

ESTUDO AERODINÂMICO EM UM AMBIENTE URBANO: INFLUÊNCIA DA ALTURA DAS EDIFICAÇÕES DE VIZINHANÇA

AERODYNAMIC STUDY IN AN URBAN ENVIRONMENT: INFLUENCE OF THE HEIGHT OF NEIGHBORING BUILDINGS

Paulo. U Silva e Gustavo Bono

*Programa de Pós-Graduação Engenharia Civil e Ambiental, Centro Acadêmico do Agreste,
Universidade Federal de Pernambuco, Av. Marielle Franco s/n – KM 59 – Nova PE, CEP 50104-900,
Caruaru, Pernambuco, Brasil, paulo.usilva@ufpe.br, gustavo.bono@ufpe.br*

Palavras-chave: Dinâmica dos Fluidos Computacional. OpenFOAM. Conforto de pedestres. Cargas de vento. Modelo $\kappa - \varepsilon$.

Resumo. O ambiente urbano está em constante desenvolvimento, tornando cada vez mais complexas as interações aerodinâmicas nestes locais. As mudanças podem levar a variações significativas nos coeficientes de pressão média (C_p) e na configuração do escoamento. Neste trabalho, investiga-se a influência da altura da vizinhança nos valores de C_p nas fachadas de uma edificação prismática de proporções 1:1:6. O estudo adota seis diferentes alturas da vizinhança com relação à uma edificação central. Os casos são simulados através do software OpenFOAM, com o modelo de turbulência $\kappa - \varepsilon$ clássico. São adotados dois ângulos de incidência do vento, $\theta = 0^\circ$ e 30° com relação a face de barlavento. Os resultados apontam que devido à proximidade da vizinhança, o incremento na altura pode causar um efeito de proteção em edificações mais centralizadas no ambiente urbano, induzindo alterações significativas nos valores de C_p .

Keywords: Computational Fluid Dynamics. OpenFOAM. Pedestrian wind comfort. Wind loads. $\kappa - \varepsilon$ model.

Abstract. The urban environment is constantly developing, making the aerodynamic interactions in these places increasingly complex. The changes can lead to significant variations in the mean pressure coefficients (C_p) and in the flow configuration. In this work, we investigate the influence of the neighborhood height on the C_p values on the facades of a prismatic building of proportions 1:1:6. The study adopts six different heights of the neighborhood in relation to a central building. The cases are simulated using the software OpenFOAM, with the classic $\kappa - \varepsilon$ turbulence model. Two angles of wind incidence are adopted, $\theta = 0^\circ$ and 30° with respect to the windward face. The results indicate that due to the proximity of the neighborhood, the increase in height can cause a protection effect in buildings more centralized in the urban environment, inducing significant changes in the values of C_p .

1 INTRODUÇÃO

Em geral, o crescimento de nações é demonstrado por sua urbanização. De acordo com Mittal *et al.* (2018), evidenciadas por fatores econômicos e sociais, as novas edificações tendem a ser cada vez mais altas. Tal incremento em altura demanda edifícios mais esbeltos, tornando as cargas laterais, como o vento, mais relevantes no projeto (Hasançebi, 2017).

Realizar a análise de um prédio de forma isolada, entretanto, não é adequado, pois locais com grande concentração de edificações causam alterações significativas no regime de escoamento. Antes de projetar um sistema estrutural de uma edificação, é necessário também quantificar os efeitos causados pela sua vizinhança. Blocken (2014) mostra que a análise do escoamento e das pressões que surgem nas faces dos prédios pode ser feita através da Dinâmica dos Fluidos Computacional (DFC). Neste trabalho, para a realização das simulações de vento urbano, adota-se o *software* livre e de código aberto OpenFOAM, que possui ampla biblioteca base e pode ser usado na análise das cargas de vento em edificações (Silva *et al.*, 2015a; Silva *et al.*, 2015b).

