

EMPREGO DO OPENFOAM NO ESTUDO DA AERODINÂMICA DE EDIFICAÇÕES

USE OF OPENFOAM IN THE STUDY OF BUILDING AERODYNAMICS

Anderson V. do Nascimento^a, Mateus C. A. D. Cavalcante^a, Gustavo Bono^{a,b}

^a*Labotatório de Engenharia Computacional (LECOM), Núcleo de Tecnologia – Centro Acadêmico do Agreste, Universidade Federal de Pernambuco, Rod. BR-104 km 59, Caruaru-PE, CEP 55002-970, Brasil, andersonvnascimento@outlook.com, mateus_sx@hotmail.com, <http://www.ufpe.br/caa>*

^b*Programa de Pós-graduação Engenharia Civil e Ambiental, Centro Acadêmico do Agreste, Universidade Federal de Pernambuco, Rod. BR-104 km 59, Caruaru-PE, CEP 55002-970, Brasil, bonogustavo@gmail.com, <http://www.ufpe.br/ppgecam>*

Palavras-chave: Engenharia do vento, aerodinâmica das construções, simulação numérica.

Resumo. A aerodinâmica das edificações tem grande influência na distribuição de pressão e, por consequência, essa influência se estende às cargas devidas ao vento, à ventilação natural, ao conforto dos pedestres, entre outros. No presente trabalho, simula-se através da Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) o escoamento no interior e exterior de modelos simplificados de edificações, a fim de avaliar como alterações geométricas podem afetar sua aerodinâmica. Para isso, emprega-se o pacote livre de código aberto OpenFOAM (versão 5.0). Todos os casos foram simulados considerando escoamento incompressível, turbulento e em regime permanente. Para verificar o potencial do pacote OpenFOAM na Engenharia do Vento Computacional foram simulados dois casos tridimensionais: o escoamento ao redor de uma edificação baixa com aberturas em faces opostas e o escoamento em torno de duas edificações adjacentes com razão de aspecto 1:1:4. A metodologia adotada mostrou-se muito eficiente para estudo de aerodinâmica de edificações, já que permitiu a visualização de todos os parâmetros importantes (distribuições de pressão, linhas de correntes, taxas de vazão e perfis de velocidade) e os resultados mostraram ótima concordância com a literatura.

Keywords: Wind engineering, building aerodynamics, numerical simulation.

Abstract. The aerodynamics of buildings has a great influence on the pressure distribution and, consequently, this influence extends to loads due to wind, natural ventilation, pedestrian comfort, among others. In the present work, the flow inside e outside of simplified building models is simulated through Computational Fluid Dynamics (CFD), in order to evaluate how geometrical changes can affect its aerodynamics. For this, the open source OpenFOAM package (version 5.0) is used. All cases were simulated considering incompressible, turbulent e steady flow. To verify the potential of the OpenFOAM package in Computational Wind Engineering, two three-dimensional cases were simulated: the flow around a low-rise building with openings on opposite faces e the flow around two adjacent buildings with aspect ratio 1:1:4. The adopted methodology proved to be very efficient for the study of building aerodynamics, as it allowed the visualization of all important parameters (pressure distributions, current lines, flow rates e velocity profiles) and the results showed excellent agreement with the literature.

1 INTRODUÇÃO

A aerodinâmica de uma edificação tem influência direta sobre as cargas devidas ao vento, sobre a topologia do escoamento ao redor da mesma, na ventilação natural em seu interior, entre outros. Sendo assim, avaliar as condições aerodinâmicas das edificações é de suma importância ainda na fase de projeto, onde são tomadas as decisões que permitem prolongar a vida útil da construção e garantir o conforto dos usuários.

Existem diferentes abordagens de estudo para se prever o comportamento aerodinâmico das edificações. Há décadas, os túneis de vento têm sido a abordagem predominante para tal fim, contudo, com a popularização e evolução dos computadores e o desenvolvimento de métodos numéricos mais acurados, as simulações numéricas tornaram-se uma excelente alternativa.

As simulações de aerodinâmica são realizadas através de *softwares* baseados na Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD – *Computational Fluid Dynamics*). Comparada aos experimentos em túnel de vento, a CFD traz vantagens como a visualização dos fenômenos físicos em todo o domínio computacional, o uso de escala real para facilitar a compatibilidades das condições físicas do escoamento, a rapidez para criação dos cenários a serem simulados, a economia de recursos materiais para realização dos estudos e a customização física.

