



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

ANDERSON VIANA DO NASCIMENTO

**ESTUDO DA VENTILAÇÃO EM EDIFÍCIOS ATRAVÉS DA ENGENHARIA DO  
VENTO COMPUTACIONAL COM USO DO SOFTWARE OPENFOAM**

Caruaru

2019

ANDERSON VIANA DO NASCIMENTO

**ESTUDO DA VENTILAÇÃO EM EDIFÍCIOS ATRAVÉS DA ENGENHARIA DO  
VENTO COMPUTACIONAL COM USO DO SOFTWARE 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.

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

Caruaru

2019

Catálogo na fonte:  
Bibliotecária – Paula Silva - CRB/4 - 1223

N244e Nascimento, Anderson Viana do.  
Estudo da ventilação em edifícios através da engenharia do vento computacional com uso do software OpenFOAM. / Anderson Viana do Nascimento. – 2019.  
130 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. Ventilação. 2. Dinâmica dos fluídos. 3. Interface de programas de aplicativos (Software). 4. Edifícios – Engenharia ambiental. 5. Dinâmica estrutural. I. Bono, Gustavo (Orientador). II. Título.

CDD 620 (23. ed.) UFPE (CAA 2019-241)

ANDERSON VIANA DO NASCIMENTO

**ESTUDO DA VENTILAÇÃO EM EDIFÍCIOS ATRAVÉS DA ENGENHARIA DO  
VENTO COMPUTACIONAL COM USO DO SOFTWARE 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: 27/08/2019.

**BANCA EXAMINADORA**

---

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

---

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

---

Prof. Dr. Fernando Raul Licapa Contreras (Examinador Externo)  
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico esse trabalho aos meus pais, Adilson Félix do Nascimento e Roseneide Viana do Nascimento, que sempre foram o que há de mais importante em minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Gustavo Bono, pelos mais de seis anos de muito apoio, incentivo e inúmeros conselhos.

Aos meus pais, Adilson Félix do Nascimento e Roseneide Viana do Nascimento, pelo apoio, incentivo e confiança em toda minha vida.

À minha incrível avó Maria do Carmo Viana, pela ajuda, apoio e incentivo.

Ao meu falecido avô Santino Viana, por sempre acreditar em mim.

À minha namorada, Andréa Raffaella, que foi minha companhia durante a elaboração desse trabalho.

Aos meus amigos, Alison Norberto, Arianne Camila, Jhonata Fernandes, João Matheus, José Germano, Thássia Menezes e Vitor Hugo, que, apesar de muitas vezes me colocarem pra baixo, são minha família universitária.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo incentivo financeiro em parte desta pesquisa.

À Marcelo e Euclécia por estarem sempre à disposição para ajudar na secretaria do PPGECAM.

Ao Laboratório de Engenharia Computacional (LECOM) do Campus Agreste (CAA), que forneceu todo recurso computacional necessário para o desenvolvimento desse trabalho.

“How can it be that mathematics, being after all a product of human thought which is independent of experience, is so admirably appropriate to the objects of reality?” (EINSTEIN, 1922, p. 28)

## RESUMO

Em países de clima quente como o Brasil, a ventilação natural é uma estratégia de projeto que deve ser usada sempre que possível, pois trata-se do meio passivo mais eficiente para obtenção do conforto térmico. O presente trabalho tem por objetivo investigar a ventilação natural em modelos de edificações através de ferramentas numéricas baseadas na Dinâmica dos Fluidos Computacional. Para isso, empregou-se o software livre e de código aberto OpenFOAM, que faz uso do Método dos Volumes Finitos, fornecendo uma gama de *solvers* e modelos de turbulência. Os *solvers simpleFoam* e *pisoFoam* foram utilizados no presente trabalho para a simulação de escoamentos incompressíveis, tridimensionais e turbulentos. Para a verificação do programa e dos esquemas numéricos adotados simulou-se o escoamento ao redor de um cilindro quadrado com os modelos de turbulência  $k-\varepsilon$  e  $k-\omega$  SST. Posteriormente, empregou-se o modelo de turbulência  $k-\varepsilon$  padrão para simular a ventilação em um modelo tridimensional de edificação com duas aberturas. Finalmente, simulou-se de forma bidimensional os arranjos de três edificações, analisando como as inclinações do terreno e distancias de separação entre as edificações afetam a ventilação natural. Os resultados obtidos com os modelos de turbulência  $k-\varepsilon$  padrão e LES (Smagorinsky) permitiram comparar ambas modelagens e avaliar como esses dois parâmetros geométricos influenciam a ventilação natural e a topologia do escoamento.

Palavras-chave: Ventilação natural. Dinâmica dos fluidos computacional. OpenFOAM. Edifícios baixos.

## ABSTRACT

In warm countries like Brazil, the natural ventilation is a project strategy that must be used always when possible, because it is the most efficient passive mean to obtain the thermal comfort. The present work aims to investigate the natural ventilation in buildings models through numerical tools based in the Computational Fluid Dynamics. For this purpose, OpenFOAM open source software was used, which uses the finite volume method, providing a range of solvers and turbulence models. The simpleFoam and pisoFoam solvers were used in the present work for the simulation of incompressible, three-dimensional and turbulent flows. For the verification of the program and the numerical schemes adopted, the flow around a square cylinder was simulated with the turbulence models  $k-\varepsilon$  and  $k-\omega$  SST. Subsequently, the standard  $k-\varepsilon$  turbulence model was used to simulate ventilation in a three-dimensional building with two openings. Finally, the arrangements of three buildings were simulated in a two-dimensional way, analyzing how the slope of the terrain and the separation distances between the buildings affect the natural ventilation. The results obtained with the standard  $k-\varepsilon$  and LES (Smagorinsky) turbulence models allowed us to compare both models and to evaluate how these two geometric parameters influence the natural ventilation and the flow topology.

Keywords: Natural ventilation. Computational fluid dynamics. OpenFOAM. Low rise buildings.

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\nabla\phi$	Vetor gradiente de uma função $\phi$
$\nabla \cdot \phi$	Divergente de uma função $\phi$
$\otimes$	Produto tensorial
:	Produto duplo escalar (operação tensorial)
$\phi'$	Flutuação de uma variável qualquer
$\bar{\phi}$	Valor médio de uma variável qualquer
$\tilde{\phi}$	Variável qualquer filtrada
$\mathbf{a}^T$	Transposta de $\mathbf{a}$
$\  \quad \ $	Norma de um vetor
$A$	Valor de área de uma superfície
$a$	Coefficiente do campo de velocidade no sistema algébrico
$C_*$	Constantes de turbulência
$C_D$	Coefficiente de arrasto
$C_L$	Coefficiente de sustentação
$C_{ij}$	Tensões cruzadas
$C_{SGS}$	Constante de Smagorinsky
$CFL$	Número de Courant-Friedrichs-Lewy
$D$	Comprimento das edificações
$\mathbf{E}_f$	Componente do vetor de área, paralelo à linha que passa pelos dois centros dos volumes
$F$	Fluxo advectivo
$G$	Função de filtro
$\mathbf{H}$	Operador que age sobre o campo de velocidades no sistema algébrico
$H$	Altura do contorno sólido
$\mathbf{I}$	Matriz identidade
$i$	Energia interna térmica
$k$	Energia cinética turbulenta
$L$	Distância entre edificações
$L_x$	Razão entre as distâncias para face e para o volume vizinho

$L_{ij}$	Tensões de Leonard
$k_T$	Condutividade térmica
$\mathbf{n}$	Vetor normal unitário
$p$	Pressão
$P_k$	Produção de energia turbulenta
$Q$	Vazão
$R_{ij}$	Tensões de Reynolds em LES
$R_1$	Comprimento de vórtice
$R_2$	Abertura de vórtice
$\mathbf{S}$	Vetor de superfície
$S_*$	Termo fonte
$St$	Número de Strouhal
$\tilde{S}_{ij}$	Tensão do fluxo resolvido
$T$	Temperatura
$\mathbf{T}_f$	Vetor normal a $\mathbf{E}_f$
$t$	Tempo
$\mathbf{u}$	Vetor velocidade
$u$	Componente da velocidade na direção do eixo $x$
$u_{ABL}$	Velocidade de fricção
$V$	Volume
$V_c$	Volume de controle
$v$	Componente da velocidade na direção do eixo $y$
$x$	Posição no espaço
$W$	Largura total do conjunto de contornos sólidos
$w$	Componente da velocidade na direção do eixo $z$
$z$	Altura
$z_0$	Altura rugosa
$\alpha$	Inclinação do terreno
$\beta$	Constante do modelo $k-\omega$
$\Gamma$	Coeficiente de difusão
$\Delta$	Comprimento de corte
$\Delta t$	Intervalo de tempo

$\Delta x$	Comprimento do elemento de malha
$\varepsilon$	Dissipação da energia cinética turbulenta
$\kappa$	Constante de Von Karman
$\mu$	Viscosidade dinâmica
$\mu_{eff,\varepsilon}$	Viscosidade efetiva para a dissipação de energia cinética
$\mu_{eff,k}$	Viscosidade efetiva para a energia cinética turbulenta
$\mu_{SGS}$	Viscosidade dinâmica SGS (do inglês <i>sub-grid scale</i> )
$\mu_t$	Viscosidade turbulenta
$\nu$	Viscosidade cinemática
$\rho$	Densidade ou massa específica
$\sigma_*$	Constantes de turbulência
$\boldsymbol{\tau}^R$	Tensor de Reynolds
$\tau_{ij}$	Tensor de tensões
$\Phi$	Função de dissipação térmica
$\phi$	Variável dependente genérica
$\omega$	Dissipação de turbulenta específica

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>16</b>
2.1	OBJETIVO GERAL.....	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>17</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>23</b>
4.1	VENTILAÇÃO NATURAL .....	23
4.2	DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD).....	25
4.3	OPENFOAM .....	26
4.4	MODELAGEM MATEMÁTICA.....	27
4.5	FORMULAÇÃO NUMÉRICA .....	29
<b>4.5.1</b>	<b>Termo de acúmulo.....</b>	<b>32</b>
<b>4.5.2</b>	<b>Termo de transporte advectivo .....</b>	<b>32</b>
<b>4.5.3</b>	<b>Termo de transporte difusivo .....</b>	<b>35</b>
<b>4.5.4</b>	<b>Termos fonte.....</b>	<b>36</b>
<b>4.5.5</b>	<b>Discretização do tempo .....</b>	<b>36</b>
<b>4.5.6</b>	<b>Equação da pressão.....</b>	<b>37</b>
<b>4.5.7</b>	<b>Algoritmo SIMPLE .....</b>	<b>38</b>
<b>4.5.8</b>	<b>Algoritmo PISO .....</b>	<b>39</b>
4.6	MODELAGEM NUMÉRICA DA TURBULÊNCIA .....	40
<b>4.6.1</b>	<b>RANS .....</b>	<b>40</b>
<b>4.6.2</b>	<b>Hipótese de Boussinesq.....</b>	<b>42</b>
<b>4.6.3</b>	<b>Modelo <math>k-\varepsilon</math> padrão .....</b>	<b>43</b>
<b>4.6.4</b>	<b>Modelo <math>k-\omega</math> padrão.....</b>	<b>44</b>
<b>4.6.5</b>	<b>Modelo <math>k-\omega</math> SST.....</b>	<b>45</b>
<b>4.6.6</b>	<b>LES.....</b>	<b>45</b>

4.6.6.1	Filtragem espacial.....	45
4.6.6.2	Modelo SGS de Smagorinsky.....	49
4.7	PARÂMETROS DAS SIMULAÇÕES.....	50
<b>5</b>	<b>CASOS ESTUDADOS .....</b>	<b>53</b>
5.1	CILINDRO QUADRADO 2D .....	54
5.2	CASO DE KARAVA.....	57
5.3	CASO DE KARAVA EM 2D .....	60
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>64</b>
6.1	CILINDRO QUADRADO 2D .....	64
6.2	CASO DE KARAVA.....	76
6.3	CASO DE KARAVA EM 2D .....	82
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>97</b>
7.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	98
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>99</b>
	<b>APÊNDICE A – RESÍDUOS DO CASO CILINDRO QUADRADO .....</b>	<b>107</b>
	<b>APÊNDICE B – DISTRIBUIÇÕES DOS CASOS KARAVA 2D .....</b>	<b>110</b>
	<b>APÊNDICE C – VETORES VELOCIDADE NO INTERIOR DAS EDIFICAÇÕES, CASOS KARAVA 2D.....</b>	<b>125</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento humano está atrelado à capacidade de entender a natureza ao nosso redor e, aplicando conhecimentos técnicos, desenvolver ferramentas que possam trazer benefícios aos mais diversos segmentos da sociedade. Os diversos ramos da engenharia são exemplo de tudo isso. Um desses ramos, a Engenharia do Vento, trata de estudar as interações entre o vento na camada limite atmosférica e o homem junto a seus trabalhos na superfície da terra (CERMAK, 1975).

Com o avanço tecnológico das últimas décadas, os computadores tornaram-se uma importante ferramenta a ser usada na Engenharia do Vento. Surge assim a Engenharia do Vento Computacional, que permite o estudo numérico de importantes fenômenos naturais, como a ventilação natural.

Pode-se dizer que a ventilação natural constitui um importante objeto de estudo, já que, com a crescente concentração da população nas cidades, há uma grande necessidade de avaliar as condições do meio para buscar-se reforçar as características das edificações que proporcionem melhor ventilação, tanto nos espaços internos como nos externos. O objetivo principal de ventilar edificações é renovar o ar dos ambientes, tornando-os mais confortáveis e saudáveis. Edificações construídas de forma a não levar em consideração a ventilação dos ambientes internos podem causar aos ocupantes, além de desconforto térmico, problemas de saúde como alergias, asma e doenças de pele (AMORES *et al.*, 2019).

Outro ponto importante é o consumo de energia nas edificações. Uma parte significativa desse consumo está associada ao condicionamento de ar. A construção de edificações adequadas ao clima local pode resultar num consumo de energia significativamente menor. Vale lembrar que é na fase de projeto da edificação onde são tomadas as decisões mais importantes associadas ao consumo futuro de energia. A elaboração de projetos que considerem adequadamente o clima da região na qual a edificação está inserida resulta na melhoria da eficiência energética da mesma (LÔBO E BITTENCOURT, 2003).

Portanto, a ventilação natural constitui um dos principais meios para obtenção do conforto térmico, já que, além de promover a redução do consumo energético com condicionamento artificial (ventilação mecânica e ar-condicionado), promove um ambiente interno mais saudável.

A nível mundial, a maioria das estruturas construídas para fins residenciais, comerciais e outros propósitos, podem ser classificadas como edificações baixas. (UEMATSU E ISYUMOV, 1999). Logo, é de grande importância que modelos de edificações baixas sejam idealizadas de forma a prover uma eficiente ventilação natural.

Entre os meios para estudo da aerodinâmica e ventilação natural de edificações, estão os programas de simulação numérica baseados na Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD do inglês *Computational Fluid Dynamics*). A simulação de ventilação permite mostrar o desempenho da edificação mesmo antes de ser construída. Sendo assim, a simulação auxilia na tomada de decisões desde o momento em que as ideias estão sendo amadurecidas. Portanto, a utilização da CFD torna-se importante nos primeiros estágios de projeto, ou seja, na fase de concepção do edifício. Mesmo em edificações já construídas, é possível estudar e propor modificações arquitetônicas a fim de reduzir o consumo de energia através da ventilação natural.

É válido ressaltar que a rapidez na criação dos modelos computacionais e a possibilidade de realizar estudos de diversas configurações geométricas, fazem das simulações computacionais um instrumento ainda mais interessante. A fácil visualização dos resultados permite que novas alterações sejam realizadas em curto prazo de tempo. Isso torna a simulação numérica uma opção mais econômica e com tempo de execução menor se comparada com os ensaios realizados em túneis de vento (RAMPONI E BLOCKEN, 2012).

Observando as vantagens das simulações com CFD, o presente trabalho visa simular, através de um *software* de código aberto, a ventilação em modelos de edificações baixas. Para isso, são definidos alguns esquemas numéricos que podem ser utilizados e são estudados diferentes modelos de turbulência. A comparação com resultados experimentais em túnel de vento permite verificar a eficiência do OpenFOAM e dos esquemas utilizados. É, ainda, estudado o efeito que alguns parâmetros geométricos (inclinação do terreno e separação entre edificações) têm sobre a ventilação natural em edificações baixas.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo principal do presente trabalho é avaliar, através de um programa baseado na CFD, a aerodinâmica de modelos de edifícios baixos, observando como suas características geométricas podem afetar a ventilação natural e a topologia do escoamento.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Comparar diferentes modelos de turbulência;
- b) Simular o caso do cilindro quadrado, comparando os resultados com outros autores (experimentais e numéricos), a fim de verificar o OpenFOAM e os esquemas numéricos adotados;
- c) Realizar o estudo da ventilação cruzada em um modelo genérico de edificação;
- d) Simular conjuntos de edificações analisando como a separação entre as edificações adjacentes e a inclinação do terreno afetam a ventilação natural e a topologia do escoamento.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Devido à importância da ventilação natural em projetos de edificações, surgiu a necessidade de estudar-se, de maneira preditiva, sua eficiência. Dessa forma, nos anos 1950, surgiam as primeiras pesquisas experimentais sobre ventilação natural. Os primeiros estudos eram realizados em túnel de vento ou tratavam-se de experimentos de visualização de fluxo, a fim de determinar na ventilação natural o impacto da localização das aberturas nos edifícios (DICK, 1950; CAUDILL, CRITES E SMITH, 1951; HOLLEMAN, 1951; SMITH, 1951).

Com o passar dos anos, o desenvolvimento dos computadores permitiu que o escoamento dos fluidos pudesse ser simulado numericamente. Em meados dos anos 1980 os códigos CFD começaram a ser utilizados para predição do fluxo no entorno de edificações (TAMURA, 1985; MURAKAMI, MOCHIDA E HIBI, 1986). Os resultados obtidos, mesmo nessa época, já permitiam observar com detalhes os campos de fluxo e a formação dos vórtices e das linhas de separação do escoamento.

Entre os primeiros trabalhos publicados sobre o estudo da ventilação natural com uso da CFD, podem-se destacar os trabalhos de Nielsen (1988) e Murakami e Kato (1988), onde são feitas revisões sobre os métodos numéricos utilizados nas primeiras simulações numéricas sobre circulação de ar em ambientes internos como salas e quartos. Em ambos os trabalhos foi testado o modelo de turbulência  $k-\varepsilon$  padrão (LAUNDER E SPALDING, 1974) e seus resultados foram comparados a resultados experimentais. Para as limitações computacionais da época, os resultados foram bastante satisfatórios. Contudo, essas simulações tratavam de casos simples, onde eram investigados cômodos únicos.

Devido ao avanço dos recursos computacionais, pesquisas de maior complexidade foram realizadas, permitindo o tratamento de geometrias mais complexas. Um exemplo é a pesquisa realizada por Péren *et al.* (2015), no qual, também utilizando o programa ANSYS Fluent, foram estudadas diferentes configurações de beirais de telhado, observando a influência de cada beiral sobre a ventilação interna da edificação. Também foi simulado o escoamento em uma única edificação vazada, a fim de validar o método utilizado através de comparação com os resultados experimentais obtidos por Karava, Stathpoulos e Athienitis (2011). O estudo comprovou a eficiência do método e mostrou que o formato do beiral do telhado exerce grande influência sobre a ventilação do edifício.

Outro exemplo é o trabalho realizado por Yang e Jiang (2017), onde foi simulada a ventilação em uma edificação de dormitórios estudantis completa. Para isso, foi utilizado o programa comercial ANSYS Fluent adotando o modelo  $k-\varepsilon$  padrão. O estudo mostrou que há uma variação da capacidade de ventilação devido a diferenças geométricas entre diferentes pontos da edificação, e, de forma geral, avaliou o fluxo em toda a extensão do edifício. Além disso, este estudo também mostrou a importância de localizar-se aberturas em diferentes pontos da edificação.

Hooff, Blocken e Tominaga (2017), por sua vez, estudaram, utilizando o ANSYS Fluent, a ventilação cruzada em um modelo genérico de edificação isolada que conta com duas aberturas. São testados diferentes modelos de turbulência que abrangem RANS (do inglês *Reynolds Averaged Navier-Stokes*) e LES (do inglês *Large Eddy Simulation*) e todos os resultados são comparados a resultados experimentais obtidos em túnel de vento. Os resultados obtidos tiveram ótima concordância com os resultados experimentais, com destaque para os resultados obtidos com o modelo  $k-\varepsilon$  padrão, que, apesar de ser o mais simples dentre os modelos testados, apresentou um erro na estimativa da vazão interna da edificação de apenas 3,5 %, frente ao erro de 7,6 % obtido com o modelo LES de Smagorinsky (SMAGORINSKY, 1963). Apesar do erro na estimativa de vazão, o modelo de Smagorinsky mostrou-se o mais eficiente para a captura dos principais fenômenos físicos do escoamento. Dessa forma o trabalho mostrou que a escolha do modelo de turbulência ideal depende de cada problema e dos parâmetros que se quer analisar. Também se observou que o modelo LES apresenta um custo computacional muito superior aos modelos RANS (80-100% maior).

Cheng *et al.* (2018) incrementaram uma abordagem de avaliação rápida e precisa na forma de equações empíricas para estimar a taxa de ventilação e o potencial de ventilação natural nos ambientes construídos. Usando o ANSYS Fluent com modelos RANS e LES, foi feita uma série de simulações de estratégias de ventilação natural cruzada. Os resultados permitiram determinar coeficientes críticos de ventilação para as equações empíricas como funções de direção do vento, velocidade e altura do edifício. De forma geral, as equações finais obtidas podem ajudar os arquitetos e engenheiros a avaliar a viabilidade da ventilação natural durante o projeto inicial de edificações.

Kosutova *et al.* (2019) simularam a ventilação cruzada em um modelo genérico de edificação isolada equipada com venezianas (dispositivos de bloqueiam a

incidência solar e permitem a passagem do vento). Foram testadas diferentes posições para as aberturas equipadas com venezianas. As simulações foram feitas utilizando diferentes modelos de turbulência RANS com o ANSYS Fluent e foram posteriormente comparadas a resultados obtidos em túnel de vento. Os resultados apresentaram boa concordância com os resultados experimentais e mostraram as diferenças do escoamento de cada configuração de aberturas.

Outro interessante estudo foi realizado por Liu *et al.* (2019), onde foi simulada a ventilação no interior e no exterior de um edifício multifamiliar. Dentro do edifício é modelado geometricamente um apartamento de vários cômodos e fora do edifício são inseridos vários edifícios vizinhos de diferentes tamanhos. Para tudo isso, foi utilizado o programa comercial ANSYS Fluent adotando o modelo de turbulência RNG  $k-\varepsilon$  (YAKHOT *et al.*, 1992). Foi possível observar a influência de edificações vizinhas sobre a ventilação do edifício de interesse e sobre a ventilação cruzada no interior do apartamento. Além disso, o estudo mostrou que os métodos utilizados apresentaram boa concordância com resultados experimentais.

No Brasil, o uso da CFD para análise da ventilação natural em edifícios é uma prática relativamente nova. No entanto, alguns estudos já foram desenvolvidos, por exemplo, o trabalho realizado por Lôbo e Bittencourt (2003), que investigaram o potencial do uso de captadores de vento em edificações localizadas em regiões quentes e úmidas, mais especificamente em Maceió-AL. Para isso, utilizaram o programa comercial PHOENICS. Os resultados, apresentados em forma de campos de velocidade, comprovaram o potencial do uso de captadores de vento para favorecer a ventilação natural em regiões de clima quente e úmido.

Pode-se destacar também o trabalho de Trindade, Pedrini e Duarte (2010), que simularam com o programa PHOENICS a ventilação natural em edificações pré-fabricadas, tipo galpão, na cidade de Natal-RN. Foram discutidas e mostradas as limitações e potencialidades da CFD, observando as características dos códigos de simulações utilizados, as condições de simulação e a representatividade dos modelos.

Tork, Tibiriçá e Tibiriçá (2017), por sua vez, empregaram o modelo de turbulência  $k-\varepsilon$  padrão, com o programa comercial ANSYS CFX, para analisar o impacto das prescrições urbanísticas dadas por planos diretores no escoamento do vento em cenários de Belém-PA. Os autores mostraram que o adensamento urbano e a redução dos recuos entre as edificações são os principais limitantes do

escoamento do vento em espaços urbanos densos. Essas configurações urbanísticas favorecem a redução da velocidade do vento e do seu potencial de ventilação natural.

Morais e Labaki (2017) analisaram a ventilação interna por ação dos ventos em modelos de edificações multifamiliares do Programa Minha Casa, Minha Vida, através do programa ANSYS CFX com o modelo de turbulência  $k-\omega$  SST (MENTER, 1994). Foi realizada uma modelagem fiel às plantas das edificações reais, adotando todos os detalhes e ambientes. Este trabalho mostrou um avanço em relação aos trabalhos nacionais anteriores dessa natureza, pois todos os pavimentos na simulação foram considerados vazados. Foram obtidos resultados quantitativos (velocidade média do vento em cada ambiente) e qualitativos (imagens do fluxo de ar externo e interno). Com isso, foi possível avaliar qual das edificações testadas apresentou melhor desempenho com relação à ventilação.

Lukiantchuki *et al.* (2018) fizeram uma análise de *sheds*, que são aberturas na cobertura que funcionam como captadores ou extratores de ar, dependendo de sua localização em relação aos ventos dominantes. Foi avaliada a influência do número de *sheds* e da distância entre eles no desempenho da ventilação natural. Assim como no trabalho anterior, foi utilizado o ANSYS CFX com o modelo de turbulência  $k-\epsilon$  padrão. Parte dos resultados foi verificado através de comparação com resultados experimentais de túnel de vento e mostraram ótima concordância, com erros inferiores a 10%. Os resultados mostraram que a distância entre os *sheds* gera grande influência sobre a ventilação no interior das edificações, onde o aumento da distância entre esses dispositivos incrementa o fluxo de ar interno para os *sheds* captadores.

Percebe-se que na maioria das pesquisas sobre ventilação com CFD empregam-se programas comerciais. Wang *et al.* (2018) revisaram os principais trabalhos sobre ventilação em ambientes internos de edificações, dentre aquelas publicados entre 2009 e 2018, e mostraram a predominância do uso de *softwares* comerciais, principalmente do ANSYS Fluent. Apesar desse cenário, há programas de código livre capazes e eficientes para esses estudos. O programa livre de código aberto OpenFOAM, por exemplo, é utilizado em diversos trabalhos em diferentes áreas da fluidodinâmica (BALOGH *et al.*, 2012).

Os trabalhos de ventilação que fazem uso do OpenFOAM são recentes e testam modelos simples de edificações. Kasim *et al.* (2016), por exemplo, utilizaram o OpenFOAM para estudar a taxa de ventilação natural em nove diferentes configurações de abertura (janelas), a fim de determinar o local apropriado para uma

ventilação cruzada mais eficiente. A edificação foi modelada com geometria simples e foi utilizado o modelo de turbulência RNG  $k-\varepsilon$ . Os resultados desse estudo concluíram que determinada posição de abertura pode ajudar a melhorar o desempenho de ventilação induzida pelo vento, especialmente em uma área com alta densidade de edificações, como é o caso da região urbana.

Hong *et al.* (2017) fizeram uma análise do potencial do OpenFOAM para estudar a ventilação natural em edifícios agrícolas. Foram utilizados quatro diferentes modelos de turbulência  $k-\varepsilon$ , incluindo o padrão. Os resultados obtidos foram comparados qualitativamente e quantitativamente às medidas obtidas em túnel de vento e mostraram ótima concordância. Também observaram que um menor tamanho de malha computacional leva a uma precisão de simulação ligeiramente maior, mas um refinamento de malha acima de um determinado nível não melhorou a precisão da simulação. Isso ocorreu devido ao problema de convergência da solução. Os modelos  $k-\varepsilon$  mostraram-se eficientes, em especial o  $k-\varepsilon$  padrão para malhas menos refinadas.

Badas *et al.* (2017) avaliaram o efeito de telhados de duas águas sobre a topologia do escoamento na região entre edificações, chamada de cânion urbano, a fim de avaliar parâmetros que melhorem a ventilação nesses ambientes. As simulações numéricas foram realizadas com o OpenFOAM, modelando os cânions urbanos bidimensionalmente, usando arranjos de edifícios de telhado de duas águas idênticos com inclinação de telhado variando de  $0^\circ$  a  $40^\circ$ . As simulações realizadas para diferentes comprimentos de cânions mostraram a influência da inclinação do telhado sobre a turbulência e a ventilação, principalmente para os cânions mais estreitos. Os resultados são úteis para desenvolver estratégias de projeto e planejamento destinadas a melhorar a ventilação natural e promover a dispersão eficiente de poluentes e calor em áreas urbanas.

No estudo de King *et al.* (2017), foi realizada uma comparação entre os programas OpenFOAM e ANSYS Fluent. Foi utilizado o modelo de turbulência  $k-\omega$  SAS (do inglês *scale adaptive simulation*), ver Menter e Egorov (2010). Inicialmente, foi testado um modelo isolado cúbico com aberturas (cubo Silsoe), posteriormente, utilizando a mesma geometria, foram simulados diferentes conjuntos de nove cubos distribuídos em arranjos irregulares, onde adotou-se apenas um dos cubos com aberturas. Foram investigadas as pressões da fachada e as taxas de ventilação interna no modelo vazado de cada simulação, sempre analisando o efeito das estruturas vizinhas na ventilação desse modelo. O estudo mostrou que as estruturas

vizinhas causam grande interferência na ventilação de uma edificação e que essa interferência varia drasticamente de acordo com a direção do vento. Com relação aos programas, tanto o OpenFOAM quanto o ANSYS Fluent foram capazes de simular com precisão o fluxo isotérmico no entorno dos modelos testados, com resultados bastante semelhantes entre ambos.

No trabalho de Gimenez *et al.* (2018) foi estudada a ventilação natural em edificações de pequena altura, testando diferentes plantas-baixas não retangulares. Em todas as simulações emprega-se o OpenFOAM, utilizando diferentes modelos RANS de turbulência. Os resultados das simulações apresentaram ótima concordância com resultados de túnel de vento e permitiram uma análise direta das taxas de fluxo de ar e uma análise indireta da redução de carga térmica no interior das edificações. Ao final, foi possível avaliar qual configuração de planta-baixa obteve melhor desempenho diante das condições atmosféricas impostas.

Naboni *et al.* (2019) propôs uma metodologia para análise da eficiência de uso de energia renovável em edifícios. Parte dessa eficiência depende da capacidade do uso da ventilação natural no edifício. Então, para avaliar a ventilação natural e seu efeito sobre a manutenção dos microclimas, foi utilizado o OpenFOAM. Os resultados mostraram que o OpenFOAM é capaz de evidenciar a influência de aspectos geométricos do edifício sobre a sua ventilação e, conseqüentemente, sobre sua eficiência energética.

## 4 METODOLOGIA

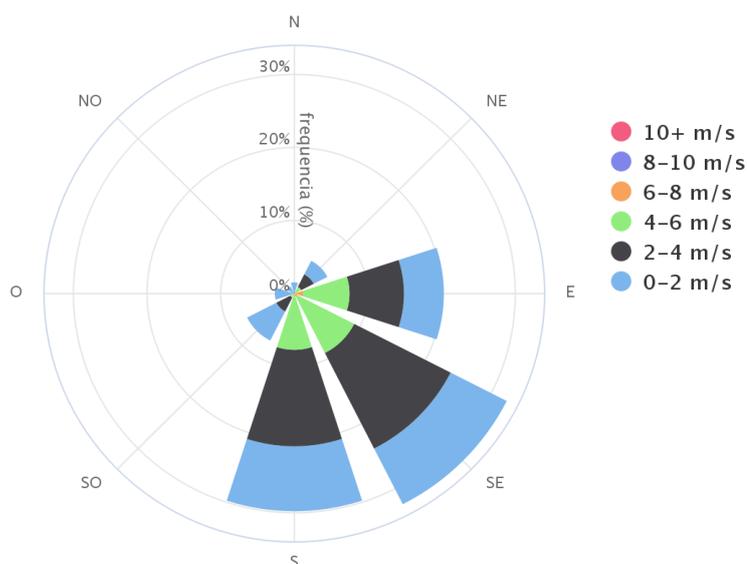
### 4.1 VENTILAÇÃO NATURAL

De acordo com a Nota Técnica EPE 030/2018 (EPE, 2018), cerca de 14% do consumo de energia das residências do país é originado pelo uso de aparelhos de ar-condicionamento, o que os torna o quarto equipamento que mais consome eletricidade nos domicílios. Em regiões de clima quente, esses aparelhos são usados intensivamente para controlar com algum rigor as condições de temperatura, humidade e velocidade do ar interior, garantindo o conforto térmico das edificações. Vale lembrar ainda que há problemas ambientais, decorrentes das emissões dos gases de refrigeração usados nas instalações de ar-condicionado, que afetam de forma significativa a camada de ozônio e contribuem para o aquecimento global (GHIAUS E ALLARD, 2004).

Para evitar o uso de ventilação artificial e ar-condicionado, ou ao menos amenizá-lo, uma importante solução é a ventilação natural. A ventilação natural baseia-se em soluções que permitem o escoamento natural do ar nos espaços interiores do edifício, através de aberturas permanentes ou controláveis. A Norma NBR 15220 (ABNT, 2005), que apresenta o Zoneamento Bioclimático Brasileiro, indica a ventilação natural como estratégia de condicionamento térmico passivo em 7 das 8 zonas nas quais o país foi subdividido. As recomendações para a ventilação natural, de acordo com as zonas, variam entre ventilação permanente (durante todo o ano ou no verão) e ventilação seletiva (nos períodos quentes, quando a temperatura exterior for menor que a interior).

A plataforma nacional Projeteee - Projetando Edificações Energeticamente Eficientes (PROJETEEE, 2019), mostra que em Caruaru a ventilação natural pode ser aplicada para obtenção do conforto térmico no interior das edificações em, aproximadamente, 52% das horas do ano, isso graças aos ventos que atuam predominantemente nas direções sul e sudeste e variam entre 0 e pouco mais que 6 m/s, como é mostrado no Gráfico 1.

Gráfico 1 - Gráfico Rosa dos Ventos para a cidade de Caruaru-PE.

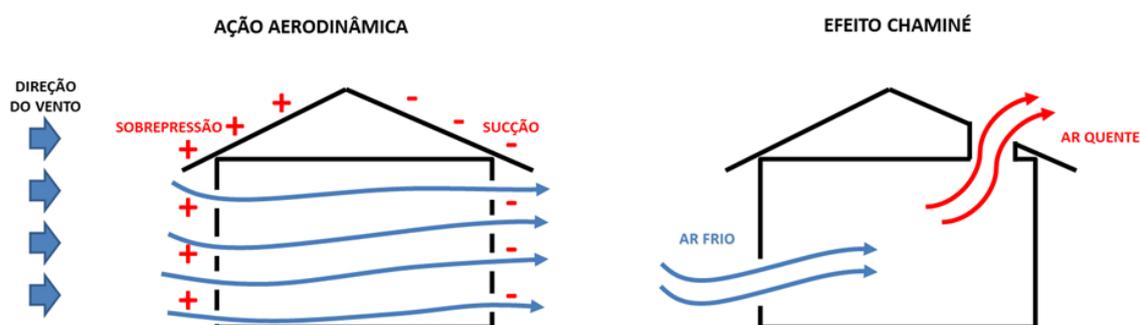


Fonte: Projeteee (2019).

Vale lembrar que a ventilação natural também possui importância por razões de salubridade dos ambientes e de seus ocupantes, pois permite uma renovação contínua do ar interno de um recinto. Em outras palavras, a ventilação natural garante aos usuários um ar confortável e saudável, além de poder ser utilizada para diluir os poluentes (NEZAMDOOST, COOPER E WOODS, 2018).

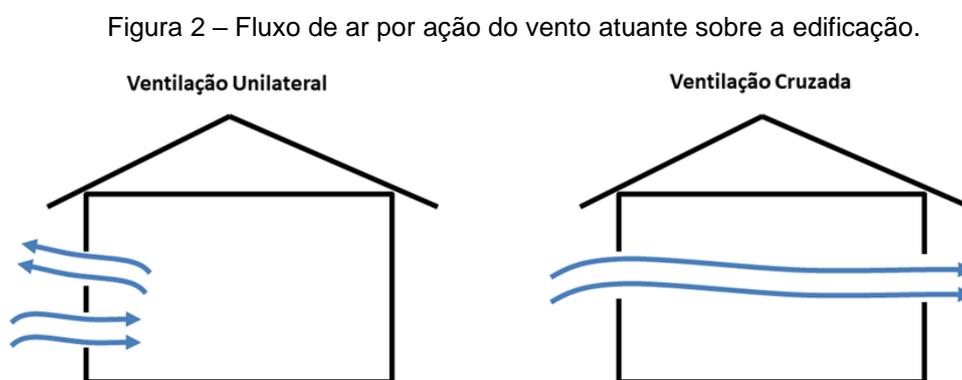
O movimento do ar na ventilação natural deve sua existência a uma força motriz, resultante de uma diferença de pressão entre o interior e o exterior do espaço ventilado. De acordo com Souza e Rodrigues (2012), a força em questão pode ser ocasionada por ação aerodinâmica do vento nas superfícies da edificação ou por diferença de temperatura (efeito chaminé). Na Figura 1 é esquematizado como se dá o deslocamento do ar para os dois casos de força motriz.

Figura 1 – Movimento do ar na ventilação natural.



Fonte: Autor (2019).

Tratando-se da ação aerodinâmica, o mecanismo de ventilação natural pode ser dividido em dois tipos distintos, a ventilação cruzada, quando a circulação do ar se dá através de aberturas situadas em lados opostos de um ambiente, e a ventilação unilateral, quando a circulação do ar se dá através de aberturas situadas no mesmo lado de um ambiente. Vale lembrar que, dependendo da quantidade de aberturas e suas disposições, num mesmo ambiente pode haver os dois tipos de ventilação. Na Figura 2, são mostrados os dois tipos de ventilação ocasionados por ação aerodinâmica.



Fonte: Autor (2019).

#### 4.2 DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)

Há diferentes ferramentas de predição para estimar-se a ventilação natural de uma edificação. Dentre as principais, destacam-se cinco ferramentas, são elas: os modelos algébricos, os modelos empíricos, as medições *in loco*, experimentos em escala reduzida e as simulações em CFD. Os modelos algébricos possuem grande embasamento teórico do fenômeno físico, porém tendem a apresentar um grau de incerteza elevado, principalmente em casos mais complexos. Os modelos empíricos são adaptações dos modelos algébricos, onde se realizam experimentos, medições ou simulações a fim de melhorar a precisão dos modelos, porém o método torna-se bastante limitado. As medições *in loco* têm como vantagem serem bastante precisas, já que trabalham em situação real, entretanto apresentam pouca praticidade, custos elevados e não permitem a manipulação das condições de escoamento. Já os experimentos em escala reduzida são práticos e permitem a manipulação das condições de contorno, contudo possuem o mesmo problema de custo elevado. Finalmente, a CFD possibilita a realização de simulações numéricas, tendo total

controle sobre as condições de escoamento e possibilidade de tratar problemas mais complexos, tudo isso com custo relativamente menor (ANDERSON, 1995; ARAÚJO E CUNHA, 2010; RAMPONI E BLOCKEN, 2012; BLOCKEN, 2015).

Com o constante desenvolvimento da CFD cresce a gama de configurações geométricas e climáticas que podem ser estudadas em simulações de ventilação natural. Não somente em estudos de ventilação natural, como também em diversos campos da engenharia, a CFD é amplamente conhecida e aplicada. A disposição de computadores cada vez mais poderosos proporciona grande praticidade e exatidão nas simulações numéricas. Logo, a CFD mostra-se uma alternativa eficiente para o estudo aerodinâmico de edificações.

A resolução de problemas com ferramentas da CFD pode ser feita empregando pacotes comerciais (ANSYS-CFX, ANSYS-Fluent, STAR-CCM+, PHOENICS, entre outros), pacotes com código aberto (OpenFOAM, SU2, FEniCS, entre outros) ou códigos próprios ("*in house*"). Os pacotes comerciais têm a desvantagem de não fornecerem um completo entendimento da modelagem e implementação numérica devido à falta de acesso a seus códigos. Além do mais, o pagamento das licenças limita seu uso em escritórios de engenharia e arquitetura de pequeno e médio porte. Os pacotes com código aberto são uma ótima alternativa, já que possuem boa eficiência, estão disponíveis gratuitamente, tem-se acesso a seus códigos e a comunidade de usuários está constantemente desenvolvendo os códigos, auxiliando e disponibilizando materiais de apoio, o que é de grande ajuda, já que esses pacotes requerem maior esforço do usuário para domínio de seu uso. Os códigos próprios permitem uma maior flexibilidade com relação às necessidades do usuário, facilitam a implementação de novas formulações e técnicas, contudo, possuem maior limitação em comparação com os demais códigos.

### 4.3 OPENFOAM

O pacote OpenFOAM (*do inglês Open Source Field Operation and Manipulation*) é uma ferramenta CFD, escrita em linguagem C++, de acesso sem restrições. Pelo fato de ser de livre acesso e por permitir personalização, essa ferramenta tem despertado um crescente interesse em diversas áreas acadêmicas (RAHBARIMANESH, BRINKERHOFF E JIM, 2018; WEBER *et al.*, 2018) industriais (PASLER *et al.*, 2018; ZHOU, LU E CHEN, 2018) e de investigação (LIMANE, FELLOUAH E GALANIS, 2017; DAO, CHEW E ZHANG, 2018).

O OpenFOAM trata-se de uma ferramenta que conta com uma vasta biblioteca de *solvers* e utilitários que o usuário pode personalizar. Entre outros encontram-se os *solvers pisoFoam* – destinado a escoamentos incompressíveis, turbulentos e em regime transiente – e *simpleFoam* – para escoamentos incompressíveis, turbulentos e em regime permanente (OpenFOAM Foundation, 2019).

Cada simulação feita com o OpenFOAM é organizada num diretório principal que contém outros subdiretórios. O subdiretório que contém as condições iniciais e de contorno é designado por “0” e, no seu interior, devem alocar-se, entre outros, os ficheiros referentes à velocidade inicial do escoamento e à pressão. O subdiretório que contém os parâmetros geométricos do domínio computacional e propriedades constantes do fluido é designado por “*constant*”. Por sua vez, os parâmetros de controle da simulação, a discretização numérica, os critérios de convergência, entre outros, são especificados no subdiretório “*system*”. Ao longo da simulação é criado um diretório para cada nova iteração, que é nomeado de acordo com o tempo simulado.

#### 4.4 MODELAGEM MATEMÁTICA

Para que se possa resolver numericamente problemas de ventilação natural, é preciso, antes de tudo, modelar matematicamente o escoamento do vento. De forma geral, o escoamento dos fluidos é modelado por um conjunto de equações baseadas nas leis de conservação de certas propriedades físicas do escoamento. São elas: as leis de conservação da massa, do momento e da energia. A solução dessas equações representa a distribuição das propriedades do escoamento no domínio espacial e temporal. Versteeg e Malalasekera (2007) demonstram a modelagem dessas equações para o escoamento tridimensional, transiente e compressível de um fluido newtoniano com transferência de calor. As equações podem ser escritas como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nabla \cdot (\mu \nabla u) + S_{Mx} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \nabla \cdot (\mu \nabla v) + S_{My} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \nabla \cdot (\mu \nabla w) + S_{Mz} \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho i \mathbf{u}) = -p \nabla \cdot \mathbf{u} + \nabla \cdot (k_T \nabla T) + \Phi + S_i \quad (5)$$

$$p = p(\rho, T) \quad (6)$$

$$i = i(\rho, T) \quad (7)$$

Onde:

$\mathbf{u}$  = vetor velocidade;

$u, v, w$  = componentes de  $\mathbf{u}$  em  $x, y$  e  $z$ , respectivamente;

$t$  = tempo;

$p$  = pressão;

$\rho$  = densidade;

$\mu$  = viscosidade dinâmica;

$S_*$  = termos fonte;

$T$  = temperatura;

$k_T$  = condutividade térmica;

$i$  = energia interna térmica;

$\Phi$  = função de dissipação.

A equação (1) baseia-se no princípio de continuidade que postula que a taxa de variação da massa por unidade de volume é igual ao fluxo líquido da massa através das fronteiras do volume de controle. As equações (2), (3) e (4), conhecidas como equações de Navier-Stokes, refletem o balanço das forças (de pressão, de corpo e viscosas) que atuam no volume de controle, baseando-se na Segunda Lei de Newton. A equação (5) contabiliza os mecanismos capazes de variar a energia térmica dos corpos fluidos (transferência de calor, dissipação viscosa, existência de fontes ou sorvedouros).

Para o presente trabalho, considera-se um escoamento isotérmico e incompressível, dessa forma, pode-se simplificar as equações governantes, conforme:

$$\nabla \cdot (\mathbf{u}) = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot (u \mathbf{u}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nabla \cdot (\nu \nabla u) + S_{Mx} \quad (9)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \nabla \cdot (v \mathbf{u}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nabla \cdot (\nu \nabla v) + S_{My} \quad (10)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \nabla \cdot (w \mathbf{u}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nabla \cdot (\nu \nabla w) + S_{Mz} \quad (11)$$

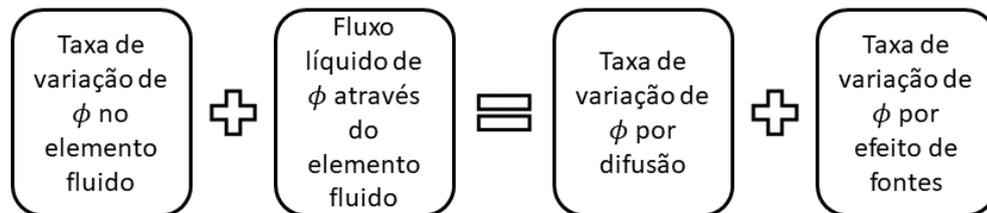
onde  $\nu$  é a viscosidade cinemática do fluido.