Este trabalho tem como objetivo analisar as mudanças que ocorrem na configuração de escoamento e coeficientes de pressão de uma edificação prismática de base quadrada com proporções 1:1:6. Foram simuladas diferentes configurações de vizinhança e escoamento, variando a altura dos prédios ao redor da edificação principal e a direção do vento. Na Seção 2, mostra-se a fundamentação teórica do estudo. Na Seção 3, apresenta-se a metodologia das simulações DFC empregadas. A Seção 4 mostra a validação do modelo empregado através do exemplo *benchmark* do escoamento ao redor de um cubo. E, por fim, nas Seções 5 e 6, são apresentados os resultados do trabalho e as conclusões.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nos projetos de edificações brasileiras, a quantificação das cargas de vento costuma ser feito pelo conjunto de regras normativas da NBR 6123 (1988). Entretanto, o valor do fator de efeito de vizinhança aplicado aos coeficientes aerodinâmicos é bastante limitado devido aos ensaios em que se baseiam (edificações com geometrias simples e de baixa altura). De acordo com Khanduri *et al.* (1998), a análise de edificações isoladas em regras normativas não prevê o aumento ou diminuição das forças que incidem nas faces de uma edificação. Alterações na paisagem urbana podem causar mudanças na direção de escoamento e nas condições de rugosidade do terreno. Portanto, o efeito de interferência deve ser devidamente analisado durante a fase de projeto. Outro ponto importante é que vórtices gerados por vento cujo ângulo de incidência é diferente de 0° ou 90° com relação à fachada também podem provocar reações violentas em regiões de vértices e arestas das edificações (Blessmann, 2009), com risco de arrancar coberturas, telhados e revestimentos de fachadas.

Ensaio de túneis de vento em modelos reduzidos de estruturas possuem a grande vantagem de oferecer resultados acurados no que diz respeito às pressões atuantes nas fachadas (Mousaad *et al.* 2011). Entretanto, uma das desvantagens do ensaio em túnel de vento é o custo atrelado ao experimento. Torna-se interessante, portanto, trabalhar em conjunto com simulações numéricas que utilizem DFC. Segundo Montarezi e Blocken (2013), a DFC consegue reduzir o tempo e os custos de projeto consideravelmente. A combinação dos ensaios em túnel de vento com DFC tornam factível a determinação de cargas que são impossíveis de serem calculadas apenas com as normas, tornando-se uma poderosa ferramenta no projeto de edificações.

2.1 Efeitos de vizinhança

Blessmann (2005) cita alguns fenômenos que podem ocorrer no escoamento devido a influência de vizinhança. O martelamento consiste na carga periódica gerada por vórtices de

Kármán provenientes de uma ou mais edificações, que causam excitação periódica em edificações presentes na esteira de vento, podendo gerar resposta dinâmica nas estruturas. O efeito Venturi consiste na formação de um caminho preferencial para a aceleração do escoamento, alterando os coeficientes de pressão nas edificações no entorno. Já o efeito da turbulência de esteira ocorre em edificações alinhadas ao barlavento. Caso estejam significativamente próximas, os corpos à jusante são protegidos de uma rajada direta na face frontal, formando-se vórtices no espaço entre os corpos. Estes efeitos de vizinhança são apresentados na Figura 1.

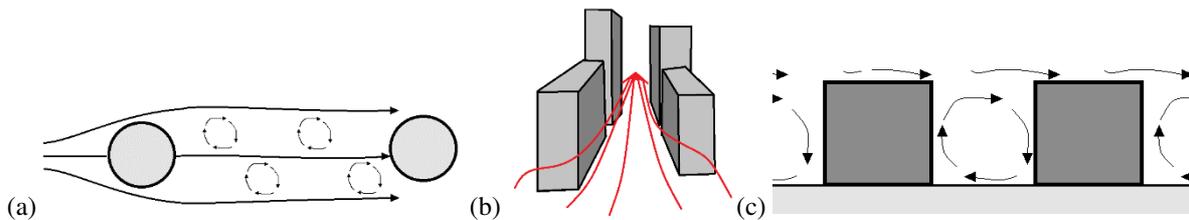


Figura 1: Efeitos de vizinhança: (a) martelamento, (b) efeito Venturi e (c) turbulência de esteira.

Elshaer *et al.* (2017) mostra através de DFC como a vizinhança influencia os coeficientes de pressão nas fachadas dos edifícios. A mudança na topologia urbana apresenta forte influência nos coeficientes de pressão. À medida que a densidade de edificações aumenta, as pressões nas faces de prédios centrais são modificadas e os efeitos de vizinhança tornam-se mais presentes, gerando diferentes respostas no que diz respeito ao carregamento lateral. Outros estudos, como Elshaer *et al.* (2016), analisam o comportamento aerodinâmico do vento atmosférico em locais com alta concentração de prédios e Zhang e Gu (2008) mostram a influência que edificações próximas possuem nos coeficientes de pressão e evidenciam que a análise das cargas de vento deve levar em conta diversas configurações no que diz respeito ao ângulo de incidência do vento, distância e altura da vizinhança.