Os *softwares* baseados na CFD mais utilizados para pesquisas de aerodinâmica de edificações são aqueles presentes em pacotes comerciais. Toja-Silva et al. (2018) mostraram que, dentre as pesquisas no tema relatadas, cerca de 62% utilizaram o pacote Ansys (Fluent e CFX), enquanto 20% utilizaram o pacote livre de código aberto OpenFOAM (The OpenFOAM Foundation, 2021) e os demais *softwares* tiveram taxas de uso inferiores a 7%. A predominância do pacote Ansys se dá pelo fato das ferramentas comerciais oferecem diversos aplicativos com interfaces gráficas intuitivas, alta capacidade de processamento, uma vasta documentação e suporte técnico. No entanto, existe um alto custo atrelado ao licenciamento desses programas e não há acesso ao código fonte, embora, as funções definidas pelo usuário (UDF, User-Defined Functions) permitam certa customização. Esses empecilhos muitas vezes incentivam o desenvolvimento de códigos próprios (“*in houses*”) ou a utilização de programas livres de código aberto, que também permitem modificações e criações de novos códigos, como é o caso do OpenFOAM (GÄRTNER et al., 2020).

O OpenFOAM (*Open Source Field Operation e Manipulation*), é um programa livre de código aberto desenvolvido em C++ com vários utilitários e uma vasta biblioteca de *solvers* implementados para diversos problemas. A grande vantagem do OpenFOAM em relação aos programas comerciais é o fato de estar licenciado sob GNU (*General Public License*). Além disso, apresenta outras vantagens como a possibilidade da implementação e otimização de códigos através de contribuições de pesquisadores e usuários de todo mundo. O fato de ser um programa robusto com diversas aplicações em CFD, de conter ferramentas de pré e pós-processamento e a utilização de processamento em paralelo, o torna uma ótima escolha para estudo da aerodinâmica de edificações. Vale ressaltar que existem algumas desvantagens na utilização do OpenFOAM em comparação com os programas comerciais. O fato de o programa não possuir uma interface gráfica, dificulta a interação inicial com o usuário. Outro fator que afeta a utilização é a pouca documentação disponível, sendo necessário muitas vezes recorrer aos ativos fóruns e grupos que trabalham com o programa OpenFOAM.

No presente trabalho emprega-se o pacote OpenFOAM para simulação de dois diferentes casos: o primeiro refere-se ao estudo de ventilação em um modelo com aberturas em faces opostas, enquanto que o segundo refere-se ao escoamento ao redor de edifícios altos dispostos paralelamente. Em ambos os casos, foi possível avaliar, de maneira eficiente, a aerodinâmica das edificações. Pôde-se visualizar parâmetros importantes como distribuições de pressão no entorno dos edifícios e disposição das linhas de corrente. Além disso, os resultados foram

comparados com os encontrados na literatura.

2 METODOLOGIA

Todos os *softwares* utilizados no presente trabalho são livres. Para a etapa de pré-processamento (criação do domínio computacional, discretização espacial e identificação dos contornos) utilizou-se o *software* Salomé na versão 8.3.0. Para a etapa de processamento utilizou-se o pacote OpenFOAM na versão 5.0 disponibilizada pela The OpenFOAM Foundation (2021). Por fim, para a etapa de pós-processamento utilizou o *software* de código aberto Paraview (que já vem acoplado no pacote OpenFOAM) na versão 5.4.1.

As simulações realizadas tratam o escoamento como tridimensional, isotérmico e incompressível. Adota-se o regime estacionário, isso através do esquema de acoplamento SIMPLE (Patankar, 1980). Para a turbulência, utilizou-se a modelagem RANS (Navier-Stokes com média de Reynolds) através do modelo $k - \varepsilon$ padrão (Launder e Spalding, 1974) para o primeiro caso e o modelo RNG $k - \varepsilon$ (Yakhot et al., 1992), para o segundo caso. A tolerância adotada como critério de parada para cada variável do escoamento é de 10^{-4} para o primeiro caso e de 10^{-6} para o segundo caso. 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, 2020). 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*. 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. Para as equações de velocidade e demais variáveis de turbulência, utilizou-se para o primeiro caso o solver *smooth* com esquema Gauss-Seidel, e para o segundo caso foi utilizado o solver PBiCG (do inglês *Preconditioned Bi-Conjugate Gradient*). Ver OpenFOAM Foundation (2020).

