



ANÁLISE AERODINÂMICA EM UM AMBIENTE URBANO: INTERFERÊNCIA DA DISTÂNCIA DAS EDIFICAÇÕES NA VIZINHANÇA

SILVA, P. U.¹; BONO, G. ²;

¹Universidade Federal de Pernambuco. A pesquisa foi realizada pelo Laboratório de Engenharia Computacional (LECOM), no Campus Acadêmico do Agreste (CAA), cidade de Caruaru (PE)

Palavras-chave: Dinâmica dos Fluidos Computacional, OpenFOAM, Conforto de pedestres, Cargas de vento, Modelo κ - ϵ

Resumo

Os ambientes urbanos estão em constante desenvolvimento, fazendo com que as interações aerodinâmicas nesses locais se tornem cada vez mais complexas. Modificações na vizinhança de uma edificação podem levar a grandes variações nos coeficientes de pressão média (C_p) e na configuração do escoamento. Neste trabalho, investiga-se os efeitos da altura e distanciamento da vizinhança nos valores de C_p e no coeficiente de momento com relação à base (C_M) de uma edificação prismática de proporções $20 \times 20 \times 120$ m. O estudo emprega seis diferentes alturas de vizinhança com relação a um edifício central, além de dois valores de distanciamento entre as edificações vizinhas. Os casos são simulados empregando a metodologia RANS e o modelo de fechamento κ - ϵ clássico no software baseado na Dinâmica dos Fluidos Computacional, OpenFOAM. Os resultados mostram que o aumento na altura da vizinhança possui efeito de proteção nas edificações centrais no ambiente urbano. Em contraste, ao aumentar a distância com relação à vizinhança, diminui-se o fator de proteção.

Aerodynamic analysis in an urban environment: Interference of distance from neighborhood buildings

Keywords: Computational Fluid Dynamics, OpenFOAM, Pedestrian Comfort, Wind Loads, κ - ϵ model

Abstract

Urban environments are constantly developing, making the aerodynamic interactions in these locations increasingly complex. Modifications in the vicinity of a building can lead to large variations in the mean pressure coefficients (C_p) and in the flow configuration. In this work, we investigate the effects of height and distance from neighborhood buildings on the values of C_p and on the moment coefficient with respect to the base (C_M) of a prismatic building of proportions $20 \times 20 \times 120$ m. The study employs six different neighborhood heights in relation to a central building, in addition two values of a uniform distance between neighboring buildings. The cases are simulated according to Computational Fluid Dynamics in OpenFOAM software, using the RANS methodology and the classical κ - ϵ closure model. The results show that the increase in the height of the neighborhood has a protective effect on central buildings in the urban environment. In contrast, as the distance from the neighborhood increases, the protection factor decreases.

INTRODUÇÃO

Em geral, o crescimento das nações está relacionado com 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. Através da Dinâmica dos Fluidos Computacional (DFC) pode-se analisar o escoamento e determinar as pressões nas faces laterais das edificações (BLOCKEN, 2014). Neste trabalho, para a realização das simulações de vento urbano, adota-se o software livre e de código aberto OpenFOAM v6, 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 nos coeficientes de pressão médios e de momento em uma edificação prismática de base quadrada com proporções $1 \times 1 \times 6$. Foram simuladas diferentes configurações de vizinhança, variando a altura dos prédios ao redor da edificação principal e a distância desta vizinhança. 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-se 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.

REFERENCIAL TEÓRICO

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 uma quantificação do aumento ou diminuição das forças nas faces de uma edificação, recomendando-se o uso de ensaios em túneis de vento para verificar alterações nas pressões atuantes nas fachadas. Alterações na paisagem urbana podem causar mudanças no 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 pelo vento cujo ângulo de incidência é diferente de 0° ou 90° com relação à fachada podem provocar reações violentas em regiões de vértices e arestas das edificações (BLESSMANN, 2009), com risco de arrancar coberturas, telhados e revestimentos de fachadas.