Versteeg e Malalasekera (2007) comentam ainda que as equações de conservação são formalmente idênticas. Logo, para uma variável genérica  $\phi$ , pode-se reescrever todas as equações governantes do escoamento estudado conforme a equação (12).

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) + S_\phi \quad (12)$$

Na Figura 3, faz-se a tradução, em palavras, da equação (12).

Figura 3 – Esquema de dimensões do domínio computacional.



Fonte: Adaptado de Versteeg e Malalasekera (2007).

Do lado esquerdo da equação (12) tem-se a taxa de variação temporal, ou termo de acúmulo, somado ao termo advectivo, e, do lado direito, tem-se o termo difusivo ( $\Gamma$  = coeficiente de difusão) somado às fontes.

#### 4.5 FORMULAÇÃO NUMÉRICA

O método dos volumes finitos (FVM do inglês *Finite Volume Method*) trata-se de uma forma de discretizar as equações diferenciais que governam os problemas físicos. Este procedimento permite resolver numericamente o sistema de equações de Navier-Stokes (MALISKA, 2004).

Existem dois tipos de discretização, um para o domínio físico e outro para as equações. Na discretização do domínio, é feita uma divisão em vários subdomínios, cada um deles representando um volume de controle. Uma vez que se discretiza o domínio e as equações, é construído um sistema de equações algébricas lineares para cada equação que governa o escoamento. O número de equações desse sistema corresponde ao número de volumes em que se divide o domínio. Computacionalmente, resolve-se esse sistema linear através de um método iterativo,

que funciona até atingir uma determinada tolerância ou um limite de iterações (MOUKALLED *et al.*, 2016).

No OpenFOAM, cada variável é computada no centro do volume de controle e o sistema de equações de Navier-Stokes é tratado de forma segregada, isto é, as equações são resolvidas uma de cada vez.

Maliska (2004) e Versteeg e Malalasekera (2007) mostram o processo de aplicação do método dos volumes finitos para a discretização das equações. Primeiro, integra-se cada termo da equação de conservação no volume de controle e, posteriormente, integra-se ambos os lados da equação no intervalo temporal, conforme a equação (13).

$$\int_t^{t+\Delta t} \left[ \frac{\partial}{\partial t} \int_{V_c} \phi dV + \int_S \phi \mathbf{u} \cdot d\mathbf{S} \right] dt = \int_t^{t+\Delta t} \left[ \int_S \Gamma \nabla \phi \cdot d\mathbf{S} + \int_{V_c} S_\phi dV \right] dt \quad (13)$$

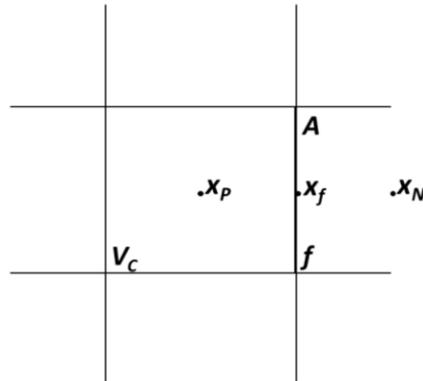
O segundo termo do lado esquerdo (transporte advectivo) e o primeiro termo do lado direito (transporte difusivo) são escritos em termos de integral de superfície através da aplicação do Teorema de Gauss.

Na equação (13), mostra-se que, dado um volume de controle e seus contornos, a quantidade  $\phi$  apenas sofre variação temporal. O volume de controle, através de seu contorno, se comunica com o restante do domínio espacial e é sobre seu contorno que o fluxo é computado.

Em suma, o método dos volumes finitos trata de resolver a forma integral das equações de transporte. A discretização da equação (13) é uma questão de reconstruir as integrais de maneira numérica.

A integração é aproximada com base na suposição de que o campo  $\phi$  é linearmente distribuído dentro do volume de controle e em suas superfícies. Essa suposição é uma aproximação de primeira ordem: isso pode ser mostrado a partir da expansão de Taylor de  $\phi$ . De forma simplificada, mostra-se, na Figura 4, um esquema simplificado de um volume de controle bidimensional, onde pode-se ver a presença de dois centros geométricos: o centro do volume de interesse e o centro de uma face  $f$  com área  $A$ . Utiliza-se esse esquema de dois volumes vizinhos ( $P$  e  $N$ ) em todo o restante desse capítulo.

Figura 4 – Centros do volume de controle.



Fonte: Autor (2019).

Define-se o centro do volume de controle  $x_p$  de acordo com:

$$\int_{V_c} (x - x_p) dV = 0 \quad (14)$$

Define-se o centro da face  $x_f$  de acordo com a equação:

$$\int_{A_f} (x - x_f) dA = 0 \quad (15)$$

A expansão em série de Taylor resulta nas equações (16) e (17), onde resume-se os termos de ordem superior (*T.O.S.*).

$$\phi(x) = \phi_p + (x - x_p)(\nabla\phi)_p + T.O.S. \quad (16)$$

$$\phi(x) = \phi_f + (x - x_f)(\nabla\phi)_f + T.O.S. \quad (17)$$

Dessa forma, a integral do volume fica no formato definido por:

$$\begin{aligned} \int_{V_c} \phi(x) dV &\approx \int_{V_P} [\phi_p + (x - x_p)(\nabla\phi)_p] dV \\ &\approx \phi_p \int_{V_P} dV + \left[ \int_{V_P} (x - x_p) dV \right] (\nabla\phi)_p \\ &\approx \phi_p V_P \end{aligned} \quad (18)$$

#### 4.5.1 Termo de acúmulo

Aplica-se a mesma simplificação de distribuição linear no termo de acúmulo, conforme:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{V_c} \phi dV \approx \left( \frac{\partial \phi}{\partial t} \right)_P V_P \quad (19)$$

A derivada pode ser aproximada através de esquemas de Diferenças Finitas. O método mais simples é o método Euler Forward (primeira ordem), conhecido no OpenFOAM como *Euler scheme* (OpenFOAM Foundation, 2019). Nesse método, utiliza-se o valor de  $\phi$  no tempo presente e no tempo futuro, conforme:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} \approx \frac{\phi^{t+\Delta t} - \phi^t}{\Delta t} \quad (20)$$

O método Euler Backward (primeira ordem), conhecido no OpenFOAM como *Backward scheme*, é bastante semelhante ao método anterior, contudo, em vez do tempo futuro, utiliza-se o valor de  $\phi$  no tempo passado, conforme:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} \approx \frac{\phi^t - \phi^{t-\Delta t}}{\Delta t} \quad (21)$$

O método de Crank-Nicolson (segunda ordem), conhecido no OpenFOAM como *CrankNicolson scheme*, faz uso tanto do tempo futuro quanto do tempo passado, isso o torna mais acurado que os métodos anteriores:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} \approx \frac{\phi^{t+\Delta t} - \phi^{t-\Delta t}}{2\Delta t} \quad (22)$$

#### 4.5.2 Termo de transporte advectivo

Conforme visto na equação (13), pode-se adaptar a integral do termo advectivo em uma integral de superfície através do Teorema de Gauss. Com isso, a integral no

volume se torna o somatório das integrais das faces do volume de controle e, dessa forma, pode-se desenvolver:

$$\begin{aligned}
 \int_{V_c} \nabla \cdot (\phi \mathbf{u}) dV &= \sum \int_{A_f} (\phi \mathbf{u}) \cdot \mathbf{n} dA \\
 &\approx \sum \phi_f (\mathbf{u} \cdot \mathbf{n})_f A_f \\
 &\approx \sum F \phi_f
 \end{aligned} \tag{23}$$

onde  $F$  é o fluxo advectivo, que é um escalar definido no centro de face. O termo  $\phi_f$  indica o valor da quantidade  $\phi$  no centro da face. Esse valor não é fornecido diretamente, portanto, deve ser interpolado dos valores dos centros dos volumes adjacentes. No OpenFOAM, há um conjunto de métodos que podem ser utilizados para esse procedimento. O principal esquema de interpolação é baseado em Diferenças Finitas Centradas, conhecido no OpenFOAM como *linear scheme* (OpenFOAM Foundation, 2019). Esse método interpola linearmente o valor de  $\phi$  no centro da face usando o valor do centro do próprio volume de controle  $\phi_P$  e de seu vizinho  $\phi_N$ , conforme:

$$\phi_f = \phi_P L_x + (1 - L_x) \phi_N \tag{24}$$

sendo,

$$L_x = \frac{\|\overline{\mathbf{x}_P \mathbf{x}_f}\|}{\|\overline{\mathbf{x}_P \mathbf{x}_N}\|} \tag{25}$$

onde  $\mathbf{x}_P$  é o centroide do volume considerado,  $\mathbf{x}_N$  é o centroide do volume vizinho genérico e  $\mathbf{x}_f$  é o centro da face que os dois volumes compartilham.

Moukalled *et al.* (2016) comentam que, para o termo advectivo, apesar de ter boa acurácia, o esquema de Diferenças Centradas pode gerar acentuada instabilidade numérica, o que pode causar a divergência da simulação. Logo, deve-se utilizar esquemas mais estáveis para o termo de transporte advectivo.

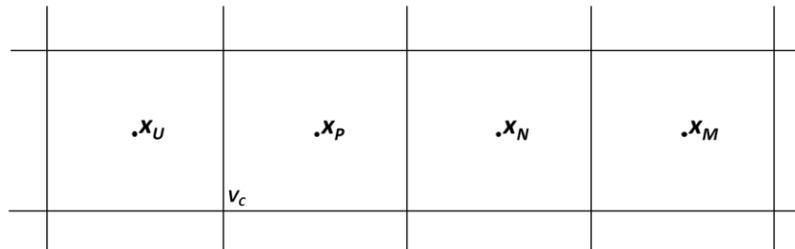
O esquema de Diferenças Upwind é um esquema de interpolação de primeira ordem que assume que o valor no centro de face seja igual ao do centro de um dos

volumes a qual pertence. Para decidir qual dos dois volumes é usado para compartilhar o valor de  $\phi$ , analisa-se o sinal do fluxo  $F$ , conforme mostrado a seguir:

$$\phi_f = \begin{cases} \phi_P & \text{se } F_f \geq 0 \\ \phi_N & \text{se } F_f < 0 \end{cases} \quad (26)$$

O esquema de Diferenças Upwind é numericamente mais estável, contudo, devido à baixa ordem, não é bem acurado e, assim, não é recomendável (OpenFOAM Foundation, 2019). Uma solução é o esquema Upwind de Segunda Ordem, conhecido no OpenFOAM como *linearUpwind scheme*. Esse esquema é acurado e possui estabilidade numérica superior ao esquema de Diferenças Centradas. Seja  $\phi_U$  o valor de  $\phi$  dado no volume de controle antecessor ao volume de  $\phi_P$ , e seja  $\phi_M$  o valor de  $\phi$  no volume de controle sucessor ao volume de  $\phi_N$  (ver Figura 5), o esquema Upwind de Segunda Ordem é dado pela equação (27):

Figura 5 – Esquema de volumes de controle vizinhos.



Fonte: Autor (2019).

$$\phi_f = \begin{cases} \phi_U L_x + (1 - L_x) \phi_P & \text{se } F_f \geq 0 \\ \phi_M L_x + (1 - L_x) \phi_N & \text{se } F_f < 0 \end{cases} \quad (27)$$

onde:

$$L_x = \begin{cases} \frac{\|\overrightarrow{X_P X_f}\|}{\|\overrightarrow{X_P X_U}\|} & \text{se } F_f \geq 0 \\ \frac{\|\overrightarrow{X_f X_N}\|}{\|\overrightarrow{X_N X_M}\|} & \text{se } F_f < 0 \end{cases} \quad (28)$$

### 4.5.3 Termo de transporte difusivo

Novamente, assume-se que o valor de  $\phi$  é linearmente distribuído na face  $e$ , com isso, tem-se a formulação dada por:

$$\begin{aligned}
 \int_{V_c} \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) dV &= \sum \int_{A_f} (\Gamma \nabla \phi) \cdot \mathbf{n} dA \\
 &\approx \sum (\Gamma \nabla \phi \cdot \mathbf{n})_f A_f \\
 &\approx \sum (\nabla \phi \cdot \mathbf{n})_f \Gamma_f A_f \\
 &\approx \sum \left( \frac{\partial \phi}{\partial n} \right)_f \Gamma_f A_f
 \end{aligned} \tag{29}$$

Computa-se a derivada de  $\phi$  na direção do vetor normal à face  $\mathbf{n}$  como sendo a parcial de  $\phi$  em relação à direção de  $\mathbf{n}$ . No caso de malhas perfeitamente ortogonais, pode-se aproximar essa derivada parcial através da equação:

$$\left( \frac{\partial \phi}{\partial n} \right)_f \approx \frac{\phi_N - \phi_P}{\|\overline{x_P x_N}\|} \tag{30}$$

Para malhas não ortogonais, pode-se utilizar a equação (26) introduzindo um fator de correção para a não ortogonalidade. Isso é feito decompondo o vetor de face em duas componentes:  $\mathbf{E}_f$  é paralelo à linha que passa pelos dois centros dos volumes, e  $\mathbf{T}_f$  é o vetor normal. Desta forma, uma nova formulação pode ser escrita de acordo com a equação dada a seguir:

$$\begin{aligned}
 (\nabla \phi)_f \cdot \mathbf{A}_f &= (\nabla \phi)_f \cdot \mathbf{E}_f + (\nabla \phi)_f \cdot \mathbf{T}_f \\
 &= E_f \left( \frac{\partial \phi}{\partial e} \right)_f + (\nabla \phi)_f \cdot \mathbf{T}_f \\
 &\approx E_f \frac{\phi_N - \phi_P}{\|\overline{x_P x_N}\|} + (\nabla \phi)_f \cdot \mathbf{T}_f
 \end{aligned} \tag{31}$$

O primeiro termo do lado direito da equação (31) representa uma contribuição semelhante à contribuição em malhas ortogonais, ou seja, envolvendo  $\phi_N$  e  $\phi_P$ , enquanto o segundo termo do lado direito é chamado de difusão cruzada, e é devido à não-ortogonalidade da malha, ver Moukalled *et al.* (2016).

#### 4.5.4 Termos fonte

Todos os termos que não representam transporte advectivo ou difusivo, ou ainda derivadas temporais, são considerados termos fonte. O termo fonte  $S_\phi$  é uma função genérica de  $\phi$ , conforme foi feito para os termos anteriores, considera-se que sua distribuição no volume de controle é linear. Com isso, discretiza-se o termo fonte conforme o Teorema do Valor Médio:

$$\int_{V_c} S_\phi dV \approx (S_\phi)_P V_P \quad (32)$$

#### 4.5.5 Discretização do tempo

Usando a discretização espacial vista nos tópicos anteriores, pode-se reescrever a equação (13) conforme:

$$\int_t^{t+\Delta t} \left[ \left( \frac{\partial \phi}{\partial t} \right)_P V_P + \sum F \phi_f \right] dt = \int_t^{t+\Delta t} \left[ \sum \left( \frac{\partial \phi}{\partial n} \right)_f \Gamma_f A_f + (S_\phi)_P V_P \right] dt \quad (33)$$

Pode-se discretizar o tempo de maneira explícita ou implícita. No esquema de discretização temporal explícita, a única incógnita que surge na equação (29) é o valor de  $\phi$  no novo passo de tempo ( $k + 1$ ), devido à discretização do termo de acúmulo, os demais valores de  $\phi$  são tratados no passo de tempo antigo ( $k$ ):

$$\phi^{k+1} = \phi^k - \frac{1}{V_P} \left[ \left( \sum F \phi_f \right)^k - \left( \sum \left( \frac{\partial \phi}{\partial n} \right)_f \Gamma_f A_f + (S_\phi)_P V_P \right)^k \right] \quad (34)$$

Já no esquema de discretização temporal implícita, valores de  $\phi$  que surgem nos termos de acúmulo e de transporte advectivo e difusivo são tratados no novo

passo de tempo  $(k + 1)$ , o que torna necessária a solução implícita do sistema (MOUKALLED *et al.*, 2016).

$$\phi^{k+1} = \phi^k - \frac{1}{V_P} \left[ \left( \sum F \phi_f \right)^{k+1} - \left( \sum \left( \frac{\partial \phi}{\partial n} \right)_f \Gamma_f A_f + (S_\phi)_P V_P \right)^{k+1} \right] \quad (35)$$

#### 4.5.6 Equação da pressão

No sistema de equações (8) à (11), não há como determinar a variação temporal da pressão. Para resolver esse problema, o OpenFOAM faz uso de sistemas de acoplamento pressão-velocidade. Para isso, utiliza-se uma equação de Poisson para a pressão, que permite realizar uma ligação da equação (8) com as equações de Navier-Stokes.

Após a discretização das equações (9) à (11), através dos esquemas já mostrados, pode-se reescrevê-las como uma equação algébrica, conforme (ver Moukalled *et al.*, 2016):

$$a_P \mathbf{u}_P = \mathbf{H}(\mathbf{u}) - (\nabla p)_P V_P \quad (36)$$

onde:

$$\mathbf{H}(\mathbf{u}) = - \sum_N (a_N \mathbf{u}_N) + b_P \quad (37)$$

e  $N$  a representa cada volume vizinho.

Deve-se observar ainda que os coeficientes  $a_N$  dependem dos fluxos nos centros das faces compartilhadas e que podemos explicitar  $\mathbf{u}_P$  conforme mostrado por:

$$\mathbf{u}_P = \frac{\mathbf{H}(\mathbf{u})}{a_P} - \frac{(\nabla p)_P V_P}{a_P} \quad (38)$$

Assim, a equação de Poisson pode ser construída aplicando a equação (8) diretamente sobre a equação (38), gerando:

$$\nabla \cdot \left( \frac{\mathbf{H}(\mathbf{u})}{a_p} \right) - \nabla \cdot \left( \frac{(\nabla p)_P V_P}{a_p} \right) = 0 \quad (39)$$

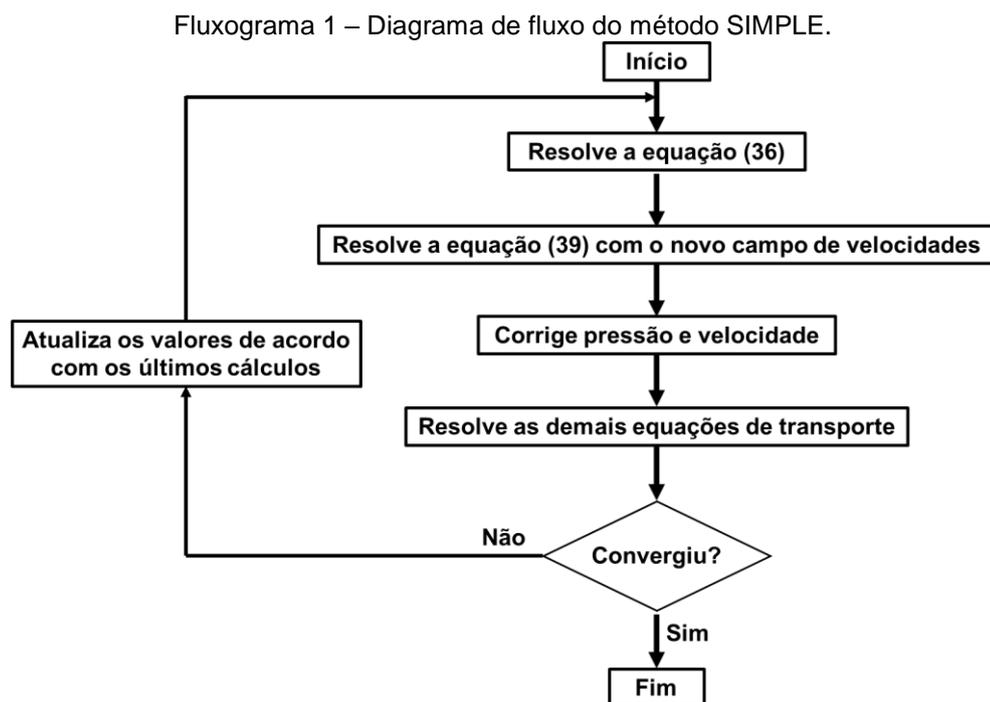
$$\therefore \nabla \cdot \left( \frac{(\nabla p)_P V_P}{a_p} \right) = \sum \left( \frac{\mathbf{H}(\mathbf{u})}{a_p} \right)_f \cdot \mathbf{A}_f$$

#### 4.5.7 Algoritmo SIMPLE

O método semi-implícito para equações acopladas, ou SIMPLE (do inglês *Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations*) é um algoritmo usado para solução de escoamento de fluidos em estado estacionário (termo de acúmulo nulo). Esse método resolve em iterações subsequentes as equações de pressão e momento. Para isso, são realizados os seguintes passos:

1. A equação (36) é resolvida usando o campo de pressão da iteração anterior. Estes resultados são então sub-relaxados para melhorar a convergência;
2. A equação (39) é resolvida baseada no novo campo de velocidades e, conforme feito anteriormente, os valores resultantes são sub-relaxados;
3. Os novos fluxos nas faces são computados e os coeficientes  $\mathbf{H}(\mathbf{u})$  são atualizados;
4. Tudo é repetido até alcançar-se uma tolerância pré-definida.

O Fluxograma 1 mostra o diagrama de fluxo do método SIMPLE.

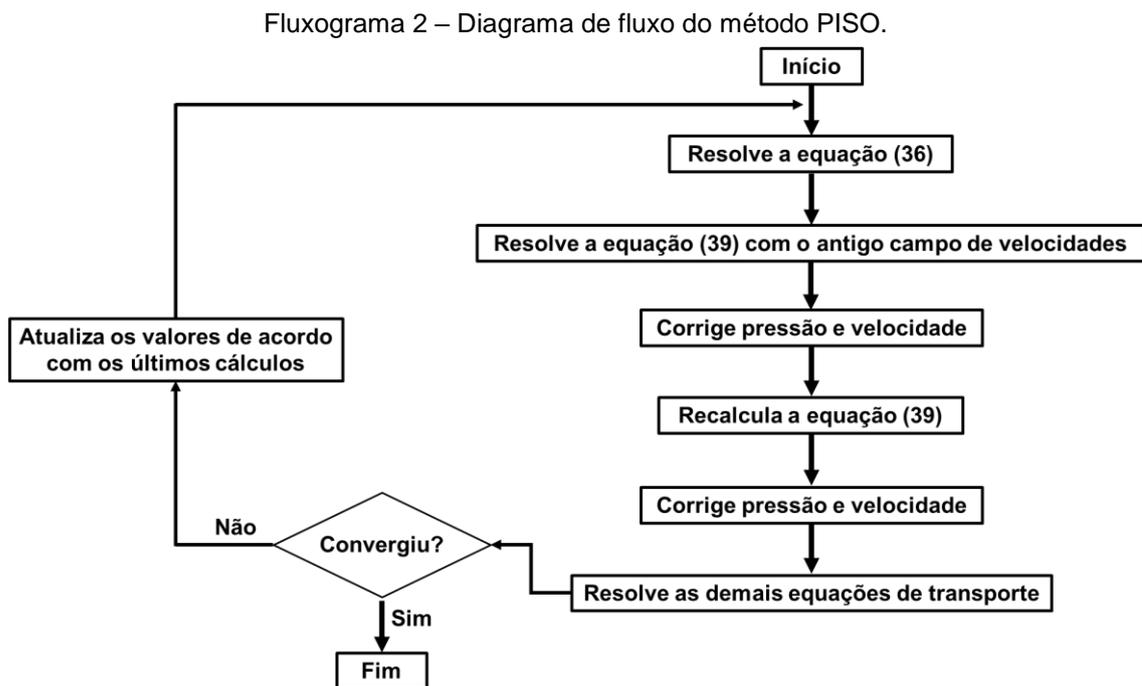


#### 4.5.8 Algoritmo PISO

O método implícito de pressão com divisão de operadores, ou PISO (do inglês *Pressure-Implicit with Splitting of Operators*), é um algoritmo usado para solução de escoamento de fluidos em regime transiente. Seus passos são:

1. A equação (36) é resolvida usando o campo de pressão da iteração anterior. Essa passagem é chamada de previsão de momento;
2. A equação (39) é resolvida, usando o mesmo  $\mathbf{H}(\mathbf{u})$  que foi utilizado no passo anterior;
3. O campo de velocidade é recalculado de maneira explícita, de modo que o campo de pressão é atualizado com os resultados do passo anterior, mas o operador  $\mathbf{H}(\mathbf{u})$  depende, ainda, do campo de velocidade do passo 1;
4. Tudo é repetido até alcançar-se uma tolerância pré-definida.

O Fluxograma 2 mostra o diagrama de fluxo do método PISO.



Fonte: Autor (2019).

Esse procedimento corrige o campo de velocidade dependendo apenas do novo campo de pressão, desprezando o termo de correção introduzido pela atualização do operador  $\mathbf{H}(\mathbf{u})$ . Isto gera maior estabilidade numérica na simulação (MOUKALLED *et al.*, 2016).

## 4.6 MODELAGEM NUMÉRICA DA TURBULÊNCIA

Escoamentos como o do vento na superfície terrestre são altamente turbulentos, principalmente quando são afetados pela presença de corpos rombudos. De maneira geral, escoamentos turbulentos são caracterizados por oscilações na pressão, velocidade e temperatura. Essas flutuações resultam de instabilidades no escoamento e são responsáveis por causar a formação de vórtices. A dimensão característica dos vórtices é chamada de escala de turbulência. Cada escala de turbulência corresponde a uma frequência de oscilação das propriedades flutuantes, quanto menor a escala, maior a frequência de oscilação.

Pode-se simular numericamente a turbulência através da resolução direta das equações de Navier-Stokes, utilizando-as para representar todos os movimentos devidos à turbulência. Esse modelo é chamado de DNS (do inglês *Direct Numerical Simulation*). Tal procedimento implica a existência de uma discretização temporal e espacial capaz de cobrir toda gama de escalas de turbulência do escoamento, para isso é necessário demandar grande quantidade de memória e alta capacidade de processamento, o que, na maioria das vezes, torna esse modelo inviável (MOIN E MAHESH, 1998; JIANG E LAI, 2017)

Para simular a turbulência com custos computacionais mais acessíveis, é possível aproximar, na totalidade ou parcialmente, as escalas de turbulência por modelos matemáticos. É o caso dos modelos RANS (do inglês *Reynolds Averaged Navier-Stokes*) e LES (do inglês *Large Eddy Simulation*). O modelo LES resolve diretamente as maiores escalas de turbulência e modela as pequenas escalas de turbulência (PIOMELLI, 1999; SAGAUT, 2006). Por sua vez, o modelo RANS aproxima toda a gama de escalas de turbulência, o que diminui a exatidão da simulação, contudo a torna menos dispendiosa computacionalmente (WILCOX, 2006; ALFONSI, 2009).

### 4.6.1 RANS

Nos modelos RANS, cada valor  $\phi$  do escoamento é considerado como uma soma entre um valor médio  $\bar{\phi}$  e uma flutuação  $\phi'$ , conforme:

$$\phi(x, t) = \bar{\phi}(x) + \phi'(x, t) \quad (40)$$

Onde  $\bar{\phi}(x)$  é resultante de uma média temporal, conforme:

$$\bar{\phi}(x) = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \phi(x, t) dt \quad (41)$$

Quando o intervalo de tempo é suficientemente grande, considerando-se as variações de campo como aleatórias, tem-se o comportamento de média descrito por (MOUKALLED *et al.*, 2016):

$$\overline{\phi'} = \overline{\phi\phi'} = 0 \quad (42)$$

Contudo, a média do produto dos termos flutuantes de duas variáveis diferentes permanece diferente de zero, ou seja:

$$\overline{\phi'\psi'} \neq 0 \quad (43)$$

As propriedades acima têm aplicação direta na equação de continuidade. Como apenas termos lineares estão envolvidos, a equação resultante é formalmente igual à original, apenas com substituição dos campos médios no lugar dos instantâneos. Entretanto, a equação do momento sofre mudanças quando se aplicam as propriedades vistas acima nas equações (9) à (11), conforme pode ser visto em Moukalled *et al.* (2016). Vale lembrar que, conforme é feito no OpenFOAM, a densidade do fluido ( $\rho$ ) é considerada unitária.

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) = -(\nabla \bar{p}) + \nabla \cdot (\mu \nabla \otimes \bar{\mathbf{u}}) - \nabla \cdot [(\bar{\mathbf{u}}' \otimes \bar{\mathbf{u}}')] \quad (44)$$

A equação (44) é formalmente igual à sua forma não média, exceto pelo surgimento do último termo, que surge devido ao termo advectivo e não se anula. Esse último termo é conhecido como tensor de Reynolds  $\tau^R$  e é dado por:

$$\boldsymbol{\tau}^R = - \begin{bmatrix} \overline{u'u'} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{u'v'} & \overline{v'v'} & \overline{v'w'} \\ \overline{u'w'} & \overline{v'w'} & \overline{w'w'} \end{bmatrix} \quad (45)$$

Conseqüentemente, o sistema de equações de RANS não é um sistema fechado, e, para poder resolvê-lo, são necessárias equações adicionais para as componentes desconhecidas do tensor de Reynolds (WILCOX, 2006; MOUKALLED *et al.*, 2016).

#### 4.6.2 Hipótese de Boussinesq

A modelagem direta do tensor de Reynolds é baseada na hipótese de Boussinesq que, em analogia com os escoamentos newtonianos, assume a tensão de Reynolds como sendo uma função linear dos gradientes de velocidade média, de acordo com:

$$\boldsymbol{\tau}^R = -(\overline{\mathbf{u}' \otimes \mathbf{u}'}) = \mu_t \{ \nabla \otimes \bar{\mathbf{u}} + (\nabla \otimes \bar{\mathbf{u}})^T \} - \frac{2}{3} [k + \mu_t \nabla \cdot (\bar{\mathbf{u}})] \mathbf{I} \quad (46)$$

Para escoamentos incompressíveis pode-se reduzir a equação acima para:

$$\boldsymbol{\tau}^R = -(\overline{\mathbf{u}' \otimes \mathbf{u}'}) = \mu_t \{ \nabla \otimes \bar{\mathbf{u}} + (\nabla \otimes \bar{\mathbf{u}})^T \} - \frac{2}{3} k \mathbf{I} \quad (47)$$

onde  $k$  é a energia cinética turbulenta, definida de acordo com:

$$k = \frac{1}{2} (\overline{\mathbf{u}' \cdot \mathbf{u}'}) \quad (48)$$

e  $\mu_t$  é a viscosidade turbulenta (em analogia à viscosidade molecular). Com essa aproximação, o problema do cálculo das componentes da tensão de Reynolds é transformado em um problema de cálculo da energia cinética turbulenta e da viscosidade turbulenta (WILCOX, 2006; MOUKALLED *et al.*, 2016).

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

O modelo  $k$ - $\varepsilon$  padrão (LAUNDER E SPALDING, 1974) é baseado na aproximação de Boussinesq. Nesse modelo a viscosidade turbulenta é calculada conforme:

$$\mu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (49)$$

onde  $\varepsilon$  é a taxa de dissipação da energia cinética de turbulência por unidade de massa, causada devido às tensões viscosas, e é dada por:

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \mu \overline{\{\nabla \otimes \bar{\mathbf{u}} + (\nabla \otimes \bar{\mathbf{u}})^T\} : \{\nabla \otimes \bar{\mathbf{u}} + (\nabla \otimes \bar{\mathbf{u}})^T\}} \quad (50)$$

A energia cinética turbulenta  $k$  e a taxa de dissipação de energia turbulenta  $\varepsilon$  são calculadas através do sistema:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \nabla \cdot [\bar{\mathbf{u}}k] = \nabla \cdot (\mu_{eff,k} \nabla k) + P_k - \varepsilon \quad (51)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot [\bar{\mathbf{u}}\varepsilon] = \nabla \cdot (\mu_{eff,\varepsilon} \nabla \varepsilon) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (52)$$

onde  $\mu_{eff,k}$  e  $\mu_{eff,\varepsilon}$  são dados de acordo com:

$$\mu_{eff,k} = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (53)$$

$$\mu_{eff,\varepsilon} = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \quad (54)$$

e, para as constantes do modelo, comumente são atribuídos os seguintes valores:  $C_{\varepsilon 1} = 1,44$ ,  $C_{\varepsilon 2} = 1,92$ ,  $C_\mu = 0,09$ ,  $\sigma_k = 1,0$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1,3$  (LAUNDER E SPALDING, 1974; WILCOX, 2006; ALFONSI, 2009). O termo da produção de energia turbulenta  $P_k$ , em sua forma compacta, é dado por:

$$P_k = \tau^R: [\nabla \otimes \bar{\mathbf{u}}] \quad (55)$$

#### 4.6.4 Modelo $k$ - $\omega$ padrão

O modelo  $k$ - $\omega$  (WILCOX, 1988) é similar em estrutura ao modelo  $k$ - $\varepsilon$  e também é baseado na aproximação de Boussinesq. Duas equações de transporte são resolvidas para determinar as duas escalas de turbulência. A dissipação de turbulência específica  $\omega$  é definida conforme:

$$\omega = \frac{\varepsilon}{C_\mu k} \quad (56)$$

A viscosidade turbulenta é calculada de acordo com:

$$\mu_t = \frac{k}{\omega} \quad (57)$$

E as equações de conservação são dadas conforme o sistema:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \nabla \cdot [\bar{\mathbf{u}}k] = \nabla \cdot (\mu_{eff,k} \nabla k) + P_k - \beta k \omega \quad (58)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \nabla \cdot [\bar{\mathbf{u}}\omega] = \nabla \cdot (\mu_{eff,\varepsilon} \nabla \omega) + C_\alpha \frac{\omega}{k} P_k - C_\beta \omega^2 \quad (59)$$

onde  $\mu_{eff,k}$  e  $\mu_{eff,\omega}$  são dados pelas equações:

$$\mu_{eff,k} = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (60)$$

$$\mu_{eff,\omega} = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \quad (61)$$

e, para as constantes do modelo, comumente são atribuídos os seguintes valores:  $C_\alpha = 5/9$ ,  $C_\beta = 0,075$ ,  $\beta = 0,09$ ,  $\sigma_k = 2,0$ ,  $\sigma_\omega = 2,0$  (WILCOX, 2006; MOUKALLED *et al.*, 2016).

A equação de  $\omega$  é mais simples de ser integrada do que a equação de  $\varepsilon$ . Além disso, nas regiões próximas às paredes, onde há uma diminuição da turbulência, o modelo  $k-\omega$  funciona melhor que o modelo  $k-\varepsilon$ . Contudo, o modelo  $k-\omega$  é muito sensível aos valores especificados de escoamento livre, o que leva a uma forte dependência da solução sobre a especificação arbitrária do escoamento livre. Essa dependência não existe no modelo  $k-\varepsilon$  (WILCOX, 2006; MOUKALLED *et al.*, 2016).

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

O modelo  $k-\omega$  SST (MENTER, 1994), do inglês *Shear Stress Transport*, adota uma combinação dos dois modelos vistos anteriormente:  $k-\omega$  próximo às paredes e  $k-\varepsilon$  na região da corrente livre. Assim, esse modelo consegue fornecer as vantagens que existem nos dois modelos anteriores. Como desvantagem, esse método produz níveis de turbulência elevados em zonas de estagnação e zonas de grande aceleração.

Um fator de mistura é introduzido dentro da equação de transporte para regular a troca entre os modelos  $k-\omega$  e  $k-\varepsilon$ , ver MOUKALLED *et al.* (2016).

#### 4.6.6 LES

Os movimentos de grande escala contêm mais energia do que os de pequena escala, por isso são os termos mais relevantes no transporte das quantidades conservadas. A abordagem LES aproveita esse princípio e resolve apenas os grandes vórtices, a fim de obter a descrição do escoamento com relação à abordagem RANS e economizar o esforço computacional em relação ao DNS.

Em vez de calcular a média de tempo, o LES usa uma operação de filtragem espacial para separar os vórtices maiores e menores. O método começa com a seleção de uma função de filtragem e uma certa largura de corte, a fim de resolver em um cálculo de fluxo instável todos os vórtices com escala maior que o comprimento de corte (PIOMELLI, 1999; LESIEUR, MÉTAIS E COMTE, 2005; WILCOX, 2006; VERSTEEG E MALALASEKERA, 2007).

##### 4.6.6.1 Filtragem espacial

Em LES, a operação de filtragem espacial é definida por meio de uma função de filtro  $G(x, x', \Delta)$ , conforme:

$$\tilde{\phi}(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G(x, x', \Delta) \phi(x', t) dx'_1 dx'_2 dx'_3 \quad (62)$$

onde  $\tilde{\phi}$  é a função filtrada,  $x'$  é a variável que representa a posição dos pontos que cercam o ponto em  $x$  e  $\Delta$  é o comprimento de corte do filtro.

No OpenFOAM, o filtro utilizado como padrão é conhecido como filtro de caixa e é definido por:

$$G(x, x', \Delta) = \begin{cases} \frac{1}{\Delta^3} & \text{se } |x - x'| \leq \frac{\Delta}{2} \\ 0 & \text{se } |x - x'| > \frac{\Delta}{2} \end{cases} \quad (63)$$

O comprimento de corte  $\Delta$  é planejado como uma medida indicativa do tamanho dos vórtices que são considerados nos cálculos e dos vórtices que são rejeitados. A princípio, pode-se escolher qualquer tamanho para a largura de corte, mas nos cálculos de CFD, é inútil selecionar uma largura de corte menor do que o tamanho da malha computacional. Logo, a seleção mais comum é adotar um comprimento de corte igual ao tamanho da malha. Em escoamentos tridimensionais, com volumes de controle com comprimento  $\Delta x$ , largura  $\Delta y$  e altura  $\Delta z$ , o comprimento de corte é frequentemente considerado como sendo a raiz cúbica do volume do elemento da malha (método nomeado no OpenFOAM como *cubeRootVol*), conforme:

$$\Delta = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3} \quad (64)$$

Aplicando a filtragem sobre as equações governantes para o fluxo incompressível e isotérmico, considerando a densidade como unitária, e unificando as equações de Navier-Stokes, obtêm-se as equações:

$$\nabla \cdot (\tilde{\mathbf{u}}) = 0 \quad (65)$$

$$\frac{\partial \tilde{\mathbf{u}}}{\partial t} + \nabla \cdot [\widetilde{\mathbf{u} \otimes \mathbf{u}}] = -(\nabla \tilde{p}) + \nabla \cdot (\mu \nabla \otimes \tilde{\mathbf{u}}) \quad (66)$$

O problema da equação acima é computar o termo advectivo  $\text{div}[\widetilde{\mathbf{u}} \otimes \mathbf{u}]$ . Para resolvermos tal problema, primeiro, reescreve-se o termo advectivo como:

$$\nabla \cdot [\widetilde{\mathbf{u}} \otimes \mathbf{u}] = \nabla \cdot [\widetilde{\mathbf{u}} \otimes \widetilde{\mathbf{u}}] + \{\nabla \cdot [\widetilde{\mathbf{u}} \otimes \mathbf{u}] - \nabla \cdot [\widetilde{\mathbf{u}} \otimes \widetilde{\mathbf{u}}]\} \quad (67)$$

O primeiro termo do lado direito da equação acima pode ser calculado a partir dos campos filtrados e o segundo termo é substituído por um modelo. Assim, substituindo na equação (66) e separando as componentes novamente, formula-se as equações de momento do modelo LES, conforme o sistema de equações dadas a seguir:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\tilde{u} \tilde{\mathbf{u}}) &= -\frac{\partial \tilde{p}}{\partial x} + \mu \nabla \cdot (\nabla \tilde{u}) - [\nabla \cdot (\tilde{u} \tilde{\mathbf{u}}) - \nabla \cdot (\tilde{u} \tilde{\mathbf{u}})] \\ \frac{\partial \tilde{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\tilde{v} \tilde{\mathbf{u}}) &= -\frac{\partial \tilde{p}}{\partial y} + \mu \nabla \cdot (\nabla \tilde{v}) - [\nabla \cdot (\tilde{v} \tilde{\mathbf{u}}) - \nabla \cdot (\tilde{v} \tilde{\mathbf{u}})] \\ \frac{\partial \tilde{w}}{\partial t} + \nabla \cdot (\tilde{w} \tilde{\mathbf{u}}) &= -\frac{\partial \tilde{p}}{\partial z} + \mu \nabla \cdot (\nabla \tilde{w}) - [\nabla \cdot (\tilde{w} \tilde{\mathbf{u}}) - \nabla \cdot (\tilde{w} \tilde{\mathbf{u}})] \end{aligned} \quad (68)$$

Pode-se escrever os últimos termos das equações acima como sendo o divergente de um conjunto de tensões  $\tau_{ij}$ . O  $i$ -ésimo componente desses termos pode ser escrito de acordo com a equação:

$$\nabla \cdot (\tilde{u} \tilde{\mathbf{u}} - \tilde{u} \tilde{\mathbf{u}}) = \frac{\partial (\tilde{u}_i \tilde{u} - \tilde{u}_i \tilde{u})}{\partial x} + \frac{\partial (\tilde{u}_i \tilde{v} - \tilde{u}_i \tilde{v})}{\partial y} + \frac{\partial (\tilde{u}_i \tilde{w} - \tilde{u}_i \tilde{w})}{\partial z} = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (69)$$

onde,

$$\tau_{ij} = \tilde{u}_i \tilde{\mathbf{u}} - \tilde{u}_i \tilde{\mathbf{u}} = \tilde{u}_i \tilde{u}_j - \tilde{u}_i \tilde{u}_j \quad (70)$$

O tensor acima é conhecido com tensor SGS (do inglês *sub-grid-scale*).

A variável  $\phi$  pode ser decomposta em duas parcelas:

$$\phi(\mathbf{x}, t) = \tilde{\phi}(\mathbf{x}, t) + \phi'(\mathbf{x}, t) \quad (71)$$

onde  $\tilde{\phi}(\mathbf{x}, t)$  é a função filtrada, que possui variação espacial superior à largura de corte, e  $\phi'(\mathbf{x}, t)$  é a parcela não computada em LES, pois possui variação espacial inferior à largura de corte. Usando essa decomposição, pode-se reescrever o primeiro termo do lado direito da equação (70) conforme:

$$\widetilde{u_i u_j} = (\widetilde{u_i} + u'_i)(\widetilde{u_j} + u'_j) = \widetilde{u_i u_j} + \widetilde{u_i} u'_j + u'_i \widetilde{u_j} + u'_i u'_j \quad (72)$$

Assim, pode-se reescrever o tensor SGS através da equação:

$$\tau_{ij} = (\widetilde{u_i u_j} - \widetilde{u_i} \widetilde{u_j}) + \widetilde{u_i} u'_j + u'_i \widetilde{u_j} + u'_i u'_j \quad (73)$$

onde cada parcela da equação recebe um nome especial. Apresenta-se, no Quadro 1, a denominação de cada parcela da equação (69).

Quadro 1 – Parcelas do tensor SGS.

Tensões de Leonard	$L_{ij} = (\widetilde{u_i u_j} - \widetilde{u_i} \widetilde{u_j})$	(74)
Tensões Cruzadas	$C_{ij} = \widetilde{u_i} u'_j + u'_i \widetilde{u_j}$	(75)
Tensões de Reynolds em LES	$R_{ij} = u'_i u'_j$	(76)

Fonte: Autor (2019).

As tensões de Leonard são computadas através de um método de aproximação que utiliza o campo filtrado, ver Leonard (1975). As tensões cruzadas são devidas a interações entre os turbilhões da SGS e o fluxo resolvido. Uma expressão aproximada para essas tensões é dada em Ferziger (1977). As tensões de Reynolds, que são causadas por transferência de momento advectivo devido a interações de turbilhões SGS, são modeladas com o chamado modelo de turbulência SGS (WILCOX, 2006; VERSTEEG E MALALASEKERA, 2007).

#### 4.6.6.2 Modelo SGS de Smagorinsky

Smagorinsky (1963) sugeriu que, uma vez que os menores vórtices turbulentos são quase isotrópicos, espera-se que a hipótese de Boussinesq possa fornecer uma boa descrição dos efeitos dos vórtices não resolvidos no escoamento resolvido. Assim, no modelo SGS de Smagorinsky, as tensões de Reynolds  $R_{ij}$  são consideradas proporcionais à taxa local de tensão do fluxo resolvido  $\tilde{S}_{ij}$ , como mostra-se a seguir:

$$R_{ij} = -2\mu_{SGS}\tilde{S}_{ij} + \frac{1}{3}R_{ii}\delta_{ij} = -\mu_{SGS}\left(\frac{\partial\tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial\tilde{u}_j}{\partial x_i}\right) + \frac{1}{3}R_{ii}\delta_{ij} \quad (77)$$

onde a constante de proporcionalidade  $\mu_{SGS}$  é a viscosidade dinâmica SGS e o termo  $\frac{1}{3}R_{ii}\delta_{ij}$  assegura que a soma das tensões SGS normais modeladas é igual à energia cinética dos vórtices SGS.

A viscosidade dinâmica SGS é dada por:

$$\mu_{SGS} = (C_{SGS} \Delta)^2 |\tilde{S}| = (C_{SGS} \Delta)^2 \sqrt{2\tilde{S}_{ij}\tilde{S}_{ij}} \quad (78)$$

onde  $C_{SGS}$  é a constante de Smagorinsky, geralmente adotada como 0,10 (DEARDORFF, 1970; LAUNDER E SANDHAM, 2002; VERSTEEG E MALALASEKERA, 2007).