Nos próximos itens, mostram-se os detalhes dos casos estudados.

2.1 Caso com duas aberturas em faces opostas

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 1.

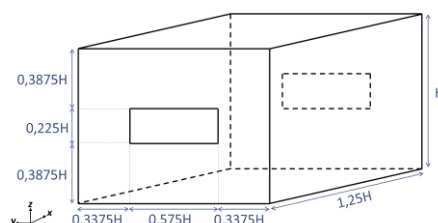


Figura 1 – Modelo de duas aberturas.

O domínio computacional foi dimensionado com base nas recomendações de Franke et al. (2007), Tominaga et al. (2008) e Hooff, Blocken e Tominaga (2017).

Para a altura da edificação, adota-se o valor $H=0,16$ m, e, para a velocidade de entrada $u(z)$, adota-se a lei logarítmica, conforme a Eq. (1). Prescreve-se um número de Reynolds igual a $4,5 \times 10^4$. A velocidade de fricção u_{ABL} é de $0,348$ m/s, a altura rugosa z_0 vale 9×10^{-4} m e a constante de Von Karmán κ adota-se $0,42$.

$$u(z) = \frac{u_{ABL}}{\kappa} \ln\left(\frac{z+z_0}{z_0}\right) \quad (1)$$

Os perfis de entrada de velocidade do vento são aplicados nas faces da entrada e laterais do domínio utilizando a Eq (1). A energia cinética turbulenta (k) e a sua taxa de dissipação (ε) também são aplicadas na entrada e nas laterais do domínio computacional, utilizando a Eq. (2) para k e a Eq. (3) para ε .

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

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

Na face de saída do domínio, a pressão prescreve-se como nula e a velocidade é calculado com a condição de gradiente nulo. As outras condições de contorno na saída são aplicadas com a condição de gradiente nulo. Para o piso e as paredes adota-se a condições de contorno de não deslizamento. Então, são utilizadas condições de velocidade nula nesses contornos. Além disso, também são aplicadas funções de parede para as variáveis de turbulência, chamadas de *kqRWallFunction* e *epsilonWallFunction* no OpenFOAM (The OpenFOAM Foundation, 2020). A condição de contorno para a viscosidade turbulenta é aplicada no piso e nas paredes através da função *nutkRoughWallFunction* do OpenFOAM (The OpenFOAM Foundation, 2020).

A Figura 3 mostra a malha computacional para o presente caso. Foram adotadas 60 células em cada dimensão do modelo, o que resultou numa malha total de $5,9 \times 10^6$ células. Buscou-se concentrar mais células no entorno do modelo para melhorar os resultados nessa região. Para mais detalhes do presente caso, recomenda-se ver Nascimento (2019).

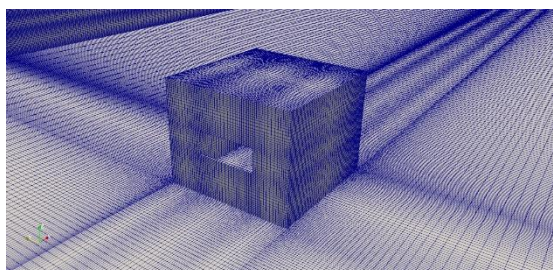


Figura 3 – Malha computacional do caso de duas aberturas.

2.2 Caso de prédios paralelos

Simula-se o escoamento em regime permanente ao redor de dois edifícios altos paralelos. As edificações têm razão de aspecto (comprimento:largura:altura) $B:B:H = 1:1:4$, sendo a distância entre elas igual a B , e incidência do vento à 0° , conforme mostrado na Figura 4. Esse exemplo é baseado no modelo presente no banco de dados de estudos em túnel de vento da Universidade Politécnica de Tóquio - UPT (<http://www.wind.arch.t-kougei.ac.jp/system/eng/contents/code/tpu>), onde $B=0,07$ m, número de Reynolds igual a $1,53 \times 10^5$ e velocidade de referência igual a 8,2 m/s, medida na altura máxima da edificação

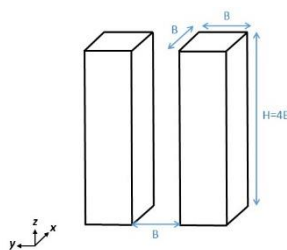


Figura 4 – Modelo dos edifícios altos paralelos.