2.2 Modelo de fechamento para a turbulência

Para determinar as condições de velocidade e pressão no escoamento do fluido, são usadas as equações de Navier-Stokes. A partir das mesmas, modelos numéricos podem ser obtidos para avaliar o comportamento do fluido, como as modelagens do tipo *Reynolds Averaged Navier-Stokes* (RANS), que consistem em um conjunto de médias temporais das equações citadas. Como são problemas não-lineares, as equações médias trazem consigo flutuações turbulentas da velocidade e da pressão, que produzem as tensões de Reynolds (Andersson *et al.*, 2012).

Para solucionar as equações médias de Navier-Stokes, deve-se obter as flutuações do tensor de Reynolds. Diversos modelos são apresentados na literatura para resolver e analisar o comportamento do fluido em um determinado intervalo de tempo. O modelo de fechamento para a metodologia RANS adotado neste trabalho é o $\kappa - \varepsilon$ clássico, que apresenta uma descrição geral da turbulência através das equações de transporte da energia cinética turbulenta (κ) e da dissipação da energia cinética turbulenta (ε) (Hanjalic e Launder, 1972). Apesar de possuir limitações e restrições ao seu uso (Larsson *et al.*, 2011), este modelo é comumente empregado no estudo do escoamento ao redor de edificações, como visto em Balogh *et al.* (2012) e Ishihara *et al.* (2020), entre outros.

3 METODOLOGIA

Para simular as condições de camada limite atmosféricas foram adotados os parâmetros apresentados por Hargreaves e Wright (2007). O perfil do vento foi ajustado de maneira a ficar

aproximado ao de Richards *et al.* (2002), que considera um domínio vazio, com terreno homogêneo, ar seco, rugosidade aerodinâmica invariável e um fluido newtoniano incompressível.

3.1 Modelagem da camada limite atmosférica

O OpenFOAM possui em sua biblioteca a classe de condições de contorno *atmBoundaryLayer*, que define condições a montante e jusante do domínio que simulem a camada limite atmosférica (CLA). A imposição desta classe garante que o perfil de velocidade seja do tipo logarítmico. No modelo de fechamento $\kappa - \varepsilon$, para definir a velocidade emprega-se a Equação (1), onde u , v e w são os componentes do vetor velocidade, κ_0 é a constante de von Kármán, z é a coordenada acima do solo, z_0 é a rugosidade aerodinâmica, u^* é a velocidade de fricção e d é a altura de deslocamento com relação ao solo.

$$u = \frac{u^*}{\kappa_0} \ln \left(\frac{z-d+z_0}{z_0} \right) \quad v = w = 0 \quad (1)$$

Para a energia cinética turbulenta, adota-se a Equação (2), onde $C_\mu = 0,09$; $C_1 = 1,44$ e $C_2 = 1,92$ são constantes empíricas de valores que servem para ajustar a curva logarítmica de acordo com a CLA.

$$\kappa = \frac{(u^*)^2}{\sqrt{C_\mu}} \sqrt{C_1 \ln \left(\frac{z-d+z_0}{z_0} \right) + C_2} \quad (2)$$

Para definir a dissipação da energia cinética turbulenta, empregam-se:

$$\varepsilon = \frac{(u^*)^3}{\kappa(z-d+z_0)} \sqrt{C_1 \ln \left(\frac{z-d+z_0}{z_0} \right) + C_2} \quad (3)$$

$$u^* = \frac{u_{ref} \kappa}{\ln \left(\frac{z_{ref}+z_0}{z_0} \right)} \quad (4)$$

onde, u^* é a velocidade de atrito e u_{ref} é a velocidade de referência na altura de referência z_{ref} .

3.2 Domínio de simulação e discretização

O domínio de simulação foi definido seguindo as recomendações de Franke *et al.* (2004) e Tominaga *et al.* (2008). Tais estudos estabelecem diretrizes para que haja uma correta predição do escoamento ao redor de edificações tanto isoladas quanto para conjunto de edificações. Na Figura 2, apresenta-se o domínio tomado como base. A edificação de proporções B:L:H (base:largura:altura), está posicionada a uma distância de 5H da entrada do domínio (montante) e a 15H da saída (jusante). As faces laterais estão a uma distância de 5H da edificação, de forma a ter uma simetria com relação ao plano longitudinal central. A altura do domínio é de 5H acima do topo da edificação em estudo.