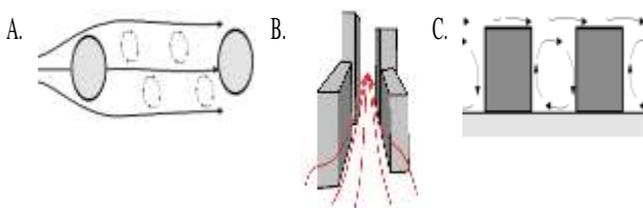
Ensaio de túneis de vento em modelos reduzidos de estruturas possuem a vantagem de oferecer resultados acurados no que diz respeito às pressões atuantes nas fachadas (MOUSAAD et al. 2011). Entretanto, uma das desvantagens do ensaio em túnel de vento é o custo atrelado ao experimento. Torna-se interessante, 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.

Efeitos de vizinhança

Blessmann (2005) cita alguns fenômenos que podem ocorrer no escoamento devido a influência da vizinhança. O martelamento consiste na carga periódica gerada por vórtices de Kármán provenientes de uma ou mais edificações, que causam excitação periódica em prédios presentes na esteira do 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 do 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 1A, 1B e 1C.

Figura 1. Efeitos de vizinhança: A martelamento, B, efeito Venturi e C, turbulência de esteira.



Fonte: Autores, 2022

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 escoamento, distância e altura da vizinhança.

Modelo de fechamento para a turbulência

Empregam-se as equações de Navier-Stokes para determinar as principais variáveis (velocidade e pressão) no escoamento do fluido. Uma das

principais abordagens para a modelagem e simulação de escoamentos turbulentos é a metodologia conhecida como Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS). Neste tipo de metodologia qualquer variável instantânea do escoamento pode ser representada através de duas parcelas, uma representativa do escoamento médio no tempo e outra componente flutuante devido à turbulência (ANDERSSON et al., 2012).

Para solucionar as equações médias de Navier-Stokes, devem-se obter as flutuações do tensor de Reynolds. Diversos modelos são apresentados na literatura, sendo um dos mais populares para a metodologia RANS o modelo de fechamento κ - ϵ 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 Qi e Ishihara (2018), Ishihara et al. (2020), Zhao e Li (2022), entre outros.

MATERIAL E MÉTODOS

Para simular as condições da camada limite atmosférica foram adotados os mesmos parâmetros de Hargreaves e Wright (2007). O perfil de velocidade 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.

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 κ - ϵ foi definida a velocidade através da seguinte relação:

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

onde u , v e w são os componentes do vetor velocidade, $\kappa_0 = 0,42$ 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.

Para a energia cinética turbulenta, adota-se a Eq. 2, onde $C_\mu = 0,09$; $C_1 = 1,44$ e $C_2 = 1,92$ são constantes empíricas 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 as Eqs. 3-4, onde, u^* é a velocidade de atrito e $u_{ref} = 10$ m/s é a velocidade de referência na altura de referência $z_{ref} = 20$ m.

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

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

Domínio de simulação e discretização

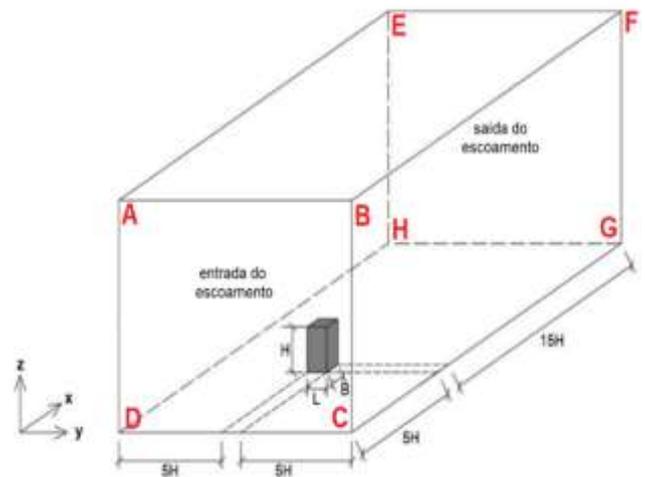
O domínio de simulação foi definido seguindo as recomendações de Franke et al. (2004) e Tominaga et al. (2008). Tais estudos estabelecem diretrizes para que haja uma correta predição do escoamento ao redor de edificações tanto isoladas quanto para conjunto de edificações. Na Figura 2, apresenta-se o domínio tomado como base para a simulação da edificação de proporções B:L:H (base:largura:altura). Percebe-se que 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 Figura 2A, apresentam-se as condições de contorno que foram implementadas no OpenFOAM, tomando como referência a Figura 2B. 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: A. Condições de contorno dos domínios de simulação, B. Esquemática.