O domínio computacional deste caso (Figura 5) foi dimensionado com base nas recomendações de Franke et al. (2007) e Toja-Silva et al. (2015b, a)

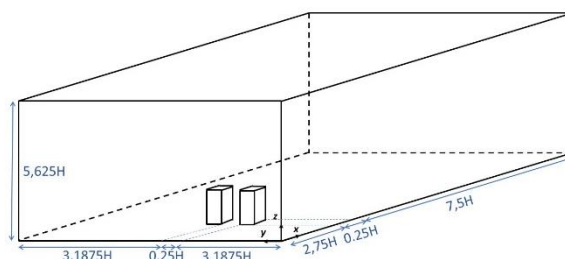


Figura 5 – Domínio computacional do caso dos edifícios altos paralelos.

Para a velocidade de entrada e variáveis turbulentas, foram utilizados os perfis experimentais de velocidade e intensidade de turbulência (Cavalcante, 2019). A partir dos valores fornecidos pelos perfis de entrada, calculou-se k a partir da Eq. (4) e o ε a partir da Eq. (5). U_{REF} é a velocidade de referência, C_μ é uma constante do modelo de turbulência e B é o comprimento característico da edificação.

$$k = \frac{3}{2} (IU_{REF})^2 \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{C_\mu^{0.75} k^{1.5}}{B} \quad (5)$$

As demais condições são idênticas à mostradas no caso anterior.

Para a geração da malha deste exemplo, empregou-se a função nativa *snappyHexMesh*, do OpenFOAM. A elaboração de malhas através da função *snappyHexMesh*, consiste na definição de parâmetros estipulados pelo usuário, que geram malhas tridimensionais contendo volumes hexaédricos e hexaédricos divididos automaticamente a partir de geometrias de superfícies trianguladas. A malha se ajusta a região de interesse específico (prédios) refinando iterativamente a partir de uma malha base definida através do *blockMesh*, que envolve todo o domínio. A Figura 6, apresenta-se a região interna da malha, com as regiões de refinamento definidas. O número total de células é de $3,2 \times 10^6$. Para mais detalhes do presente caso, recomenda-se ver Cavalcante (2019).

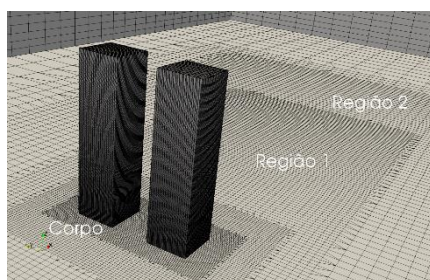


Figura 6 – Domínio computacional no caso dos edifícios altos paralelos.

3 RESULTADOS

3.1 Caso com duas aberturas em faces opostas

Na Tabela 1, apresenta-se o valor da taxa de vazão volumétrica no interior do modelo com duas aberturas. A taxa de vazão é adimensionalizada utilizando a velocidade do vento na altura do modelo (u_H) e a área das aberturas (A_{abert}). 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.

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

Tabela 1 – Comparativo da taxa de vazão volumétrica, caso de duas aberturas.

Para o mesmo modelo de turbulência utilizado no presente trabalho ($k-\varepsilon$ padrão), Hooff, Blocken e Tominaga (2017), que utilizaram o *software* comercial Ansys, tiveram um desvio de 0,5% a mais.

Na Figura 7, mostra-se a distribuição da velocidade (magnitude) do escoamento no plano de simetria (xz) do domínio computacional. Pode-se observar a topologia do escoamento ao redor do modelo de edificação. Percebe-se a formação de um jato de ar posterior à abertura de entrada, com inclinação descendente, e outro posterior à abertura de saída, contudo, com inclinação ascendente. Existe uma ampla região de recirculação na parte posterior do modelo de edificação.