Para este trabalho, consideram-se como vizinhança 8 edifícios equidistantes entre si e com um distanciamento L entre eles. Para a simulação de um ambiente atmosférico natural, são aplicadas condições nas faces de contorno do domínio e nas edificações sujeitas à ação do vento. Na Tabela 1, apresentam-se as condições de contorno que foram implementadas no OpenFOAM, tomando como referência a Figura 2. O termo “face genérica” refere-se a uma condição em que não há informação geométrica ou topológica da malha, sendo esta condição comumente empregada na entrada e saída do escoamento (Silva, 2022).

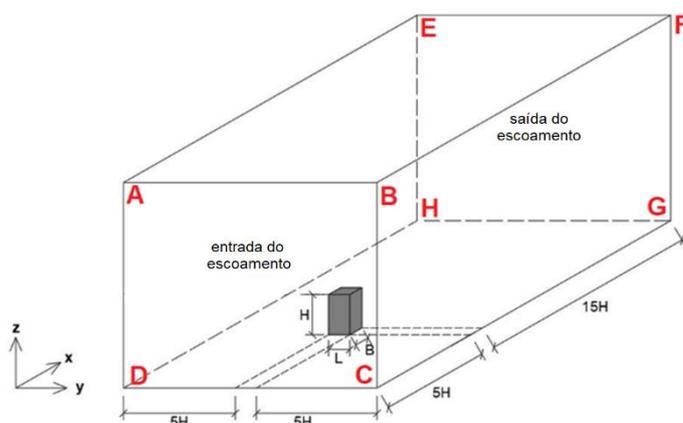


Figura 2: Domínio de simulação.

Face	Especificação	Tipo
ABCD	Entrada do escoamento	Face genérica
AEHD	Lateral esquerda	Plano de simetria
BFGC	Lateral direita	Plano de simetria
ABFE	Limite superior do domínio	Plano de simetria
CGHD	Limite inferior do domínio	Função de parede
EFGH	Saída do escoamento	Face genérica
Faces das edificações	Fachada das edificações	Função de parede

Tabela 1: Condições nas faces de contorno dos domínios de simulação.

A discretização do domínio no OpenFOAM foi feita através do utilitário *snappyHexMesh*. Para avaliar a qualidade da malha para simular a turbulência nos casos, utiliza-se o parâmetro y^+ , definido pela Equação (5), em que u^* é a velocidade de fricção do fluido, y_p é a distância da parede à camada limite adjacente e ν é a viscosidade cinemática. O intervalo de valores para o parâmetro que indica uma boa qualidade da malha deve estar entre 30 e 100 para funções de parede no modelo de fechamento $\kappa - \varepsilon$ (Wilcox, 2010).

$$y^+ = \frac{u^* y_p}{\nu} \quad (5)$$

Através do software de pós-processamento ParaView 5.4.0, são obtidos os coeficientes médios de pressão (C_p), definidos pela seguinte equação:

$$C_p = \frac{p - p_0}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2} \quad (6)$$

onde, p é a pressão absoluta em um determinado ponto da face, p_0 é a pressão atmosférica, ρ é a massa específica do ar atmosférico ($1,225 \text{ kg/m}^3$ ao nível do mar e temperatura ambiente de 15° C), e U_∞ é a velocidade não perturbada do vento. Além dos valores de C_p , são comparados os coeficientes de momentos tomados com relação à base da edificação.

4 VALIDAÇÃO

Emprega-se o *benchmark* do cubo sobre uma superfície plana para a validação do software OpenFOAM e os esquemas numéricos adotados. Para a comparação adotam-se os ensaios em túnel de vento realizados pelo *Tokyo Polytechnic University* (TPU).

Para o estudo considera-se um cubo de dimensões unitárias e número de Reynolds igual a

68000. Para a simulação numérica foram considerados três níveis de refinamento da malha: 200.384 (M1), 998.753 (M2) e 2.742.095 (M3) volumes finitos. Nas Figura 3, mostra-se a distribuição dos coeficientes médios de pressão (C_p) que atuam nas faces do cubo nas três malhas e os resultados experimentais da base de dados da TPU. Nas imagens, as faces de cima são, respectivamente, a de montante, superior e de jusante. Já a face central embaixo representa as faces laterais, que devido à configuração da simulação, são simétricas.