Face	Especificação
ABCD	Perfil de entrada de velocidade e energia cinética
AEHD	Condições de simetria para velocidade
BFCG	Condições de simetria para velocidade
ABFE	Condições de simetria para velocidade
CGHD	Função de parede
EFGH	Saída do escoamento
Faces das edificações	Função de parede

B



Fonte: Autores, 2022

A discretização do domínio no OpenFOAM foi feita através do utilitário *snappyHexMesh*. Para avaliar a qualidade da malha, utiliza-se o parâmetro y^+ , definido pela Eq. 5:

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

onde, u^* 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).

Para analisar a distribuição das principais variáveis do problema, emprega-se o software de pós-processamento ParaView 5.4.0, sendo o coeficientes médios de pressão (C_p) definidos pela Eq. 6:

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

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 kg/m³ ao nível do mar e temperatura ambiente de 15° C), e $U_\infty = 10$ m/s 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. Os coeficientes de momento adimensionais C_M para edificações são obtidos através da Eq. 7, como visto em Lu e Li (2022), onde M_i é o momento resultante em torno do eixo i , e b e h são, respectivamente, a largura da base e altura do edifício.

$$C_M = \frac{M_i}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 b h^2} \quad (7)$$

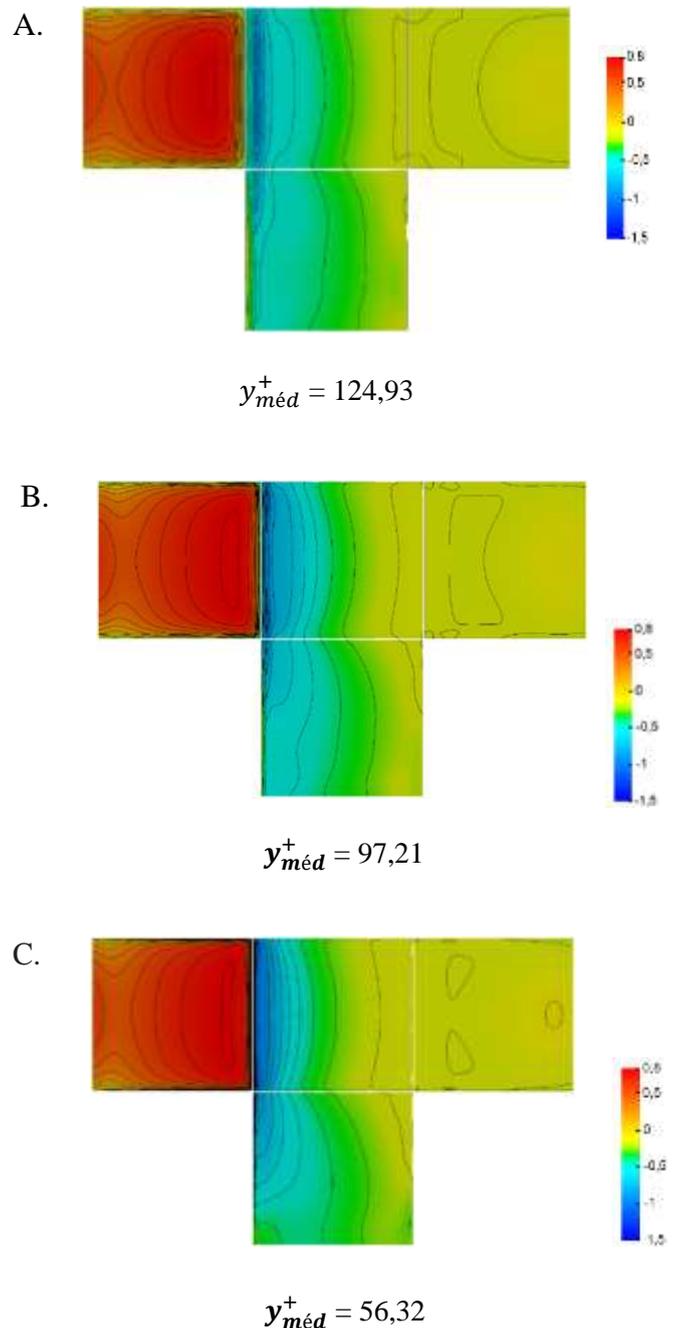
VALIDAÇÃO

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).

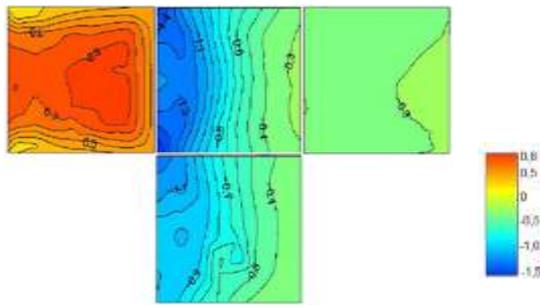
Para o estudo considera-se um cubo de dimensões unitárias e número de Reynolds igual a 80.000. Para a simulação numérica foram