Apesar da natureza diferente das tensões de Leonard e das tensões cruzadas, elas geralmente são agrupadas com as tensões de Reynolds nas versões atuais do método do volume finito, como no caso do OpenFOAM. Toda a tensão  $\tau_{ij}$  é modelada como uma entidade única por meio de um único modelo de turbulência SGS, conforme:

$$\tau_{ij} = -2\mu_{SGS}\tilde{S}_{ij} + \frac{1}{3}\tau_{ii}\delta_{ij} = -\mu_{SGS}\left(\frac{\partial\tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial\tilde{u}_j}{\partial x_i}\right) + \frac{1}{3}\tau_{ii}\delta_{ij} \quad (79)$$

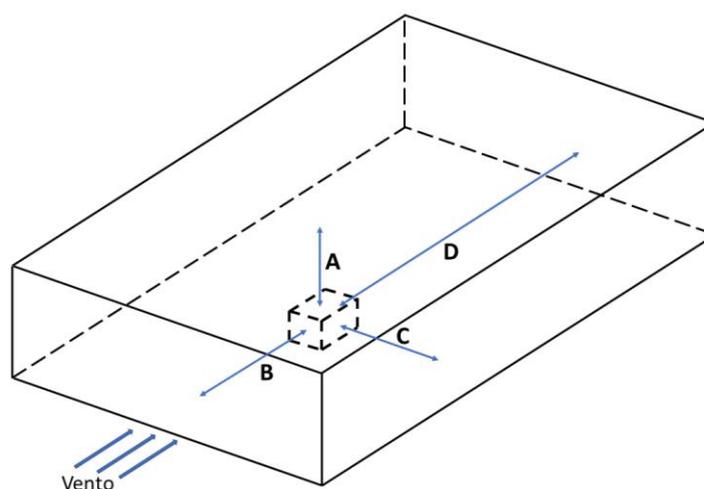
#### 4.7 PARÂMETROS DAS SIMULAÇÕES

Os erros e incertezas que existem nos resultados de simulações em CFD devem sempre ser minimizados, de forma a não prejudicar a representatividade desses resultados. Para isso, Franke *et al.* (2007), Tominaga *et al.* (2008), Koblitz (2013), Blocken, Staphopoulos e Beeck (2016) fornecem recomendações gerais a serem seguidas em simulações do vento em edificações. A seguir são mostradas as principais recomendações.

Na escolha das dimensões do domínio computacional, é necessário atender alguns valores mínimos para evitar que haja erros provenientes de efeitos como acelerações artificiais e encurtamento da zona de recirculação do vento. Tratando-se de domínios que apresentam apenas uma edificação na simulação, as dimensões do domínio são tomadas com base na altura do edifício estudado ( $H$ ). Já para casos em que são estudados conjuntos de edificações, as dimensões são tomadas com base na largura total do conjunto de edificações ( $W$ ) e na altura do edifício mais alto ( $H_{\text{máx}}$ ).

No Quadro 2, apresentam-se as dimensões mínimas para o domínio computacional para os casos com uma única edificação e para os casos que representam um conjunto de edificações, de acordo com o esquema da Figura 6.

Figura 6 – Esquema de dimensões do domínio computacional.



Fonte: Autor (2019).

Quadro 2 – Dimensões mínimas do domínio computacional.

<b>Caso</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
Ed. Único	5 H	5 H	5 H	10 H
Conjunto de ed.	2,3 W	2,3 W	2,3 W	15 H <sub>máx</sub>

Fonte: Autor (2019).

A maior dificuldade em simular o vento no entorno de edificações é conseguir reproduzir corretamente as principais características do escoamento, tais como a separação do escoamento nas proximidades dos contornos sólidos (telhado e paredes da edificação), borbulhas de separação, entre outros. Por conta disso, deve-se ter cuidado na escolha do nível de refinamento de malha no entorno da edificação.

A região próxima à edificação e as regiões com formação de vórtices devem apresentar uma malha mais refinada em comparação com regiões afastadas do corpo ou nas quais o escoamento não apresenta fortes gradientes. Tominaga *et al.* (2008) recomendam que, para a dimensão das arestas dos elementos da edificação e do seu entorno, deve-se adotar no máximo H/10.

Com relação às condições de contorno, há diferentes formas de prescrever o perfil de velocidade na entrada. Richards e Hoxey (1993) recomendam usar a lei logarítmica, que é bastante eficiente para simular o escoamento do vento atmosférico. Baseadas nessa lei, as condições ABL (*Atmospheric Boundary Layer*) representam bem a influência da rugosidade da superfície terrestre sobre o escoamento. A velocidade de entrada, prescreve-se como:

$$u(z) = \frac{u_{ABL}}{\kappa} \ln \left( \frac{z + z_0}{z_0} \right) \quad (80)$$

onde:

$u(z)$  = velocidade do vento em função da altura, em metros por segundo;

$z$  = altura em relação ao solo, em metros;

$u_{ABL}$  = velocidade de fricção em metros por segundo;

$z_0$  = altura rugosa, em metros;

$\kappa$  = constante de Von Karman, comumente adota-se 0,42.

Na face de saída do domínio, prescrever-se os gradientes de todas as variáveis como nulos. Vale lembrar que essa face deve estar longe o suficiente para evitar qualquer perturbação do escoamento ao redor da edificação.

Também é necessário, dentro das condições de contorno, prescrever os valores das variáveis de turbulência. No OpenFOAM, o procedimento é o mesmo utilizado para prescrição da velocidade e da pressão (OpenFOAM Foundation, 2019). Para o modelo  $k-\varepsilon$  é necessário prescrever os valores de  $k$ ,  $\varepsilon$  e  $\mu_t$ . Para o modelo  $k-\omega$  SST, no lugar de  $\varepsilon$  prescreve-se os valores de  $\omega$  e, para o modelo LES de Smagorinsky, é necessário apenas definir os valores de  $\mu_t$ .

Para simulações em regime transiente, o tamanho dos passos de tempo adotados na simulação é um importante parâmetro para obter-se a convergência e boa precisão dos resultados Franke *et al.* (2007). Uma forma eficiente de calcular-se o tamanho dos passos de tempo é a través da equação:

$$\Delta t = CFL \frac{\Delta x_{min}}{u_{m\acute{a}x}} \quad (81)$$

onde:

$\Delta t$  = tamanho dos passos de tempo;

$\Delta x_{min}$  = comprimento do menor elemento da malha;

$u_{m\acute{a}x}$  = máxima velocidade do escoamento;

$CFL$  = número de Courant-Friedrichs-Lewy, que deve ser menor ou igual a 1 para obter-se a estabilidade da simulação.

## 5 CASOS ESTUDADOS

A primeira fase da solução dos problemas tratados no presente trabalho é a etapa de pré-processamento, que consiste na criação do domínio computacional e na discretização espacial desse domínio (aplicação do método dos volumes finitos). Para isso, emprega-se o *software* de código aberto Salomé, em sua versão 8.3.0. As condições iniciais e condições de contorno relacionadas ao escoamento do vento são inseridas diretamente dentro dos diretórios de cada simulação, através de arquivos de texto. Para a etapa de pós-processamento também se utiliza um *software* de código aberto, o ParaView, em sua versão 5.4.1.

Para a etapa de processamento, faz-se uso do pacote OpenFOAM em sua versão 4.0. O solver *pisoFoam* é utilizado para as simulações com escoamento em regime transiente e o solver *simpleFoam* é utilizado para as simulações com escoamento em regime permanente. Para todas as simulações em regime permanente é definida como condição de parada uma tolerância de  $10^{-4}$  para cada variável do escoamento, conforme recomenda Franke *et al.* (2007).

Todos os esquemas de discretização utilizados são de segunda ordem. A escolha de cada esquema segue as recomendações do manual de usuário do OpenFOAM (OpenFOAM Foundation, 2019). Nas simulações com escoamento em regime transiente, para a discretização da derivada temporal, utiliza-se o esquema de Crank-Nicolson, nomeado como *CrankNicolson* dentro do OpenFOAM. Para discretização dos termos difusivos, a fim de melhor acurácia, faz-se uso do esquema Linear, nomeado como *Gauss linear* dentro do OpenFOAM, e para os termos advectivos, que precisam de maior estabilidade numérica, faz-se uso do esquema Upwind de Segunda Ordem, nomeado como *Gauss linearUpwind*.

São consideradas as recomendações prescritas por Tominaga *et al.* (2008) e Franke *et al.* (2007), além dos trabalhos de referência, para o dimensionamento do domínio computacional, para a escolha do modelo de camada limite atmosférica e para o cálculo do tamanho dos passos de tempo.

Para resolver os sistemas lineares das equações acopladas, adota-se o solver GAMG (do inglês *generalised geometric-algebraic multi-grid*) para as equações de pressão e o solver *smooth* com esquema Gauss-Seidel para as equações de velocidade e das variáveis de turbulência conforme recomendação do manual de usuário do OpenFOAM, ver OpenFOAM Foundation (2019).

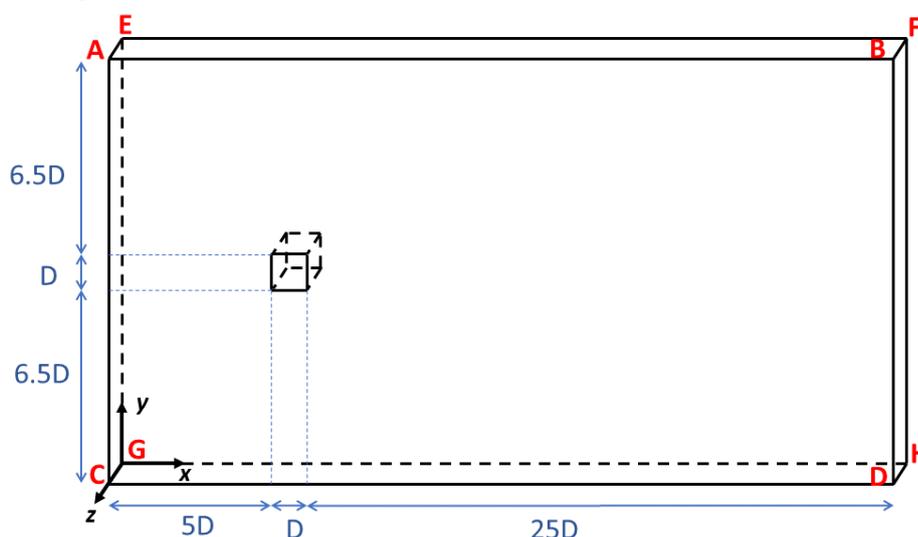
Todas as simulações são realizadas com computação paralela, adotando quatro núcleos de processamento. A paralização no OpenFOAM é feita através da implementação aberta openMPI (do inglês *Message Passing Interface*), de forma automática com malha construída sequencialmente, ver OpenFOAM Foundation (2019). Utiliza-se o esquema *Scotch* para decomposição das simulações, que otimiza a comunicação entre processadores, ver Wang *et al.* (2012)

São estudados no presente trabalho, três casos, no primeiro trata-se do escoamento ao redor de um cilindro quadrado bidimensional, no segundo exemplo analisa-se o problema do escoamento sobre um paralelepípedo com duas aberturas estudado por Hooff, Blocken e Tominaga (2017), e finalmente estuda-se um problema bidimensional de três edifícios dispostos em série.

### 5.1 CILINDRO QUADRADO 2D

Neste caso, estuda-se o escoamento incompressível turbulento ao redor de um cilindro quadrado de arestas de comprimento unitário. O modelo geométrico e as condições de contorno baseiam-se no estudo experimental desenvolvido por Lyn e Rodi (1994) em um túnel de vento com uma taxa de bloqueio (relação entre a área da seção transversal do corpo experimentado e do túnel de vento) de 7%. O domínio computacional utilizado no presente caso segue o mesmo diâmetro do túnel de vento utilizado por Lyn e Rodi (1994). Mostra-se, na Figura 7, o domínio computacional utilizado.

Figura 7 – Domínio computacional do caso 2D com cilindro quadrado.



Fonte: Autor (2019).

No Quadro 3, apresenta-se a primeira parte das condições de contorno, usando a referência de faces prescrita na Figura 7. No OpenFOAM, a condição de gradiente nulo é nomeada como *zeroGradient* e a condição de simetria é nomeada como *symmetryPlane*. Para campos escalares, a condição de simetria funciona da mesma forma que a condição de gradiente nulo, já para campos vetoriais, é feito um espelhamento das componentes paralelas ao bordo e uma anulação das componentes ortogonais, ver MOUKALLED *et al.* (2016). Por natureza, toda simulação no OpenFOAM é tridimensional, por isso, para problemas bidimensionais, a geometria e a malha são construídas tridimensionalmente e nos bordos ortogonais ao eixo não resolvido é especificada a condição de vazio, chamada de *empty* no OpenFOAM, que faz com que o Teorema de Gauss não contabilize as faces pertencentes a esses bordos e define todos os coeficientes relacionados à sua direção normal como nulos.

Quadro 3 – Primeira parte das condições de contorno do caso 2D com cilindro quadrado.

Face	Velocidade em x	Velocidade em y	Velocidade em z	Pressão
ABDC	empty	empty	empty	empty
EFHG	empty	empty	empty	empty
ACGE	$u = u_0$	$v = 0$	$w = 0$	$\nabla(p) = 0$
BDHF	$\nabla(u) = 0$	$\nabla(v) = 0$	$\nabla(w) = 0$	$p = 0$
AEFB	Condição de simetria	Condição de simetria	Condição de simetria	Condição de simetria
CGHD	Condição de simetria	Condição de simetria	Condição de simetria	Condição de simetria
Faces do cilindro	$u = 0$	$v = 0$	$w = 0$	$\nabla(p) = 0$

Fonte: Autor (2019).

Adota-se como dimensão característica o valor de  $D = 1\text{ m}$  e, para a velocidade de referência  $u_0$ , o valor de  $1\text{ m/s}$ . Seguindo o experimento de Lyn e Rodi (1994), prescreve-se um número de Reynolds igual à  $21.400$  e uma intensidade de turbulência de  $2\%$ .

Para a modelagem da turbulência, utilizam-se os modelos RANS  $k-\varepsilon$  e  $k-\omega$  SST. Apresenta-se, no Quadro 4, as condições de contorno referente às variáveis de turbulência.

Quadro 4 – Segunda parte das condições de contorno do caso 2D com cilindro quadrado.

Face	$k$	$\varepsilon$	$\omega$	$\mu_t$
ABDC	empty	empty	empty	empty
EFHG	empty	empty	empty	empty
ACGE	$k = k_0$	$\varepsilon = \varepsilon_0$	$\omega = \omega_0$	$\nabla(\mu_t) = 0$
BDHF	$\nabla(k) = 0$	$\nabla(\varepsilon) = 0$	$\nabla(\omega) = 0$	$\nabla(\mu_t) = 0$
AEFB	Condição de simetria	Condição de simetria	Condição de simetria	Condição de simetria
CGHD	Condição de simetria	Condição de simetria	Condição de simetria	Condição de simetria
Faces do cilindro	Função de parede	Função de parede	Função de parede	Função de parede

Fonte: Autor (2019).

Na entrada, prescrevem-se a energia cinética turbulenta  $k_0$ , a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta  $\varepsilon_0$  e a dissipação de turbulência específica  $\omega_0$  conforme as equações (CFD ONLINE, 2019):

$$k_0 = \frac{3}{2} (u_0 I)^2 \quad (82)$$

$$\varepsilon_0 = \frac{C_\mu k_0^2}{\nu} \left( \frac{\mu_t}{\mu} \right)^{-1} \quad (83)$$

$$\omega_0 = \frac{k_0}{\nu} \left( \frac{\mu_t}{\mu} \right)^{-1} \quad (84)$$

onde  $\nu$  é a viscosidade cinemática e  $\frac{\mu_t}{\mu}$  é a taxa de viscosidade turbulenta. Para o presente exemplo, adota-se  $\frac{\mu_t}{\mu}$  como 10, conforme as recomendações de Bosh e Rodi (1998).

Aplica-se uma função de parede na energia cinética turbulenta  $k$  nomeada no OpenFOAM como *kqRWallFunction*. Para a energia cinética turbulenta  $\varepsilon$ , aplica-se a função de parede nomeada como *epsilonWallFunction* e, para a dissipação de turbulência específica  $w$ , adota-se a função *omegaWallFunction*. Para a viscosidade turbulenta  $\mu_t$  há diferentes opções de função de parede presentes no OpenFOAM. Seguindo recomendações do manual do usuário (OpenFOAM Foundation, 2019), adota-se aquela que faz uso da energia cinética turbulenta, nomeada no OpenFOAM como *nutkWallFunction*, ver MOUKALLED *et al.* (2016).

Para os dois modelos de turbulência analisados se faz um estudo de independência de refinamento de malha. Para isso, adota-se três níveis de discretização espacial, no primeiro as arestas do cilindro quadrado são discretizadas utilizando 50 volumes, no segundo são utilizados 75 e no terceiro adotam-se 100 volumes.

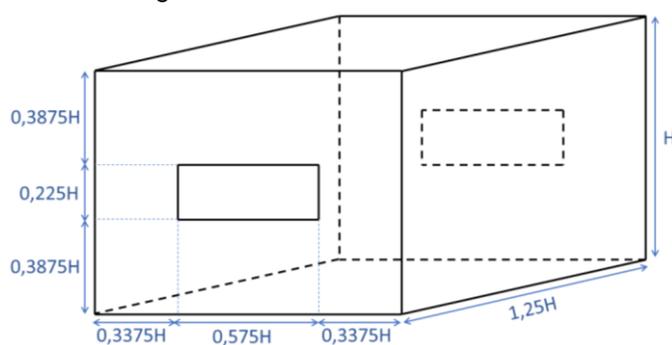
Para comparar os resultados obtidos no presente trabalho com os resultados experimentais e numéricos de outros autores, adota-se regime de escoamento transiente. O valor do intervalo de tempo  $\Delta t$  é adotado como 0,005 s, 0,0033 s e 0,0025 s, respectivamente para cada nível de refinamento de malha, satisfazendo a condição de Courant-Friedrichs-Lewy. Adota-se, 500 s para o tempo físico total de cada simulação.

A fim de verificar os esquemas adotados no OpenFOAM, todos os resultados obtidos no presente exemplo são comparados com os resultados experimentais apresentados por Lyn e Rodi (1994) e os numéricos obtidos por Raisee e Jafari (2006).

## 5.2 CASO DE KARAVA

O segundo exemplo analisado, reproduz o caso estudado por Hooff, Blocken e Tominaga (2017), que, por sua vez, se baseiam no caso E1 estudado experimentalmente por Karava, Stathopoulos e Athienitis (2011). Simula-se o escoamento em regime permanente ao redor de uma edificação genérica com formato de paralelepípedo, onde as paredes e teto possuem espessura de 0,02H. Existem duas aberturas de mesmo tamanho, uma na face a barlavento e outra a sotavento, conforme mostra-se na Figura 8.

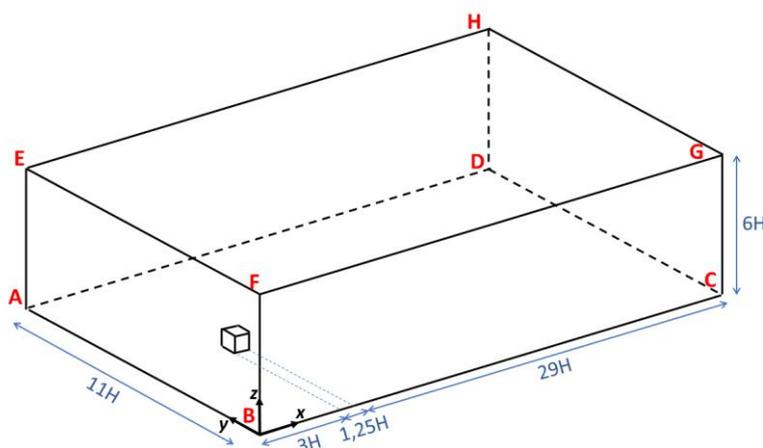
Figura 8 – Caso de Karava.



Fonte: Autor (2019).

Emprega-se o mesmo domínio computacional utilizado por Hooff, Blocken e Tominaga (2017), que recomendam o uso de  $3H$  de distância entre o início do domínio e o modelo de edificação para minimizar o crescimento da camada limite. Mostra-se o domínio computacional completo na Figura 9.

Figura 9 – Domínio computacional do caso de Karava.



Fonte: Autor (2019).

Para a altura da edificação, adota-se o valor empregado no ensaio do túnel de vento,  $H=0,16$  m, e, para a velocidade de entrada  $u(z)$ , adota-se a lei logarítmica, conforme a Eq. (80). Prescreve-se um número de Reynolds igual a 45.000. A velocidade de fricção  $u_{ABL}$  é de 0,348 m/s e a altura rugosa  $z_0$  vale 0,0009 m.

No Quadro 5, apresenta-se as condições de contorno, usando a referência de faces prescrita na Figura 9.

Quadro 5 – Primeira parte das condições de contorno do caso de Karava.

Face	Velocidade em x	Velocidade em y	Velocidade em z	Pressão
AEFB	$u = u(z)$	$v = 0$	$w = 0$	$\nabla(p) = 0$
CDHG	$\nabla(u) = 0$	$\nabla(v) = 0$	$\nabla(w) = 0$	$p = 0$
ADCB	condição de simetria	condição de simetria	condição de simetria	condição de simetria
BFGC	condição de simetria	condição de simetria	condição de simetria	condição de simetria
EHGF	condição de simetria	condição de simetria	condição de simetria	condição de simetria
ADCB	$u = 0$	$v = 0$	$w = 0$	$\nabla(p) = 0$
Edificação	$u = 0$	$v = 0$	$w = 0$	$\nabla(p) = 0$

Fonte: Autor (2019).

Para a modelagem da turbulência, utiliza-se unicamente o modelo RANS  $k$ - $\varepsilon$  padrão. Apresentam-se, no Quadro 6, as condições de contorno referentes às variáveis de turbulência.

Quadro 6 – Segunda parte das condições de contorno do caso de Karava.

Face	$k$	$\varepsilon$	$\mu_t$
AEFB	$k = k(z)$	$\varepsilon = \varepsilon(z)$	$\nabla(\mu_t) = 0$
CDHG	$\nabla(k) = 0$	$\nabla(\varepsilon) = 0$	$\nabla(\mu_t) = 0$
ADCB	condição de simetria	condição de simetria	condição de simetria
BFGC	condição de simetria	condição de simetria	condição de simetria
EHGF	condição de simetria	condição de simetria	condição de simetria
ADCB	função de parede	função de parede	função de parede
Edificação	função de parede	função de parede	função de parede

Fonte: Autor (2019).

Os perfis de energia cinética turbulenta  $k(z)$  e sua taxa de dissipação  $\varepsilon(z)$ , são calculados conforme as equações:

$$k(z) = 0,033[u(H)]^2 \exp^{-0,32\left(\frac{z}{H}\right)} \quad (85)$$

$$\varepsilon(z) = \frac{(u_{ABL})^3}{\kappa(z + z_0)} \quad (86)$$

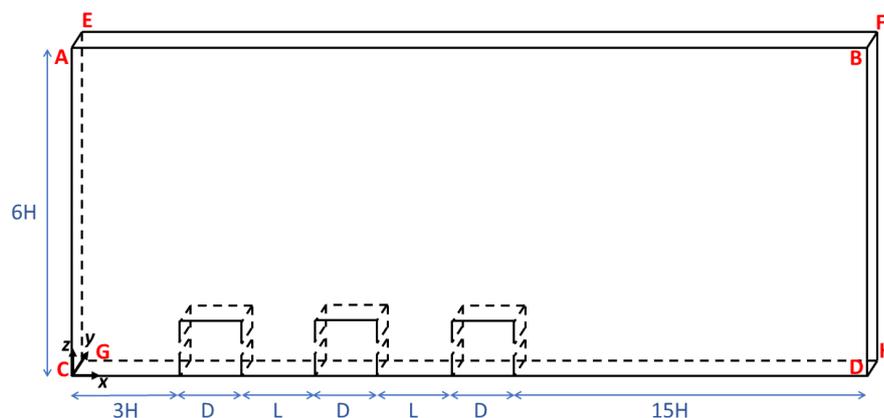
Para  $k$  e  $\varepsilon$  empregam-se as mesmas funções de parede utilizadas no caso anterior. Contudo, para a viscosidade turbulenta  $\mu_t$  utiliza-se uma função de parede baseada na rugosidade de grão de areia (*nutkRoughWallFunction*), onde adota-se a altura rugosa de grão de areia  $k_s$  como zero, ver Nikuradse (1950) e Cebeci e Bradshaw (1997).

Faz-se um estudo de independência de refinamento de malha utilizando quatro níveis de discretização espacial, as arestas da edificação são discretizadas utilizando 30, 40, 50 e 60 volumes, respectivamente.

### 5.3 CASO DE KARAVA EM 2D

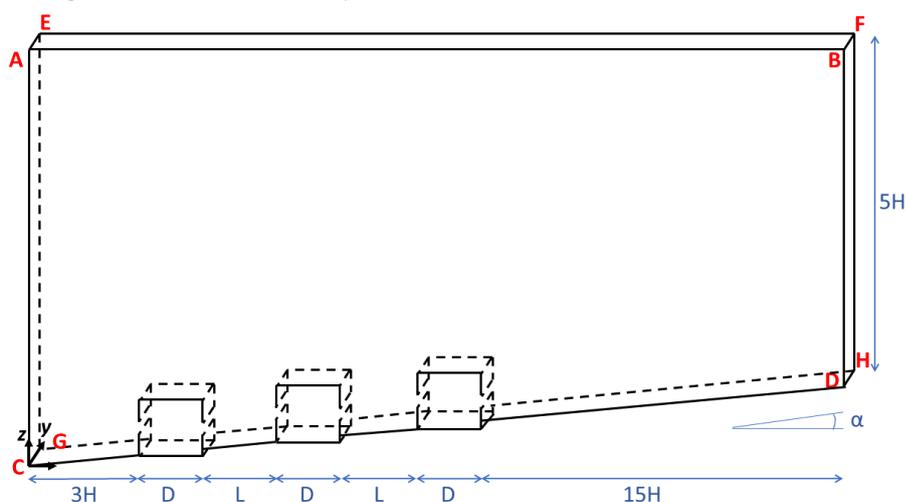
No presente exemplo, simula-se o caso E1 analisado por Karava, Stathopoulos e Athienitis (2011) como um problema bidimensional. Inicialmente, analisa-se uma única edificação e posteriormente estuda-se arranjos de 3 edificações dispostas em série, onde variou-se o espaçamento entre elas e a inclinação do terreno. Nas Figuras 10 e 11, mostram-se os domínios computacionais desse caso.

Figura 10 – Domínio computacional do caso de Karava 2D plano.



Fonte: Autor (2019).

Figura 11 – Domínio computacional do caso de Karava 2D inclinado.



Fonte: Autor (2019).

A distância horizontal entre as edificações é definida em função do comprimento  $D$ . Testam-se quatro distâncias ( $L$ ) e três diferentes inclinações de terreno ( $\alpha$ ). No Quadro 7, detalha-se as diferentes configurações simuladas e suas respectivas identificações.

Quadro 7 – Configurações do caso Karava em 2D com múltiplas edificações.

$\alpha \setminus L$	1D	2D	3D	4D
0°	A1	A2	A3	A4
5°	B1	B2	B3	B4
10°	C1	C2	C3	C4

Fonte: Autor (2019).

No Quadro 8, mostra-se as condições de contorno, usando a referência de faces prescrita nas Figuras 10 e 11.

Quadro 8 – Primeira parte das condições de contorno do caso 2D com cilindro quadrado.

Face	Velocidade em $x$	Velocidade em $y$	Velocidade em $z$	Pressão
ABDC	empty	empty	empty	empty
EFHG	empty	empty	empty	empty
ACGE	$u = u(z)$	$v = 0$	$w = 0$	$\nabla(p) = 0$
BDHF	$\nabla(u) = 0$	$\nabla(v) = 0$	$\nabla(w) = 0$	$p = 0$
AEFB	condição de simetria	condição de simetria	condição de simetria	condição de simetria
CGHD	$u = 0$	$v = 0$	$w = 0$	$\nabla(p) = 0$
Edificações	$u = 0$	$v = 0$	$w = 0$	$\nabla(p) = 0$

Fonte: Autor (2019).

O perfil de velocidade de entrada do vento  $u(z)$ , o número de Reynolds e as dimensões da edificação são os mesmos utilizados no caso anterior. Contudo, para neste caso, adota-se, além do modelo de turbulência RANS  $k-\varepsilon$  padrão, o modelo LES de Smagorinsky. Apresenta-se, no Quadro 9, as condições de contorno referente às variáveis de turbulência.

Adotam-se os mesmos perfis de entrada das variáveis de turbulência e funções de parede que foram empregados no caso anterior. Ressalta-se que para o modelo LES só foi necessário prescrever os valores de contorno de  $\mu_t$ . Para a constante de Smagorinsky, adota-se 0,10 (LAUNDER E SANDHAM, 2002) e, para o cálculo do comprimento de corte, adota-se o esquema *cubeRootVol*.

No estudo de independência de malha considera-se apenas uma edificação com o modelo de turbulência RANS  $k-\varepsilon$  padrão. Foram considerados 4 níveis de refinamento da malha, adotando-se para as arestas da edificação discretizações de 50, 60, 70 e 80 volumes.

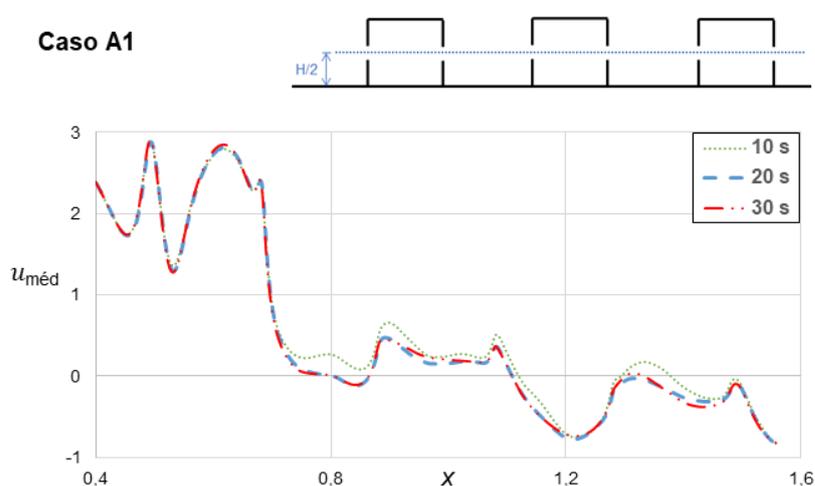
Quadro 10 – Segunda parte das condições de contorno do caso 2D com cilindro quadrado.

Face	$k$	$\varepsilon$	$\mu_t$
ABDC	empty	empty	empty
EFHG	empty	empty	empty
ACGE	$k = k(z)$	$\varepsilon = \varepsilon(z)$	$\nabla(\mu_t) = 0$
BDHF	$\nabla(k) = 0$	$\nabla(\varepsilon) = 0$	$\nabla(\mu_t) = 0$
AEFB	condição de simetria	condição de simetria	condição de simetria
CGHD	função de parede	função de parede	função de parede
Edificações	função de parede	função de parede	função de parede

Fonte: Autor (2019).

Para as simulações feitas com o modelo RANS, adotou-se o regime de escoamento permanente. Já para as simulações com o modelo LES, devido à natureza do mesmo, consideram-se as simulações em regime transiente. Assim, para essas simulações adotou-se um intervalo de tempo  $\Delta t$  de 0,0001 s e um tempo físico total de 30 s. Na Figura 12, apresenta-se um perfil da média componente da velocidade na direção  $x$  ( $u_{méd}$ ) para o caso com terreno plano e menor distância entre edificações (A1). O perfil é extraído numa linha longitudinal,  $z = H/2$ , em três tempos diferentes (10, 20 e 30 s). Percebe-se que o tempo total simulado é suficiente para garantir uma média representativa dos resultados.

Figura 12 – Estudo do tempo simulado em LES.



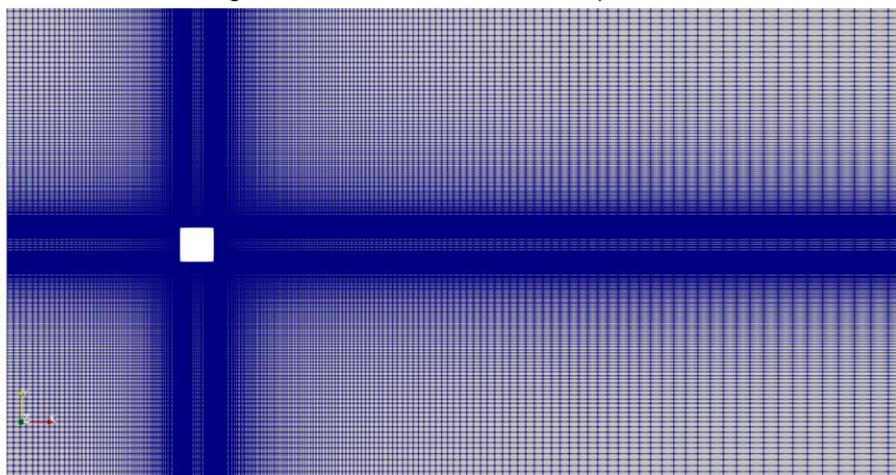
Fonte: Autor (2019).

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 CILINDRO QUADRADO 2D

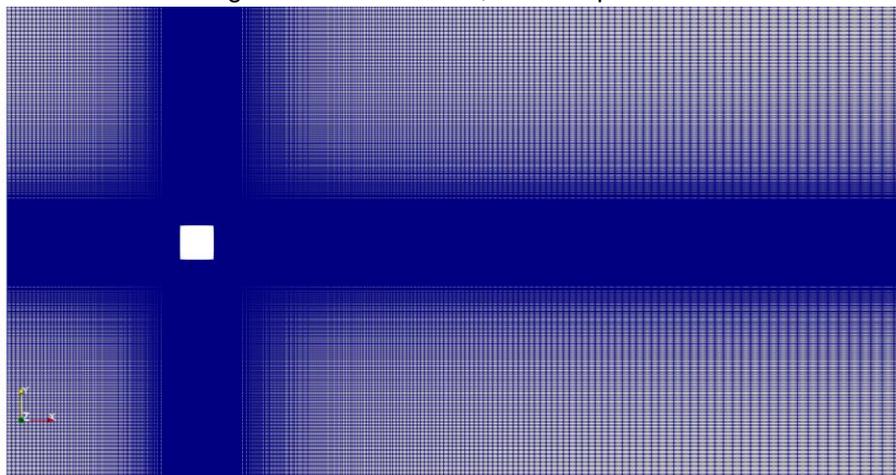
Inicialmente, mostra-se o estudo de independência de malha para o exemplo do escoamento ao redor do cilindro quadrado. Nas Figuras 13, 14 e 15, apresentam-se as três malhas (M50, M75, M100) utilizadas para o presente caso.

Figura 13 – Malha M50, cilindro quadrado.



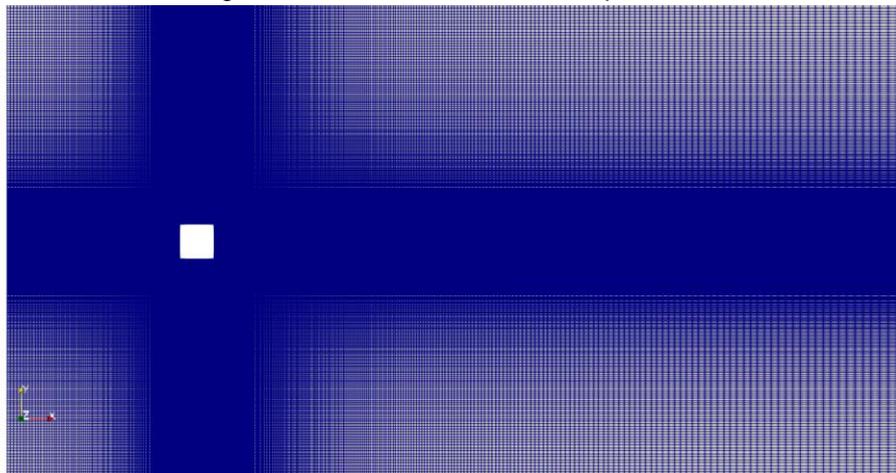
Fonte: Autor (2019).

Figura 14 – Malha M75, cilindro quadrado.



Fonte: Autor (2019).

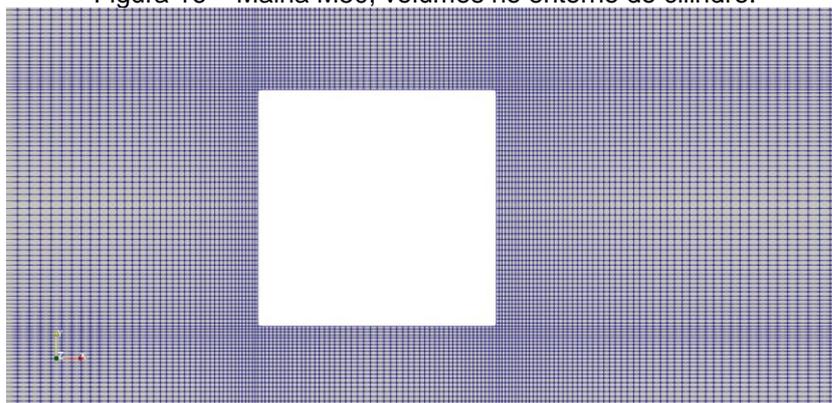
Figura 15 – Malha M100, cilindro quadrado.



Fonte: Autor (2019).

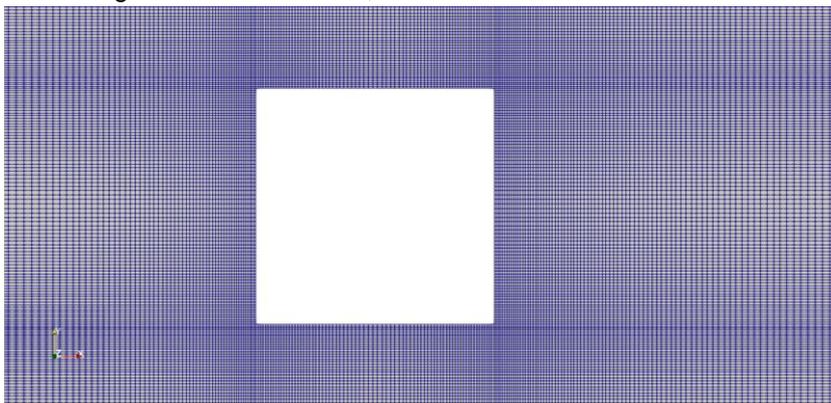
As malhas totalizaram 66250, 149250 e 265000 volumes de controle, respectivamente. Para otimizar a distribuição dos volumes de controle dentro do domínio, procurou-se concentrar a maior parte dos elementos no entorno do cilindro quadrado, já que ao redor do mesmo acontecem os principais fenômenos físicos e os gradientes mais elevados. Mostra-se, nas Figuras 16, 17 e 18, a distribuição dos volumes de controle no entorno do cilindro quadrado para cada malha.

Figura 16 – Malha M50, volumes no entorno do cilindro.



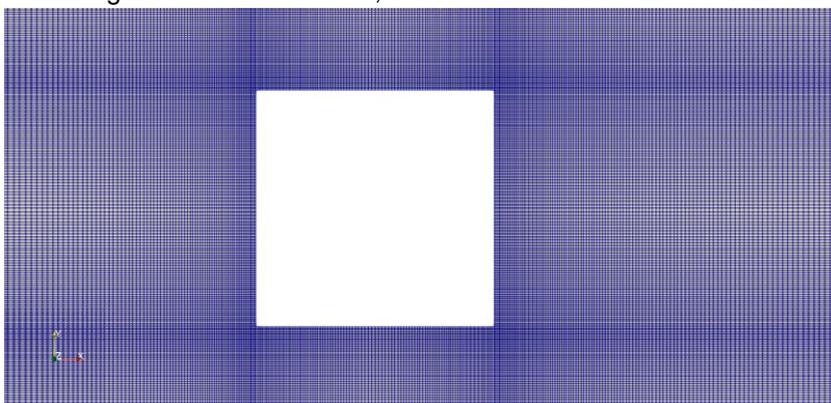
Fonte: Autor (2019).

Figura 17 – Malha M75, volumes no entorno do cilindro.



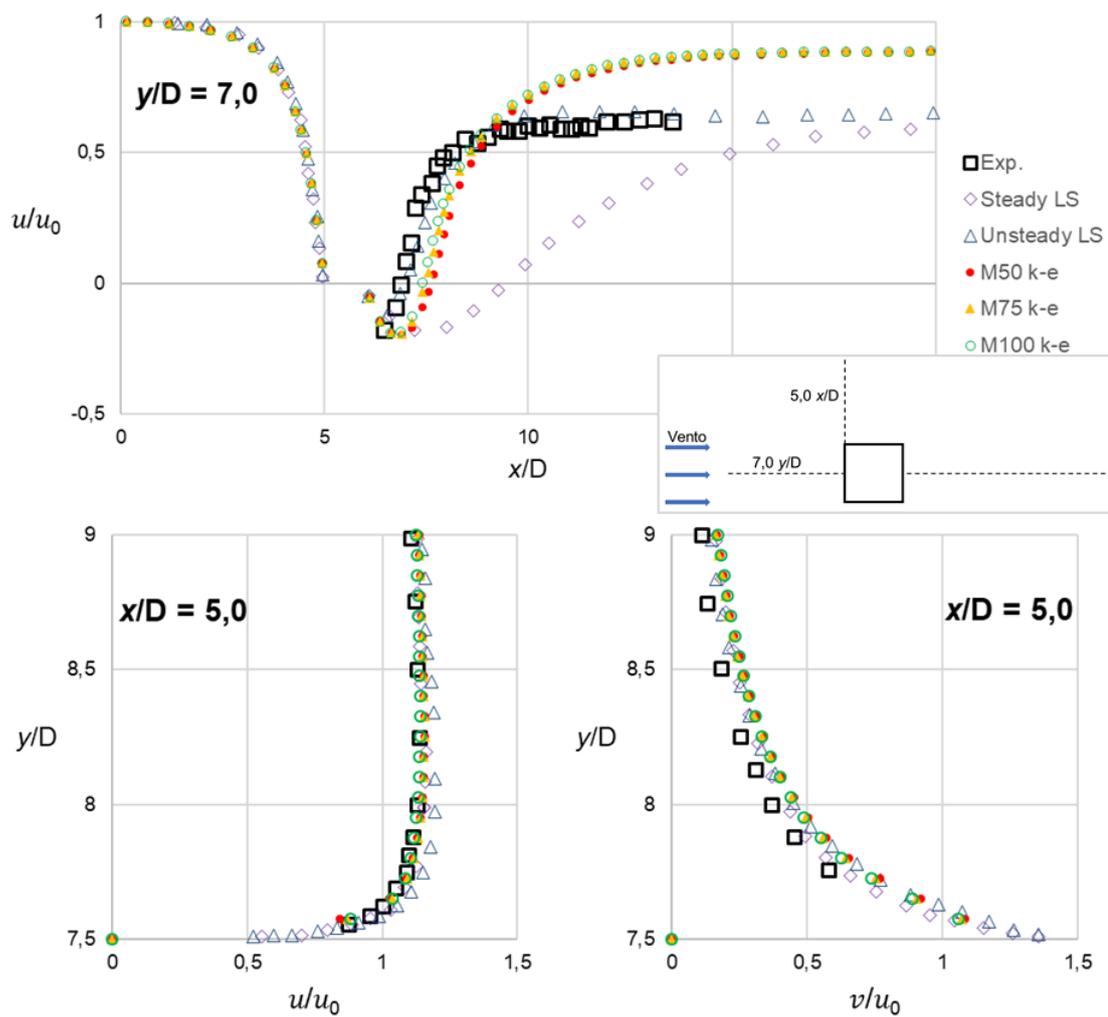
Fonte: Autor (2019).

Figura 18 – Malha M100, volumes no entorno do cilindro.