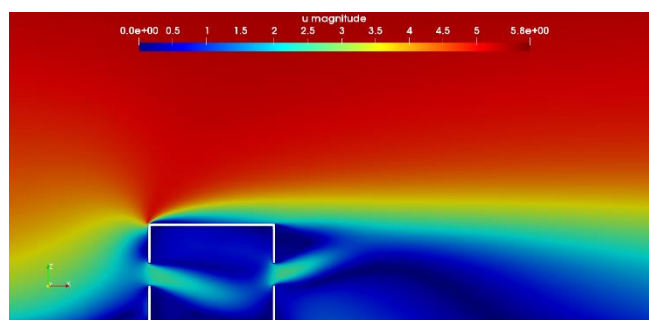


Figura 7 – Distribuição da magnitude da velocidade do vento, caso de duas aberturas.

Na Figuras 8, mostra-se a distribuição de pressão no entorno do modelo e no plano de simetria. 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 será o potencial de ventilação cruzada.

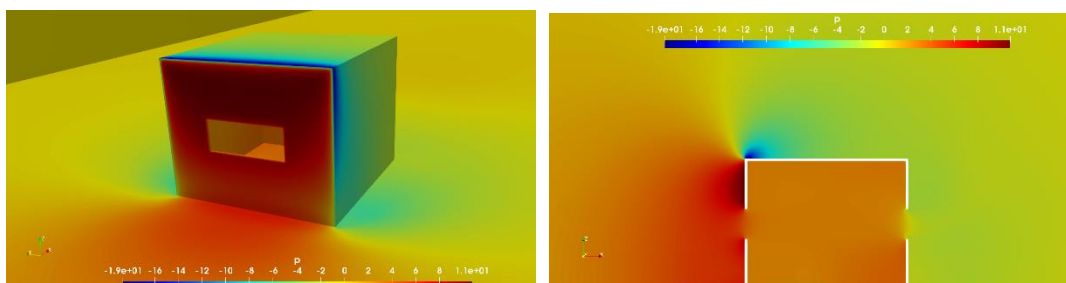


Figura 8 – Distribuição de pressão, caso de duas aberturas.

Finalmente, apresenta-se, na Figura 9, 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.

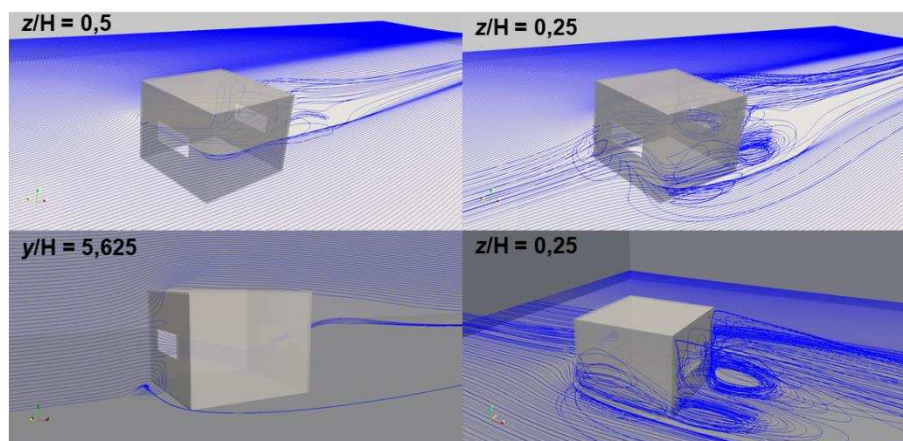


Figura 9 – Linhas de corrente, caso de duas aberturas.

3.2 Caso dos prédios paralelos

Inicialmente, compararam-se na Figura 10 as distribuições do coeficiente médio de pressão apresentadas pelo UPT e os resultados numéricos obtidos neste trabalho. Os resultados numéricos apresentam isolinhas de pressão constante que variam num intervalo de 0.20 para as faces *left side* e *front* e 0.10 para as faces *right side* e *leeward*. É possível observar a simetria das isolinhas de pressão constante nas faces frontais dos prédios e a boa concordância entre o resultado numérico e experimental.

A fim de avaliar a distribuição de velocidade e intensidade de turbulência na região entre os prédios, foram analisados perfis no plano de simetria xz . A altura adimensionalizada máxima do prédio está em $z/B = 4$. Na Figura 11, mostram-se os perfis para $x/B=0$ e -0.50 . Observa-se um comportamento similar de ambos os perfis, aumentando os valores a partir do nível do solo até uma altura que está entre $z/B=3$ e $z/B=3.5$, a partir de onde há uma redução nos valores de velocidade e intensidade de turbulência.