considerados três níveis de refinamento da malha: 200.384 (M1), 998.753 (M2) e 2.742.095 (M3) volumes finitos. Na 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.



D.



Fonte Autores, 20xx

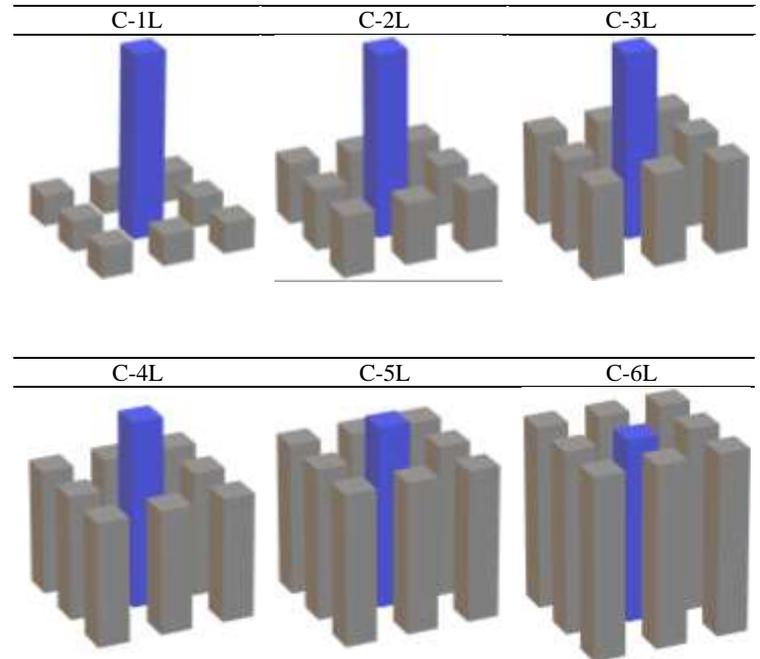
Além, das distribuições de C_p apresenta-se o valor médio de y^+ ao longo do cubo. O valor mostra-se levemente superior ao recomendado para o modelo de turbulência no caso de M1, entretanto, observa-se uma boa concordância com os resultados experimentais. Percebe-se que as curvas de C_p da TPU não apresentam simetria como as obtidas nos resultados numéricos. Tal assimetria origina-se das perturbações do escoamento nos ensaios em túnel de vento em modelos reduzidos e das incertezas 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 obtidas com o OpenFOAM.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, analisa-se como as mudanças de altura e distância na vizinhança de uma edificação de proporções 1:1:6 alteram os coeficientes aerodinâmicos de pressão e momento com relação à base. As seis configurações estudadas no OpenFOAM são apresentadas na Figura 4B, sendo destacado de cor azul o edifício em análise. Para o estudo considera-se um número de Reynolds igual a 480.000 e cada caso foi simulado empregando duas distâncias da vizinhança com relação à edificação central: $d = 1L$ e $2L$, onde L é a dimensão da aresta da base da edificação e o ângulo de incidência do vento é $\theta = 0^\circ$. Para facilitar a comparação, cada exemplo identifica-se como $C-h-d$. Por exemplo, para um caso que se emprega altura de vizinhança 3L e distanciamento = 1L, refere-se como C-3L-1L. Os resultados dos coeficientes de pressão para os dois