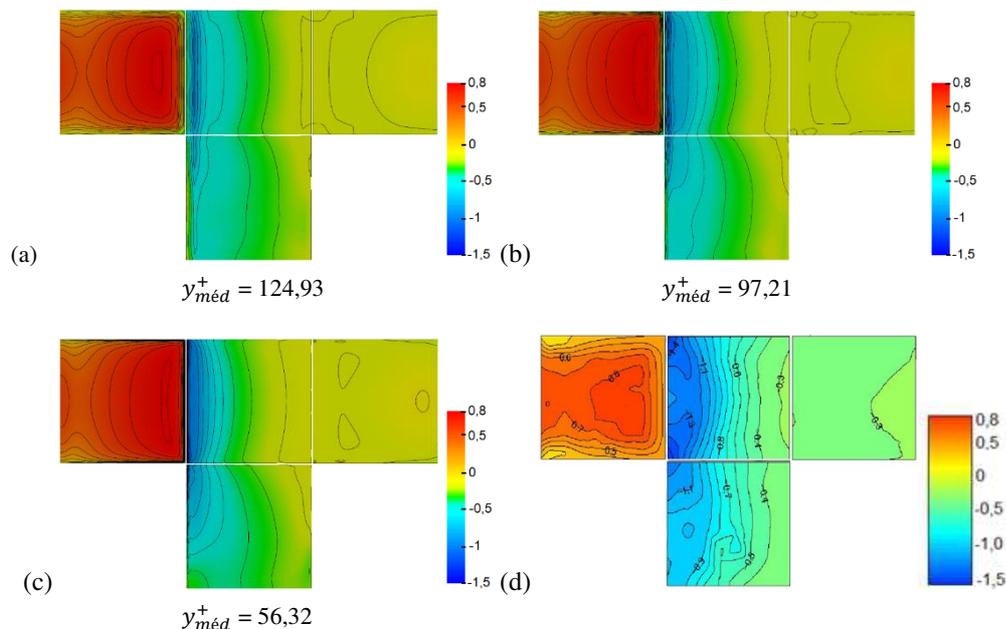


Figura 3: Coeficientes médios de pressão: (a) M1, (b) M2, (c) M3 e (d) TPU.

Além, dos resultados das simulações apresenta-se o valor médio de y^+ ao longo do cubo. O valor do parâmetro em M1 mostra levemente superior ao recomendado para o modelo de turbulência, entretanto, observa-se uma boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais. Percebe-se que as curvas de C_p da TPU não apresentam simetria como as obtidas nos resultados numéricos. Tal assimetria origina-se das perturbações do escoamento nos ensaios em modelos reais reduzidos e nas medições. Entretanto, o formato das curvas, junto com os valores apresentados de C_p mostram que os resultados da metodologia e modelo de fechamento empregados são condizentes com as simulações numéricas do OpenFOAM.

5 RESULTADOS

Nesta seção, analisa-se como a mudança de altura na vizinhança de um modelo em escala reduzida de edificação de proporções 1:1:6 altera os principais coeficientes aerodinâmicos em um número de Reynolds igual a 280.000. A velocidade e o comprimento de referência são, respectivamente, $U = 10$ m/s e $l = 420$ mm. As seis configurações estudadas no OpenFOAM são apresentadas na Tabela 2. O edifício em análise está caracterizado pela cor azul. Cada caso foi simulado considerando dois ângulos de incidência: $\theta = 0^\circ$ e 30° com relação ao plano de fachada, tal como mostra-se na Figura 4. Apresenta-se também na Figura 4 o perfil de entrada da velocidade para os exemplos avaliados. Para facilitar a comparação, cada exemplo identifica-se como C- h - θ . Por exemplo, para um caso que se emprega altura de vizinhança $3L$ e $\theta = 30^\circ$, refere-se como C- $3L$ - 30° , onde $L = d = 70$ mm. Os resultados dos coeficientes de pressão para os dois ângulos são compilados, respectivamente, nas Tabelas 3 e 4. As faces são apresentadas na sequência: montante, lateral direita, jusante e lateral esquerda.

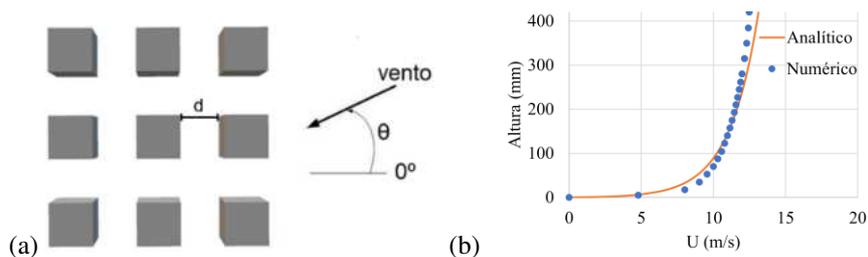


Figura 4: (a) Definição do ângulo de incidência do vento e (b) Perfil de entrada.