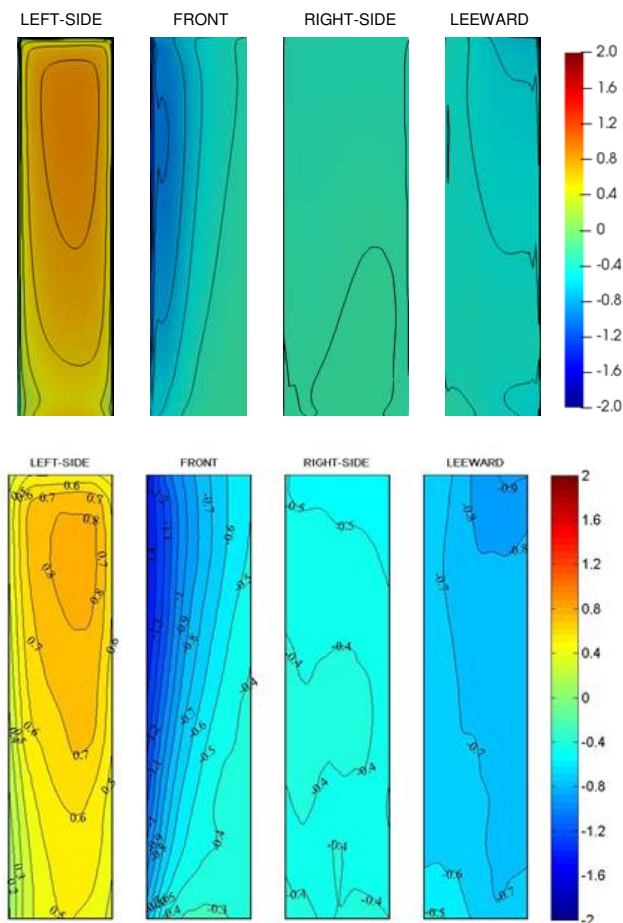


Figura 10 – Comparação do resultado numérico com o experimental do coeficiente de pressão médio.

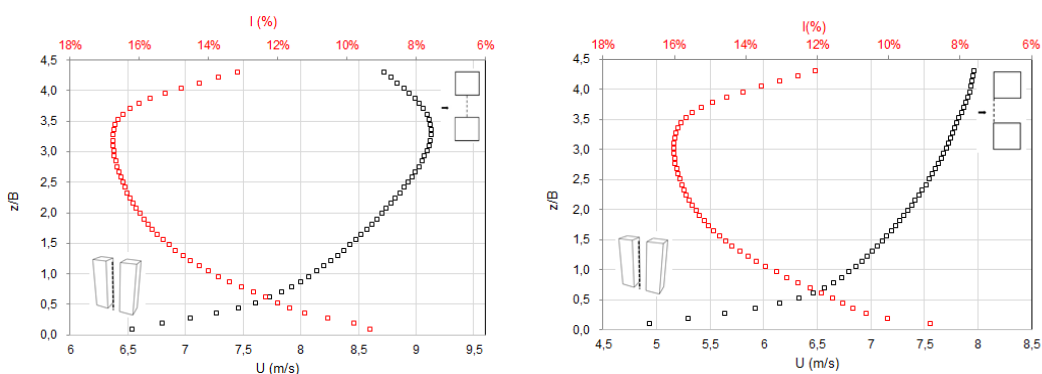


Figura 11 – Distribuição do perfil de velocidade e intensidade de turbulência em função da altura para $x/B=0$ e -0.50 .

Em termos práticos para a Engenharia do Vento, as informações levantadas são de extrema importância, principalmente com relação aos valores de turbulência e velocidade. Esses dados auxiliam, por exemplo, na determinação das cargas de vento na estrutura, na escolha de aerogeradores que podem ser utilizados na passagem entre os prédios para geração de energia eólica e no conforto dos pedestres que estejam no entorno das edificações.