distanciamentos apresentam-se nas Figuras 5A e 5B. As faces são apresentadas na sequência: lateral esquerda, montante, lateral direita e jusante.

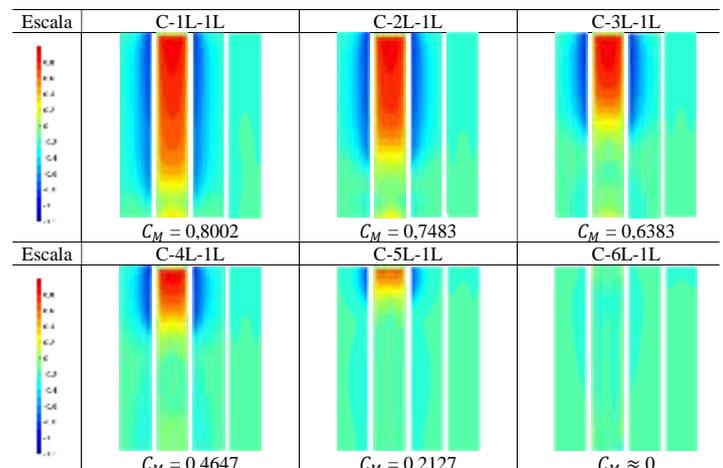
Figura 4. Modelo de vizinhança as diferentes alturas em cada caso.

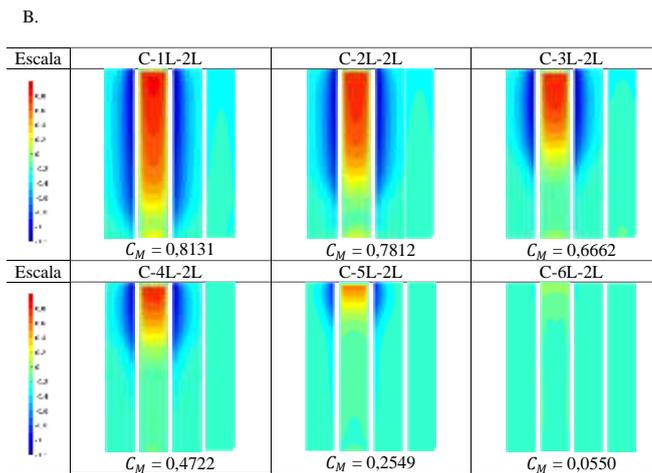


Fonte Autores, 2022

Figura 6. Coeficientes de pressão nas fachadas da edificação central com distância de vizinhança: A. $d = 1L$, B. $d = 2L$.

A.