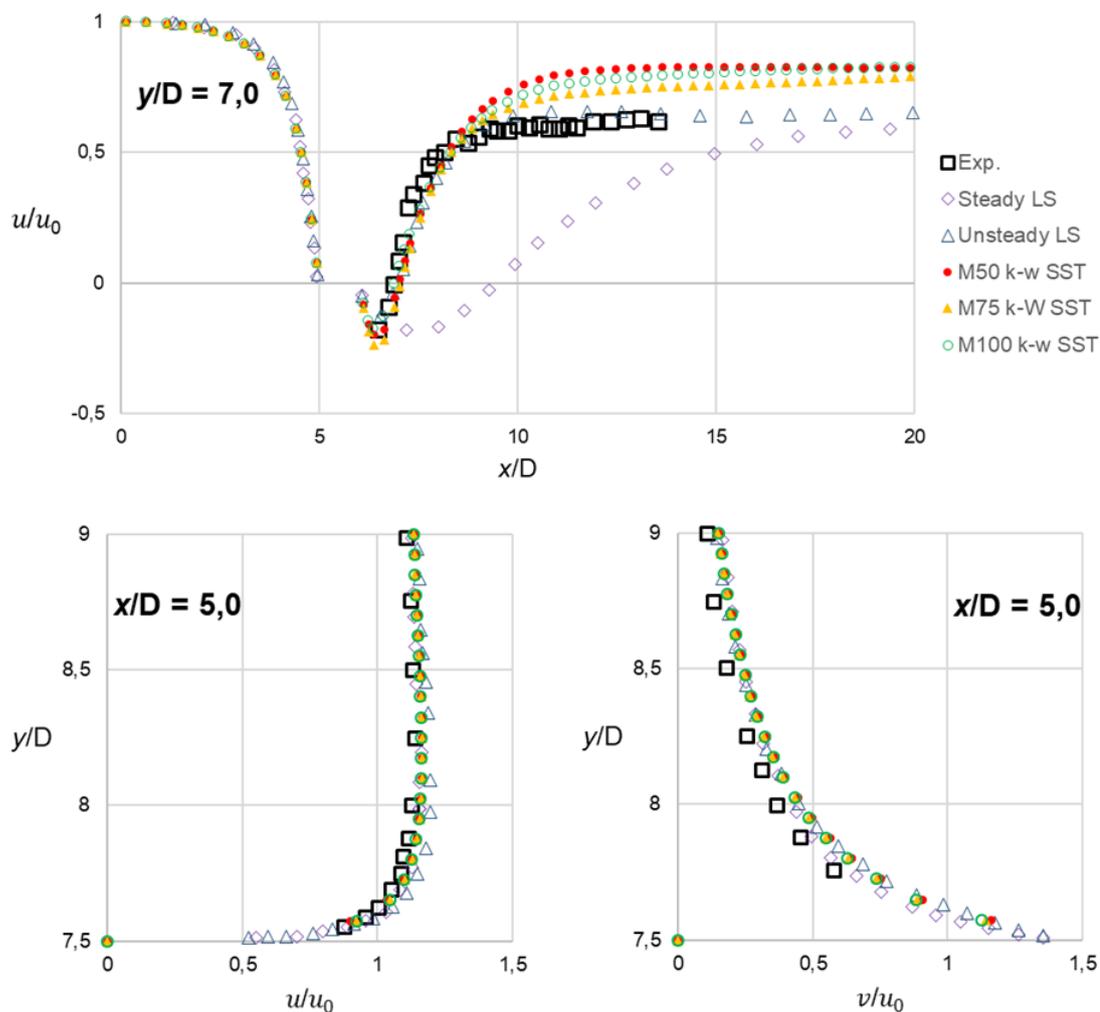


Fonte: Autor (2019).

Nos Gráficos 2 e 3, mostram-se os resultados de alguns perfis de velocidade para valores de  $y$  e  $x$  constantes. O primeiro perfil, da componente da velocidade na direção  $x$  ( $u$ ), é extraído numa linha longitudinal,  $y/D = 7,0$ , que corta o domínio ao meio. Os outros dois perfis, da componente da velocidade na direção  $y$  ( $v$ ), são extraídos de linhas transversais com origem no cilindro,  $x/D = 5,0$ . Apresentam-se os resultados das três malhas testadas (M50, M75 e M100), assim como os resultados experimentais obtidos por Lyn e Rodi (1994) e os resultados das simulações numéricas realizadas por Raisee e Jafari (2006) com o modelo de turbulência  $k-\varepsilon$  padrão de Launder e Spalding (1974) em formato Steady e Unsteady.

Gráfico 2 – Estudo de malha, modelo  $k-\varepsilon$ .

Fonte: Autor (2019).

Gráfico 3 – Estudo de malha, modelo  $k-\omega$  SST.

Fonte: Autor (2019).

Percebe-se que as três malhas em ambos os modelos apresentaram boa concordância com Lyn e Rodi (1994) e Raisee e Jafari (2006), tendo maiores diferenças na região mais afastada à sotavento. Na Tabela 1, apresentam-se os valores de média do coeficiente de arrasto ( $C_{D, \text{MÉD}}$ ) e do número de Strouhal ( $St$ ) para as malhas empregadas.

Tabela 1 – Coeficientes aerodinâmicos, cilindro quadrado, estudo de malha.

		Estudo	$C_{D, MÉD}$	St
		Lyn e Rodi (1994)	2,10	0,132
Presente Estudo	Modelo $k-\varepsilon$	M50	1,94	0,137
		M75	1,96	0,134
		M100	1,98	0,140
	Modelo $k-\omega$ SST	M50	2,20	0,114
		M75	2,22	0,106
		M100	2,23	0,129

Fonte: Autor (2019).

Percebe-se que para o modelo  $k-\omega$  SST as malhas M50 e M75, não apresentam bons resultados de número de Strouhal (St), ou seja, o refinamento das malhas ainda não é suficiente para minimizar os erros de aproximação da discretização. Além disso, a malha M100 apresenta o melhor resultado de média do coeficiente de arrasto ( $C_{D, MÉD}$ ) com o modelo  $k-\varepsilon$ . Sendo assim, para os demais resultados do presente caso, utiliza-se a malha M100.

Nos Gráficos 4 a 7, apresentam-se, para os dois modelos de turbulência RANS, as duas componentes da velocidade ( $u$  e  $v$ ) e as duas componentes das flutuações ( $u'$  e  $v'$ ) para seis valores constantes de  $x/D$ .

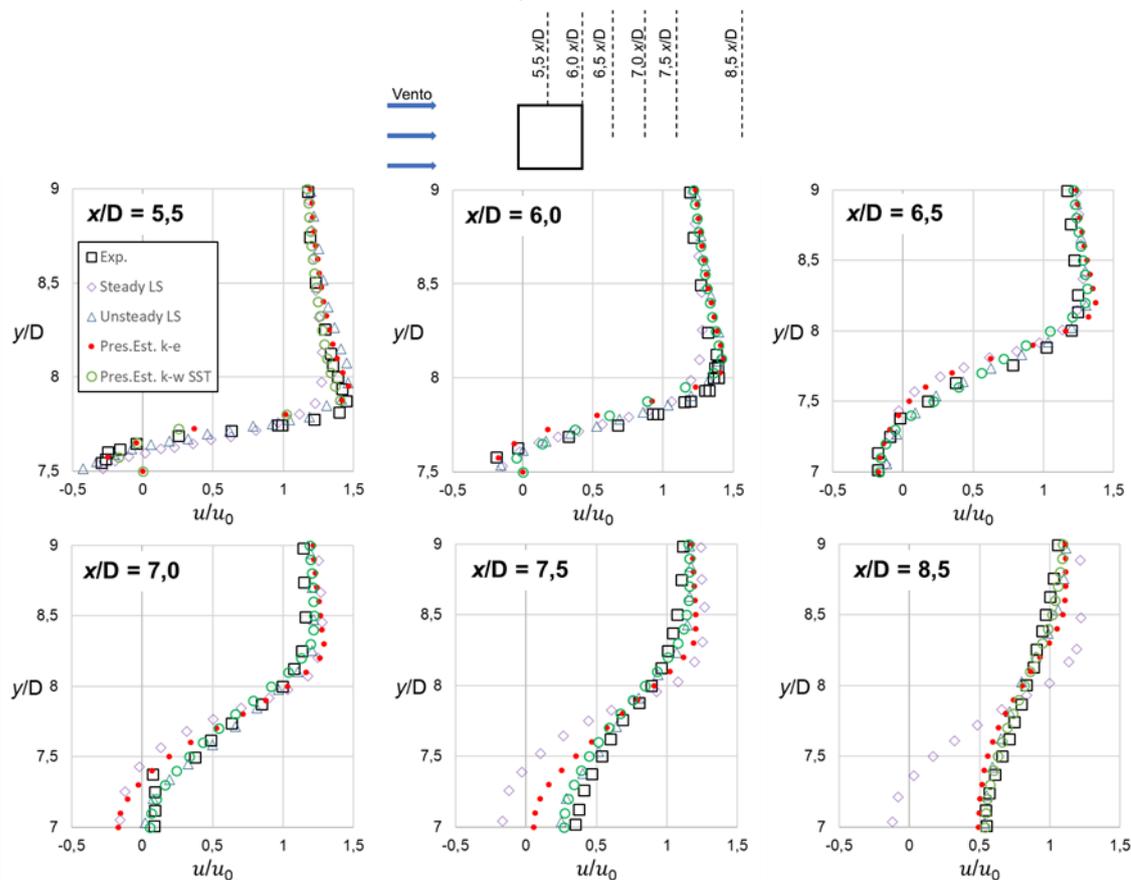
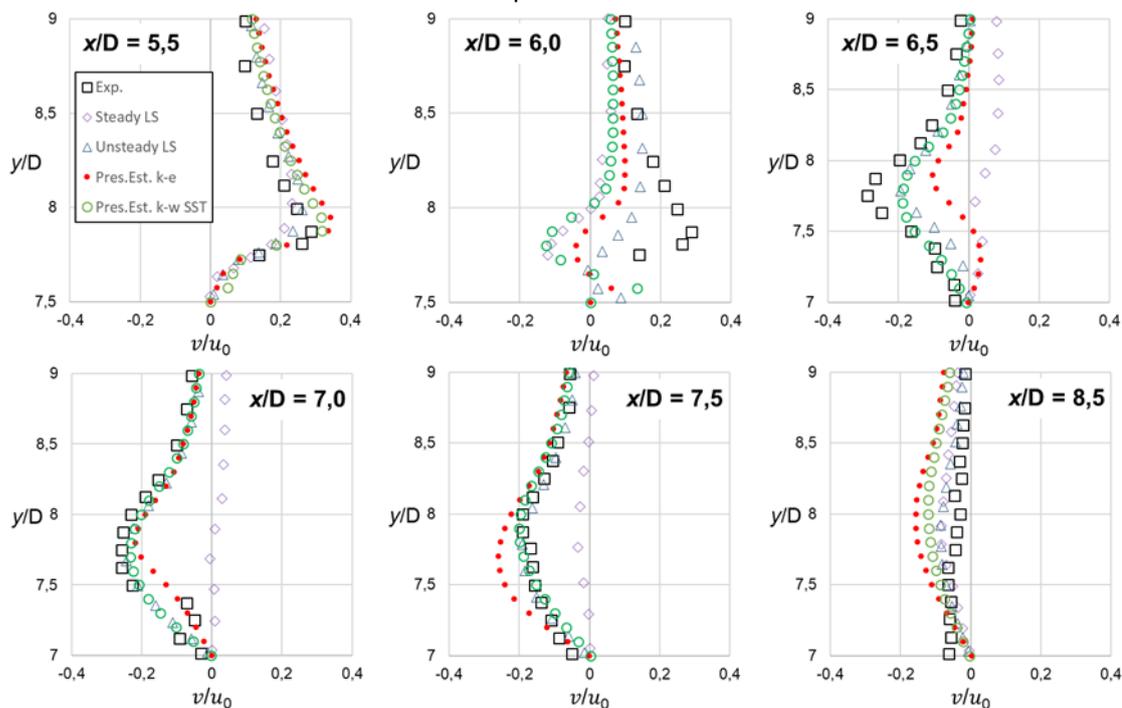
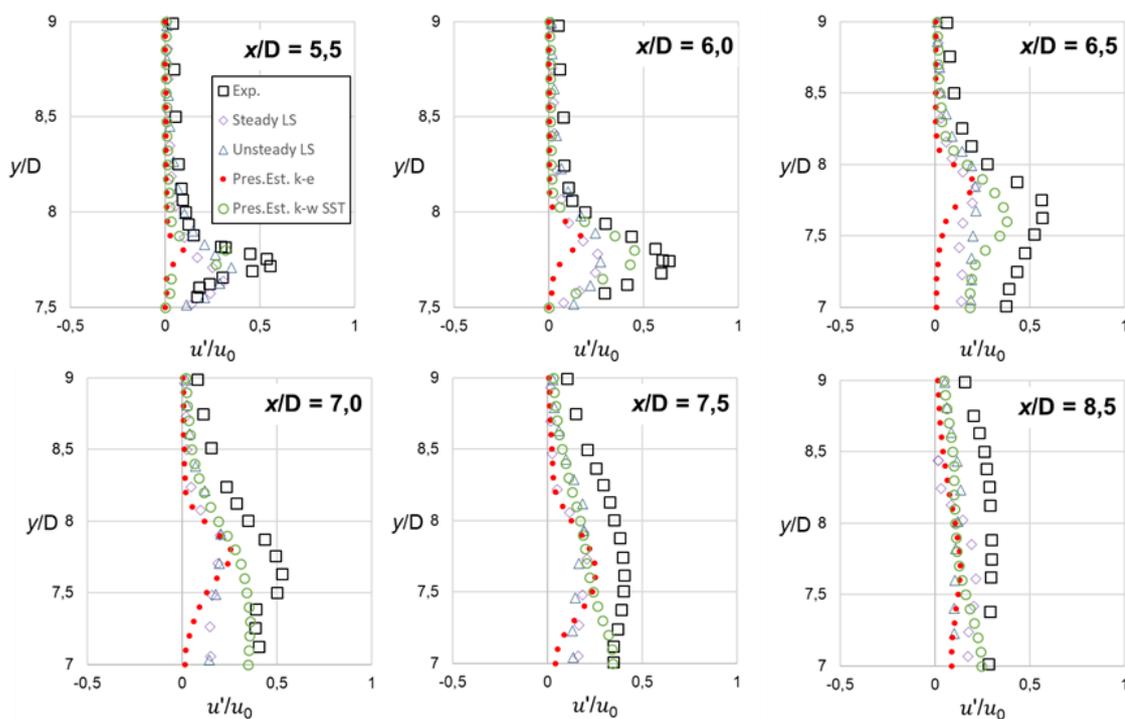
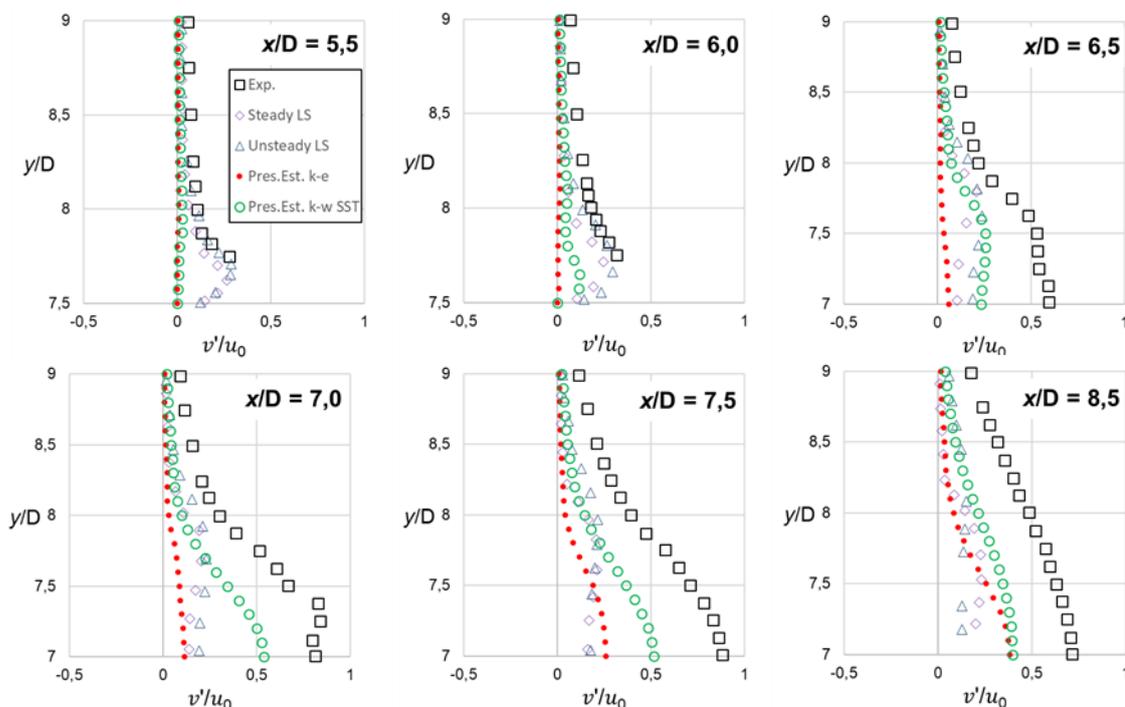
Gráfico 4 – Perfis da componente  $u$  da velocidade do vento.Gráfico 5 – Perfis da componente  $v$  da velocidade do vento.

Gráfico 6 – Perfis de flutuação da componente  $u$  (direção  $x$ ) da velocidade do vento.

Fonte: Autor (2019).

Gráfico 7 – Perfis de flutuação da componente  $v$  (direção  $y$ ) da velocidade do vento.

Fonte: Autor (2019).

Observa-se uma boa concordância entre os resultados obtidos com os apresentados por outros autores. Também se percebe que todos os modelos de turbulência, tanto os utilizados no presente trabalho quanto os empregados por Rasee

e Jafari (2006), têm dificuldade em capturar as flutuações da velocidade. De maneira geral, o modelo  $k-\omega$  SST apresenta os resultados mais próximos aos dados experimentais e, em alguns casos mostra melhores resultados que os modelos adaptados empregados por Raisee e Jafari (2006).

Na Tabela 2, mostra-se uma comparação entre os valores de raiz média quadrada do coeficiente de sustentação ( $C_{L, RMS}$ ), de média do coeficiente de arrasto ( $C_{D, MÉD}$ ) e do número de Strouhal ( $St$ ).

Tabela 2 – Coeficientes aerodinâmicos, cilindro quadrado.

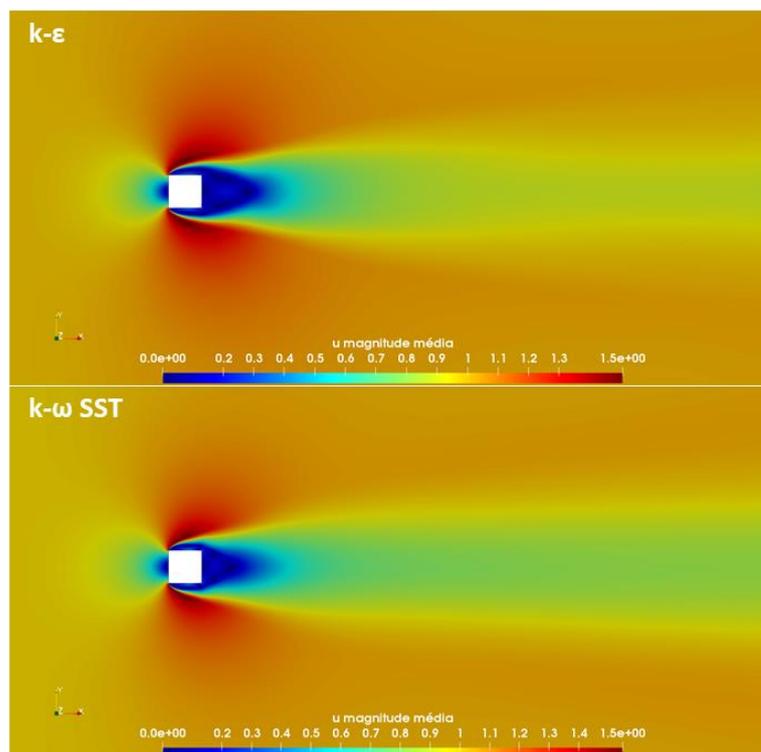
Estudo	Tipo	Re	$C_{L, RMS}$	$C_{D, MÉD}$	St
Vickery (1966)	Experimental	100000	-	2,10	0,133
Lee (1975)	Experimental	176000	0,68 – 1,32	2,05	-
Bearman e Obasaju (1982)	Experimental	20000	1,20	2,10	0,130
Norberg (1993)	Experimental	22000	-	2,10	0,130
Lyn e Rodi (1994)	Experimental	21400	-	2,10	0,132
Luo <i>et al.</i> (1994)	Experimental	34000	1,21	2,21	0,130
Minguez <i>et al.</i> (2011)	Experimental	21400	-	2,10	0,130
	Modelo LES	21400	-	2,20	0,141
Murakami e Mochida (1995)	Modelo LES	22000	1,60	2,09	0,132
Verstappen e Veldman (1998)	Modelo LES	22000	1,45	2,09	0,133
Sohankar, Davidson e Nerberg (2000)	Modelo LES	22000	1,23 – 1,54	2,03 – 2,32	0,126 – 0,132
Kato e Launder (1993)	Modelo $k-\varepsilon$ KL	22000	0,82	2,05	0,145
Bosch e Rodi (1998)	Modelo $k-\varepsilon$ padrão	22000	0,05	1,62	0,126
	Modelo $k-\varepsilon$ KL	22000	1,01	2,11	0,146
Raisee e Jafari (2006)	Modelo $k-\varepsilon$ padrão	22000	-	1,98	0,126
	Modelo $k-\varepsilon$ KK	22000	-	1,90	0,123
Zhong, Deng e Xiao (2019)	Modelo $k-\omega$ SST	25000	1,60	2,25	0,112
Trias, Gorobets e Oliva (2015)	DNS	22000	1,71	2,18	0,132
Presente Estudo	Modelo $k-\varepsilon$ padrão	21400	0,77	1,97	0,140
	Modelo $k-\omega$ SST	21400	1,44	2,23	0,129

Fonte: Autor (2019).

Ambos os modelos de turbulência apresentam bons resultados para os coeficientes aerodinâmicos. O modelo  $k-\varepsilon$  padrão mostra as máximas discrepâncias, principalmente no valor do  $C_{L, RMS}$ , isso ocorre pelas deficiências do modelo na simulação de escoamentos de baixa turbulência (WILCOX, 2006; MOUKALLED *et al.*, 2016). Por sua vez, o modelo  $k-\omega$  SST obteve excelente resultado, sendo muito semelhantes aos apresentados por Bearman e Obasaj (1982), Murakami e Mochida (1995) e Zhong, Deng e Xiao (2019).

Na Figura 19, apresentam-se as distribuições de magnitude de velocidade do vento para os dois modelos de turbulência empregados. Percebe-se que os resultados são semelhantes. Há, apenas, divergência na esteira e no formato da região de recirculação.

Figura 19 – Distribuições da magnitude da velocidade do vento.

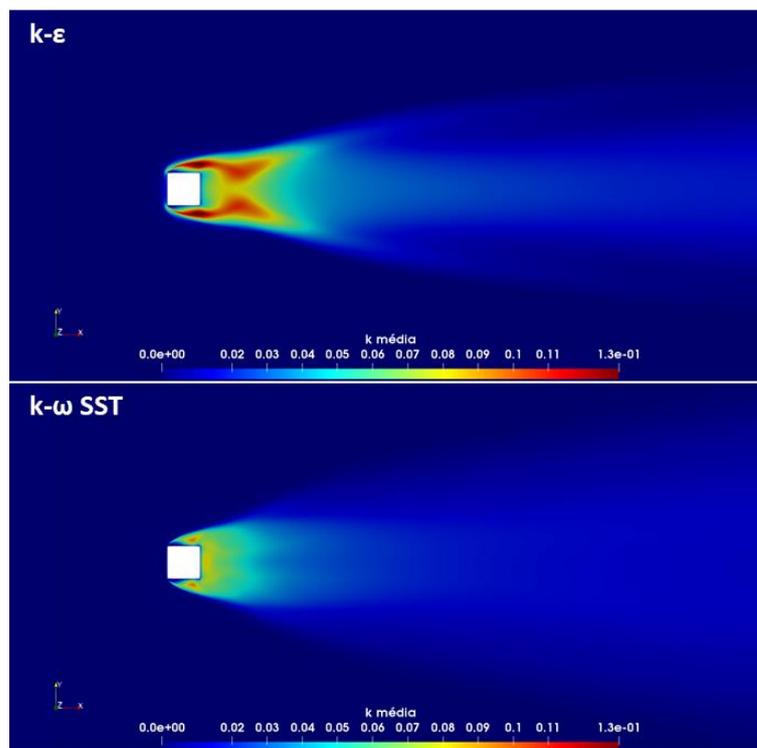


Fonte: Autor (2019).

Na Figura 20, apresentam-se as distribuições de energia cinética turbulenta média para ambos modelos de turbulência. Percebe-se, que existem diferenças nos valores e na distribuição da energia cinética turbulenta média. O modelo  $k-\varepsilon$  apresenta picos de energia cinética na região de recirculação mais afastada do cilindro quadrado, enquanto o modelo  $k-\omega$  SST gera picos de energia na região mais próxima

ao cilindro. Percebe-se, ainda, que na região posterior mais afastada a topologia entre ambos os modelos muda, isso ocorre devido ao fato do modelo  $k-\varepsilon$  modelar melhor regiões de corrente livre.

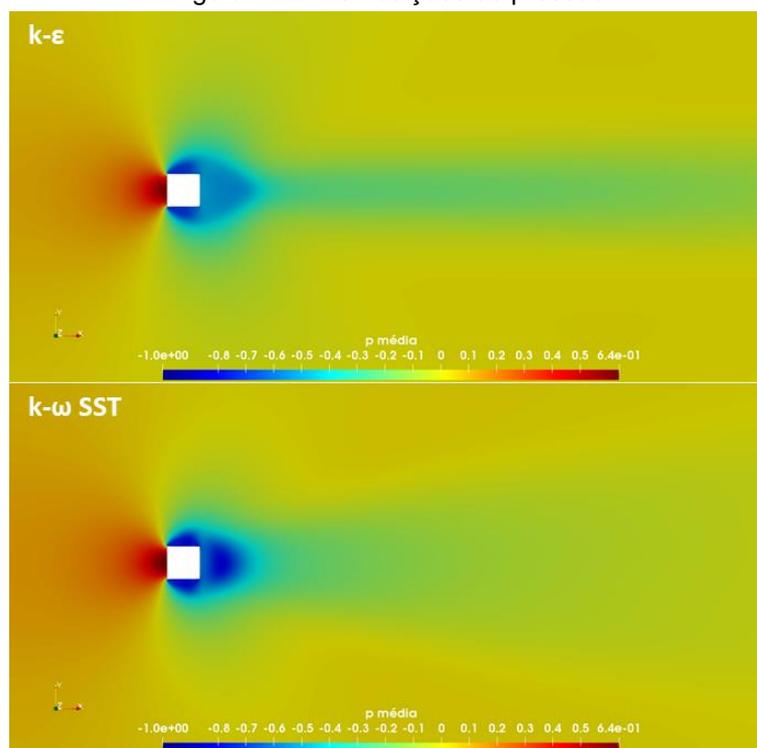
Figura 20 – Distribuições da energia cinética turbulenta.



Fonte: Autor (2019).

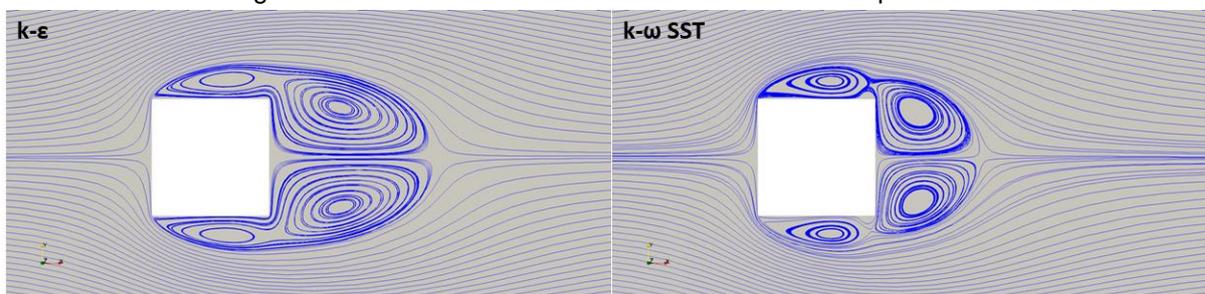
Nas Figuras 21 e 22, apresentam-se as distribuições de pressão e as linhas de corrente ao redor do cilindro quadrado para os dois modelos de turbulência. Observa-se que a sucção do modelo  $k-\omega$  SST alcança valores absolutos de pressão maiores que os valores obtidos com o modelo  $k-\varepsilon$ . Através das linhas de corrente, pode-se perceber a formação dos vórtices laterais ao cilindro e os dois vórtices contra-rotativos na região de sucção. O modelo  $k-\omega$  SST produz uma menor região de recirculação em comparação com o modelo  $k-\varepsilon$ .

Figura 21 – Distribuições de pressão.



Fonte: Autor (2019).

Figura 22 – Linhas de corrente no entorno do cilindro quadrado.



Fonte: Autor (2019).

Samion *et al.* (2016) simulou o mesmo exemplo, utilizando o modelo  $k-\omega$  SST. Compara-se, na Tabela 3, os valores de comprimento ( $R_1$ ) e a distância entre centros ( $R_2$ ) na região de recirculação.

Tabela 3 – Comparação de comprimentos de vórtice para o cilindro quadrado.

Estudo	$R_1$ (D)	$R_2$ (D)
Samion <i>et al.</i> (2016)	0,82	0,72
Presente Estudo Modelo $k-\varepsilon$	1,40	0,85
Presente Estudo Modelo $k-\omega$ SST	0,90	0,78

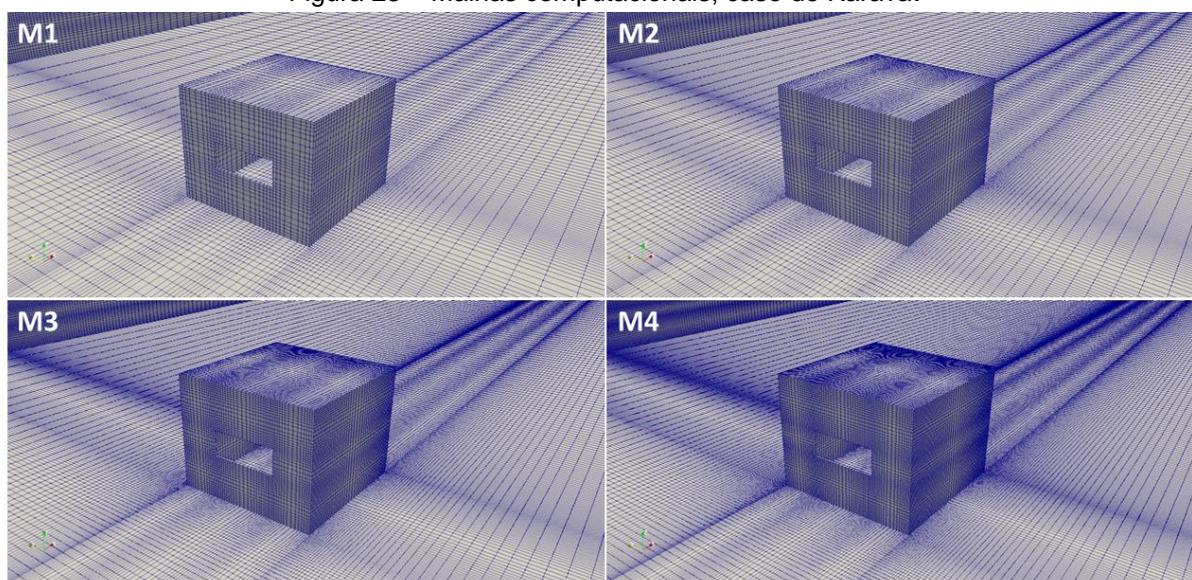
Fonte: Autor (2019).

Novamente, devido ao baixo Reynolds, percebe-se que o modelo  $k-\omega$  SST consegue captar melhor o escoamento nas proximidades do cilindro quadrado.

## 6.2 CASO DE KARAVA

Na Figura 23, mostram-se as quatro malhas empregadas para o estudo de refinamento de malha para o caso do modelo de edificação genérico. As malhas totalizaram 741.346, 1.764.522, 3.420.480 e 5.929.984 de volumes de controle, respectivamente.

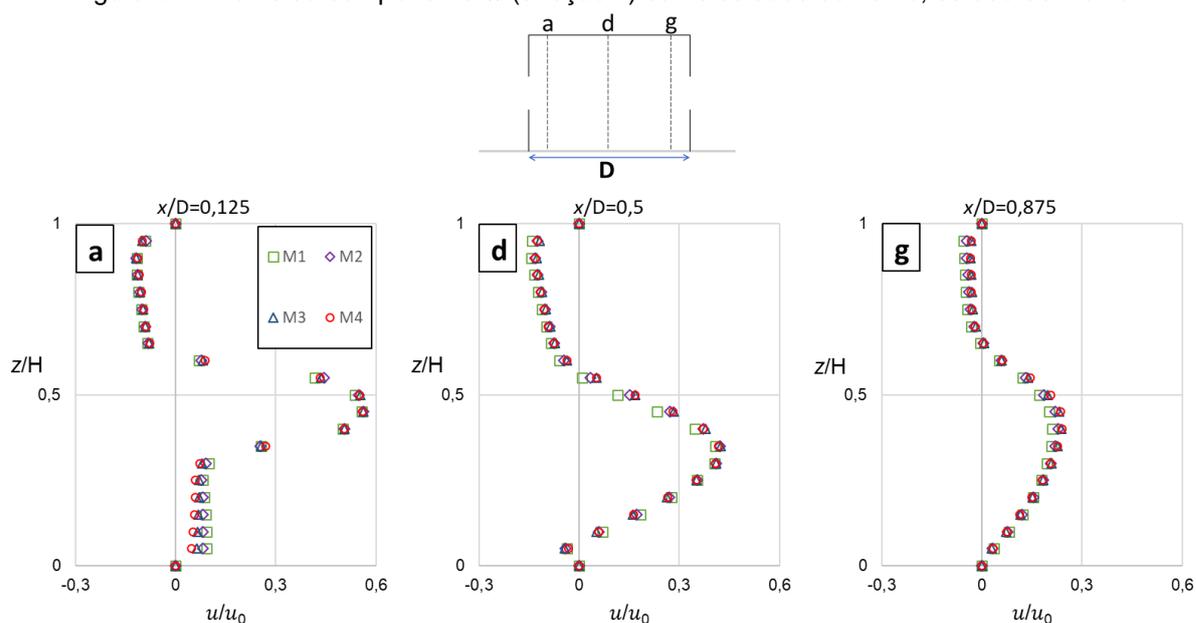
Figura 23 – Malhas computacionais, caso de Karava.



Fonte: Autor (2019).

Na Figura 24, apresentam-se os perfis de velocidade do escoamento (componente  $u$ ) para as malhas M1, M2, M3 e M4 em três valores constantes de  $x/D$  (interior da edificação).

Figura 24 – Perfis da componente  $u$  (direção  $x$ ) da velocidade do vento, estudo de malha.



Fonte: Autor (2019).

As quatro malhas apresentam resultados próximos, há apenas diferença na região entre as duas aberturas. Na Tabela 4, apresenta-se o valor do fluxo de ar na edificação obtido com as malhas empregadas, além do resultado experimental obtido em túnel de vento por Tominaga e Blocken (2015).

Tabela 4 – Vazão adimensionalizada, caso de Karava, estudo de malha.

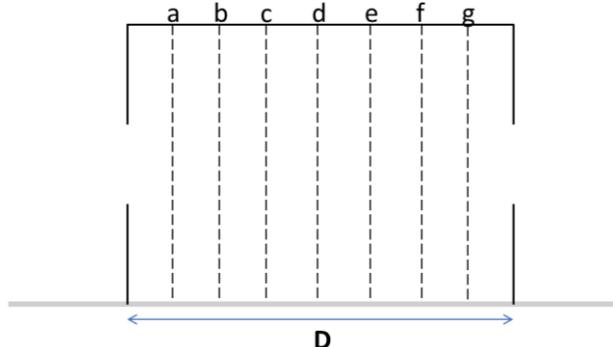
Estudo		$Q/u_H A_{abert}$	Desvio (%)
Exp.		0,500	-
Presente Estudo	M1	0,445	11,0
	M2	0,465	7,0
	M3	0,474	5,2
	M4	0,485	3,0

Fonte: Autor (2019).

Percebe-se que a malha M4 apresenta resultado de vazão mais próximo do resultado experimental, mostrando maior acurácia em comparação com as demais malhas. Sendo assim, utiliza-se a malha M4 para análise do caso.

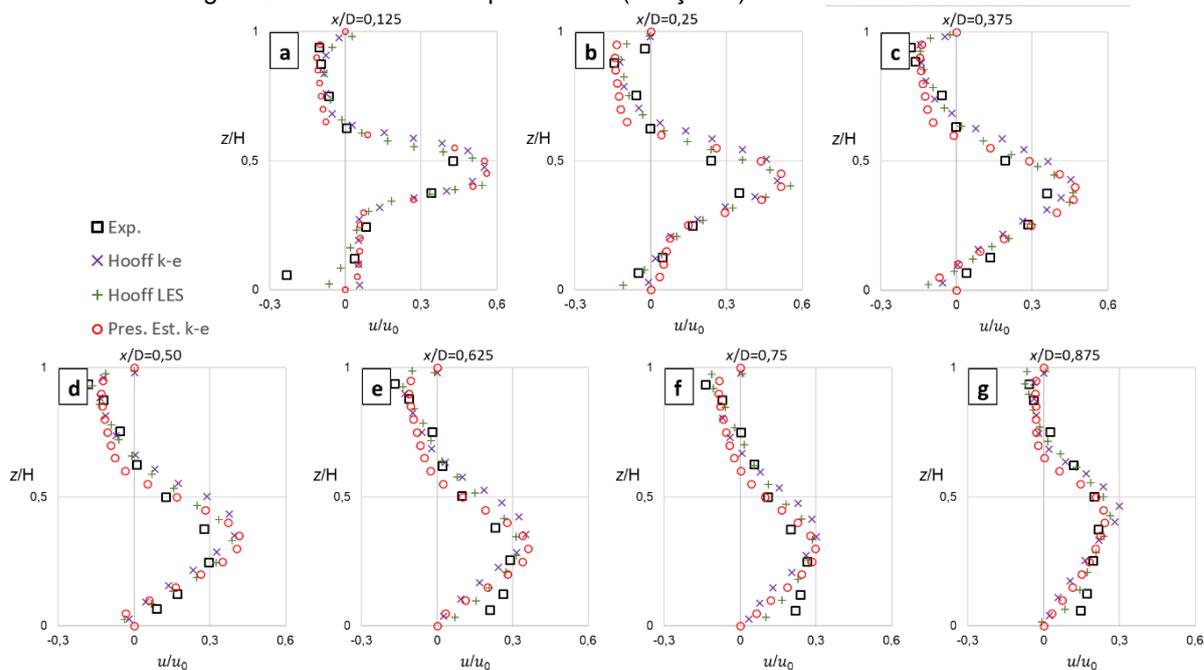
Nas Figuras 26 e 27, apresentam-se os perfis da componente  $u$  da velocidade do escoamento e da energia cinética turbulenta para sete cortes com  $x/D$  constante realizados no interior da cavidade (ver Figura 25).

Figura 25 – Esquema de perfis para o estudo geral, caso de Karava.



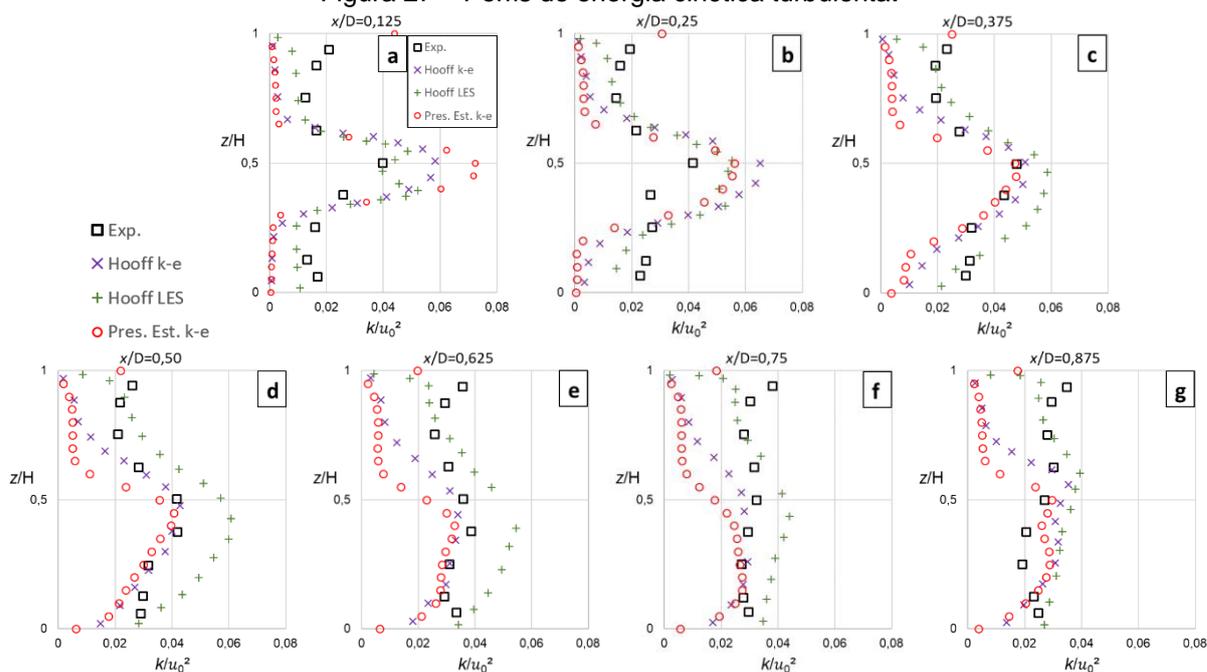
Fonte: Autor (2019).

Figura 26 – Perfis da componente  $u$  (direção  $x$ ) da velocidade do vento.



Fonte: Autor (2019).

Figura 27 – Perfis de energia cinética turbulenta.



Fonte: Autor (2019).

Os perfis da componente de velocidade apresentam boa concordância quando comparados com os resultados numéricos de Hooff, Blocken e Tominaga (2017). Nos perfis de energia cinética, contudo, houve divergências nas distribuições e nos valores das amplitudes. Percebe-se que os modelos de turbulência baseados nos esquemas RANS mostram as maiores dificuldade de capturar corretamente os perfis de energia cinética. O modelo LES utilizado por Hooff, Blocken e Tominaga (2017), apresenta as menores discrepâncias em relação aos resultados experimentais.

Na Tabela 5, apresenta-se o valor da vazão na edificação. Para fins de comparação, também são apresentados os valores obtidos por Hooff, Blocken e Tominaga (2017) com dois modelos de turbulência, além do resultado experimental obtido por Tominaga e Blocken (2015). Percebe-se que o valor da vazão obtida no presente trabalho tem ótima concordância com os resultados experimentais e numéricos.

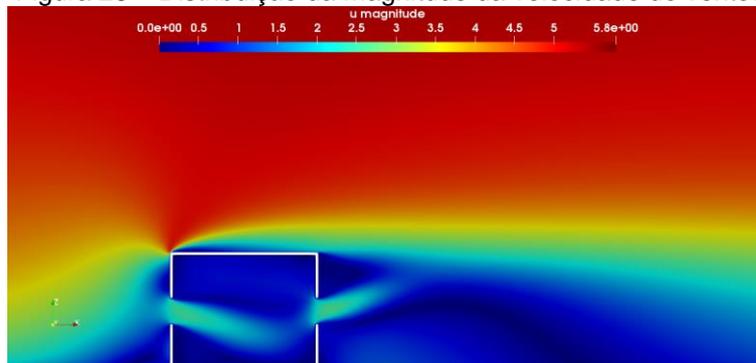
Tabela 5 – Vazão adimensionalizada, caso de Karava.

Estudo	$Q/u_H A_{abert}$	Desvio (%)
Exp.	0,500	-
Hooff $k-\varepsilon$	0,483	3,5
Hooff LES	0,538	7,6
Presente Est.	0,485	3,0

Fonte: Autor (2019).

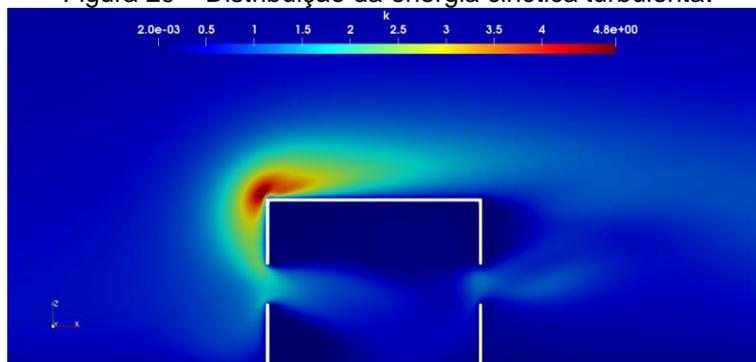
Apresentam-se, nas Figuras 28 e 29, as distribuições da velocidade (magnitude) do escoamento e a energia cinética turbulenta no plano de simetria ( $x-z$ ) do domínio computacional. Pode-se observar a topologia do escoamento ao redor do modelo de edificação. Na aresta superior da fachada frontal há um pico de energia cinética, que ocorre devido à separação do escoamento.

Figura 28 – Distribuição da magnitude da velocidade do vento.



Fonte: Autor (2019).

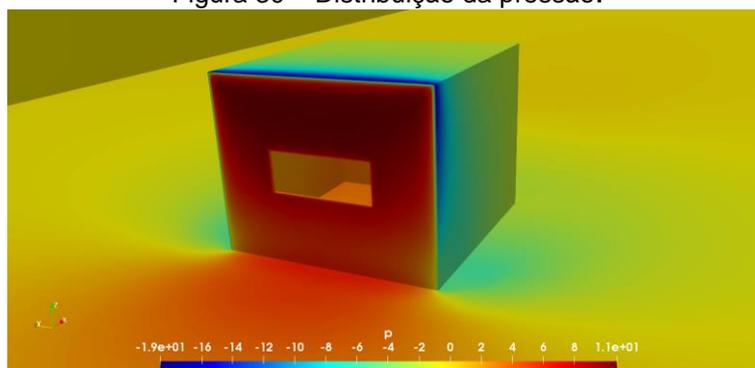
Figura 29 – Distribuição da energia cinética turbulenta.



Fonte: Autor (2019).