C-1L	C-2L	C-3L	C-4L	C-5L	C-6L

Tabela 2: Casos simulados para a vizinhança a uma distância 1L da edificação central.

Escala	C-1L-0°	C-2L-0°	C-3L-0°
Escala	C-4L-0°	C-5L-0°	C-6L-0°

Tabela 3: Coeficientes de pressão nas fachadas da edificação central no ângulo de incidência do vento $\theta = 0^\circ$.

Verifica-se, que para $\theta = 0^\circ$ os valores de C_p são simétricos. Observa-se que com o aumento de altura ao redor da edificação central, os valores de C_p sofrem alterações significativas. As regiões de pressão positiva que aparecem predominantemente nas faces de barlavento tornam-se cada vez menores. Portanto, as forças resultantes e os momentos na estrutura modificam-se,

conforme a configuração de vizinhança ao redor do prédio em estudo. Na Figura 5, apresenta-se os valores dos momentos (M_y e M_x) calculados a partir da base da edificação.

Percebe-se que com o aumento da altura na vizinhança, há uma tendência de queda no valor do momento. Isto ocorre devido à redução da área positiva na face a montante. A pequena distância (70 mm) dos edifícios circunvizinhos faz com que eles protejam a edificação central da incidência direta do vento, principalmente no ângulo de incidência: $\theta = 0^\circ$. O efeito de proteção é visto também, em menor proporção para $\theta = 30^\circ$. Ao comparar as configurações de escoamento nos dois ângulos de incidência, ver Figura 6, percebe-se que em ângulos de incidência não simétricos, mesmo com a proteção da vizinhança, parte do escoamento incide diretamente na edificação central devido ao efeito Venturi, minimizando a proteção.

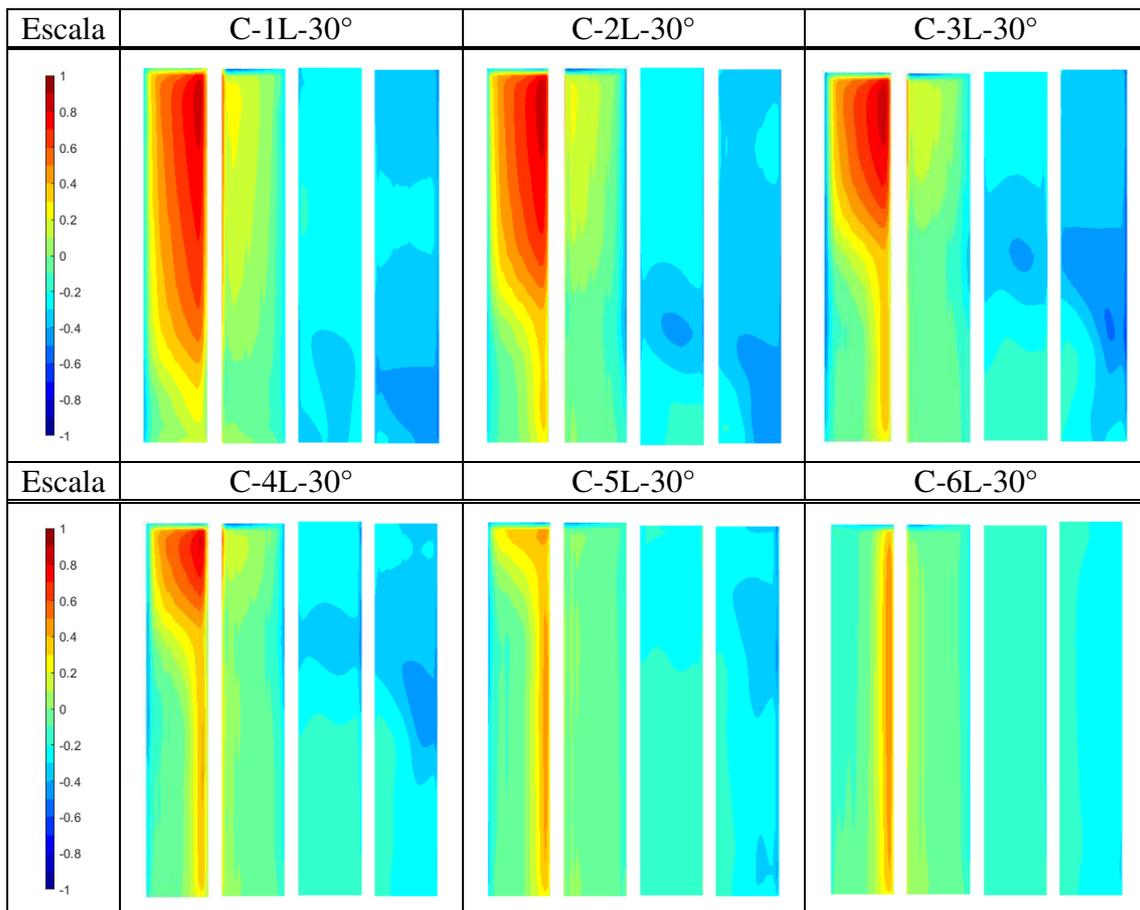


Tabela 4: Coeficientes de pressão nas fachadas da edificação central no ângulo de incidência do vento $\theta = 30^\circ$.