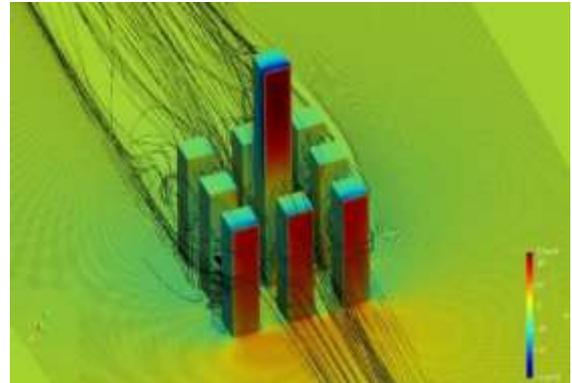
Fonte Autores, 2022

Devido à direção de incidência do vento, as cargas nas faces laterais tornam-se simétricas. Observa-se que com o aumento de altura da vizinhança, os valores de C_p sofrem alterações significativas na edificação central. 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 da vizinhança.

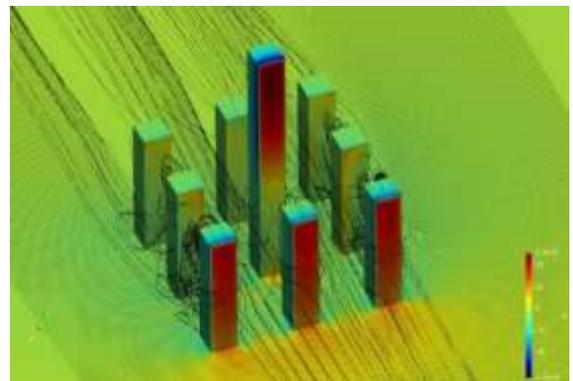
Percebe-se que com o aumento da altura na vizinhança, há uma tendência de queda no valor do C_M . Isto ocorre devido à redução das pressões positivas na face a montante. A pequena distância (20 metros) dos edifícios circunvizinhos faz com que eles protejam a edificação central da incidência direta do vento, principalmente na direção em que incide o vento. O efeito de proteção é visto também, em menor proporção para $d = 2L$. Com o distanciamento maior entre os prédios, a edificação central fica mais exposta à incidência direta do vento, aumentando os valores dos coeficientes aerodinâmicos. Ao comparar os distanciamentos, ver Figuras 6A e 6B, percebe-se que o efeito de proteção diminui devido à maior incidência direta do vento.

Figure 6. Configuração de escoamento nos casos: A. C-3L-1L, e B. C-3L-2L.

A.



B.



Fonte Autores, 2022

CONCLUSÕES

Neste trabalho, apresenta-se um estudo da influência que a altura e distância da vizinhança tem sobre uma edificação prismática de dimensões $20 \times 20 \times 120$ m centrada numa configuração de nove edificações. Foram consideradas 6 configurações com alturas diferentes de vizinhança, com edifícios prismáticos de base 20×20 m e distanciamento $L = 20$ m e 40 m.

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 solicitação do valor do momento na base da edificação.

Com o aumento da altura, o momento diminuiu para os dois distanciamentos, chegando a um valor nulo no caso C-6L-1L. Devido às condições de simetria do escoamento, as faces laterais apresentaram os mesmos coeficientes de pressão médios. Verificou-se também que ao aumentar a distância das vizinhanças, aumenta-se também o valor dos coeficientes aerodinâmicos analisados. O presente estudo evidencia a importância de verificar várias configurações de vizinhança e ângulos de incidência do vento ao projetar uma edificação devido à constante transformação do ambiente urbano.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas, **NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro, 1988.

ANDERSSON, B.; ANDERSSON, R.; HAKANSSON, L.; MORTERSEN, M.; SUDIYO, R.; VAN WACHEM, B. **Computational Fluid Dynamics**, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2012.

BLESSMANN, J. **Introdução ao estudo das ações dinâmicas do vento**, 2ª ed., Editora da UFRGS, Porto Alegre, 2005.

BLESSMANN, J. **Ação do vento em telhados**, 2ª ed., Editora da UFRGS, Porto Alegre, 2009.

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

ELSHAER, A.; ABOSHOHA, H.; BITSUAMLAK, G.; DAMATTY, A.E.; DAGNEW, A. LES evaluation of wind-induced responses for an isolated and surrounded tall buildings. **Engineering Structures**, v. 115, p. 179–195, 2016.