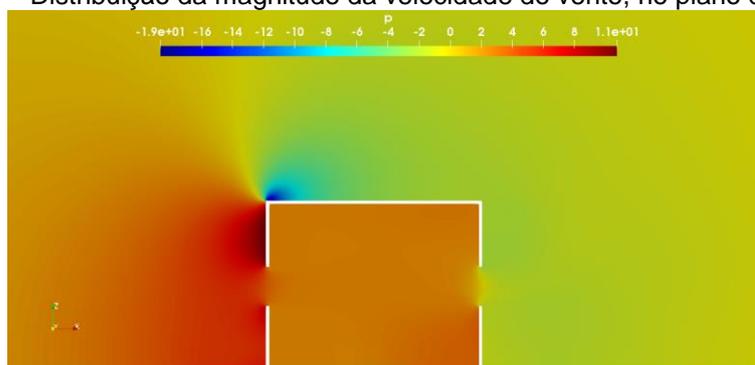
Nas Figuras 30 e 31, mostra-se a distribuição de pressão no entorno do modelo. Percebe-se que a pressão aumenta na parte superior da fachada frontal e decresce drasticamente após a separação do escoamento. Vale lembrar que quanto maior a diferença de pressão entre as fachadas da edificação, maior é o seu o potencial de ventilação cruzada (LOFTNESS E HAASE, 2013).

Figura 30 – Distribuição da pressão.



Fonte: Autor (2019).

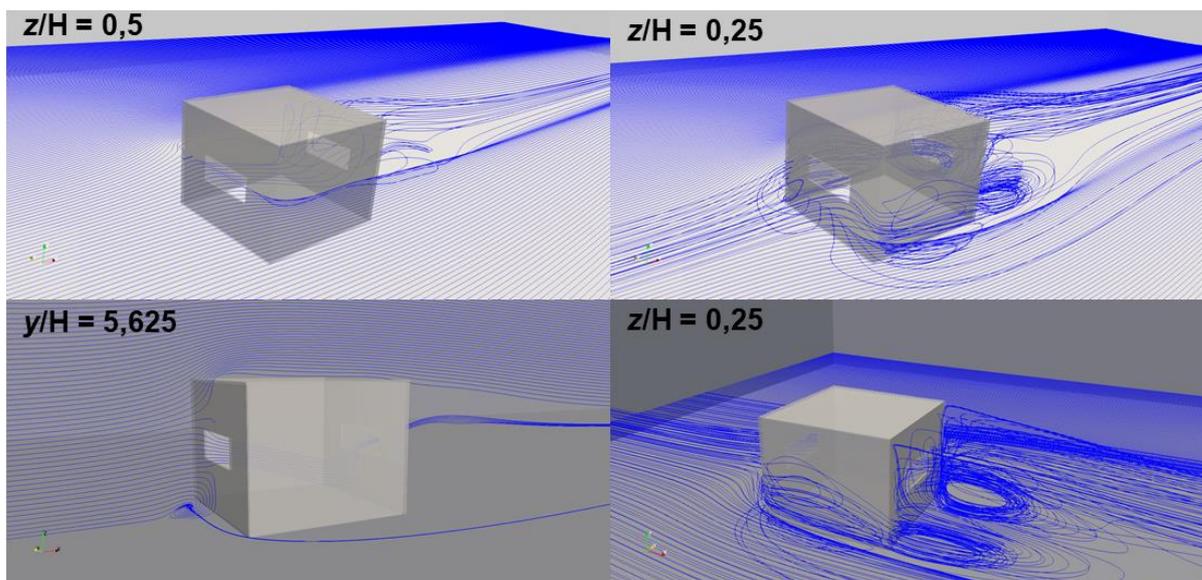
Figura 31 – Distribuição da magnitude da velocidade do vento, no plano de simetria.



Fonte: Autor (2019).

Finalmente, apresenta-se, na Figura 32, a topologia do escoamento através de linhas de corrente dispostas em três diferentes planos. Pode-se observar a formação de diferentes vórtices ao redor do modelo, sendo os principais: o vórtice de base que se forma na região inferior da fachada frontal, o vórtice lateral e o vórtice ferradura que se forma na região de recirculação.

Figura 32 – Linhas de corrente, caso de Hooff.

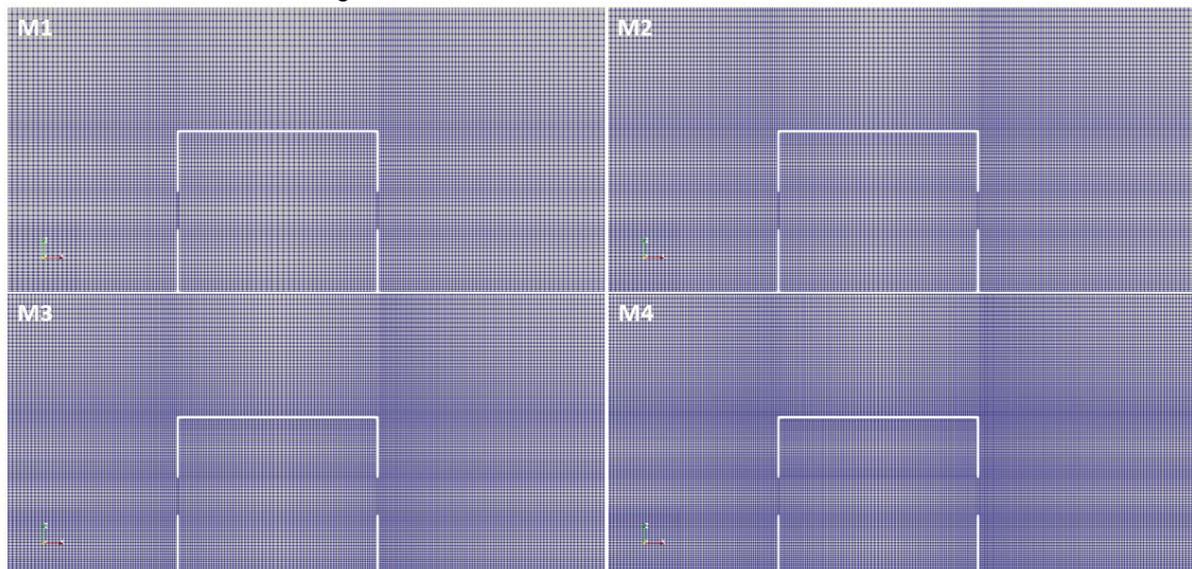


Fonte: Autor (2019).

### 6.3 CASO DE KARAVA EM 2D

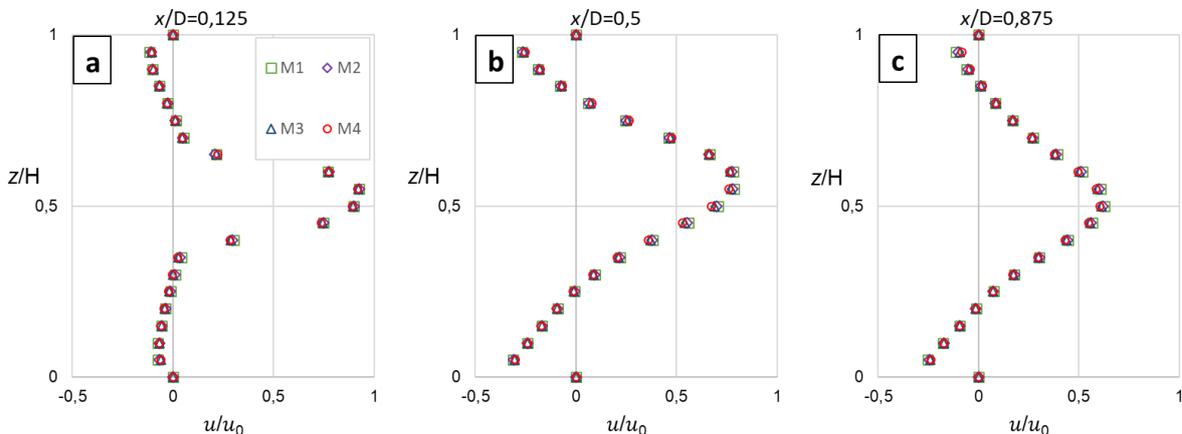
As discretizações empregadas nas proximidades da edificação no estudo de independência de malha são apresentadas na Figura 33. As quatro malhas totalizaram 39.001, 56.048, 76.177 e 99.735 volumes de controle, respectivamente.

Figura 33 – Malhas testadas no caso Karava 2D.



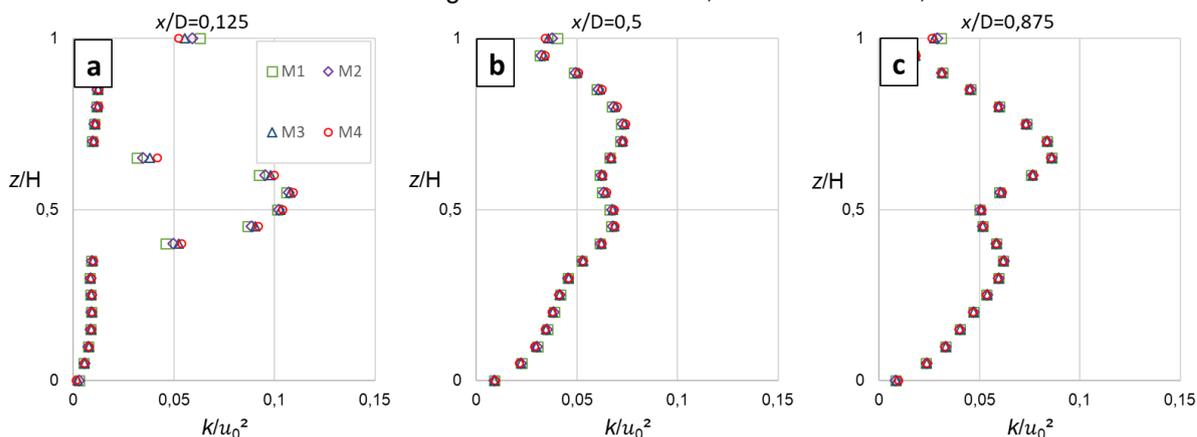
Fonte: Autor (2019).

Mostram-se, nos Gráficos 8 e 9, os perfis de velocidade (componente  $u$ ) do escoamento e a energia cinética turbulenta utilizando o modelo de turbulência  $k-\varepsilon$  no interior da edificação para  $x/D = 0,125, 0,50$  e  $0,875$ .

Gráfico 8 – Perfis da componente  $u$  (direção  $x$ ) da velocidade do vento, estudo de malha, Karava 2D.

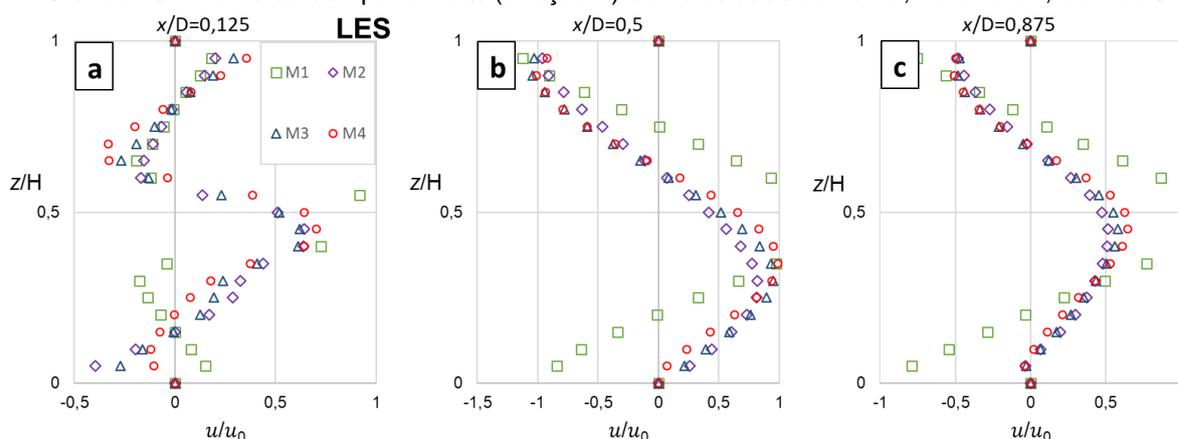
Fonte: Autor (2019).

Gráfico 9 – Perfis de energia cinética turbulenta, estudo de malha, Karava 2D.



Fonte: Autor (2019).

Percebe-se nos perfis de energia cinética turbulenta que na altura média da edificação as malhas menos refinadas influenciam os resultados, principalmente em  $x/D = 0,125$  (perfil “a”). No Gráfico 10, mostram-se os perfis de velocidade (componente  $u$ ) obtidos nas mesmas posições, utilizando, agora, o modelo de turbulência LES.

Gráfico 10 – Perfis da componente  $u$  (direção  $x$ ) da velocidade do vento, Karava 2D, com LES.

Fonte: Autor (2019).

Percebe-se que os perfis obtidos com o modelo de turbulência LES ainda apresentam pequenas diferenças entre as malhas M3 e M4. Na Tabela 6, mostra-se o valor da vazão adimensionalizada para as quatro malhas analisadas com os dois modelos de turbulência. Em função dos resultados mostrados, adotou-se para os casos das três edificações o máximo refinamento nas arestas (malha M4). Portanto, o número mínimo e máximo de volumes de controle empregados na simulação dos 12 casos (ver Quadro 7) variam entre 144743 e 362372, respectivamente.

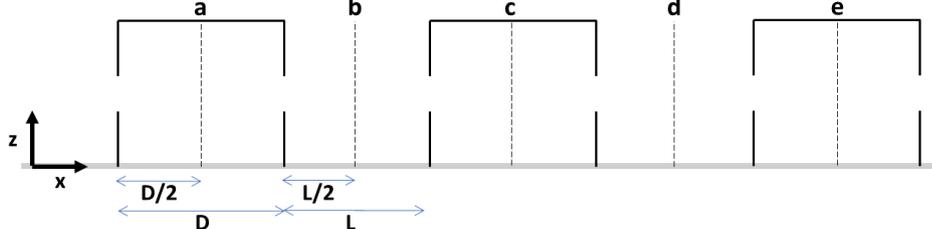
Tabela 6 – Vazão adimensionalizada, caso de Karava, estudo de malha, caso 2D.

Malha	$Q/u_H A_{abert}$	
	RANS	LES
M1	0,729	0,867
M2	0,737	0,554
M3	0,741	0,561
M4	0,741	0,596

Fonte: Autor (2019).

Nos Gráficos 11 a 13, apresentam-se, para as quatro separações entre as edificações e as três inclinações do terreno, os perfis da componente  $u$  da velocidade obtidos com o modelo de turbulência  $k-\varepsilon$  para cinco valores de  $x/D$  constante conforme mostrados no esquema da Figura 34.

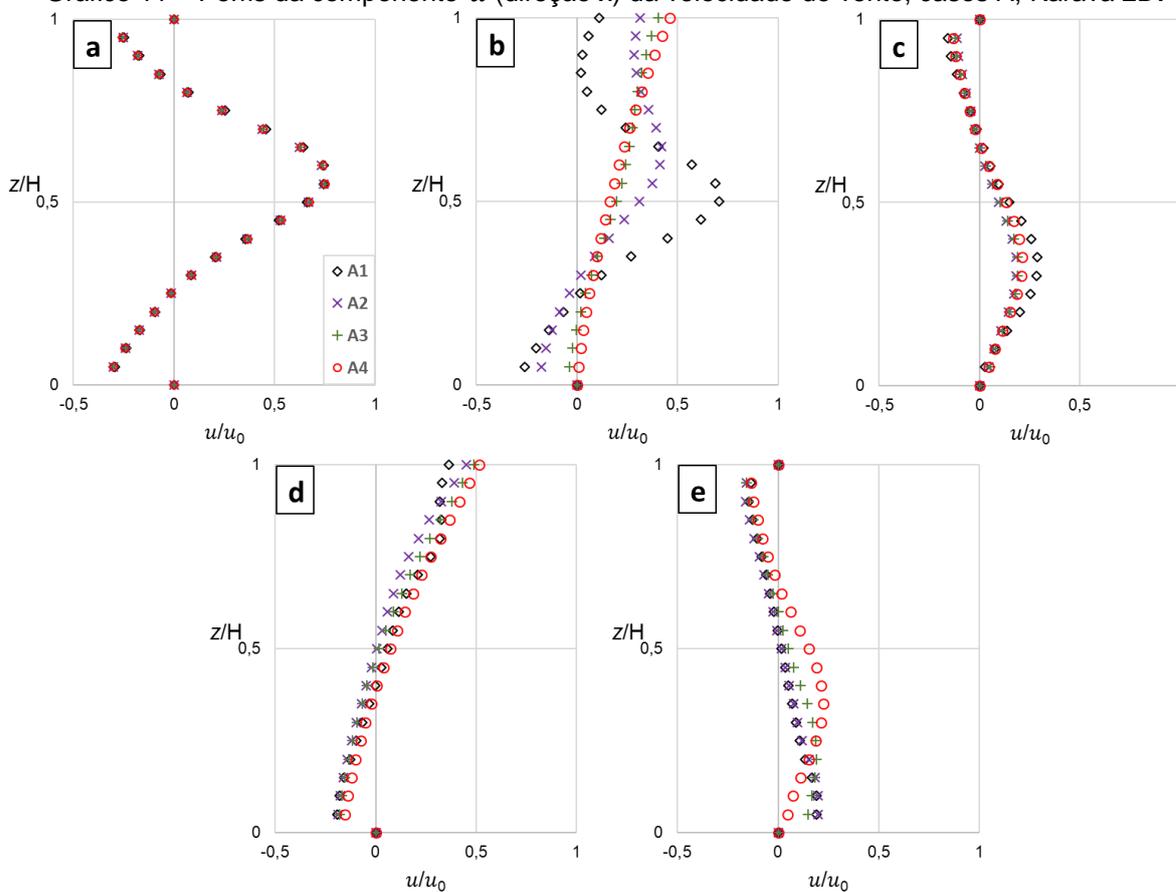
Figura 34 – Esquema de perfis para o estudo geral, caso de Karava 2D.



Fonte: Autor (2019).

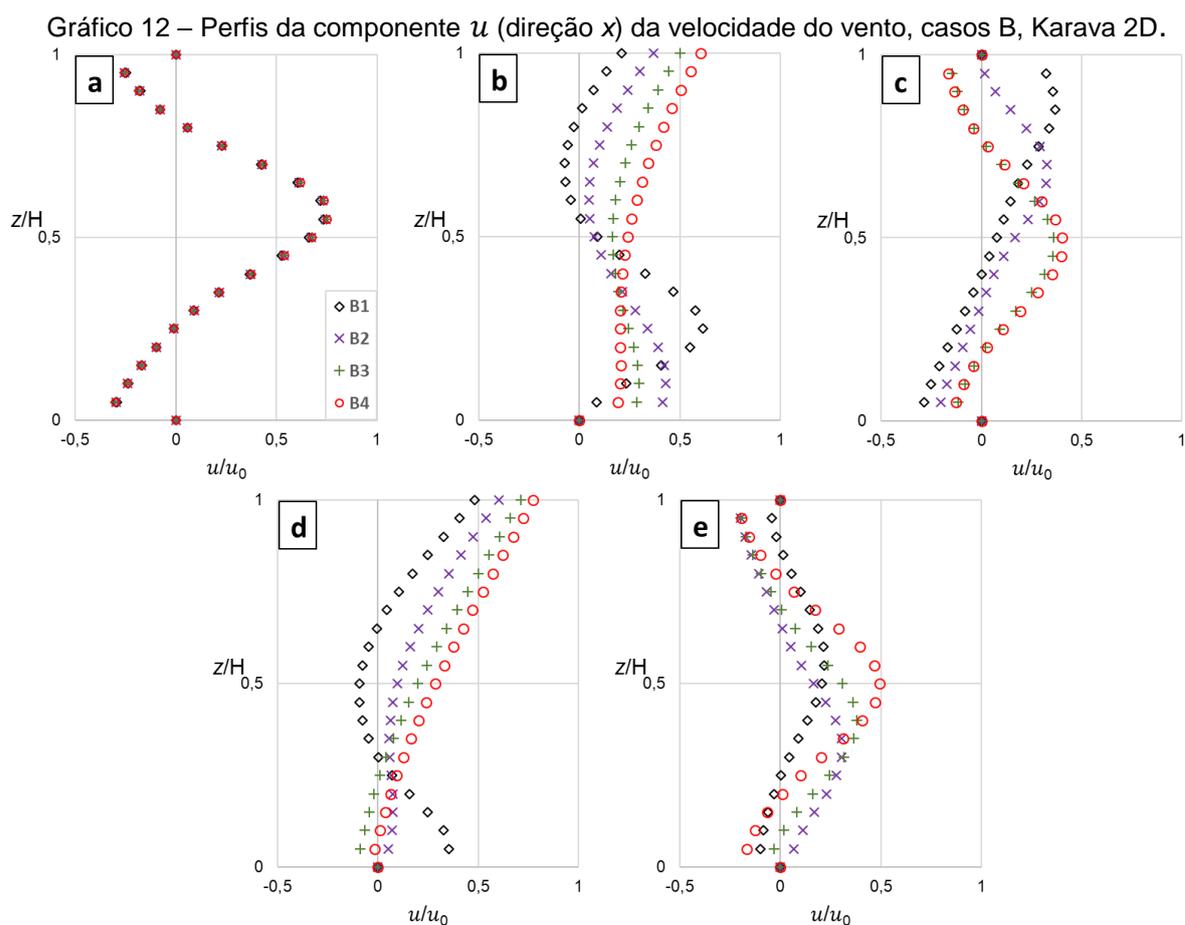
Para os perfis no caso da inclinação do terreno nula não se percebem grandes variações, ver Gráfico 11. Há divergências apenas nos perfis do corte “b”, onde o aumento na distância entre a primeira e a segunda edificação fazem com que os máximos valores da velocidade sejam minimizados. Percebe-se também que o aumento da distância entre as edificações induz um leve deslocamento do pico de máxima velocidade do escoamento no interior da terceira edificação, e, portanto, uma mudança na topologia do escoamento, conforme pode-se observar no Apêndice C.

Gráfico 11 – Perfis da componente  $u$  (direção  $x$ ) da velocidade do vento, casos A, Karava 2D.



Fonte: Autor (2019).

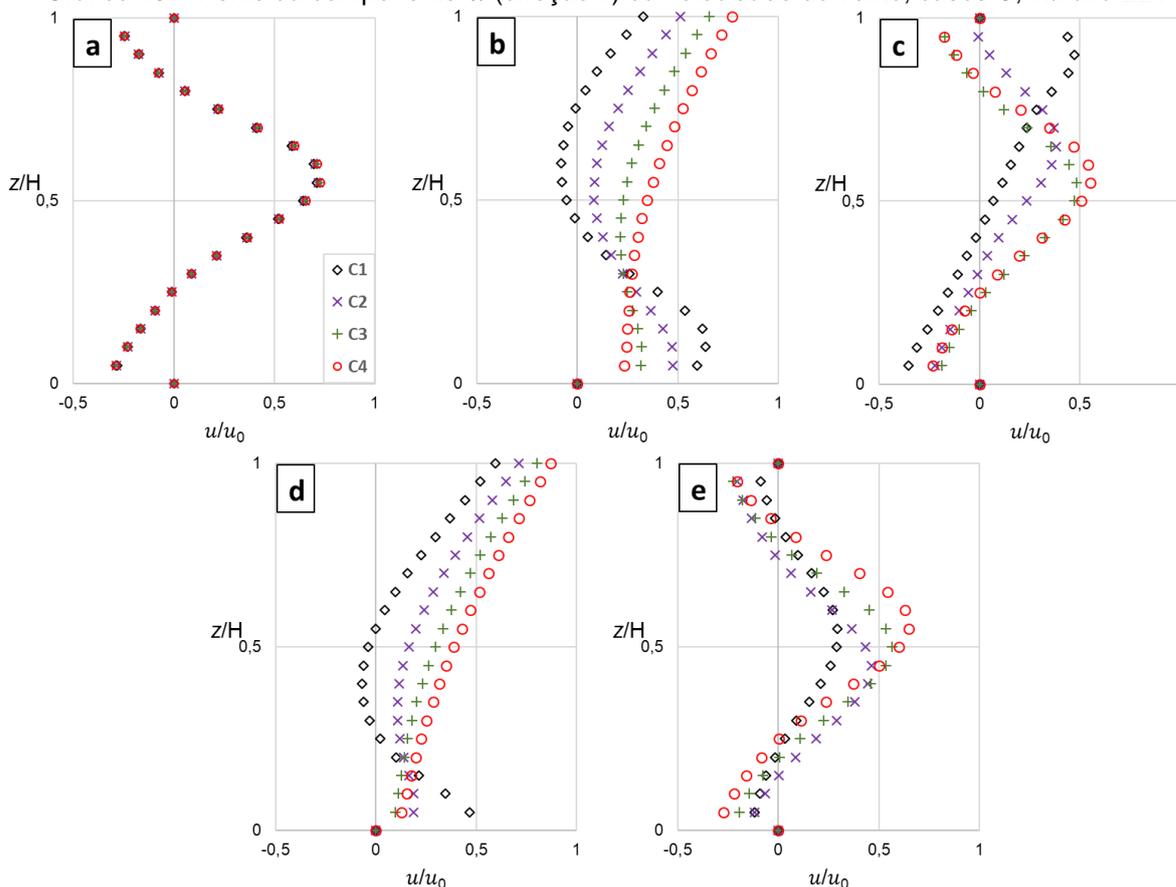
Nos casos B (inclinação do terreno igual a 5 graus), percebe-se que a aumento da distância entre as edificações origina mudanças significativas no escoamento, ver Gráfico 12. A partir do corte “b”, as posições e os valores dos pontos de máximo e mínimo da componente  $u$  da velocidade apresentam variações importantes. Isto origina alterações na topologia do escoamento. Por exemplo, no corte “c” o máximo valor positivo da velocidade  $u$  desloca-se da parte superior à região central conforme se aumenta a distância entre as edificações. No Apêndice C, pode-se ver como esta mudança afeta a topologia do escoamento, convertendo um grande vórtice em dois vórtices contrarrotativos de menor tamanho. No corte “e” todas as configurações fazem com que o escoamento seja formado por dois vórtices, e, conforme se aumenta a distância entre edificações, aumenta-se também o pico de velocidade positiva que se dá no encontro dos dois vórtices.



Observa-se no Gráfico 13, que os perfis no exemplo da inclinação do terreno igual a 10 graus (caso C), são semelhantes aos obtidos no caso B, contudo, percebe-

se que o aumento da inclinação do terreno origina um incremento nos valores da velocidade. Logo, espera-se que o aumento da inclinação favoreça a ventilação na segunda e na terceira edificação.

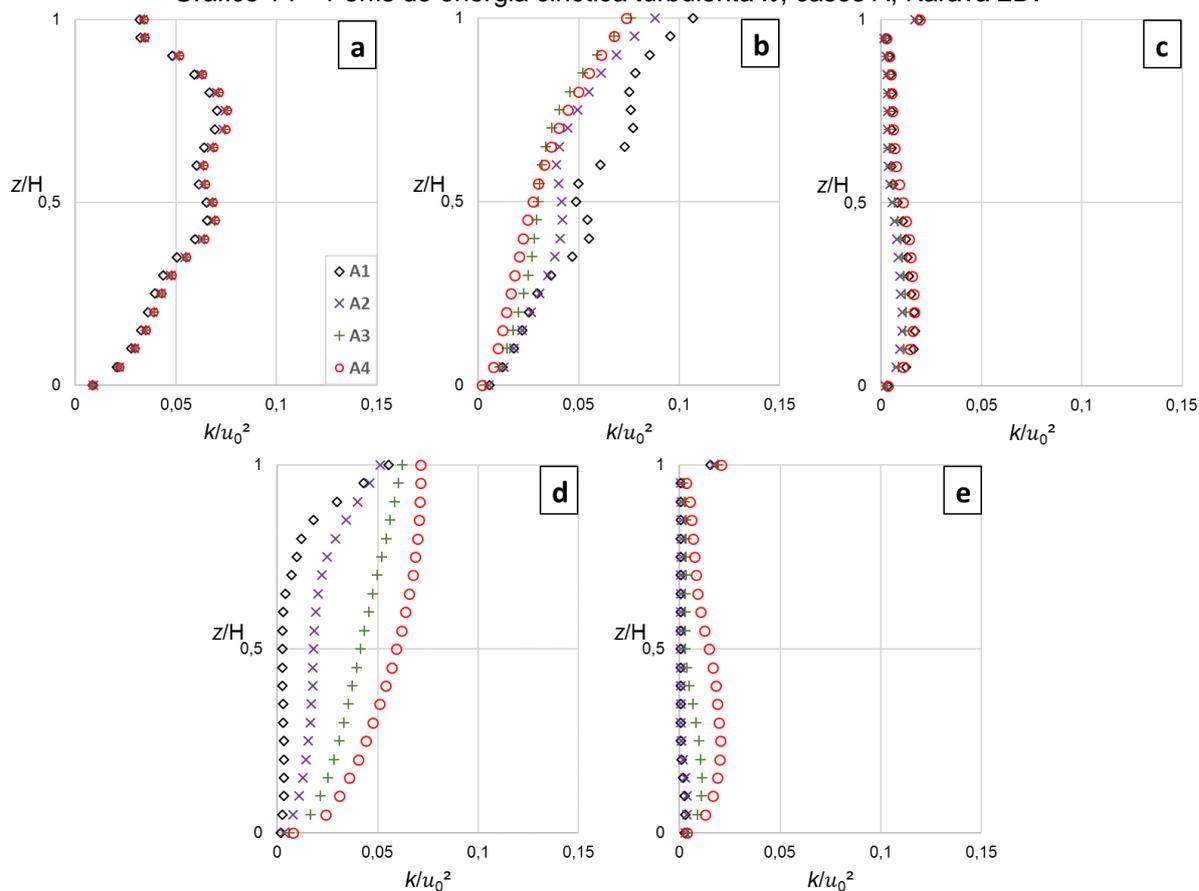
Gráfico 13 – Perfis da componente  $u$  (direção  $x$ ) da velocidade do vento, casos C, Karava 2D.



Fonte: Autor (2019).

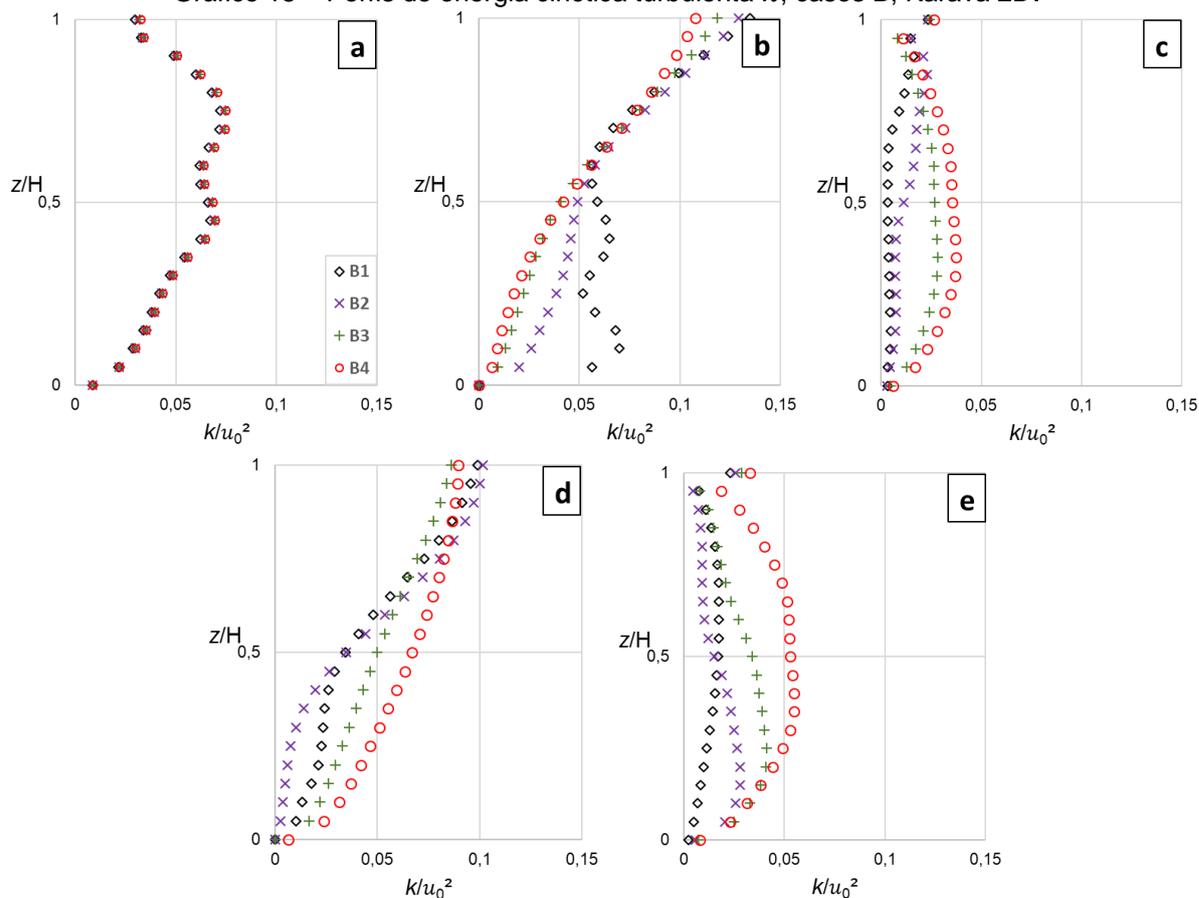
A distribuição de energia cinética turbulenta para as 4 separações entre as edificações e as 3 inclinações do terreno considerando o modelo de turbulência  $k-\varepsilon$  para cinco valores de  $x/D$  constante apresentam-se nos Gráficos 14 a 16.

Para os perfis no caso da inclinação do terreno nula (caso A) se percebem grandes variações de energia nos cortes feitos fora das edificações (cortes “b” e “d”), ver Gráfico 14. No corte “b” o formato dos perfis foi semelhante, contudo, as duas configurações com menores distâncias entre edificações (A1 e A2) apresentaram maiores valores de energia e uma distribuição menos suave. Já para o corte “d”, houve mudança no formato dos perfis e aumento na energia conforme se aumentou as distâncias. Percebe-se que a energia também aumentou no corte “e” quando se aumentou a distância entre as edificações.

Gráfico 14 – Perfis de energia cinética turbulenta  $k$ , casos A, Karava 2D.

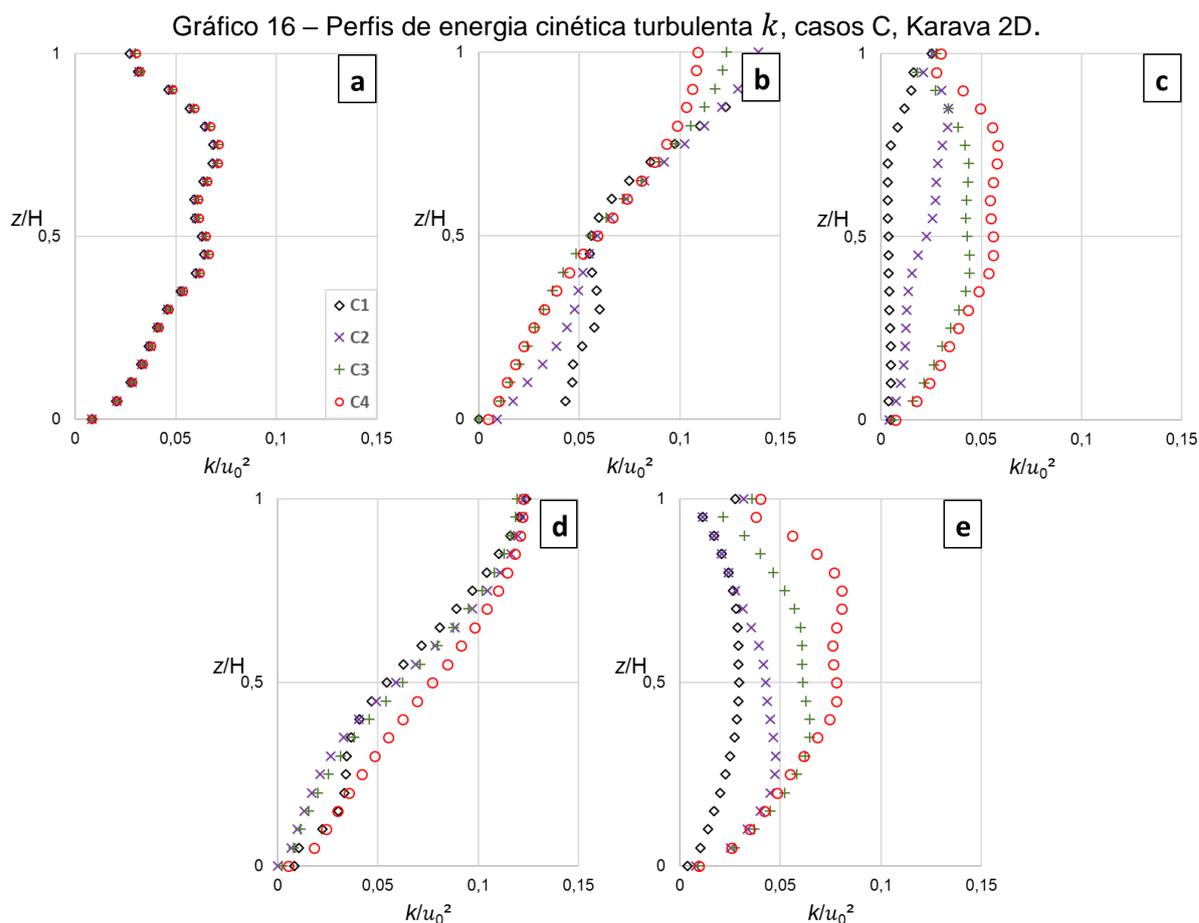
Fonte: Autor (2019).

Para os perfis no caso da inclinação do terreno igual a 5 graus (caso B), se percebem comportamentos semelhantes aqueles vistos no caso com inclinação nula (caso A), ver Gráfico 15. No corte “c”, entretanto, o aumento das distâncias provocou grandes mudanças nos perfis, que passaram de ter os máximos valores de energia da parte superior para a meia altura da edificação.

Gráfico 15 – Perfis de energia cinética turbulenta  $k$ , casos B, Karava 2D.

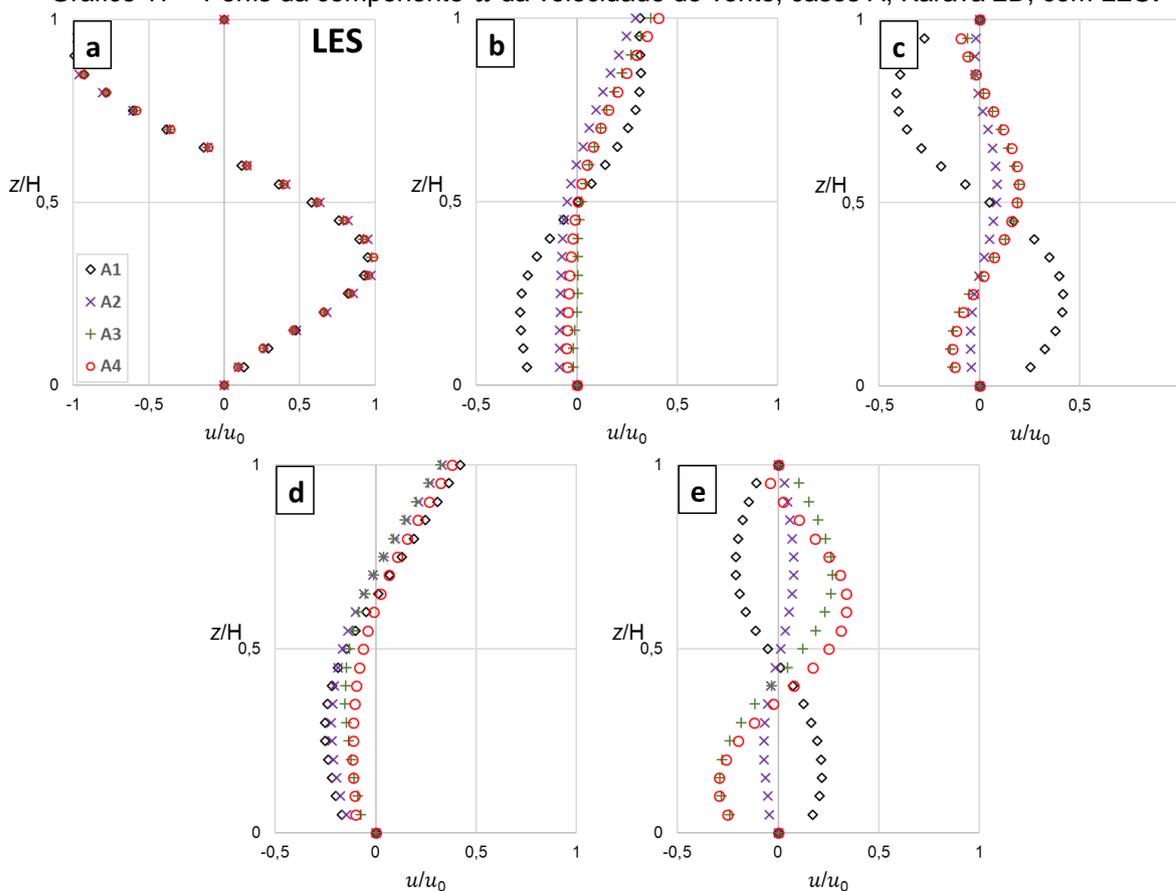
Fonte: Autor (2019).

Observa-se, no Gráfico 16, que os perfis no exemplo da inclinação do terreno igual a 10 graus (caso C), são semelhantes aos obtidos no caso B, contudo, percebe-se que o aumento da inclinação do terreno origina um incremento nos máximos valores de energia na segunda e terceira edificações (cortes “c” e “e”).



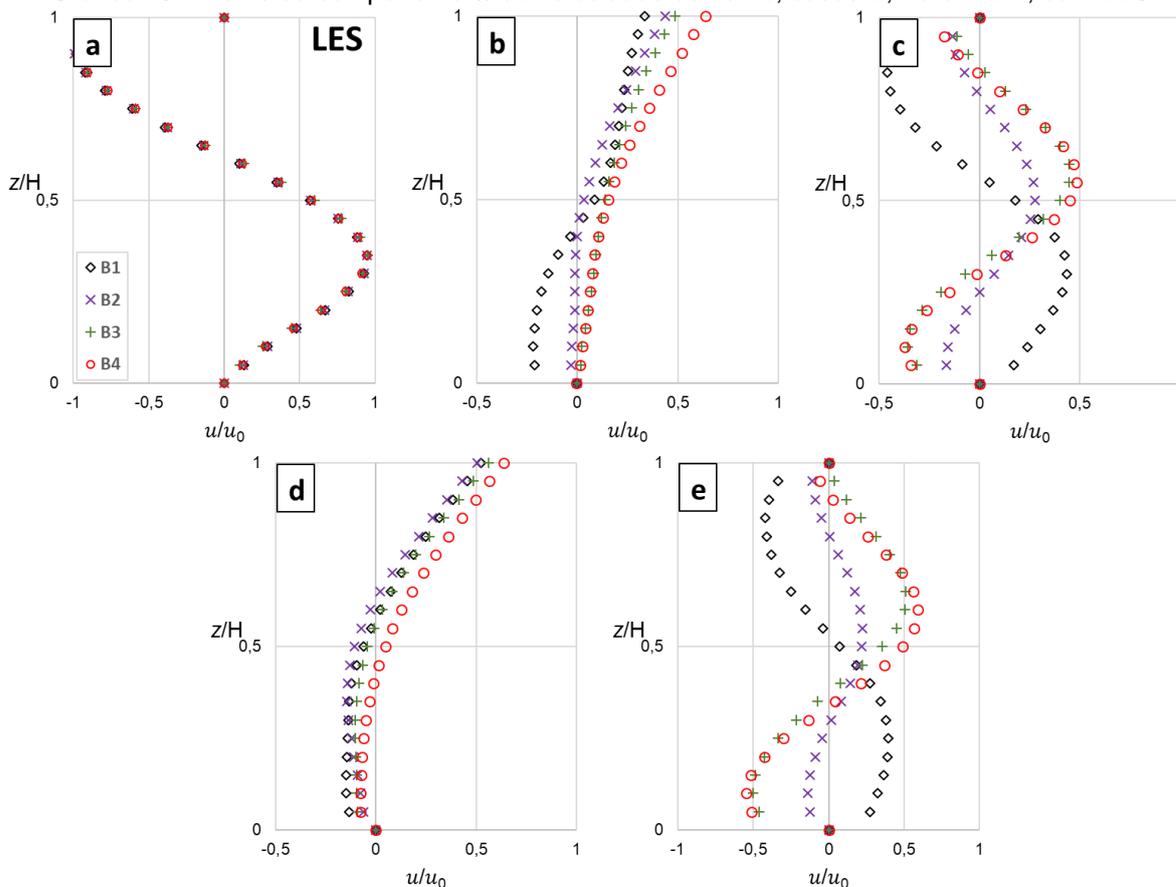
Nos Gráficos 17 a 19, apresentam-se, para as quatro separações entre as edificações e as 3 inclinações do terreno, os perfis da componente  $u$  da velocidade obtidos com o modelo de turbulência LES de Smagorinsky para cinco valores de  $x/D$  constante, conforme mostrados na Figura 34.

Percebe-se que no caso da inclinação do terreno nula, ver Gráfico 17, o formato dos perfis é diferente daqueles obtidos com o modelo de turbulência RANS. A topologia do escoamento (posições, quantidade e sentidos de giro dos vórtices) muda completamente. Nos Apêndices B e C, mostram-se em mais detalhes a topologia e principais variáveis (velocidade, pressão e energia cinética turbulenta) para todos os casos analisados.

Gráfico 17 – Perfis da componente  $u$  da velocidade do vento, casos A, Karava 2D, com LES.