4 CONCLUSÕES

Neste estudo foi utilizado o programa livre de código aberto OpenFOAM para a resolução de problemas de Dinâmica dos Fluidos. Foram analisados dois casos: o estudo de ventilação em um modelo com aberturas em faces opostas, e o escoamento ao redor de edifícios altos dispostos paralelamente. Para a modelagem da turbulência foram empregados dois modelos RANS: $k - \varepsilon$ e RNG $k - \varepsilon$, respectivamente, para os casos supracitados.

Observou-se que o OpenFOAM, em conjunto com os programas livres, Salomé e Paraview, apresentaram um excelente desempenho. Os exemplos analisados mostram uma boa concordância frente os resultados da literatura (numéricos e experimentais). Para o primeiro caso, é possível destacar o valor da taxa de vazão volumétrica encontrado. Utilizando o modelo $k - \varepsilon$ padrão e as escolhas numérico-computacionais adotadas no presente trabalho, obteve-se um desvio de 3% em relação ao valor experimental. Para o segundo caso, observou-se que a distribuição de pressão apresentada se aproximou dos dados encontrados em túnel de vento. Foi possível também analisar a topologia do escoamento, além de variáveis como velocidade e intensidade de turbulência. Também deve-se destacar que a função *snappyHexMesh*, que é um gerador iterativo de malha, pode ser utilizado facilmente nas geometrias tridimensionais de forma de controlar o refinamento da malha.

O OpenFOAM apresenta-se como uma alternativa viável, robusta e confiável frente aos *softwares* comerciais, para resolução de problemas da Dinâmica dos Fluidos, além de conter em sua biblioteca, outros utilitários que podem solucionar diversos problemas de engenharia.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Nacional de Processamento de Alto Desempenho (CENAPAD-SP). Os dois primeiros autores agradecem o apoio financeiro prestado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

REFERÊNCIAS

- Cavalcante, M. C. A. D., Influência da Geometria da Edificação na Aerodinâmica de Sistemas Eólicos Integrados Utilizando OpenFOAM. 2019. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru.
- Franke, J., Hellsten, A., Schlunzen, H., e Carissimo, B., *Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment*. COST Office, 2007.
- Gärtner, J.A., Kronenburg, A., e Martin, T., Efficient WE library for OpenFOAM. *SoftwareX*, 12:100611, 2020.
- Hooff, T.V., Blocken, B., e Tominaga, Y., On the accuracy of CFD simulations of cross-ventilation flows for a generic isolated building: Comparison of RANS, LES e experiments. *Building e Environment*, 114:148-165, 2017.
- Launder, B.E., e Spalding, D.B., The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics e Engineering*, 3:2:269-289, 1974.
- Nascimento, A.V., e Bono, G. *Estudo da Ventilação em Edifícios Através da Engenharia do Vento Computacional com Uso do Software OpenFOAM*. 2019. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Campus Acadêmico do Agreste, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2019.
- Patankar, S.V., *Numerical Heat Transfer e Fluid Flow*. Hemisphere Publishing Corporation, 1980.
- The OpenFOAM Foundation, OpenFOAM User Guide. Disponível em: < <https://cfd.direct/openfoam/user-guide/>>. Acessado em: 10 de dez. 2020.
- The OpenFOAM Foundation, OpenFOAM. Disponível em: < <https://openfoam.org/>>.

Acessado em: 01 de jun. de 2021.

- Toja-Silva, F., Peralta, C., Lopez-Garcia, O., Navarro, J. e Cruz, I., Roof region dependent wind potential assessment with different RANS turbulence models. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 142:258-271, 2015a.
- Toja-Silva, F., Peralta, C., Lopez-Garcia, O., Navarro, J. e Cruz, I., Effect of roof-mounted solar panels on the wind energy exploitation on high-rise buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 145:123-138, 2015b.
- Tominaga, Y., Akabayashi, S., Kitahara, T., e Arinami, Y., Air flow around isolated gable-roof buildings with different roof pitches: Wind tunnel experiments e CFD simulations. *Building e Environment*, 84:204-213, 2015.
- Tominaga, Y., Mochida, A., Yoshie, R., Kataoka, H., Nozu, T., Yoshikawa, M., e Shirasawa, T., AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 96:1749-1761, 2008.
- Yakhot, V., Orszag, S. A., Thangam, S., Gatski, T. B. e Speziale, C. G., Development of turbulence model for shear flow by a double expansion technique. *Physics of Fluids*, 7:1510-1520, 1992.