ELSHAER, A.; GAIROLA, A.; ADAMEK, K.; BITSUAMLAK, G. Variations in wind load on tall buildings due to urban development. **Sustainable**

Cities and Society, v. 34, 2017.

FRANKE, J.; HIRSCH, C.; JENSEN, A.G.; KRÜS, H.W.; SCHATZMANN, M.; WESTBURY, P.S.; MILES, S.D.; WISSE, J.A.; WRIGHT, N.G. Recommendations on the use of CFD in wind engineering. **Proceedings of the International Conference on Urban Wind Engineering and Building Aerodynamics**, Sint-Genesius-Rode, Belgium, 2004.

HANJALIC, K.; LAUNDER, B. A Reynolds stress model of turbulence and its application to thin shear flows. **Journal of Fluid Mechanics**, vol. 52, p. 609–638, 1972.

HARGREAVES, D.M.; 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**, v. 95, p. 355-369, 2007.

HASANÇEBI, O. Cost efficiency analysis of steel frameworks for economical design of multi-storey buildings. **Journal of Construction Steel Research**, v. 227, 105056, 2017.

ISHIHARA, T.; QIAN, G.; QI, Y. (2020), 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**, v. 20, p. 617–630, 1998.

LARSSON, I.A.S.; LINDMARK, E.M.; LUNDSTRÖM, T.S.; NATHAN, G.J. Secondary flow in semi-circular ducts. **Journal of Fluids Engineering**, v. 133, 101206, 2011.

LU, B.; LI, Q.S. Investigation of the effects of wind veering and low-level jet on wind loads of super high-rise buildings by large eddy simulations. **Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics**, v. 227, 105056, 2022.

MITTAL, H.; SHARMA, A.; GAIROLA, A. (2018), A review on the study of urban wind at the pedestrian level around buildings. **Journal of Building Engineering**, v. 124, p. 541–550, 2018.

MONTAREZI, H., BLOCKEN, B. CFD simulation of wind-induced pressure coefficients on buildings with and without balconies: validation and

- sensitivity analysis. **Building and Environment**, v. 60, p. 137–149, 2013.
- MOUSAAD, A., ZASSO, A., RESTA, F. Dynamics and control of high-rise buildings under multidirectional wind loads. **Smart Materials Research**, v. 20, p. 1–15, 2011.
- QI, Y., ISHIHARA, T. Numerical study of turbulent flow fields around of a row of trees and an isolated building by using modified k- ϵ model and LES model. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 177, p. 293–305, 2018.
- RICHARDS, P.J., QUINN, A.D., PARKER, S. A 6 m cube in an atmospheric boundary layer flow – Part 2. Computational Solutions. **Wind and Structures**, v. 5, p. 177–192, 2002.
- SILVA, F.T., PERALTA, C., GARCIA, O.L., NAVARRO, J., CRUZ, I. Effect of roof-mounted solar panels on the wind energy exploitation on high-rise buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 145, p. 123–138, 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**, v. 142, p. 258–271, 2015b.
- SILVA, Paulo Ulisses. **Emprego de otimização topológica e CFD no projeto de sistema de contraventamento em ambientes urbanos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, UFPE, Caruaru, 2022.
- TOMINAGA, Y., MOCHIDA, A., YOSHIE, R., KATAOKA, H., NOZU, T., MASARU, Y., SHIRASAWA, T. AIJ guidelines of practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 96, p. 1749–1761, 2008.
- WILCOX, D. **Turbulence Modeling for CFD**, DCW Industries Inc, 2010.
- ZHANG, A., GU, M. Wind tunnel tests and numerical simulations of wind pressures on buildings in staggered arrangement. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 96, p. 2067–2079, 2008.
- ZHAO, L., YUXUE, L. The influence of multi/high-rise building on the surface wind load of low-rise building. **Alexandria Engineering Journal**, v. 61, n. 12, p. 11979-11991, 2022.