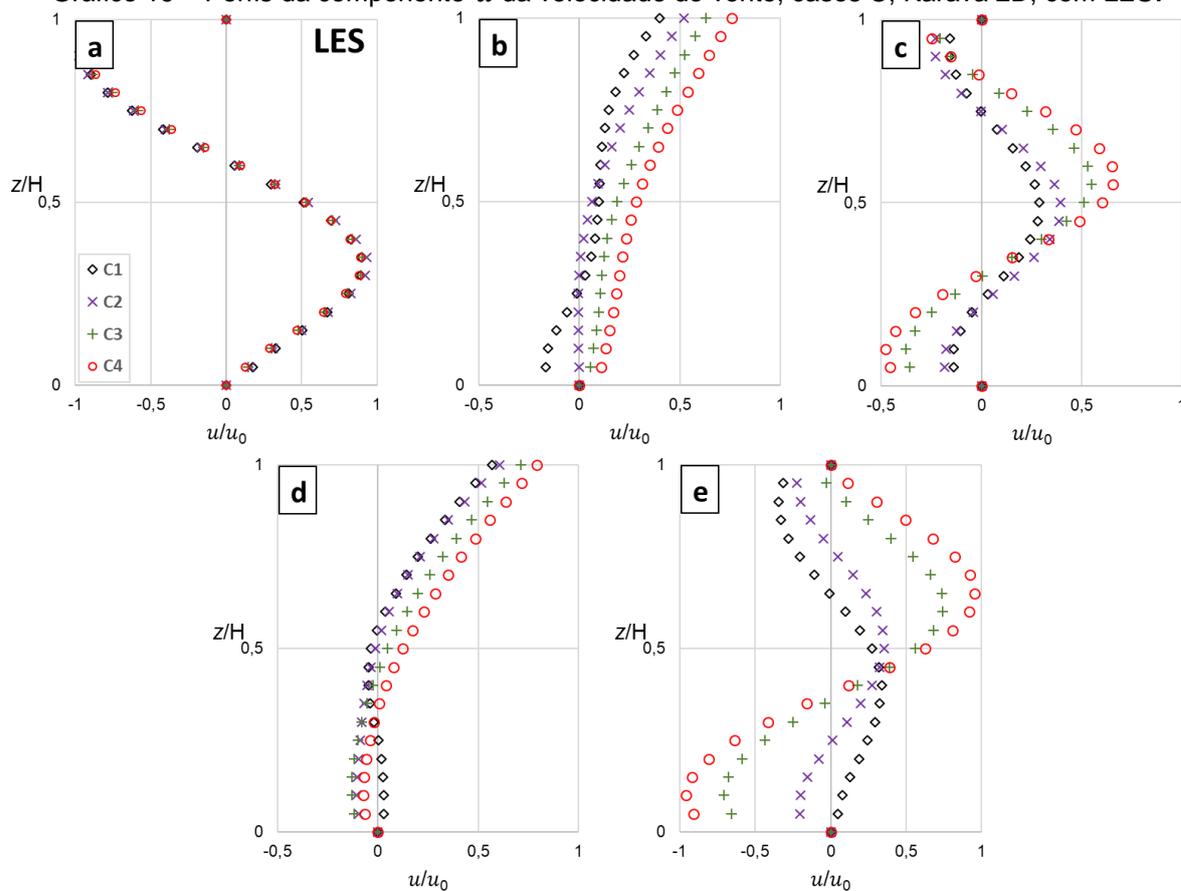
Fonte: Autor (2019).

Assim como ocorreu nos casos A com LES, para inclinação do terreno igual a 5 graus (Gráfico 18) observa-se que na segunda edificação a menor distância entre as mesmas (caso B1) provoca um grande vórtice, sendo que nos demais casos (B2, B3 e B4) existem dois vórtices contrarrotativos. Na terceira edificação, os casos B1 e B3 provocam apenas um vórtice, enquanto os demais casos (B2 e B4) provocam dois vórtices. No Apêndice C, pode-se observar que os casos B3 e B4 têm topologia semelhante, contudo, o vórtice localizado na parte superior esquerda da terceira edificação apresenta maior tamanho no caso B4, o que o faz mudar a topologia do corte “e”.

Gráfico 18 – Perfis da componente  $u$  da velocidade do vento, casos B, Karava 2D, com LES.

Fonte: Autor (2019).

Para inclinação do terreno igual a 10 graus (Gráfico 19) observa-se os perfis são semelhantes aos obtidos no caso B, contudo, percebe-se que o aumento da inclinação do terreno origina um incremento nas máximas dos valores de energia na segunda e terceira edificações (cortes “c” e “e”). Outra alteração ocorre em relação ao corte “e”, percebe-se que a maior distância entre edificações (caso C4) provoca um único vórtice, enquanto os demais (C2, C3 e C4) provocam dois vórtices contrarrotativos.

Gráfico 19 – Perfis da componente  $u$  da velocidade do vento, casos C, Karava 2D, com LES.

Fonte: Autor (2019).

Na Tabela 7, apresentam-se todos os valores de vazão adimensionalizada nas três edificações para os doze casos analisados (4 separações de edificações e 3 inclinações de terreno) com os dois modelos de turbulência. Para fins comparativos, também se apresenta o valor da vazão no caso de uma edificação isolada ( $Q_{única}$ ).

Tabela 7 – Vazões adimensionalizadas, caso de Karava 2D.

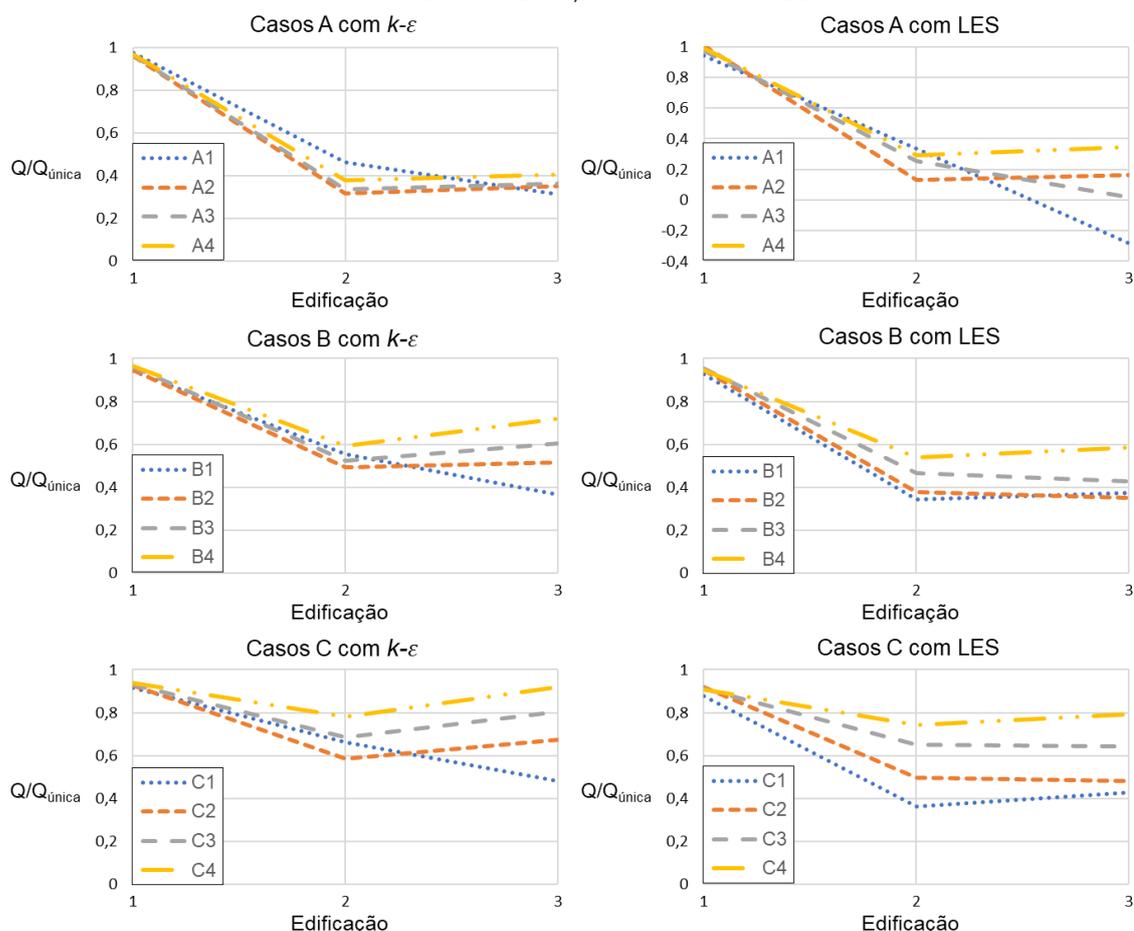
Caso	$Q/u_H A_{abert}$					
	$k-\varepsilon$			Smagorinsky		
	Casa 1	Casa 2	Casa 3	Casa 1	Casa 2	Casa 3
Única	0,741	-	-	0,596	-	-
A1	0,724	0,345	0,232	0,560	0,200	-0,169
A2	0,710	0,235	0,261	0,599	0,079	0,096
A3	0,714	0,250	0,270	0,580	0,152	0,010
A4	0,716	0,280	0,300	0,589	0,172	0,206
B1	0,699	0,413	0,273	0,551	0,203	0,223
B2	0,701	0,367	0,384	0,562	0,225	0,209
B3	0,713	0,389	0,448	0,567	0,278	0,255
B4	0,715	0,440	0,535	0,561	0,320	0,347
C1	0,680	0,492	0,358	0,520	0,215	0,254
C2	0,687	0,434	0,499	0,546	0,295	0,287
C3	0,692	0,508	0,596	0,541	0,386	0,383
C4	0,696	0,581	0,681	0,539	0,441	0,470

Fonte: Autor (2019).

Pode-se observar, que para o caso da edificação isolada o modelo de turbulência LES apresentou um valor de vazão 20% menor que o obtido com o modelo  $k-\varepsilon$ . De maneira geral, pode-se observar que o aumento da distância entre as edificações favorece a ventilação. Isto também identifica-se analisando os vetores velocidades no Apêndice B.

Percebe-se que o aumento da inclinação do terreno prejudica a ventilação na primeira edificação, contudo, essa perda é muito menor que o ganho de ventilação nas demais edificações. Para facilitar a interpretação dos resultados, no Gráfico 20, apresenta-se o valor da vazão em relação à vazão obtida no caso da edificação isolada para todos casos analisados.

Gráfico 20 – Vazões, caso de Karava 2D.



Fonte: Autor (2019).

Observa-se que sempre a segunda e terceira edificação apresentam menor valor de vazão em comparação com a primeira edificação, independentemente do modelo de turbulência empregado. Para todos os casos, percebe-se que o incremento da inclinação do terreno provocou um aumento nas vazões na segunda e na terceira edificações. Este comportamento também pode ser observado quando se incrementa a distância entre as edificações. Deve-se ressaltar que o aumento na inclinação do terreno tem maior influência no incremento da vazão em comparação com o aumento da distância.

Para as duas inclinações do terreno diferentes de zero (casos B e C) tem-se que os valores das vazões na segunda e terceira edificação sempre são maiores no modelo de turbulência RANS em comparação ao modelo LES.

Por fim, percebe-se que na terceira edificação, do caso A1 com LES, o escoamento ocorreu em sentido contrário (vazão negativa). Contudo, mesmo em

sentido contrário, o valor da vazão chegou a ser maior que nos casos A2 e A3 com o mesmo modelo de turbulência.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Devido à necessidade de se avaliar eficientemente a ventilação natural nos projetos de edificações, foi estudada, no presente trabalho, a influência que algumas características geométricas têm sobre a ventilação de edifícios baixos. Para isso, foram adotados *softwares* livres de código aberto (OpenFOAM, Salomé e ParaView).

Três casos foram estudados: um cilindro quadrado 2D, um modelo 3D de edificação baixa com aberturas em faces opostas e modelos 2D de arranjos de três edificações baixas. As simulações de todos os casos foram realizadas com êxito e permitiram a obtenção de todos os resultados necessários para as análises. Foram utilizados, ao todo, três modelos de turbulência, o modelo  $k-\varepsilon$  padrão, o modelo  $k-\omega$  SST e o modelo LES de Smagorinsky.

No primeiro caso, apresentaram-se os coeficientes aerodinâmicos para o cilindro quadrado e pôde-se observar os perfis de velocidade e de flutuações da velocidade, além das distribuições das principais variáveis do escoamento (velocidade, pressão e energia cinética). No segundo caso, foram obtidos os perfis e distribuições de velocidade e energia cinética, além dos valores de vazão nas aberturas da edificação isolada. O terceiro caso foi o que apresentou mais análises, já que foram obtidos os perfis e distribuições de velocidade e energia cinética, valores de vazão nas aberturas de todas as edificações e seus vetores velocidade.

Vale ressaltar que todas as etapas das simulações foram realizadas eficientemente com *softwares* livres, mostrando seu potencial para profissionais que necessitam de ferramentas de predição de ventilação natural.

A partir dos resultados apresentados e da análise dos mesmos, pode-se concluir que:

- A utilização de métodos computacionais na análise da dinâmica de fluidos mostrou-se muito eficiente nas situações mostradas acima, esses métodos permitem uma análise bem detalhada das principais variáveis do problema permitindo assim estudar e analisar o comportamento do escoamento de fluido tanto no interior quanto no exterior das geometrias modeladas;
- A verificação feita através da comparação dos resultados obtidos na presente simulação com os resultados apresentados por outros autores, demonstrou a eficiência do OpenFOAM e dos esquemas numéricos adotados;

- O OpenFOAM e os demais *softwares* livres de código aberto utilizados no presente trabalho mostraram-se ótimas ferramentas para o estudo de ventilação natural em edificações;
- Pôde-se observar que, em arranjos de edificações em série, de forma geral, o aumento da distância entre as edificações e o aumento da inclinação do terreno favorecem a ventilação em seus interiores,
- Observa-se que sempre a segunda e terceira edificação apresentam menor valor de vazão em comparação com a primeira edificação, independentemente do modelo de turbulência empregado. Entretanto, os valores da vazão sempre são maiores no modelo de turbulência RANS em comparação ao modelo LES.

## 7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para futuros trabalhos recomenda-se:

- Estudar outros modelos de turbulência disponíveis no OpenFOAM, tais como: Realizable  $k-\varepsilon$  (SHIH *et al.*, 1995), RNG  $k-\varepsilon$  (YAKHOT *et al.*, 1992), Eddy-viscosity SGS (YOSHIKAWA, 1986), WALE SGS (NICOUDE DUCROS, 1999), Spalart-Allmaras Detached Eddy Simulation (SPALART *et al.*, 1997), entre outros;
- Fazer um estudo paramétrico de arranjos de edificações variando a quantidade e geometria dos modelos e a topologia do terreno;
- Fazer um estudo considerando arranjos de modelos de edificações tridimensionais, a fim de avaliar a influência das edificações vizinhas.

## REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15220**: Desempenho Térmico de Edificações. Parte 3: Zoneamento Bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.
- ALFONSI, G. Reynolds-Averaged Navier–Stokes Equations for Turbulence Modeling. **Applied Mechanics Reviews**, v. 62, n. 4, 2009.
- ANDERSON, J. D. **Computational Fluid Dynamics: basics with applications**. Nova York: McGraw-Hill, 1995.
- ARAÚJO, C. V. A.; CUNHA, L. J. B. F. Proposta de método para potencializar o uso da ventilação natural. Canela: **Anais XIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, 2010.
- 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 and Industrial Aerodynamics**, v. 162, p. 24-34, 2017.
- BALOGH, B., PARENTE, A., BENOCCI, C. RANS simulation of ABL flow over complex terrains applying an enhanced k-e model and wall function formulation: implementation and comparison for fluent and OpenFOAM. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 104–106, p. 360–368, 2012.
- 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.
- BLOCKEN, B. Computational Fluid Dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations. **Building and Environment**, v. 91, p. 219-245, 2015.
- BLOCKEN, B.; STATHOPOULOS, T.; BEECK, J. P. A. J. V. Pedestrian-level wind conditions around buildings: Review of wind-tunnel and CFD techniques and their accuracy for windcomfort assessment. **Building and Environment**, v. 100, p. 50-81, 2016.
- BOSH, 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.
- CAUDILL, W. W.; CRITES, S. E.; SMITH, E. G. Some general considerations in the natural ventilation of buildings. **Texas Engineering Experiment Station**, v. 22, 43 p., 1951.
- CEBECI, T.; BRADSHAW, P. **Momentum Transfer in Boundary Layers**. Hemisphere Publishing Corporation, 1977.

CERMAK, J. E. Applications of fluid mechanics to wind engineering - A Freeman Scholar Lecture. **Journal of Fluids Engineering**, v. 97, p. 9-38, 1975.

CHENG, J.; QI, D.; KATAL, A.; WANG, L.; STATHOPOULOS, T. Evaluating wind-driven natural ventilation potential for early building design. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 182, p. 160-169, 2018.

DAO, M. H.; CHEW, L. W.; ZHANG, Y. Modelling physical wave tank with flap paddle and porous beach in OpenFOAM. **Ocean Engineering**, v. 154, p. 204-215, 2018.

DEARDORFF, J. W. A numerical study of three-dimensional turbulent channel flow at large Reynolds numbers. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 41, n. 2, p. 453-480, 1970.

DICK, J. B. The fundamentals of natural ventilation of houses. **Journal of the Institute of Heating and Ventilation Engineers**, v. 18, p. 123-134, 1950.

EINSTEIN, A. **Sidelights on Relativity**. Londres: Methuen & Co. Ltd, p. 28, 1922.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Nota Técnica EPE 030/2018**: Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro. Rio de Janeiro, 2018.

FERZIGER, J. H. Large Eddy Numerical Simulations of Turbulent Flows. **AIAA Journal**, v. 15, n. 9, p. 1261-1267, 1977.

FRANKE, J.; HELLSTEN, A.; SCHLUNZEN, H.; CARISSIMO, B. **Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment**. Reino Unido: COST Office, 2007.

FREIRE, A. P. S.; MENUT, P. P. M.; SU, J. **Turbulência**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Ciências Mecânicas, 2002.

GIMENEZ, J. M.; BRE, F.; NIGRO, N. M.; FACHINOTTI, V. Computational modeling of natural ventilation in low-rise nonrectangular floor-plan buildings. **Building Simulation**, v. 11, p. 1255-1271, 2018.

GHIAUS, C.; ALLARD, F. **Natural ventilation in urban areas: potential assessment and optimal façade design handbook**. URBVENT, 2004.

HOOFF, T. V.; BLOCKEN, B.; TOMINAGA, Y. On the accuracy of CFD simulations of cross-ventilation flows for a generic isolated building: Comparison of RANS, LES and experiments. **Building and Environment**, v. 114, p. 148-165, 2017.

HOLLEMAN, T. R. Air flow through conventional window openings. **Texas Engineering Experiment Station**, v. 33, 45 p., 1951.

HONG, S. W.; EXADAKTYLOS, V.; LEE, I. B.; AMON, T.; YOUSSEF, A.; NORTON, T.; BERCKMANS, D. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 138, p. 80-91, 2017.

JIANG, X.; LAI, C. H. **Numerical Techniques for Direct and Large-Eddy Simulations**. London: CRC Press, 2017.

KARAVA, P.; STATHOPOULOS, T.; ATHIENITIS, A. K. Airflow assessment in cross-ventilated buildings with operable façade elements. **Building and Environment**, v. 46, p. 266-279, 2011.

KASIM, N. F. M.; ZAKI, S. A.; ALI, M. S. M.; IKEGAYA, N.; RAZAK, A. A. Computational Study on the Influence of Different Opening Position on Wind-induced Natural Ventilation in Urban Building of Cubical Array. **Procedia Engineering**, v. 169, p. 256-263, 2016.

KATO, M.; LAUNDER, B. E. The Modelling of Turbulent Flow Around Stationary and Vibrating Square Cylinders. Kyoto, Japan: **Anais IX Symposium on "Turbulent Shear Flows"**, 1993.

KING, M. F.; GOUGH, H. L.; HALIOS, C.; BARLOW, J. F.; ROBERTSON, A.; HOXEY, R.; NOAKES, C. J. Investigating the influence of neighbouring structures on natural ventilation potential of a full-scale cubical building using time-dependent CFD. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 169, p. 265-279, 2017.

KOBLITZ, T. **CFD Modeling of Non-Neutral Atmospheric Boundary Layer Conditions**. DTU Wind Energy, 2013.

KOSUTOVA, K.; HOOFF, T. V.; VANDERWEL, C.; BLOCKEN, B.; HENSEN, J. Cross-ventilation in a generic isolated building equipped with louvers: Wind-tunnel experiments and CFD simulations. **Building and Environment**, v. 154, p. 263-280, 2019.

LAUNDER, B. E.; SANDHAM, N. D. **Closure Strategies for Turbulent and Transitional Flows**. Cambridge University Press, p. 267-298, 2002.

LAUNDER, B. E.; SPALDING, D. B. The numerical computation of turbulent flows. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 3, n. 2, p. 269-289, 1974.

LEE, B. E. The effect of turbulence on the surface pressure field of a square prism. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 69, n. 2, p. 263-282, 1975.

LEONARD, A. Energy Cascade in Large-Eddy Simulations of Turbulent Fluid Flows. **Advances in Geophysics**, v. 18, p. 237-248, 1975.

LESIEUR, M; MÉTAIS, O; COMTE, P. **Large-Eddy Simulations of Turbulence**. Cambridge University Press, 2005.

LIMANE, A.; FELLOUAH, H.; GALANIS, N. Simulation of airflow with heat and mass transfer in an indoor swimming pool by OpenFOAM. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 109, p. 862-878, 2017.

LIU, S.; PAN, W.; CAO, Q.; LONG, Z.; JIANG, Y.; Chen, Q. CFD simulations of natural cross ventilation through an apartment with modified hourly wind information from a meteorological station. **Energy and Buildings**, v. 195, p. 16-25, 2019.

LÔBO, D. G. F.; BITTENCOURT, L. S. Influência dos captadores de vento na ventilação natural de habitações populares localizadas em climas quentes e úmidos. Porto Alegre: **Ambiente Construído**, v. 3, n. 2, p. 57-67, 2003.

LUKIANCHUKI, M. A.; SHIMOMURA, A. R. P.; SILVA, F. M.; CARAN, R. M. Influência do número de sheds e da distância horizontal entre eles no desempenho da ventilação natural. Porto Alegre: **Ambiente Construído**, v. 18, n. 2, p. 161-176, 2018.

LUO, S. C.; YAZDANI, M. G.; CHEW, Y. T.; LEE, T. S. Effects of incidence and afterbody shape on flow past bluff cylinders. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 53, p. 375-399, 1994.

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. 261, p. 353-376, 1994.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. 2ª ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 2004.

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, p. 558-566, 2011.

MOIN, P.; MAHESH, K. DIRECT NUMERICAL SIMULATION: A Tool in Turbulence Research. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 30, n. 1, p. 539-578, 1998.

MORAIS, J. M. S. C.; LABAKI, L. C. CFD como ferramenta para simular ventilação natural interna por ação dos ventos: estudos de caso em tipologias verticais do “Programa Minha Casa, Minha Vida”. Porto Alegre: **Ambiente Construído**, v. 17, n. 1, p. 223-244, 2017.

MOUKALLED, F.; MANGANI, L.; DARWISH, M. **The finite volume method in computational fluid dynamics**. Springer, 2016.

MURAKAMI, S.; KATO, S. Current status of numerical and experimental methods for analyzing flow field and diffusion field in a room. **Proceedings of the Conference on Modelling of Indoor Air Quality and Exposure - ASHRAE**, University of Illinois Press, p. 39-56, 1988.

MURAKAMI, S.; MOCHIDA, A.; HIBI, K. Three dimensional numerical simulation for air flow around building Part1. **Journal of Architectural and Planning**, v. 300, p. 1-11, 1986.

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.

NABONI, E.; NATANIAN, J.; BRIZZI, G.; FLORIO, P.; CHOKHACHIAN, A.; GALANOS, T.; RASTOGI, P. A digital workflow to quantify regenerative urban design in the context of a changing climate. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 113, a. 109255, 2019.

NEZAMDOOST, A.; COOPER, E.; WOODS, D. Using a passive design toolset to evaluate low-cost cooling strategies for an industrial facility in a hot and dry climate. **Energy and Buildings**, v. 159, p. 319-331, 2018.

NIELSEN, P. V. Numerical prediction of air distribution in rooms – status and potentials. **Proceedings of the Conference on Modelling of Indoor Air Quality and Exposure - ASHRAE**, University of Illinois Press, p. 31-38, 1988.

NICOUD, F.; DUCROS, F. Subgrid-scale stress modelling based on the square of the velocity gradient tensor. **Flow, Turbulence and Combustion**, v. 62, n. 3, p 183-200, 1999.

NIKURADSE, J. **Laws of Flow in Rough Pipes**. Washington: National Advisory Committee for Aeronautics, 1950.

NORBERG, C. Flow around rectangular cylinders: Pressure forces and wake frequencies. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 49, p. 187-196, 1993.

OpenFOAM: User Guide v1906 – Inlet conditions. Disponível em: <<https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-bcs-derived-inlet.html>>. Acesso em: 10 fev. 2019.

OpenFOAM Foundation, OpenFOAM User Guide. Disponível em: <<https://cfd.direct/openfoam/user-guide/>>. Acesso em: 06 fev. 2019.

PASLER, V.; ARBEITER, F.; KLEIN, C.; KLIMENKO, D.; SCHLINDWEIN, G.; WETH, A. V. D. Development and verification of a component-level hydrogen transport model for a DEMO-like HCPB breeder unit with OpenFOAM. **Fusion Engineering and Design**, v. 127, p. 249-258, 2018.

PÉREN, J. I.; HOOFF, T. V.; LEITE, B. C. C.; BLOCKEN, B. Impact of eaves on cross-ventilation of a generic isolated leeward sawtooth roof building: Windward eaves, leeward eaves and eaves inclination. **Building and Environment**, v. 92, p. 578-590, 2015.

PIOMELLI, U. Large-eddy simulation: achievements and challenges. **Progress in Aerospace Sciences**, v. 35, p. 335-362, 1999.

PROJETEEE – Projetando Edifícios Energicamente Eficientes, PE - Caruaru > Estratégias. Disponível em: <<http://projeteee.mma.gov.br/dados-climaticos/>>. Acesso em: 10 fev. 2019.

RAHBARIMANESH, S.; BRINKERHOFF, J.; JIMB, H. Development and validation of a homogeneous flow model for simulating cavitation in cryogenic fluids. **Applied Mathematical Modelling**, v. 56, p. 584-611, 2018.

RAISEE, M.; JAFARI, A. Numerical Study of Turbulent Flow Around a Square Cylinder Using Two Low-Reynolds-Number  $k$ - $\epsilon$  Models. Egmond aan Zee, Netherlands: **European Conference on Computational Fluid Dynamics**, 2006.

RAMPONI, R.; BLOCKEN, B. CFD simulation of cross-ventilation for a generic isolated building: Impact of computational parameters. **Building and Environment**, v. 53, p. 34-48, 2012.

RICHARDS, P. J.; HOXEY, R. P. Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the  $k$ - $\epsilon$  turbulence model. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 46 e 47, p. 145-153, 1993.

SAGAUT, P. **Large Eddy Simulation for Incompressible Flows**. Springer, 2006.

SAMION, S. R. L.; ALI, M. S. M.; ABU, A.; DOOLAN, C. J.; PORTEOUS, R. Z. Y. Aerodynamic sound from a square cylinder with a downstream wedge. **Aerospace Science and Technology**, v. 53, p. 85-94, 2016.

SHIH, T. H.; LIOU, W. W.; SHABBIR, A.; YANG, Z.; ZHU, J. A New  $k$ - $\epsilon$  Eddy Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows. **Computers and Fluids**, v. 24, n. 3, p. 227-238, 1995.

SMAGORINSKY, J. General Circulation Experiments with the Primitive Equations. I. The Basic Experiment. **Monthly Weather Review**, v. 91, n. 3, p. 99-164, 1963.

SMITH, E. G. The feasibility of using models for predetermining natural ventilation. **Texas Engineering Experiment Station**, v. 26, 1951.

SOHANKAR, A., DAVIDSON, L.; NORBERG, C. Large Eddy Simulation of Flow Past a Square Cylinder: Comparison of Different Subgrid Scale Models. **Journal of Fluids Engineering**, v. 122, n. 1, p. 39-47, 2000.

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

SOUZA, H. A.; RODRIGUES, L. S. Ventilação natural como estratégia para o conforto térmico em edificações. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 65, p. 189-194, 2012.

SPALART, P. R.; JOU, W-H.; STRELETS, M.; ALLMARAS, S. R. Comments on the Feasibility of LES for Wings, and on a Hybrid RANS/LES. **Advances in DNS/LES**, v. 1, p. 137-147, 1997.

TAMURA, Y. A numerical analysis of the flow around a circular cylinder by the discrete vortex method using a personal computer. **Journal of Wind Engineering**, v. 26, p. 49-59, 1985.

TOMINAGA, Y.; BLOCKEN, B. Wind tunnel experiments on cross-ventilation flow of a generic building with contaminant dispersion in unsheltered and sheltered conditions. **Building and Environment**, v. 92, p. 452-461, 2015.

TOMINAGA, Y.; MOCHIDA, A.; YOSHIE, R.; KATAOKA, H.; NOZU, T.; YOSHIKAWA, M.; SHIRASAWA, T. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 96, p. 1749-1761, 2008.

TORK, L. D. A.; TIBIRIÇÁ, A. C. G.; TIBIRIÇÁ, A. M. B. Análise da ventilação natural conforme planos diretores: resultados de pesquisa em Belém, PA. Porto Alegre: **Ambiente Construído**, v. 17, n. 1, p. 339-351, 2017.

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

TRINDADE, S. C.; PEDRINI, A.; DUARTE, R. N. C. Métodos de aplicação da simulação computacional em edifícios naturalmente ventilados no clima quente e úmido. Porto Alegre: **Ambiente Construído**, v. 10, n. 4, p. 37-58, 2010.

VERSTAPPEN, R. W. C. P.; VELDMAN, A. E. P. Spectro-consistent discretization of Navier-Stokes: a challenge to RANS and LES. **Journal of Engineering Mathematics**, v. 34, n. 1, p. 163-179, 1998.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics - the finite volume method**. ed. Essex, England: Pearson Prentice Hall, 2007.

VICKERY, B. J. Fluctuating lift and drag on a long cylinder of square cross-section in a smooth and in a turbulent stream. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 25, n. 3, p. 481-491, 1966.

WANG, M.; TANG, Y.; GUO, X.; REN, X. Performance analysis of the graph-partitioning algorithms used in OpenFOAM. Nanjing, China: **IEEE Fifth International Conference on Advanced Computational Intelligence (ICACI)**, 2012.

WANG, H.; WANG, H.; GAO, F.; ZHOU, P.; ZHAI, Z. Literature review on pressure velocity decoupling algorithms applied to built-environment CFD simulation. **Building and Environment**, v. 143, p. 671-678, 2018.

WILCOX, D. C. Reassessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models. **AIAA Journal**, v. 26, n. 11, p. 1299-1310, 1988.

WEBER, N.; BECKSTEIN, P.; GALINDO, V.; STARACE, M.; WEIER, T. Electro-vortex flow simulation using coupled meshes. **Computers & Fluids**, In Press, Accepted Manuscript, 2018.

WILCOX, D. C. **Turbulence Modeling for CFD**. 3 ed. San Diego, California: DCW Industries, 2006.

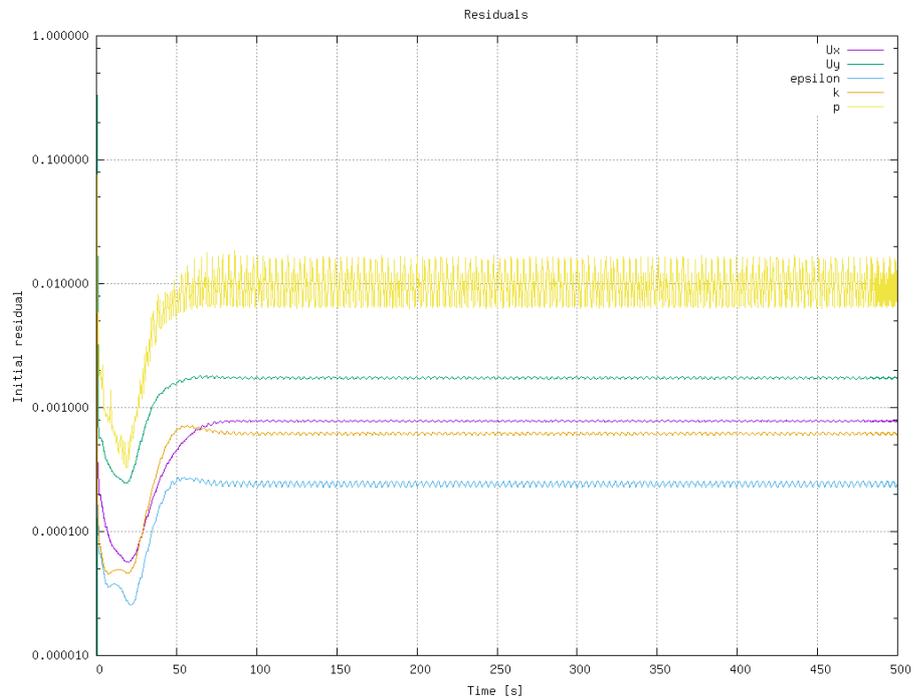
YANG, D.; JIANG, L. Simulation study on the Natural Ventilation of College Student' Dormitory. **Procedia Engineering**, v. 205, p. 1279-1285, 2017.

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

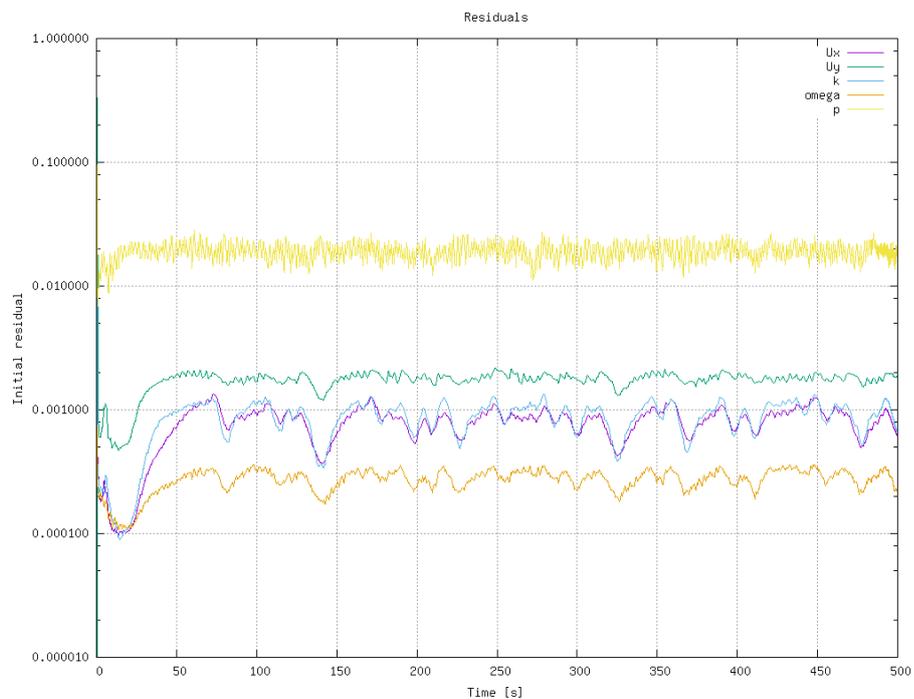
YOSHIZAWA, A. Statistical theory for compressible turbulent shear flows, with the application to sub-grid modeling. **Physics of Fluids**, v. 29, n. 7, p. 2152-2164, 1986.

ZHONG, W.; DENG, L.; XIAO, Z. Flow past a rectangular cylinder close to a free surface. **Ocean Engineering**, v. 186, p. 106-118, 2019.

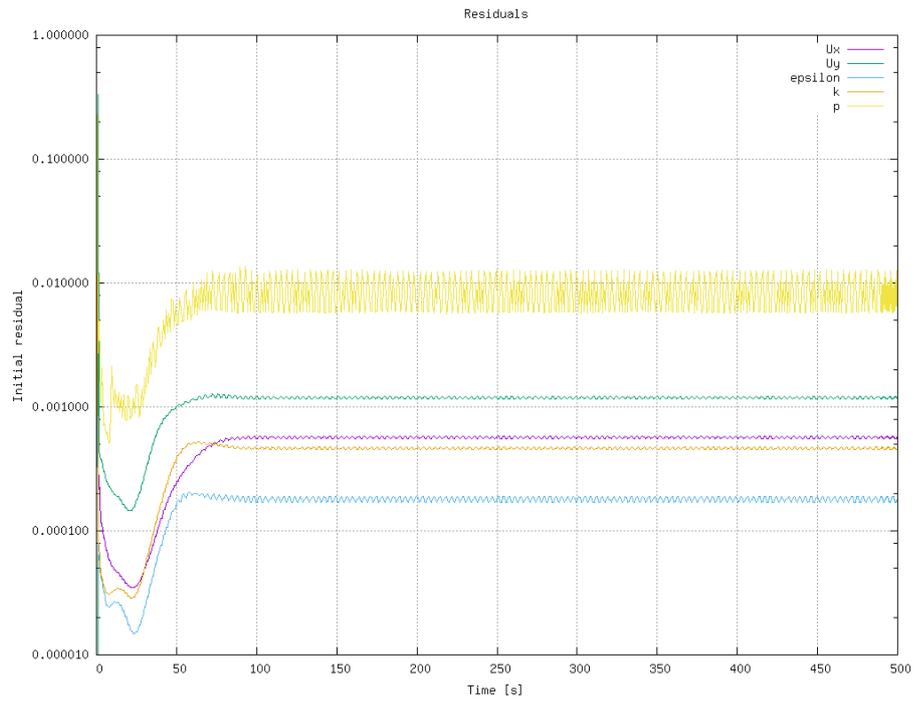
ZHOU, Z-F.; LU, G-Y.; CHEN, B. Numerical study on the spray and thermal characteristics of R404A flashing spray using OpenFOAM. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 117, p. 1312-1321, 2018.

**APÊNDICE A – RESÍDUOS DO CASO CILINDRO QUADRADO**Gráfico 21 – Resíduos, M50 com  $k-\epsilon$ .

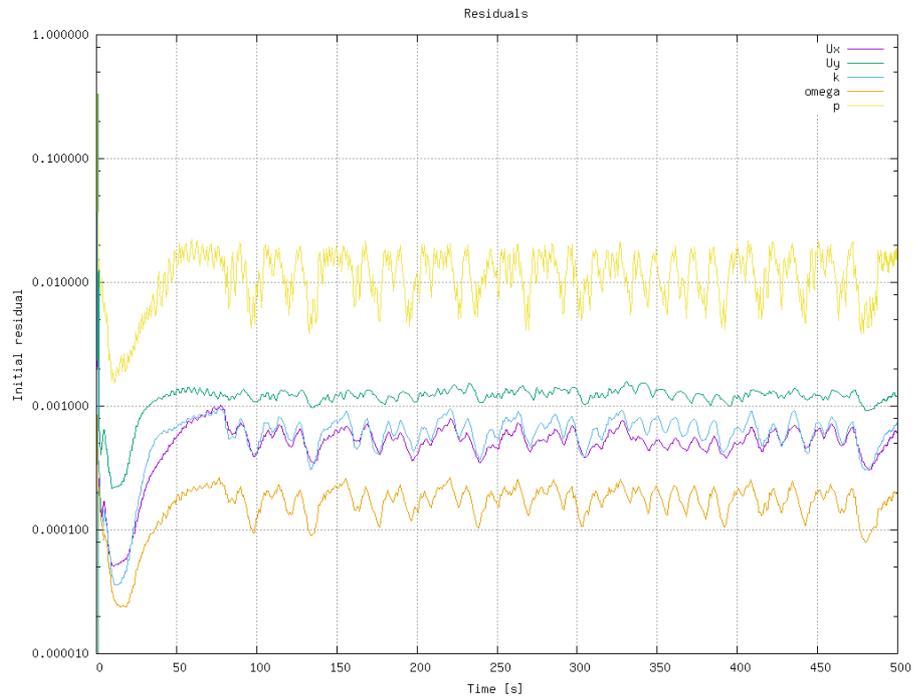
Fonte: Autor (2019).

Gráfico 22 – Resíduos, M50 com  $k-\omega$  SST.

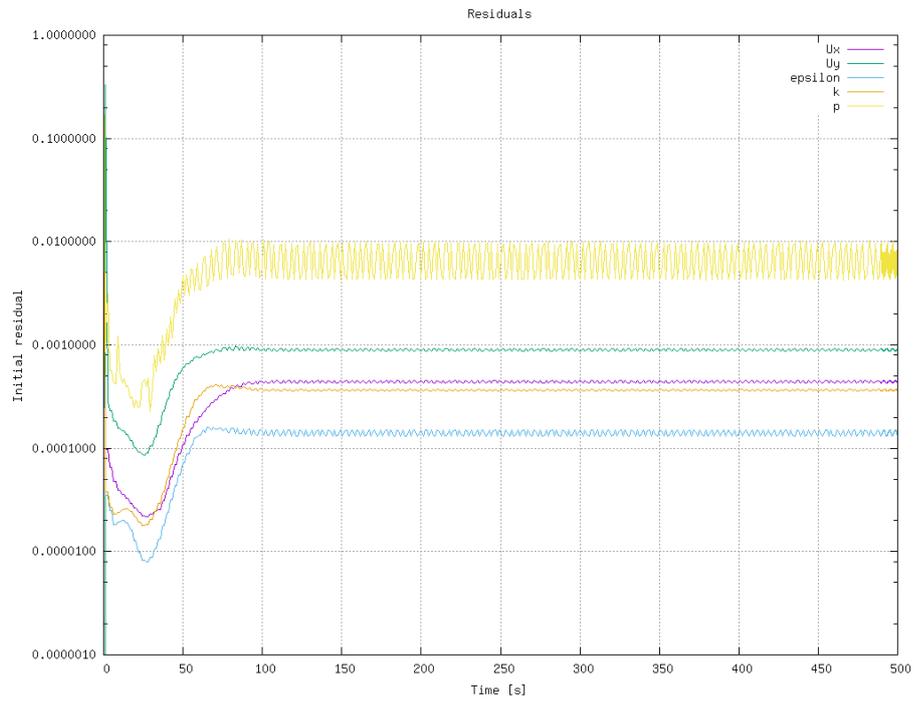
Fonte: Autor (2019).

Gráfico 23 – Resíduos, M75 com  $k-\epsilon$ .

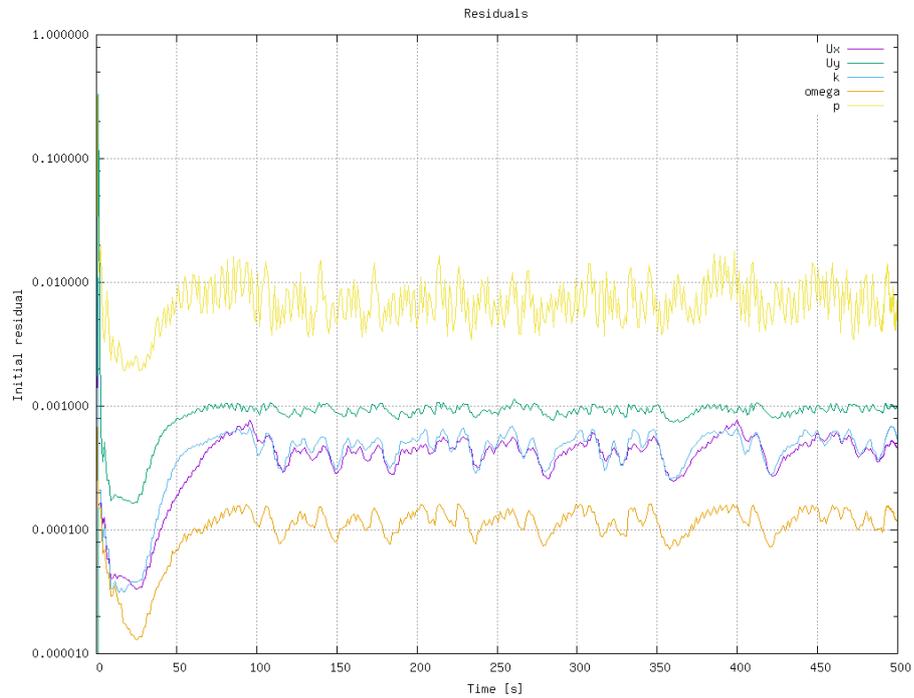
Fonte: Autor (2019).

Gráfico 24 – Resíduos, M75 com  $k-\omega$  SST.

Fonte: Autor (2019).

Gráfico 25 – Resíduos, M100 com  $k-\epsilon$ .