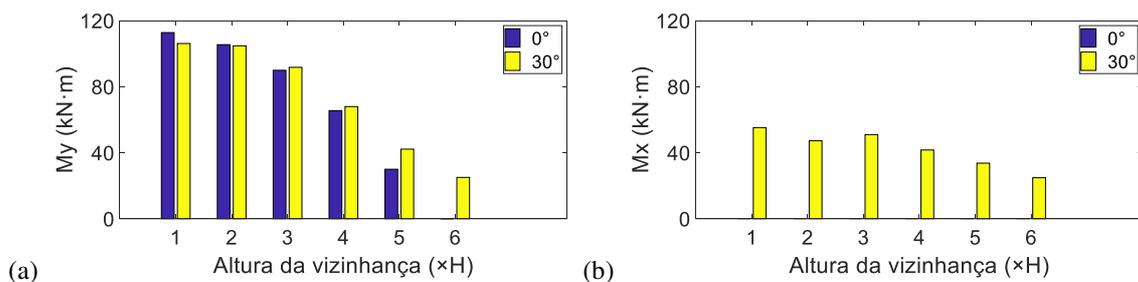


Figura 5: Coeficientes de momento em (a) M_y e (b) M_x .

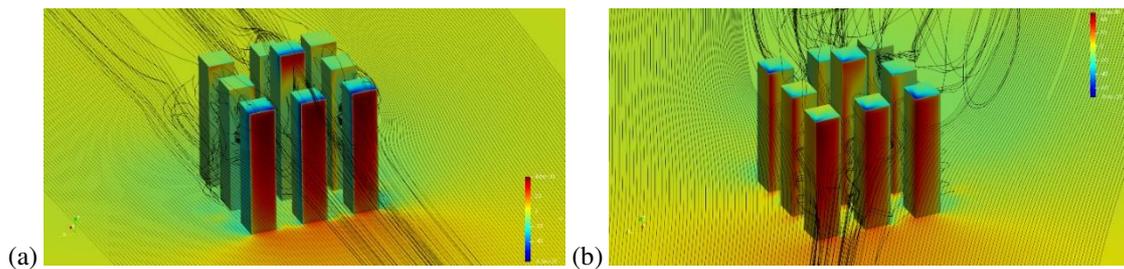


Figura 6: Configurações de escoamento dos casos (a) C-5L-0° e (b) C-5L-30° com corte na altura 3L.

Verifica-se também que a sollicitação de momento M_x nos casos $\theta = 0^\circ$ é nula devido às condições de simetria do escoamento.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho, apresenta-se um estudo da influência que a altura da vizinhança tem sobre uma edificação prismática de proporções 1:1:6 centrada numa configuração de nove edificações. Foram consideradas 6 configurações com alturas diferentes de vizinhança, com edifícios prismáticos de base 1:1 e ângulos de incidência $\theta = 0^\circ$ e $\theta = 30^\circ$.

O crescimento da altura na vizinhança ao redor da edificação simula o desenvolvimento de uma região urbana, cuja tendência é ter edifícios cada vez mais esbeltos, modificando o escoamento da região. Verificou-se que com a modificação da vizinhança, as pressões positivas nas faces de barlavento diminuem, ocasionando mudanças na força resultante e na sollicitação do valor do momento na base da edificação.

Com o aumento da altura, o momento diminuiu para os dois ângulos de incidência, chegando a um valor nulo no caso C-6L-0°. Devido às condições de simetria, o momento M_x foi nulo para o ângulo de incidência $\theta = 0^\circ$, fato que não ocorreu em $\theta = 30^\circ$. O presente estudo evidencia a importância no estudo da engenharia de vento de verificar-se várias configurações de ângulos de incidência do vento e vizinhança ao projetar uma edificação devido à constante transformação do ambiente urbano.

7 AGRADECIMENTOS

Este trabalho utilizou recursos do Centro Nacional de Processamento de Alto Desempenho de São Paulo (CENAPAD – SP).