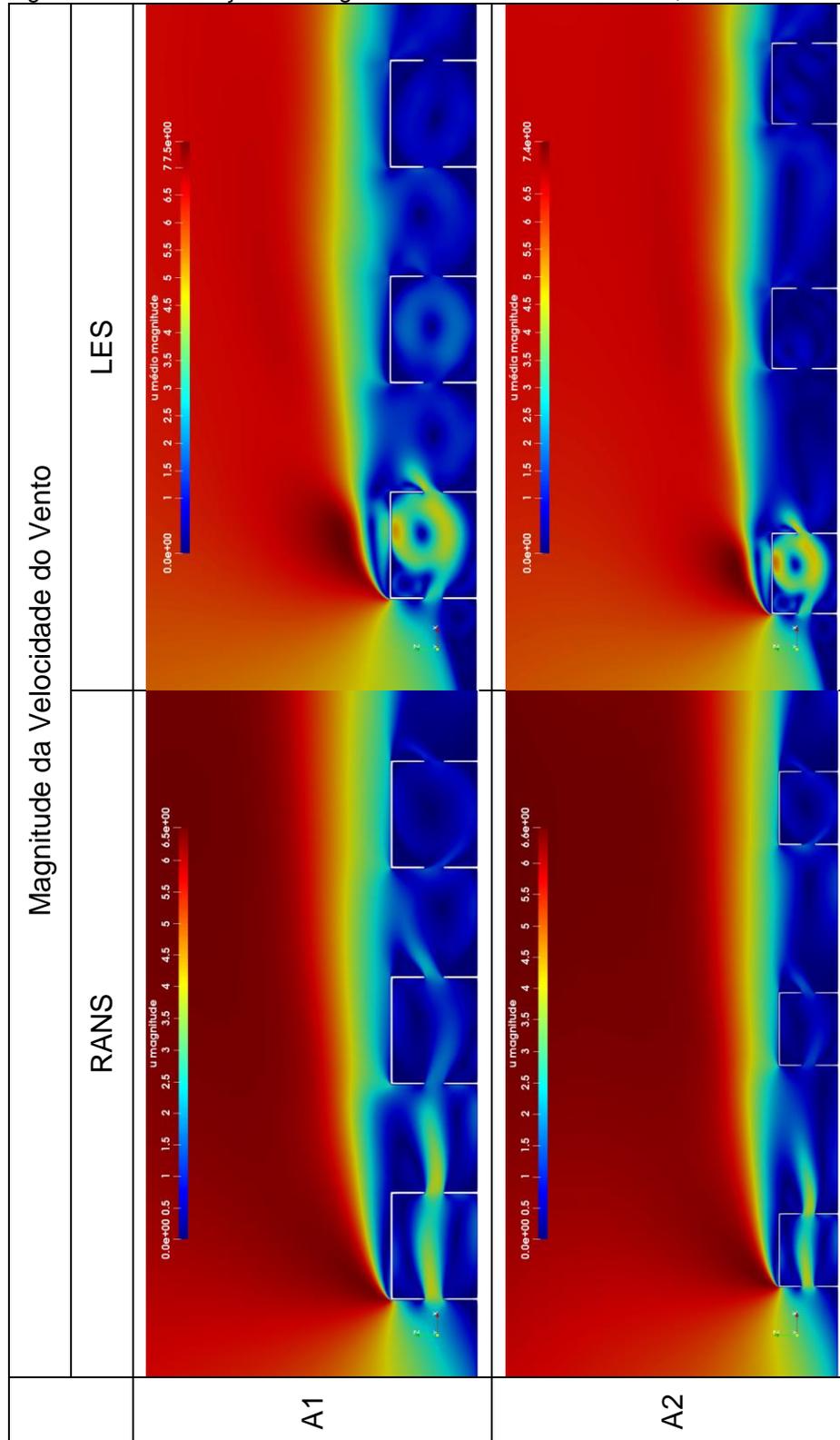
Fonte: Autor (2019).

Gráfico 26 – Resíduos, M100 com  $k-\omega$  SST.

Fonte: Autor (2019).

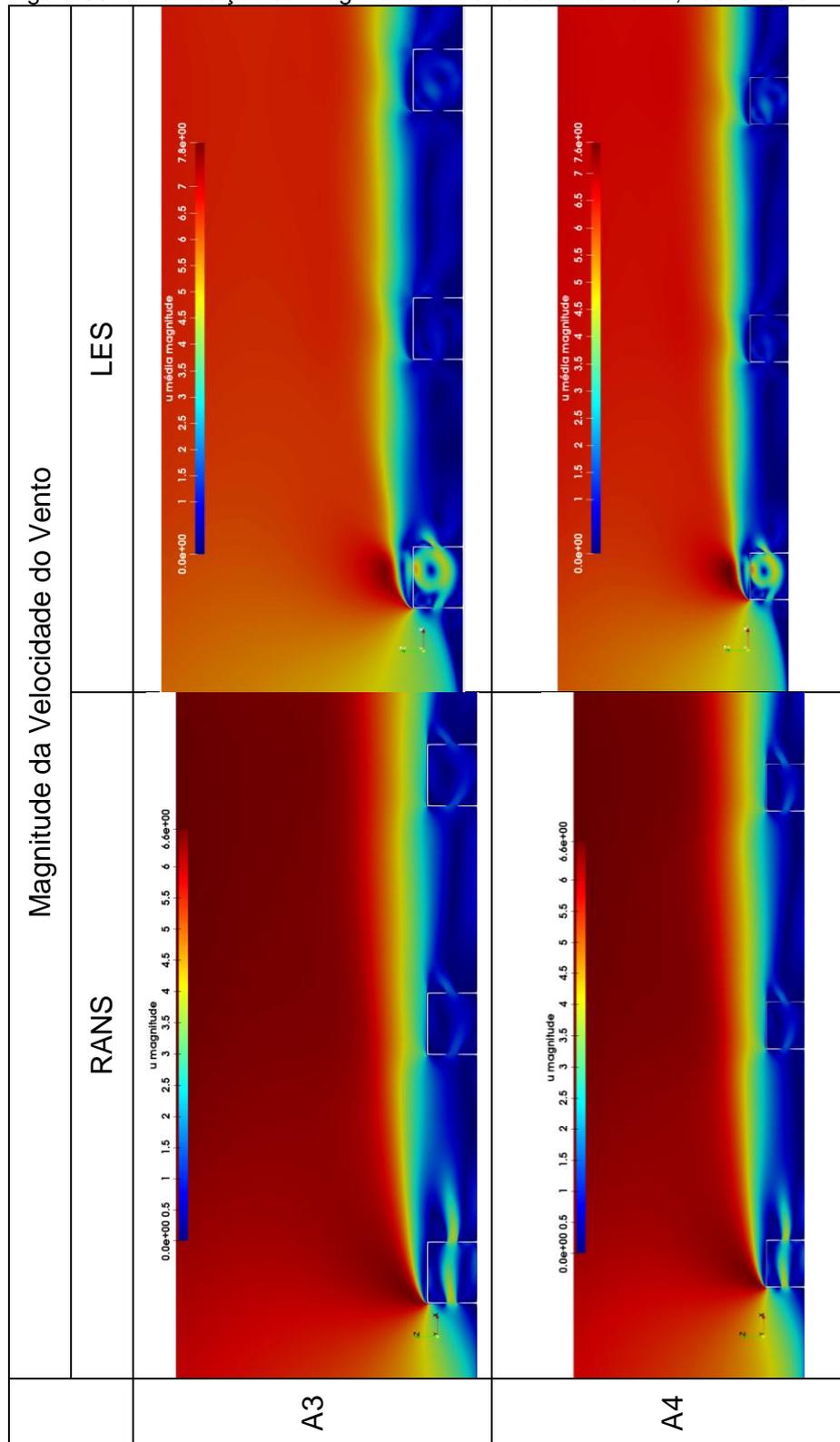
## APÊNDICE B – DISTRIBUIÇÕES DOS CASOS KARAVA 2D

Figura 35 – Distribuição da magnitude da velocidade do vento, casos A1 e A2.



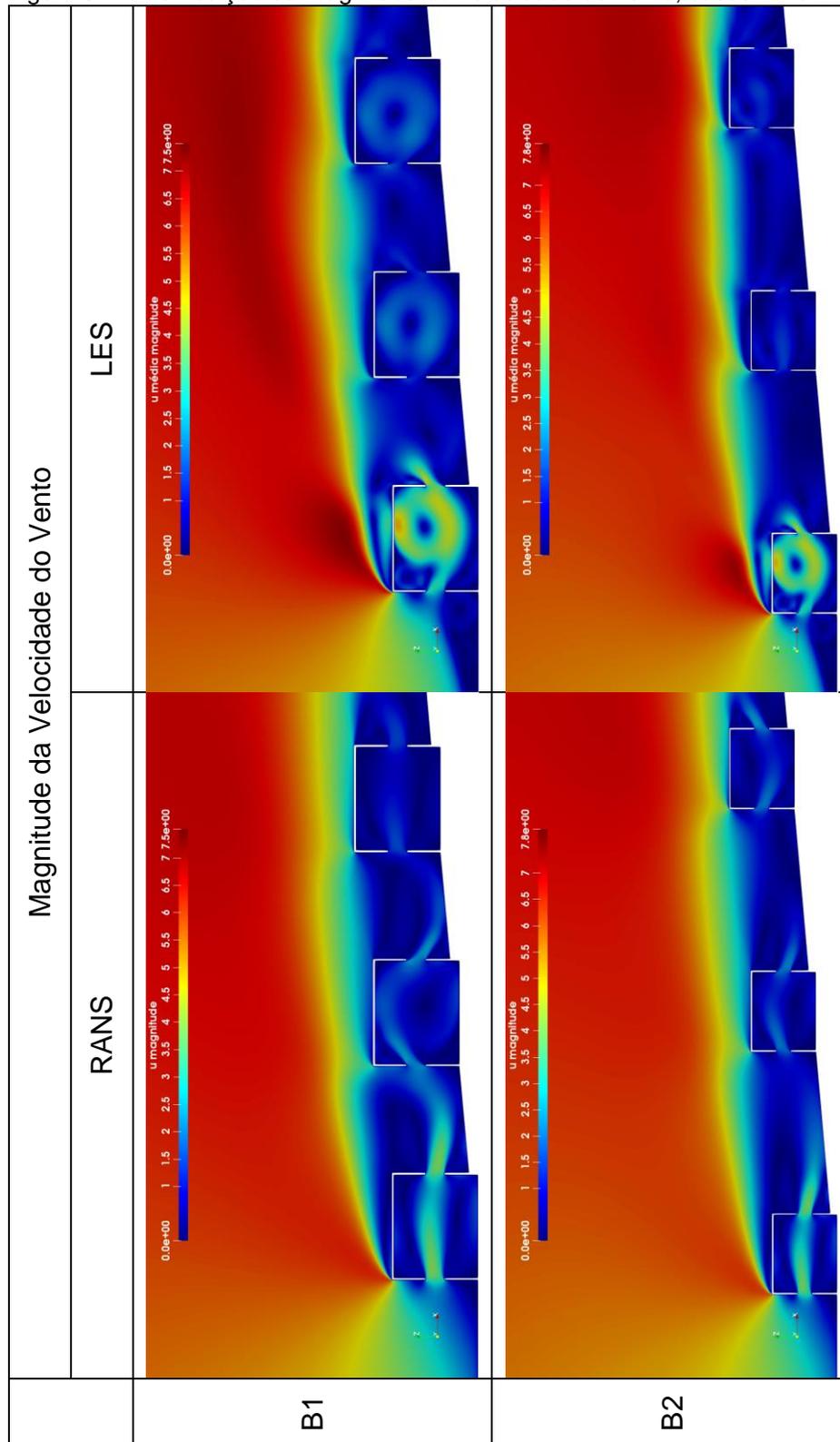
Fonte: Autor (2019).

Figura 36 – Distribuição da magnitude da velocidade do vento, casos A3 e A4.



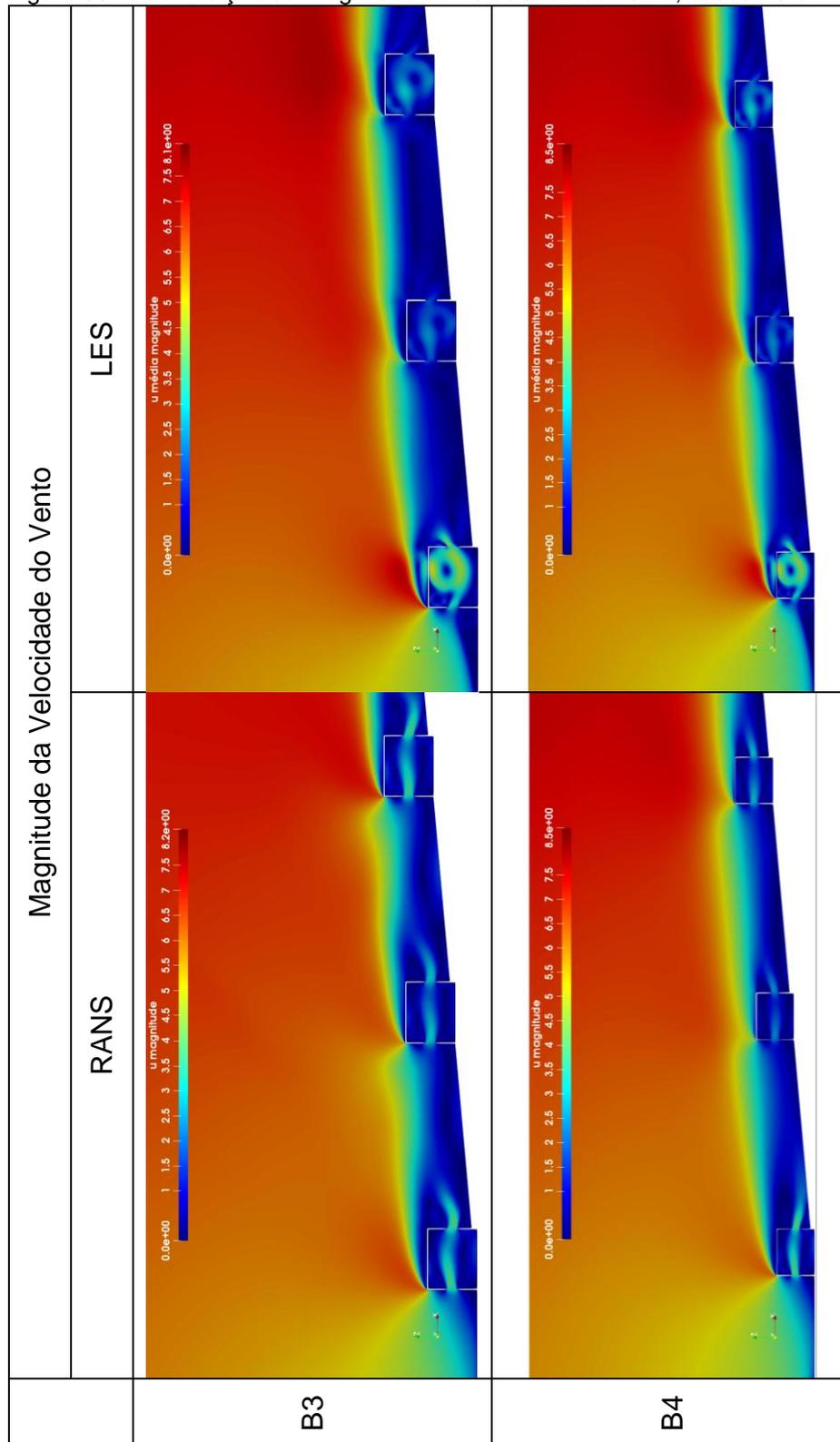
Fonte: Autor (2019).

Figura 37 – Distribuição da magnitude da velocidade do vento, casos B1 e B2.



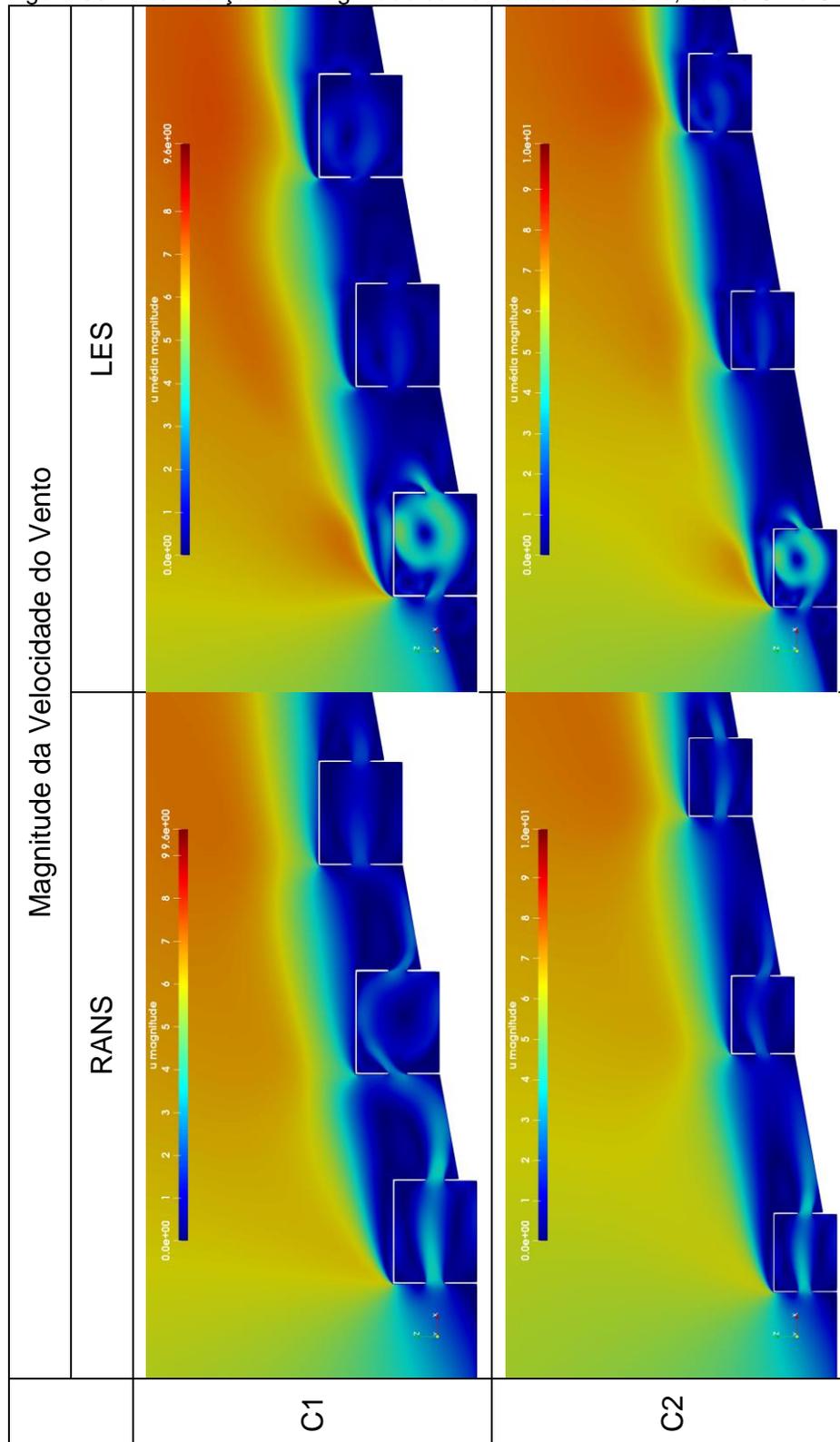
Fonte: Autor (2019).

Figura 38 – Distribuição da magnitude da velocidade do vento, casos B3 e B4.



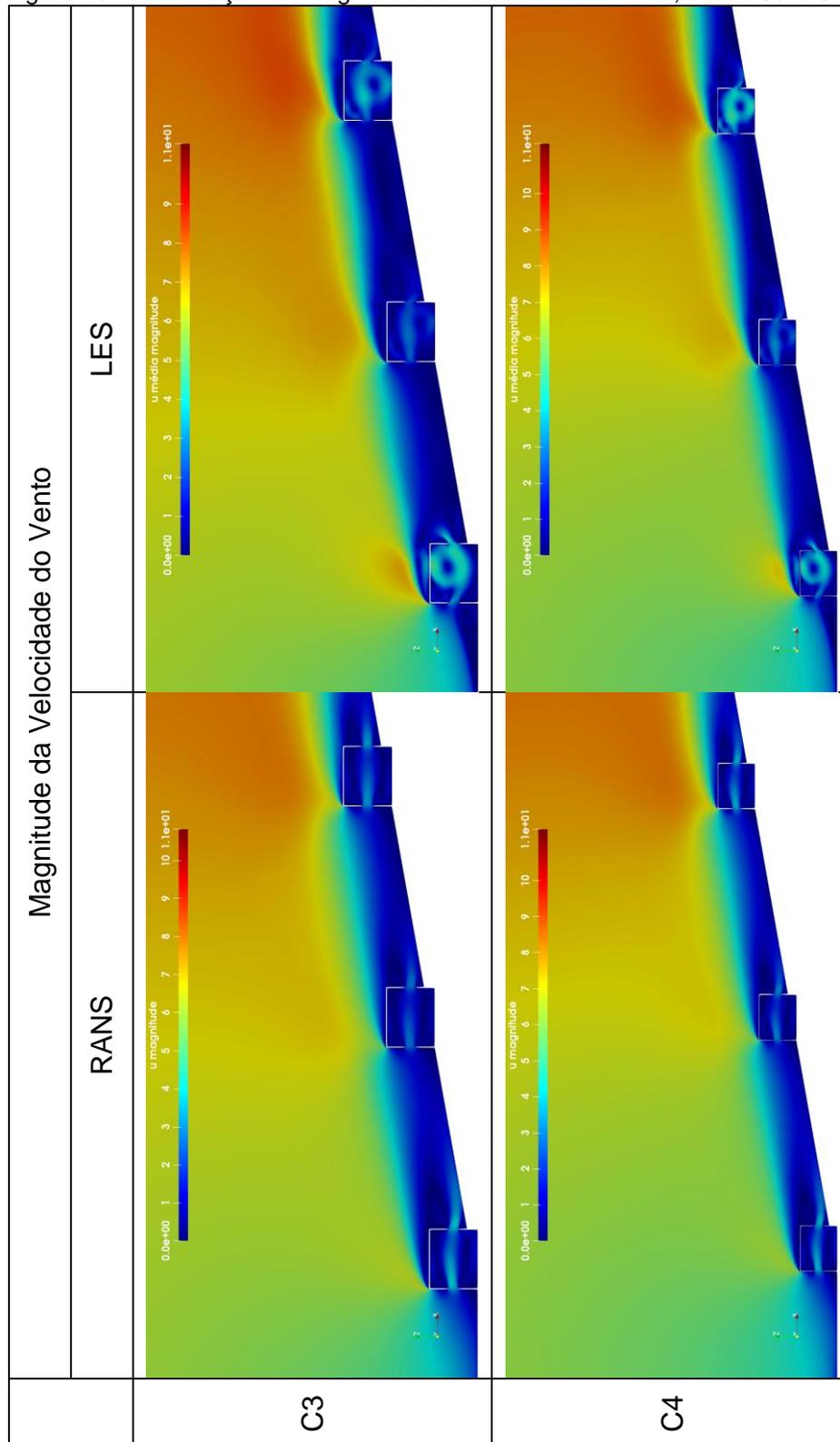
Fonte: Autor (2019).

Figura 39 – Distribuição da magnitude da velocidade do vento, casos C1 e C2.



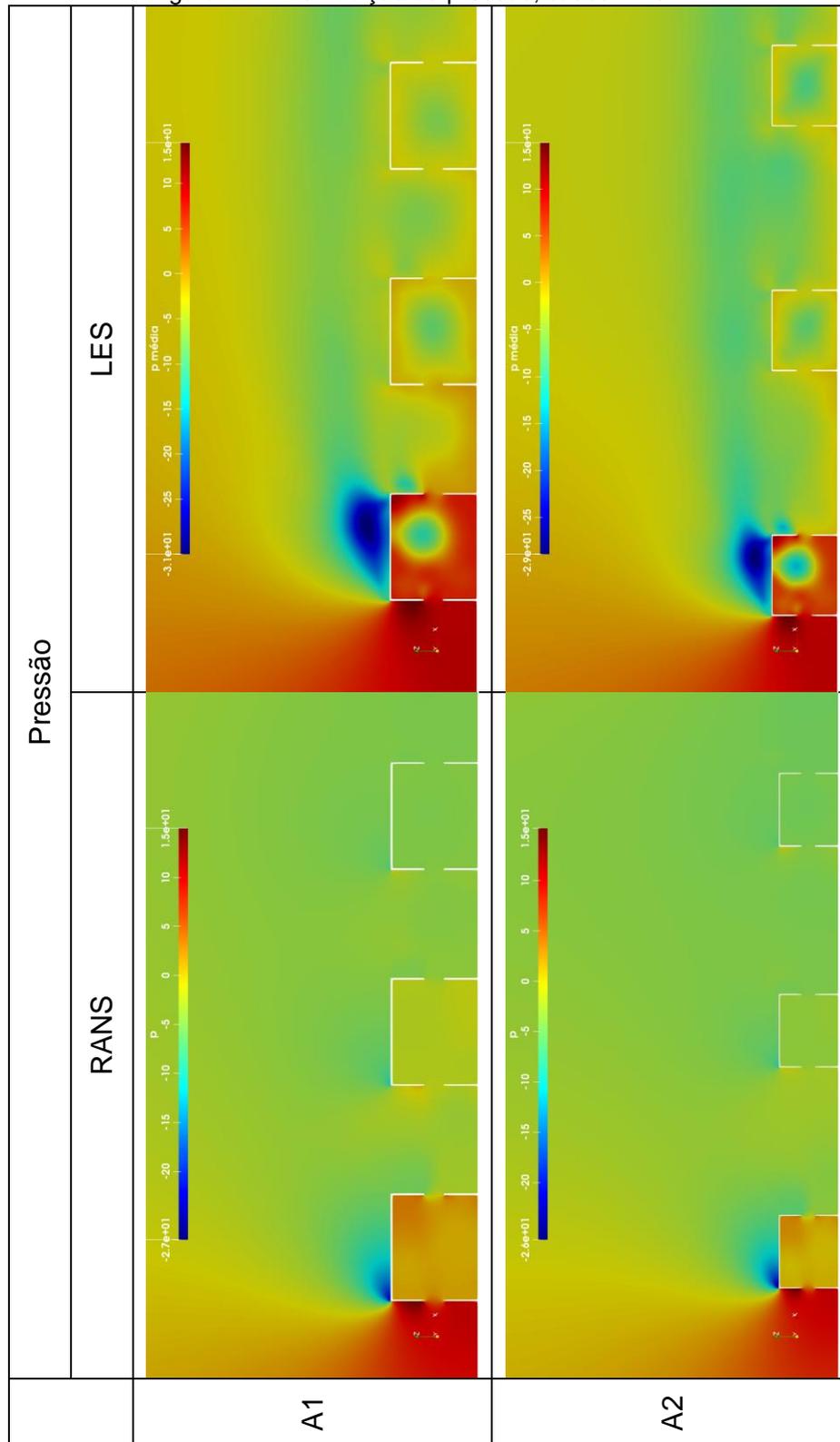
Fonte: Autor (2019).

Figura 40 – Distribuição da magnitude da velocidade do vento, casos C3 e C4.



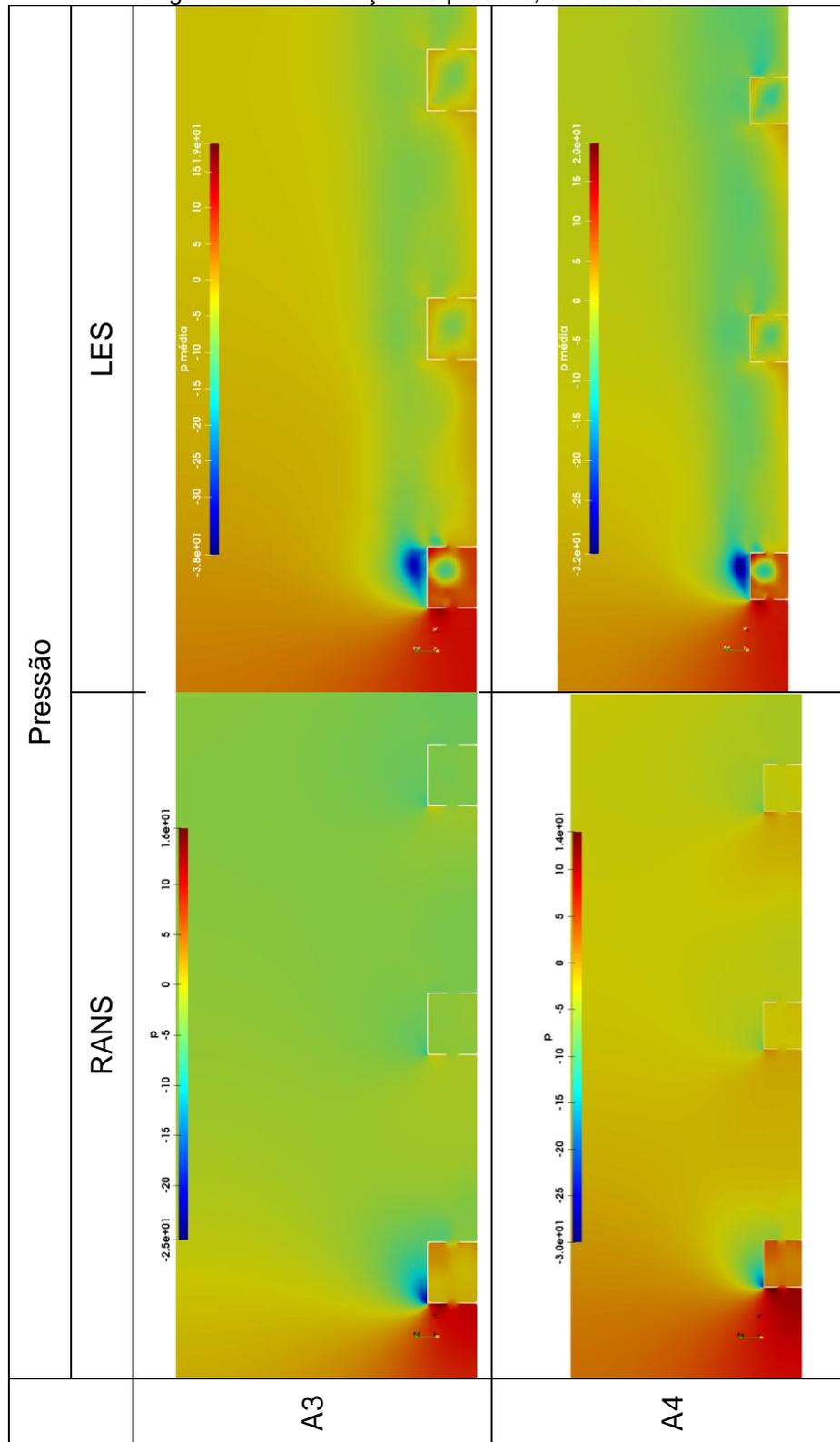
Fonte: Autor (2019).

Figura 41 – Distribuição de pressão, casos A1 e A2.



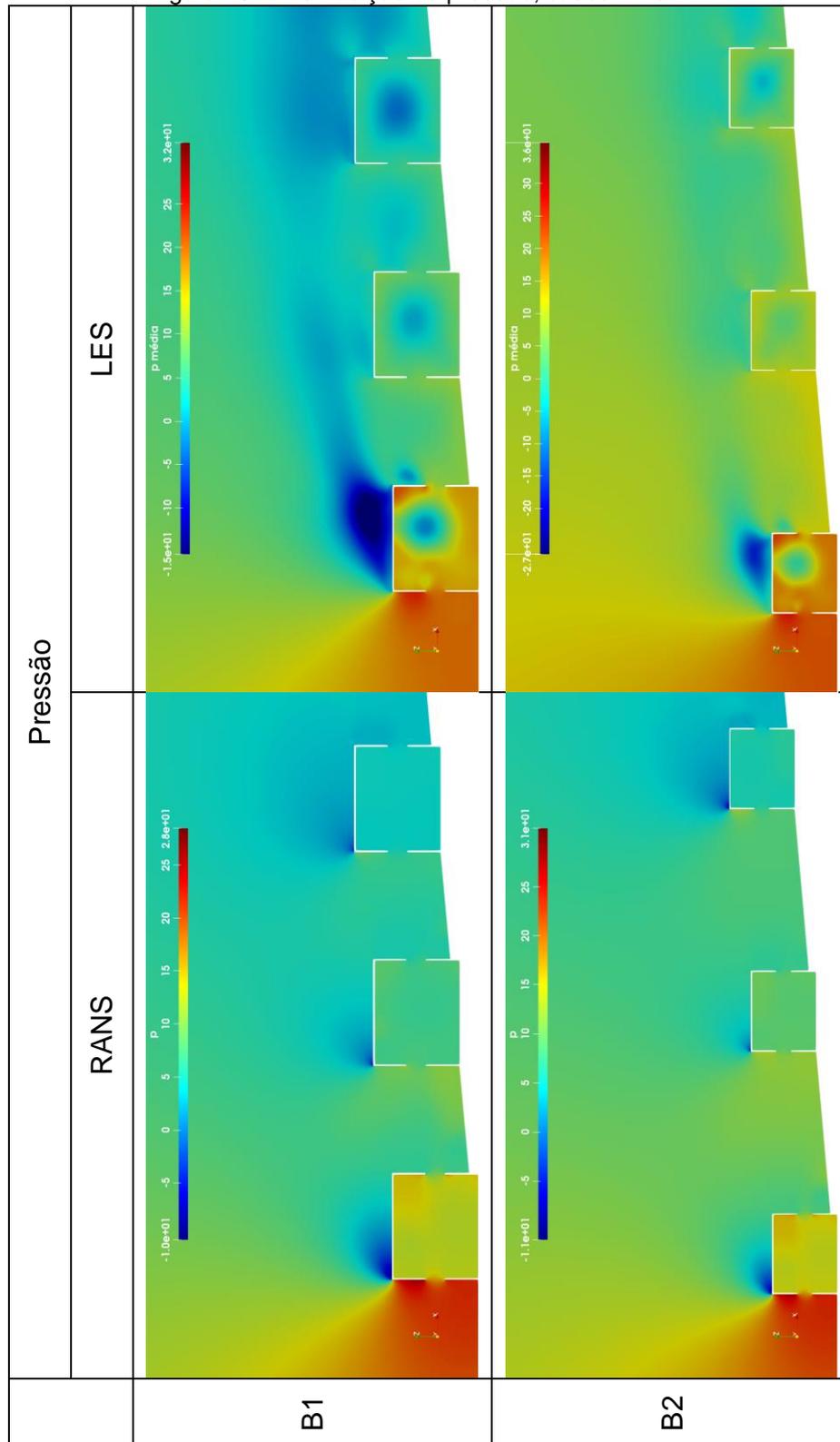
Fonte: Autor (2019).

Figura 42 – Distribuição de pressão, casos A3 e A4.



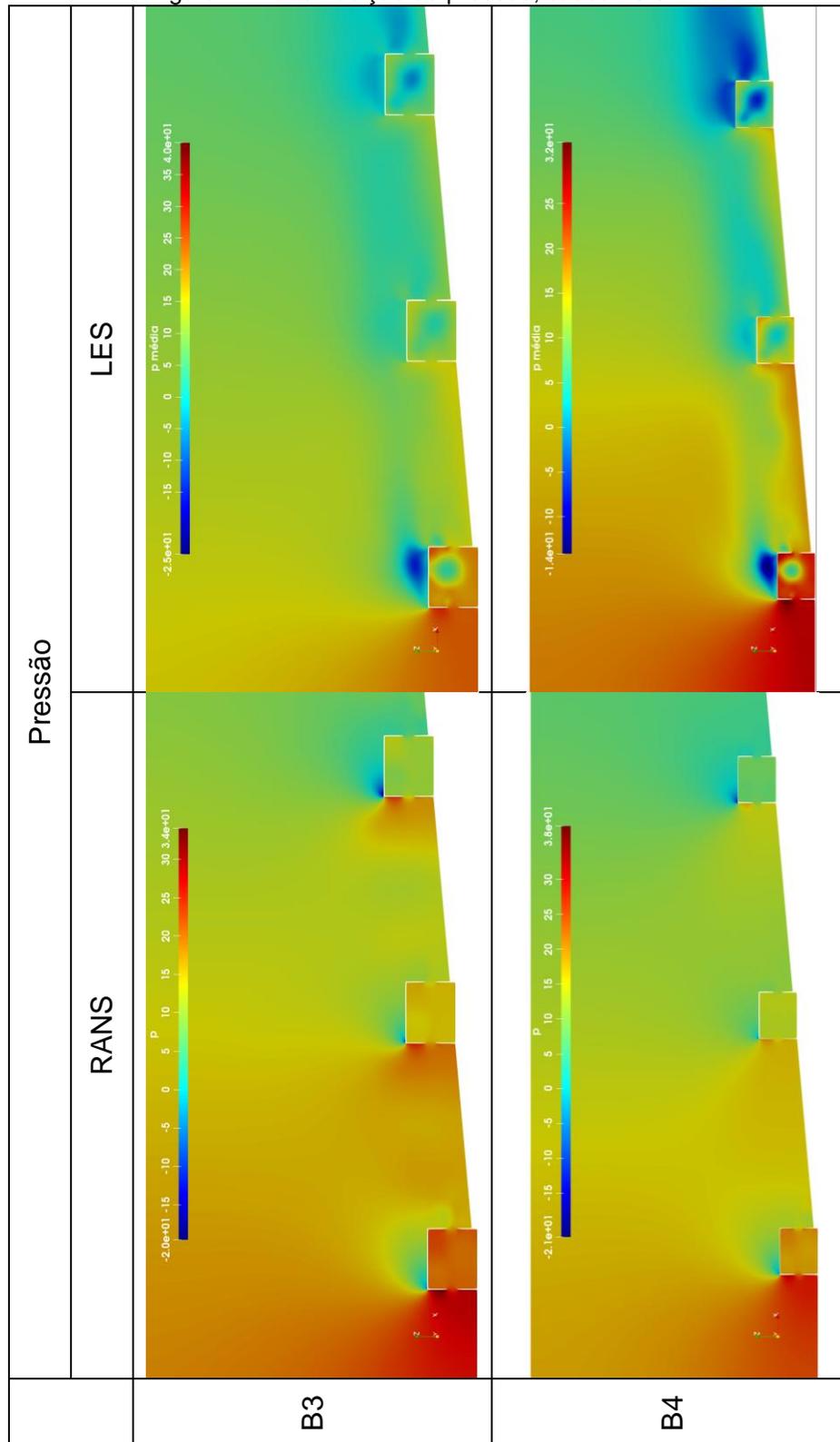
Fonte: Autor (2019).

Figura 43 – Distribuição de pressão, casos B1 e B2.



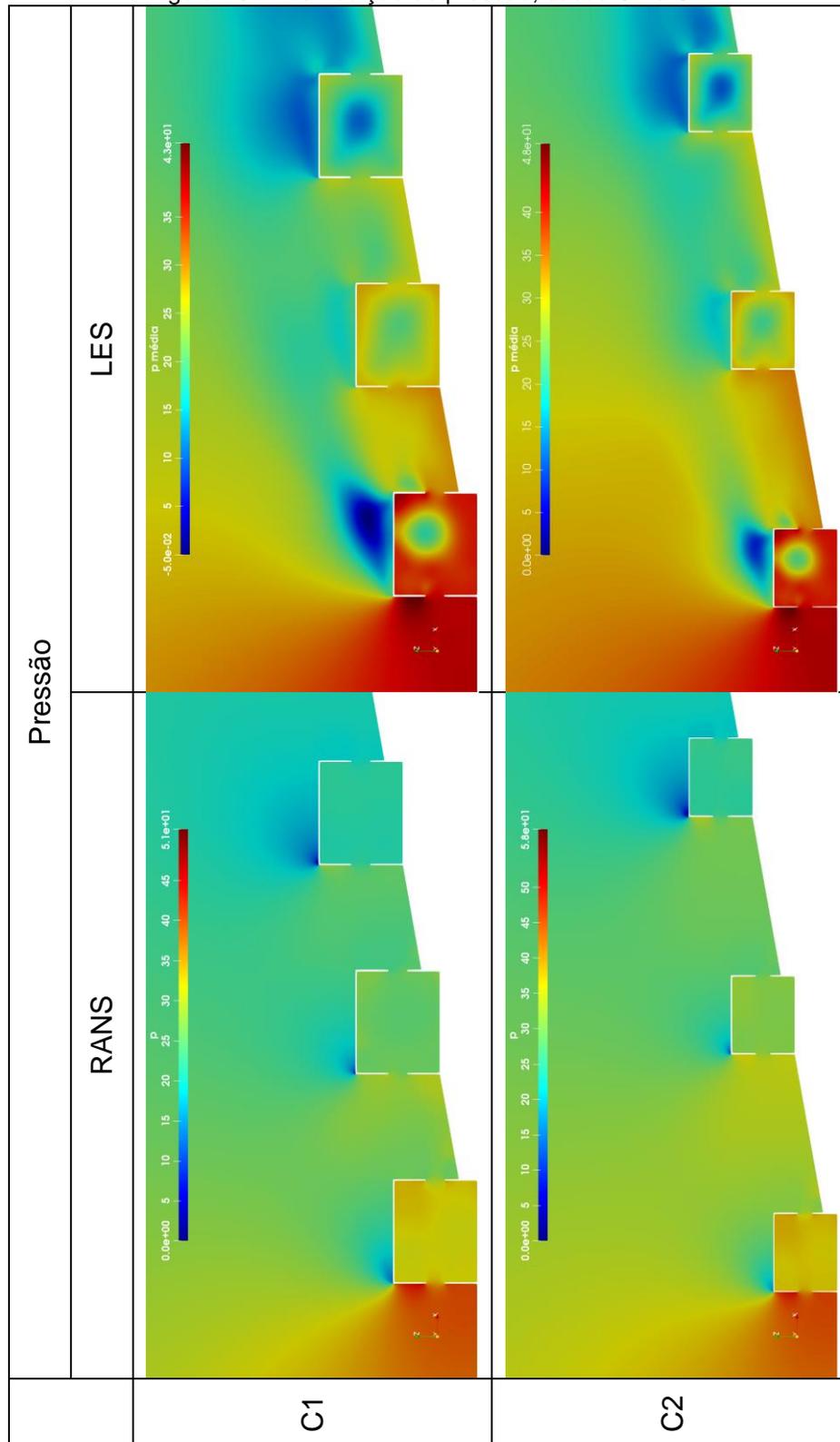
Fonte: Autor (2019).

Figura 44 – Distribuição de pressão, casos B3 e B4.



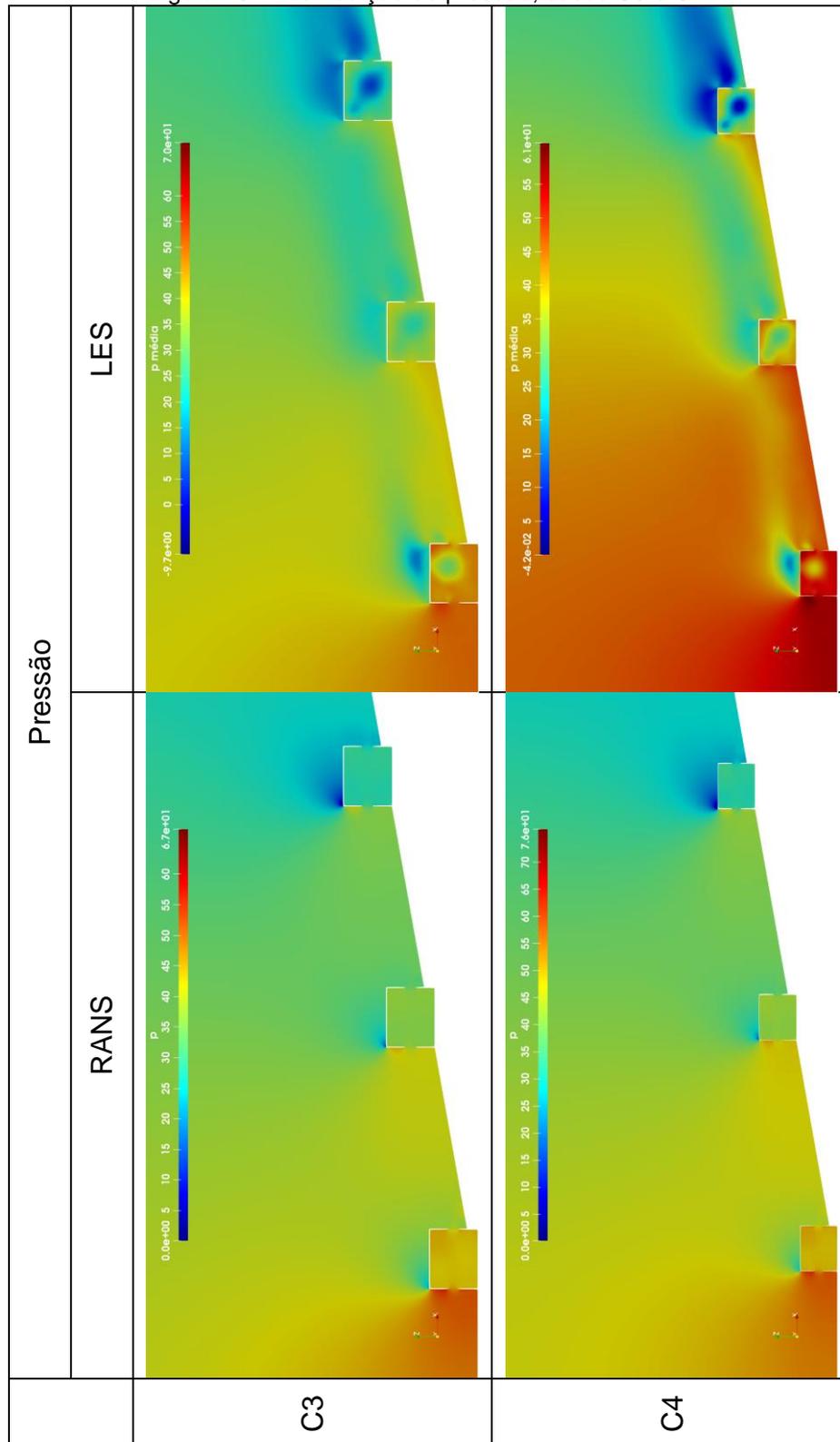
Fonte: Autor (2019).

Figura 45 – Distribuição de pressão, casos C1 e C2.