REFERÊNCIAS

- Andersson, B., Andersson, R., Hakansson, L., Mortensen, M., Sudiyo, R., and van Wachem, B. *Computational Fluid Dynamics*, Cambridge University Press, 2012.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 6123*: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.
- Balogh, M., Parente, A., and Benocci, C. RANS simulation of ABL flow over terrains applying enhanced k- ϵ model and wall function formulation: Implementation and comparison for fluent and OpenFOAM. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 104:360-368, 2012.
- Blessmann, J. *Ação do vento em telhados*, 2ª ed. Editora da UFRGS, Porto Alegre, 2009.
- Blessman, J., *Introdução ao estudo das ações dinâmicas do vento*, 2ª ed. Editora da UFRGS, Porto Alegre, 2005.
- Blocken, B. 50 years of Computational Wind Engineering: Past, present and future. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 129:69–102, 2014.
- Elshaer, A., Aboshoha, H., Bitsuamlak, G., Damatty, A.E. and Dagnew, A. LES evaluation of

- wind-induced responses for an isolated and surrounded tall buildings. *Engineering Structures*, 115:179–195, 2016.
- Elshaer, A., Gairola, A., Adamek, K., and Bitsuamlak, G. Variations in wind load on tall buildings due to urban development. *Sustainable Cities and Society*, 34, 2017.
- Franke, J., Hirsch, C., Jensen, A.G., Krüs, H.W., Schatzmann, M., Westbury, P.S., Miles, S.D., Wisse, J.A. and Wright, N.G. Recommendations on the use of CFD in wind engineering. In: *Proceedings of the International Conference on Urban Wind Engineering and Building Aerodynamics*, Sint-Genesius-Rode, Belgium, 2004.
- Hanjalic, K., and Launder, B. A Reynolds stress model of turbulence and its application to thin shear flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 52:609–638, 1972.
- Hasançebi, O. Cost efficiency analysis of steel frameworks for economical design of multi-storey buildings. *Journal of Construction Steel Research*, 128:380–396, 2017.
- Hargreaves, D.M., and Wright, N.G. On the use of the k- ϵ model in commercial CFD software to model the neutral atmospheric boundary layer. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 95:355-369, 2007.
- Ishihara, T., Qian, G., and Qi, Y. Numerical study of turbulent flow fields in urban areas using κ - ϵ model and large eddy simulation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 206, 104333, 2020.
- Khanduri, A.C., Stathopoulos, T., and Bédard, C. Wind-induced interference effects on buildings – a review of the state-of-the-art. *Engineering Structures*, 20:617–630, 1998.
- Larsson, I.A.S., Lindmark, E.M., Lundström, T.S. and Nathan, G.J. Secondary flow in semi-circular ducts. *Journal of Fluids Engineering*, 133:101206, 2011.
- Montarezi, H., and Blocken, B. CFD simulation of wind-induced pressure coefficients on buildings with and without balconies: validation and sensitivity analysis. *Building and Environment*, 60:137–149, 2013.
- Mousaad, A., Zasso, A., and Resta, F. Dynamics and control of high-rise buildings under multidirectional wind loads. *Smart Materials Research*, 20:1–15, 2011.
- Mittal, H., Sharma, A., and Gairola, A. A review on the study of urban wind at the pedestrian level around buildings. *Journal of Building Engineering*, 124:541–550, 2018.
- Richards, P.J., Quinn, A.D. and Parker, S. A 6 m cube in an atmospheric boundary layer flow – Part 2. Computational Solutions. *Wind and Structures*, 5:177–192, 2002.
- Silva, F.T., Peralta, C., Garcia, O.L., Navarro, J., and 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, 2015a.
- Silva, F.T., Peralta, C., Garcia, O.L., Navarro, J., and Cruz, I. Roof region dependent wind potential assessment with different RANS turbulence models. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 142: 258–271, 2015b.
- Silva, P.U. *Emprego de otimização topológica e CFD no projeto de sistema de contraventamento em ambientes urbanos*. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2022.
- Tominaga, Y., Mochida, A., Yoshie, R., Kataoka, H., Nozu, T., Masaru, Y. and Shirasawa, T., AIJ guidelines of practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96:1749–1761, 2008.
- Wilcox, D. *Turbulence Modeling for CFD*. DCW Industries Inc., 2010.
- Zhang, A. and Gu, M. Wind tunnel tests and numerical simulations of wind pressures on buildings in staggered arrangement. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96:2067–2079, 2008.