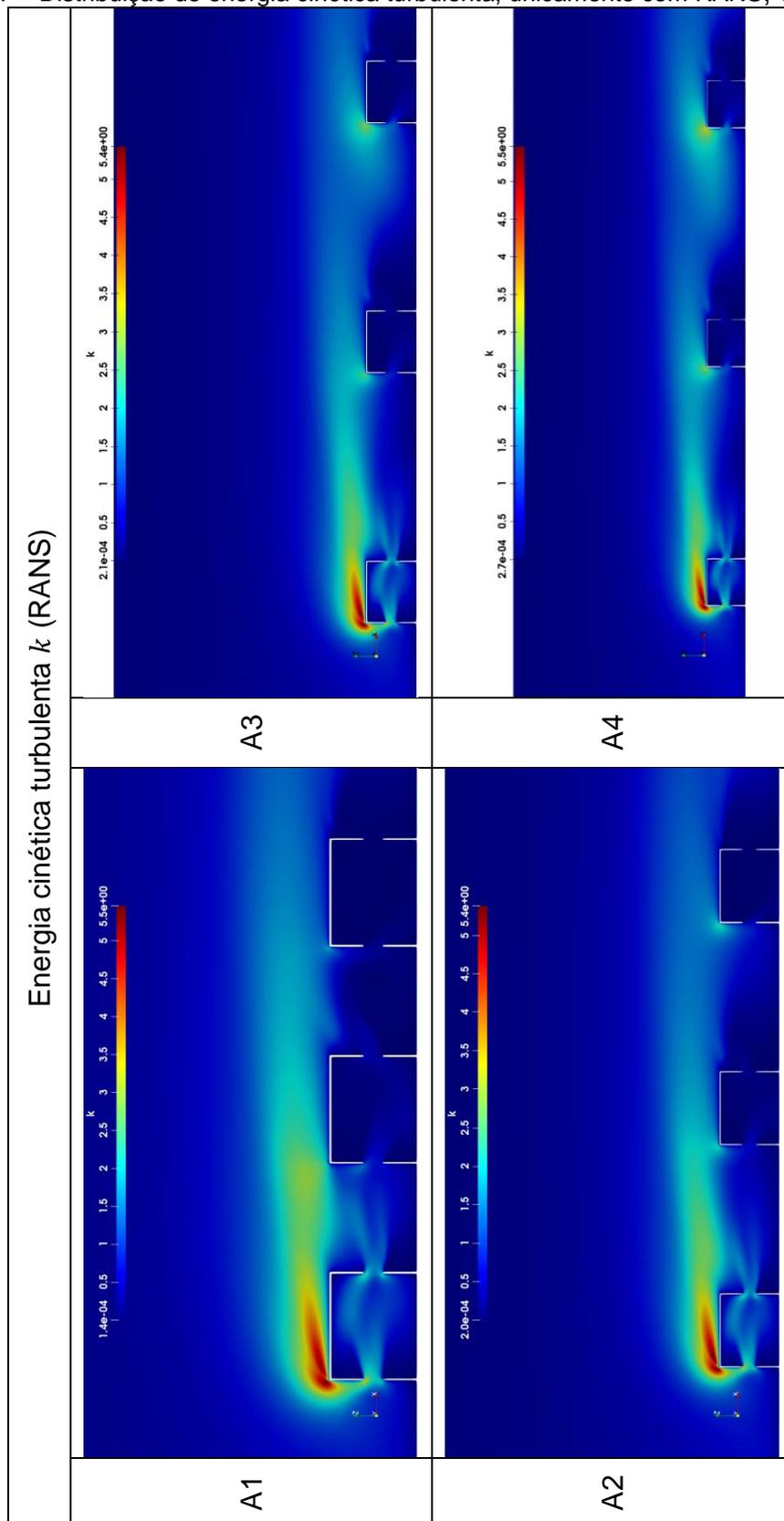
Fonte: Autor (2019).

Figura 46 – Distribuição de pressão, casos C3 e C4.



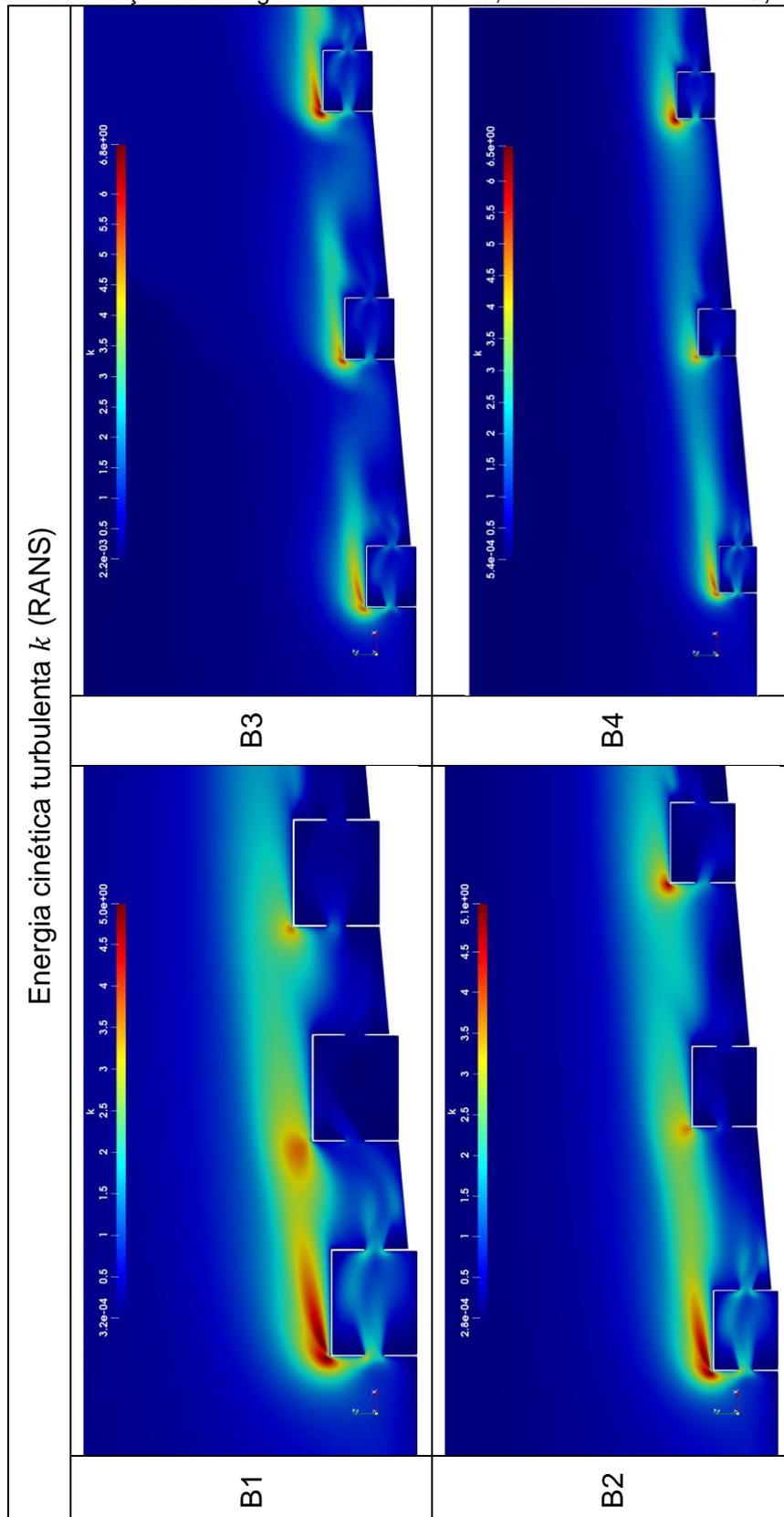
Fonte: Autor (2019).

Figura 47 – Distribuição de energia cinética turbulenta, unicamente com RANS, casos A.



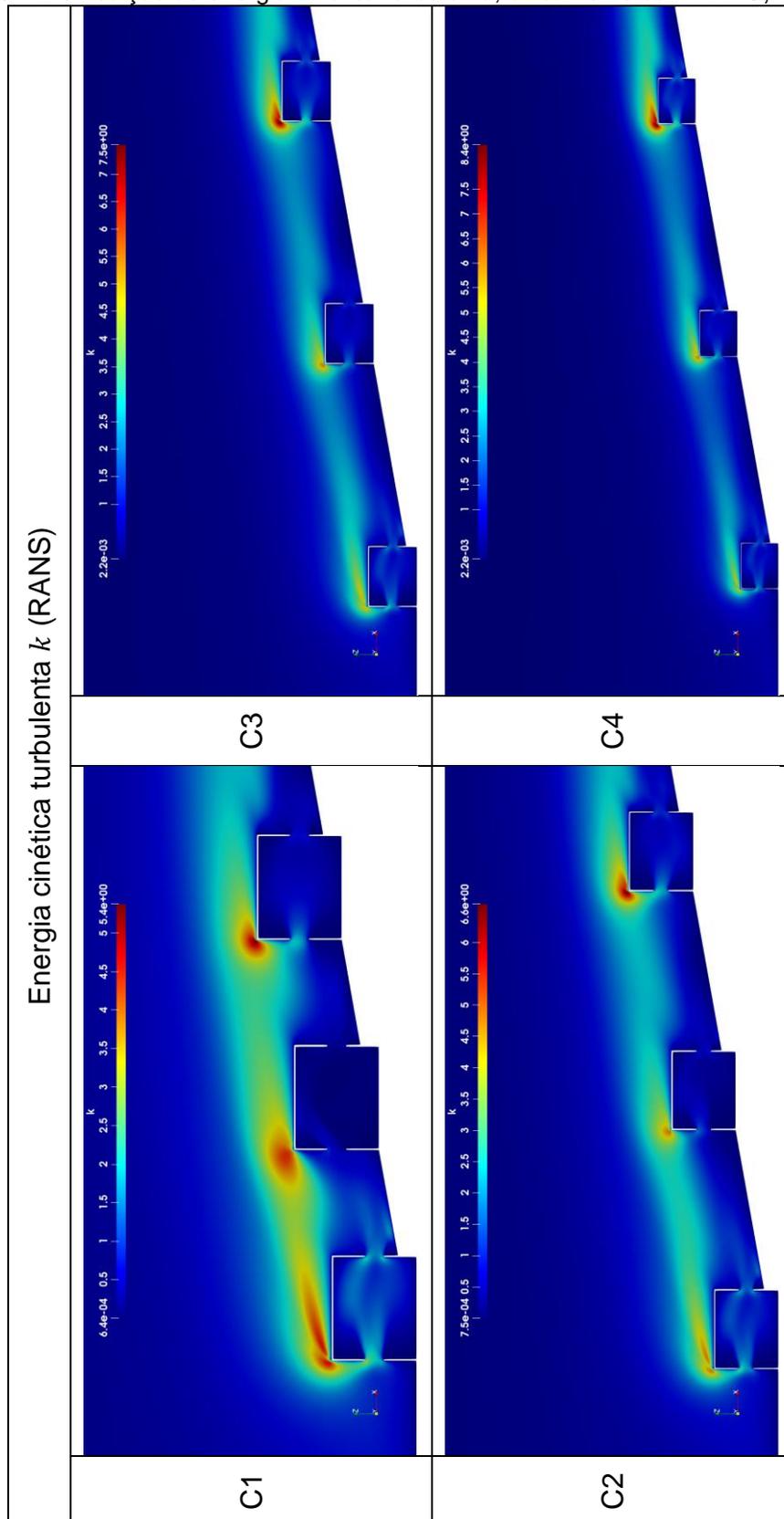
Fonte: Autor (2019).

Figura 48 – Distribuição de energia cinética turbulenta, unicamente com RANS, casos B.



Fonte: Autor (2019).

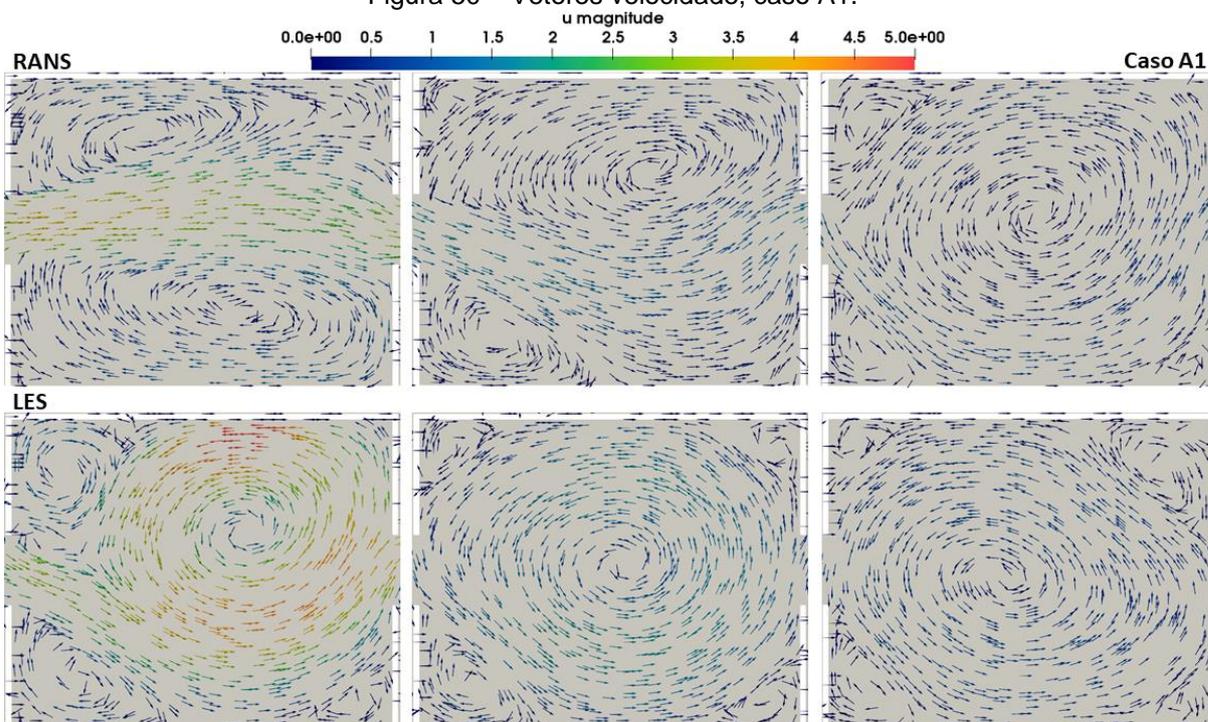
Figura 49 – Distribuição de energia cinética turbulenta, unicamente com RANS, casos C.



Fonte: Autor (2019).

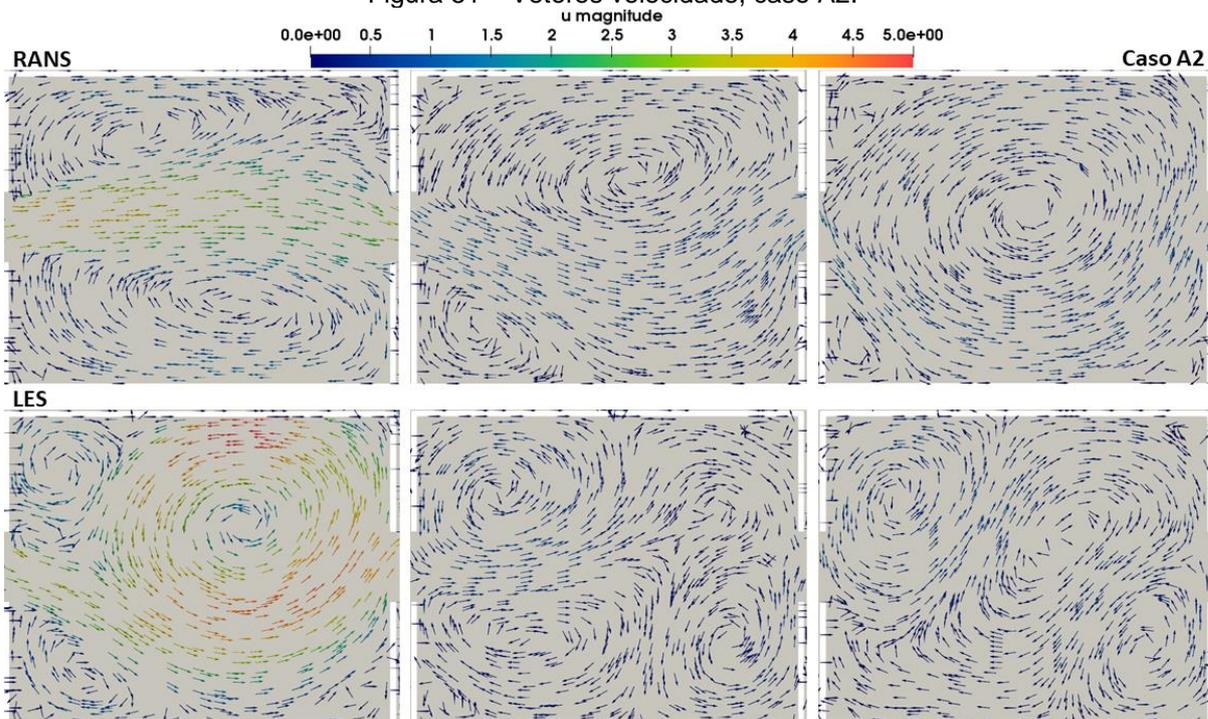
## APÊNDICE C – VETORES VELOCIDADE NO INTERIOR DAS EDIFICAÇÕES, CASOS KARAVA 2D

Figura 50 – Vetores velocidade, caso A1.



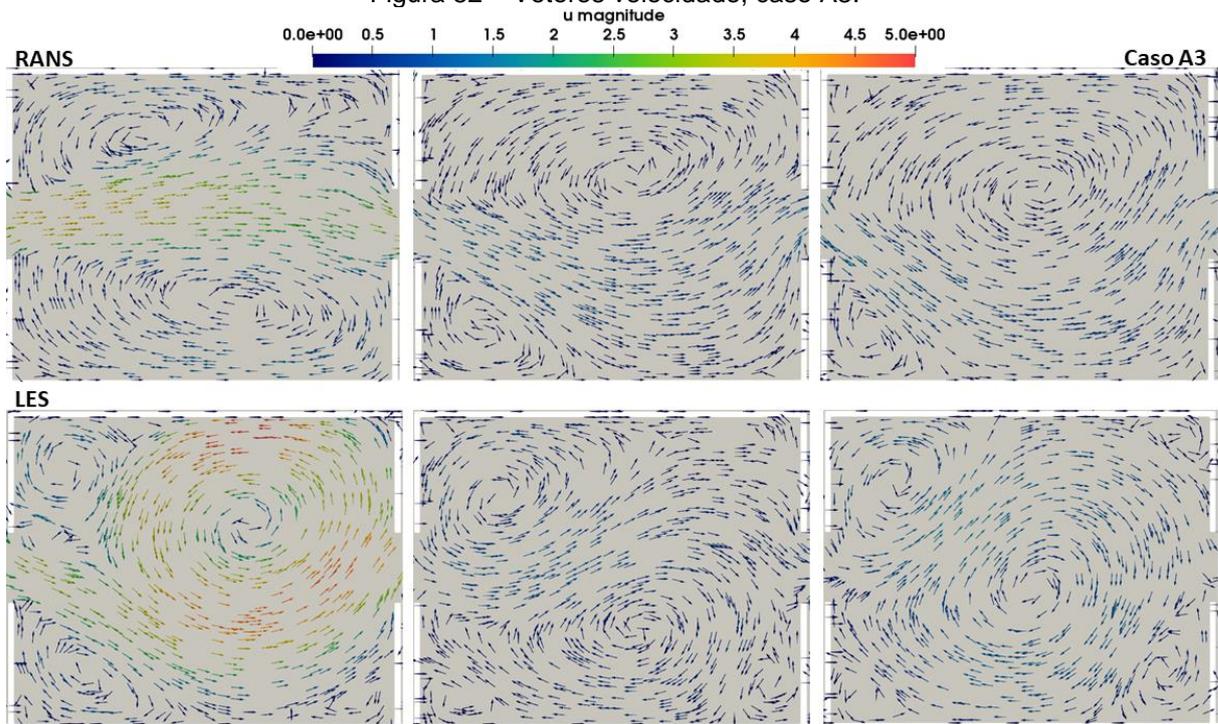
Fonte: Autor (2019).

Figura 51 – Vetores velocidade, caso A2.



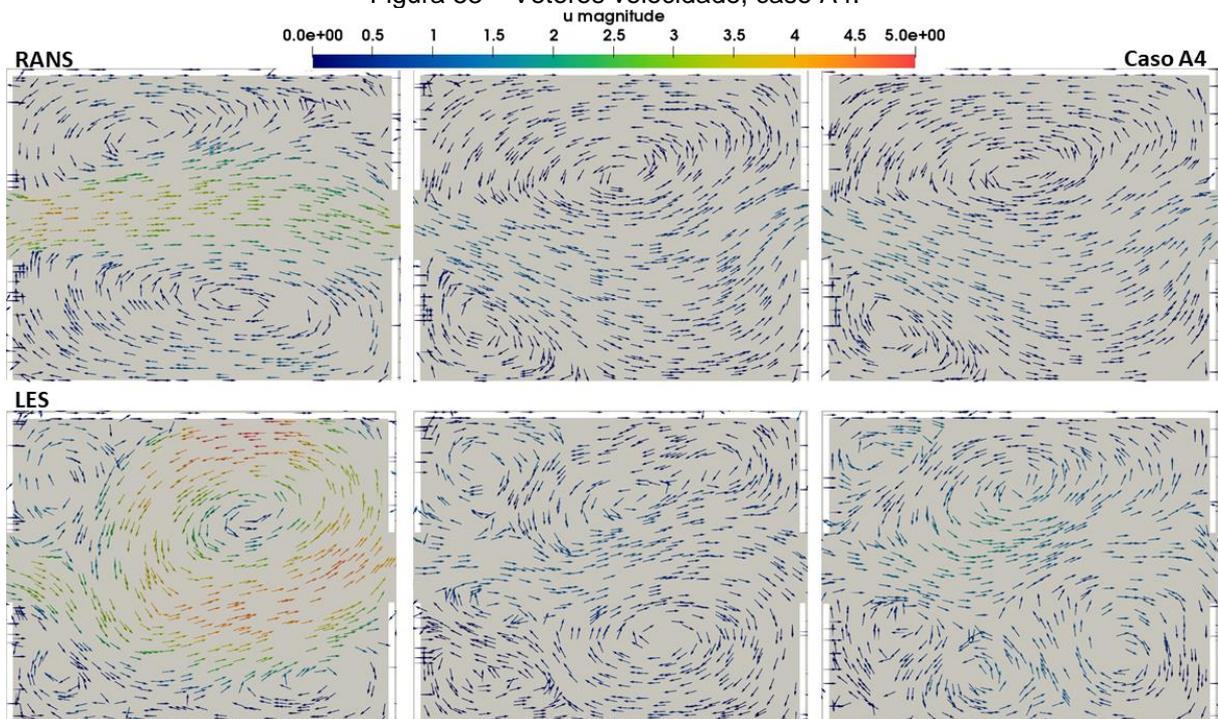
Fonte: Autor (2019).

Figura 52 – Vetores velocidade, caso A3.



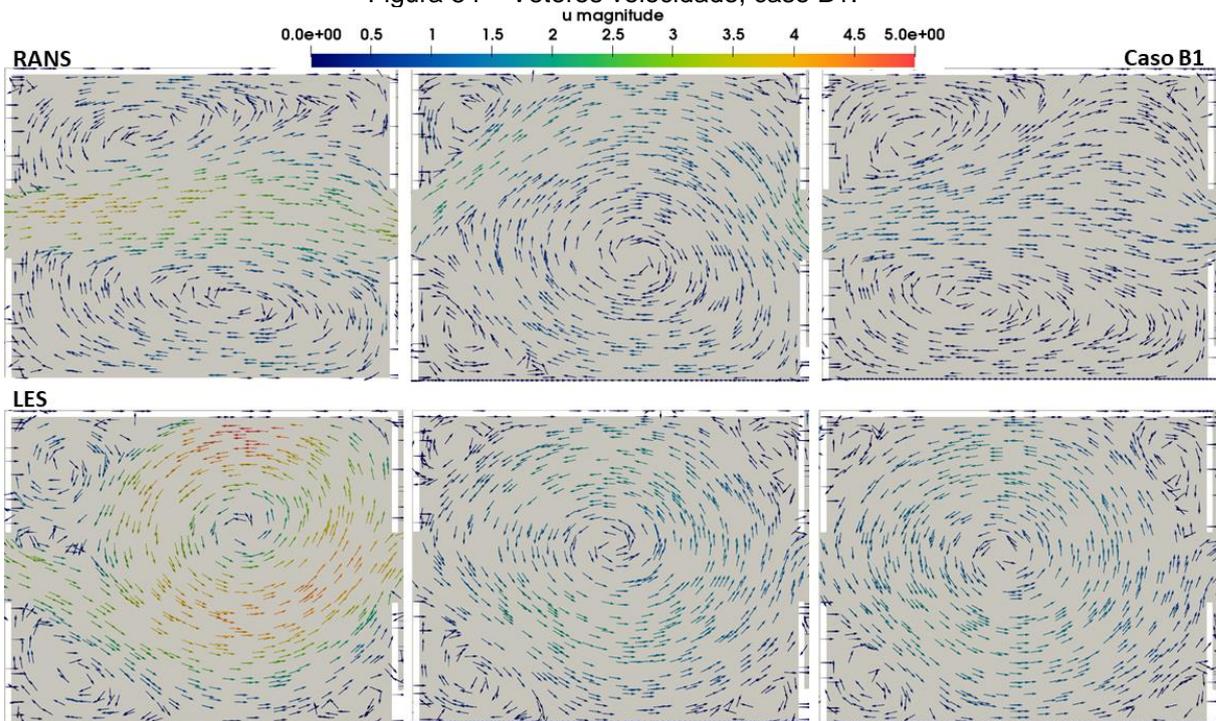
Fonte: Autor (2019).

Figura 53 – Vetores velocidade, caso A4.



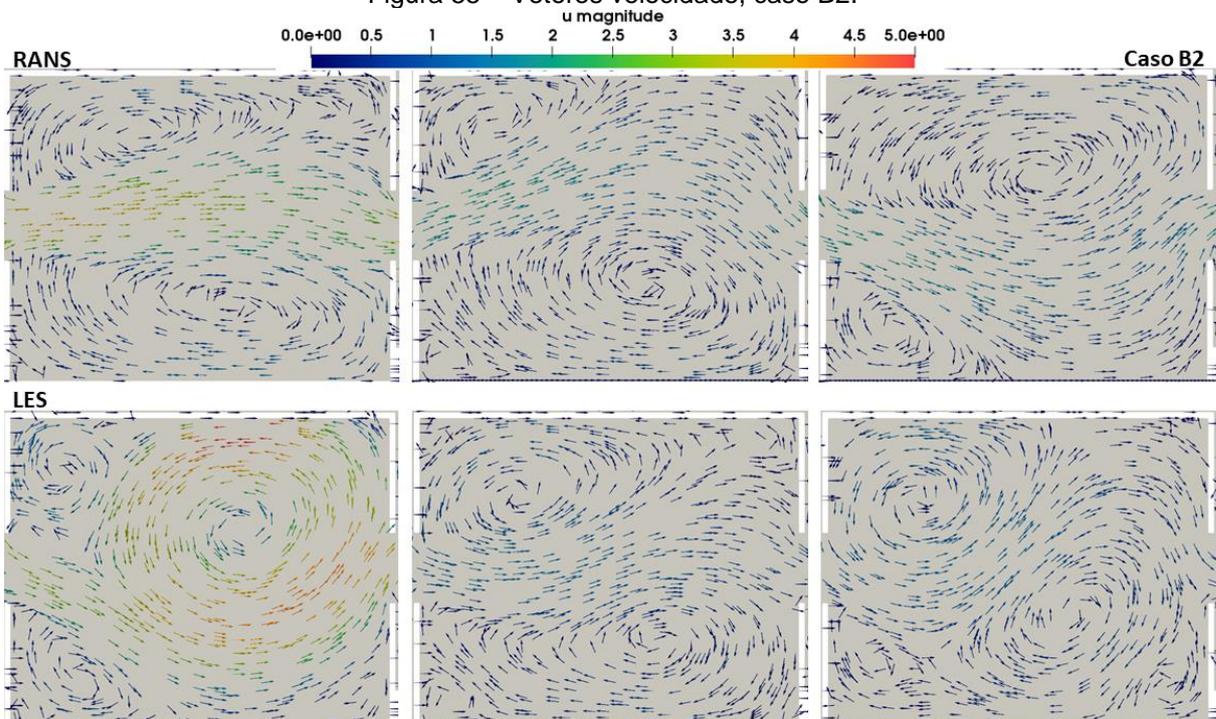
Fonte: Autor (2019).

Figura 54 – Vetores velocidade, caso B1.



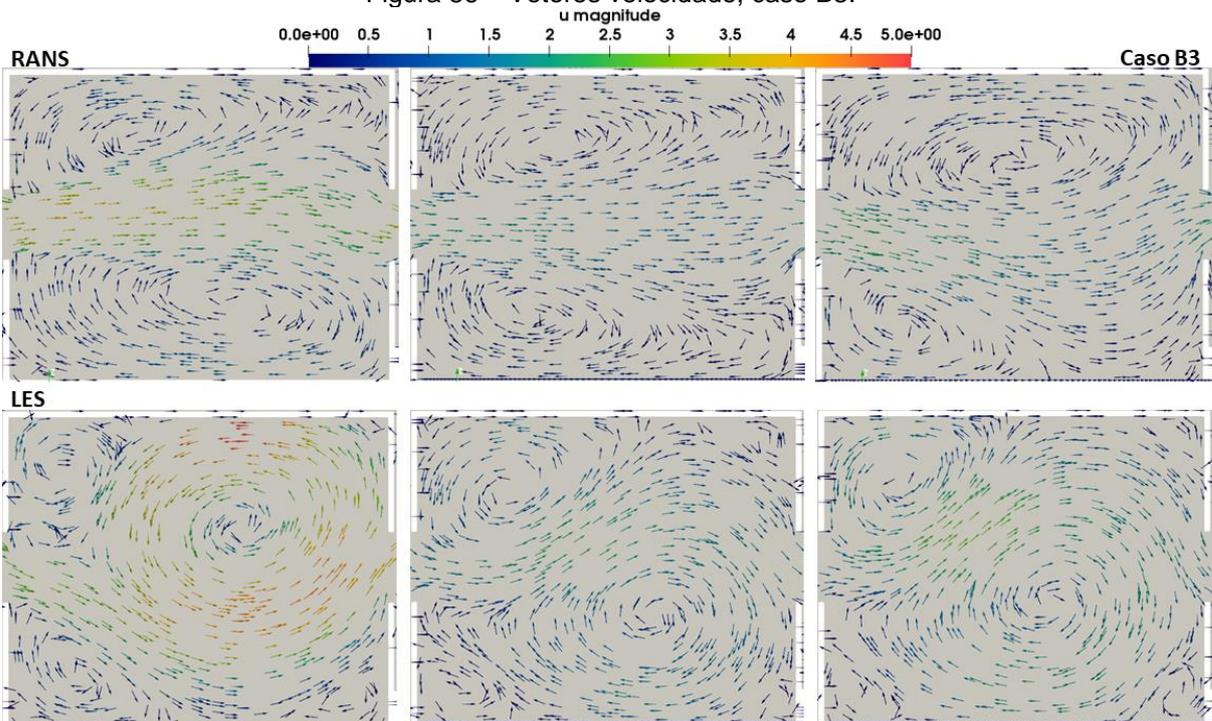
Fonte: Autor (2019).

Figura 55 – Vetores velocidade, caso B2.



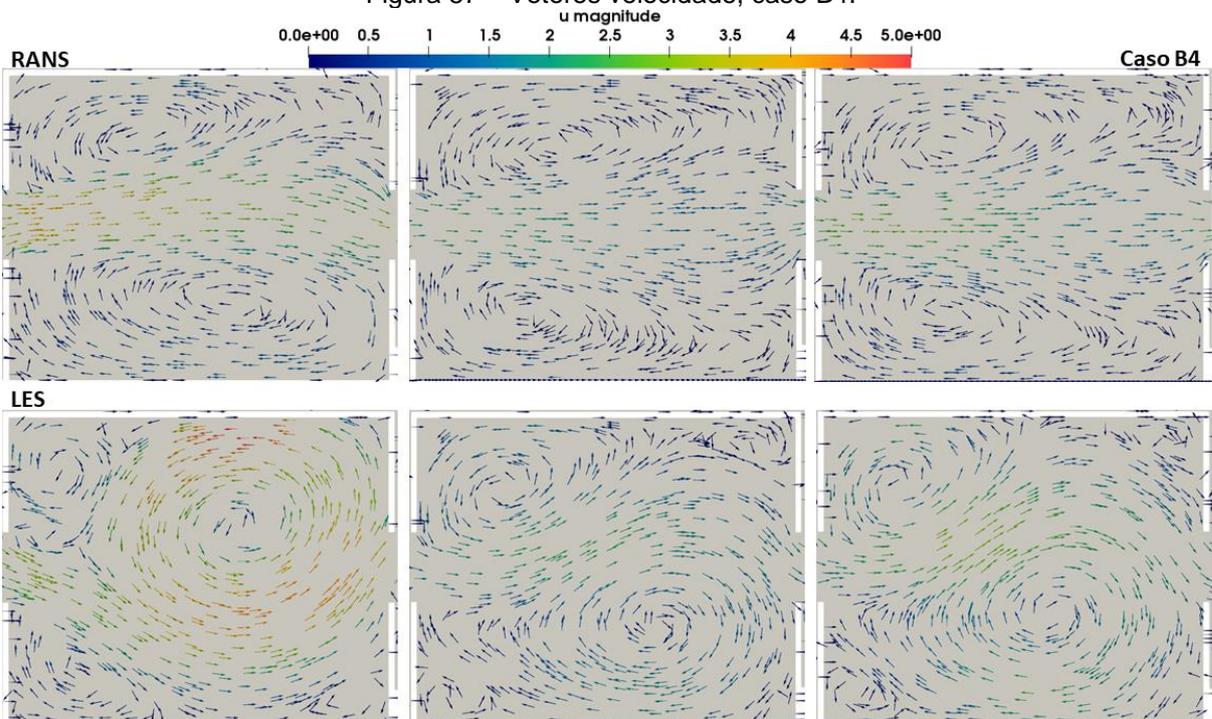
Fonte: Autor (2019).

Figura 56 – Vetores velocidade, caso B3.



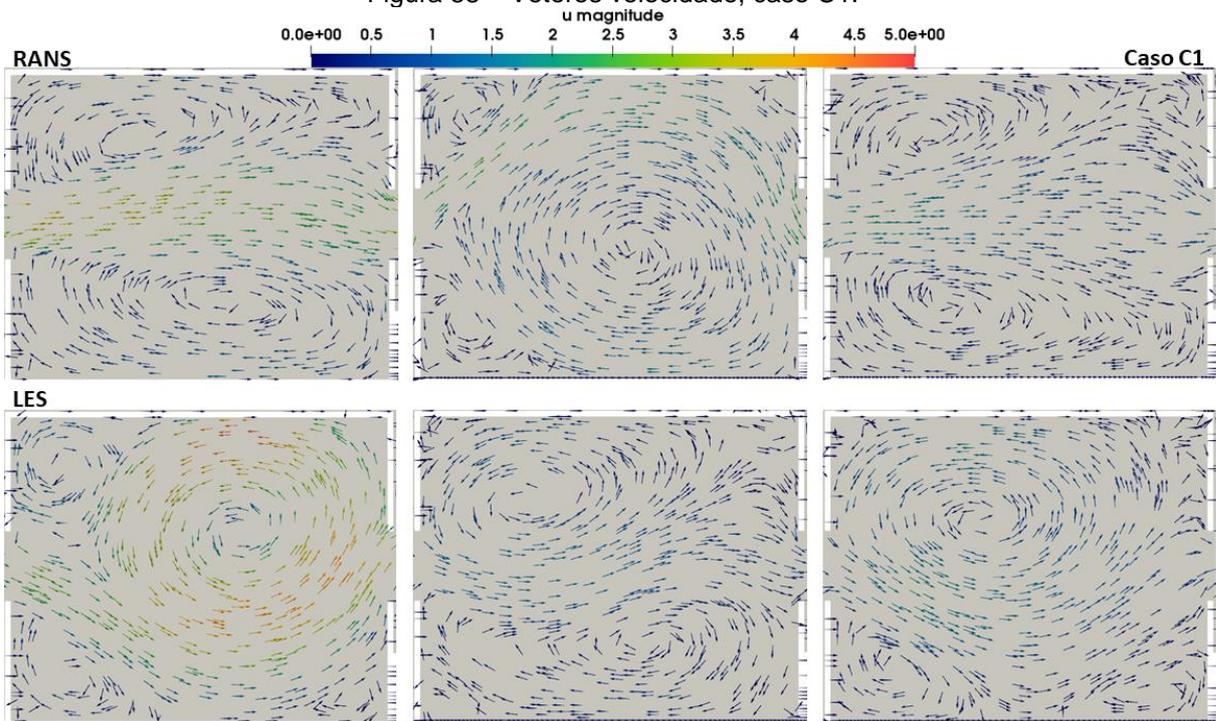
Fonte: Autor (2019).

Figura 57 – Vetores velocidade, caso B4.



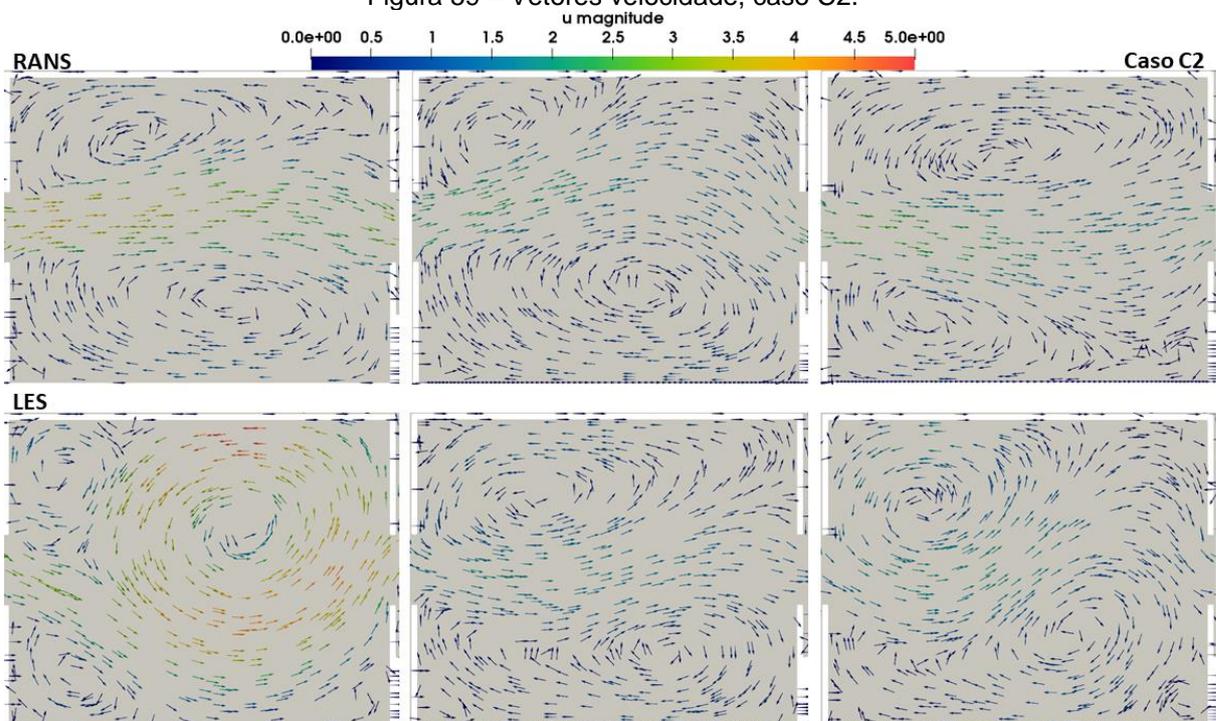
Fonte: Autor (2019).

Figura 58 – Vetores velocidade, caso C1.



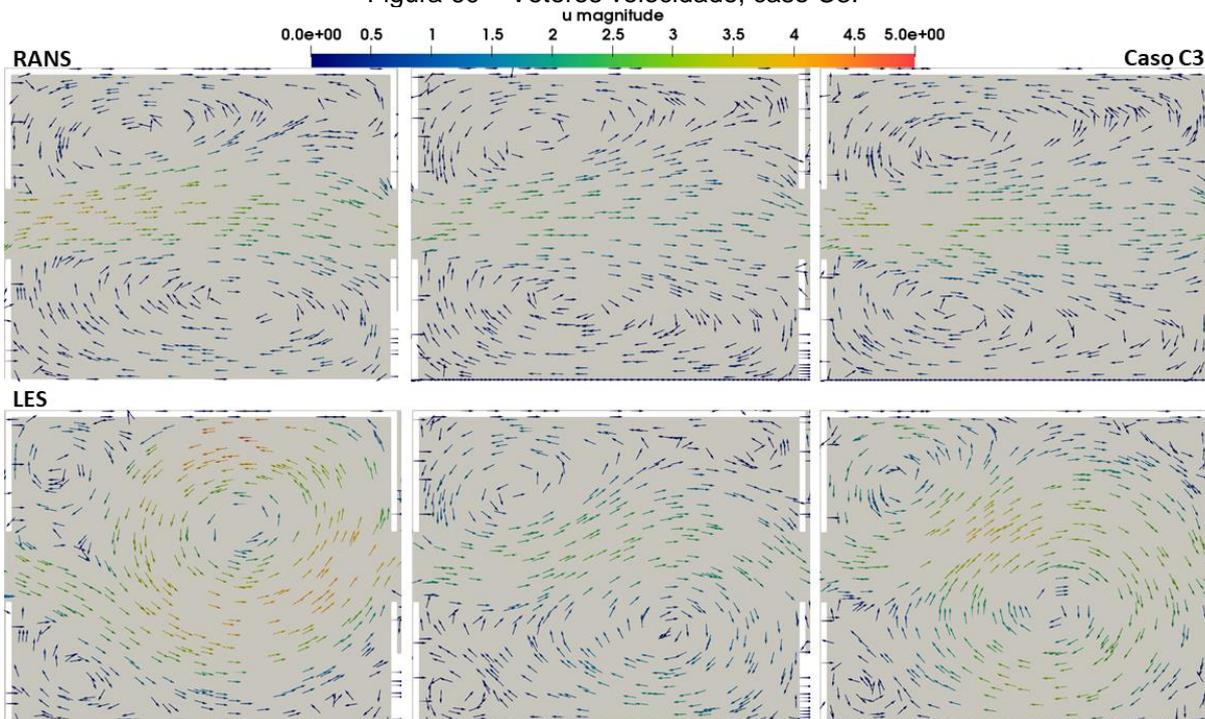
Fonte: Autor (2019).

Figura 59 – Vetores velocidade, caso C2.



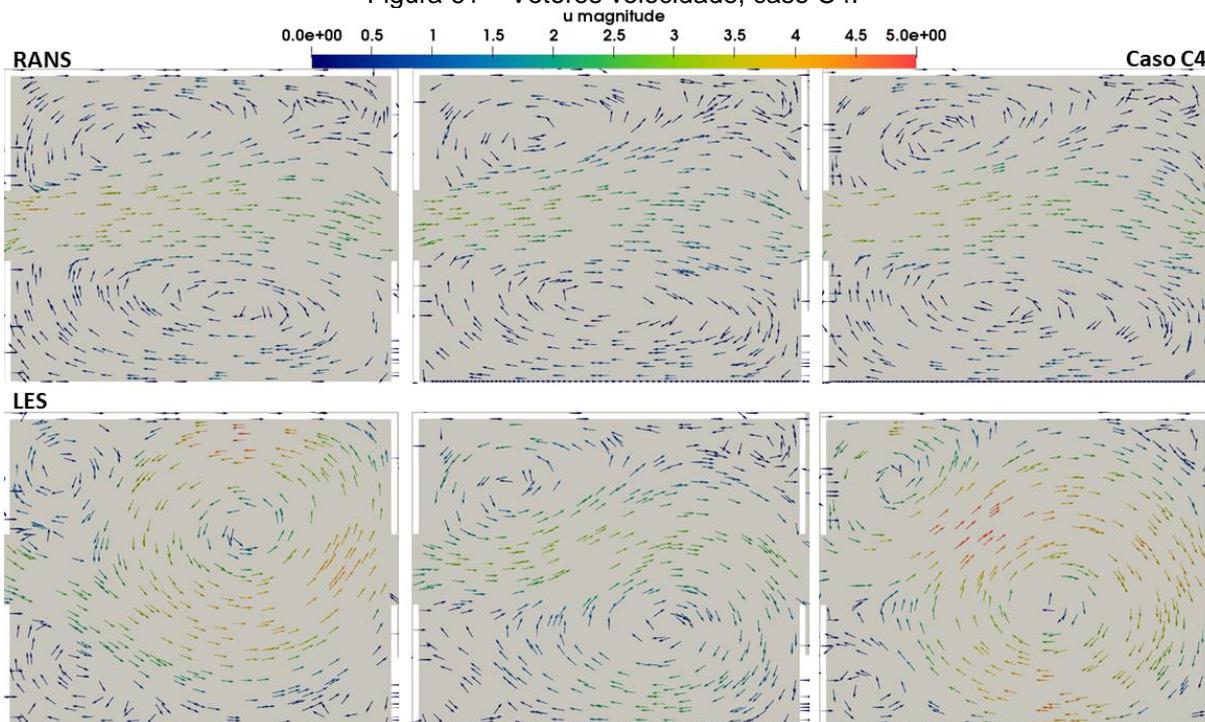
Fonte: Autor (2019).

Figura 60 – Vetores velocidade, caso C3.



Fonte: Autor (2019).

Figura 61 – Vetores velocidade, caso C4.



Fonte: Autor (2019).