

# Impacto da variação de altura de edificações em modelos urbanos teóricos para estudos de ventilação natural em edificações residenciais

*Impact of the construction height variation in urban theoretical models for natural ventilation in residential buildings*

Daniel de Oliveira Amaral<sup>a\*</sup>, Eleonora Sad de Assis<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Universidade Federal de Minas Gerais.  
Belo Horizonte-MG, Brasil.

\*E-mail:  
danielamaral.arquiteto@yahoo.com.br

Palavras-chave:

Ventilação Natural, CFD,  
AirflowNetwork, Modelos urbanos  
teóricos, Edifícios residenciais.

Keywords:

Natural Ventilation, CFD,  
AirflowNetwork, Theoretical urban  
models, Dwelling.

## Resumo

Estudos com objetivo de avaliar o impacto do meio urbano na qualidade da ventilação interna de edifícios comumente usam modelos urbanos teóricos. Na literatura especializada, esses modelos variam as dimensões, a forma e o afastamento, mas mantêm a altura entre as edificações constante. Esse arranjo urbano é condizente com a realidade de cidades americanas e europeias, mas as cidades brasileiras possuem arranjos com altimetria muito variada. Este estudo tem como objetivo avaliar o impacto do contexto urbano nas taxas de renovação de ar por hora de uma edificação residencial comparando um modelo com altura constante e com altura variável. Eles foram simulados inicialmente em simulações computacionais fluidodinâmicas e os coeficientes de pressão nas aberturas foram obtidos. Com esses dados, simulações termoenergéticas foram conduzidas no EnergyPlus e foram obtidas as Ren/h. Analisando os perfis de velocidade de vento e as taxas internas de Ren/h é possível perceber uma diferença significativa entre os dois modelos urbanos, em que o modelo de altura variável apresenta renovações na média 23 % maiores, chegando a 40 %, em comparação com o modelo de altura constante. De acordo com os resultados encontrados, é recomendado para estudos aplicados a cidades com significativa variação de altimetria, usar modelos teóricos urbanos que representem a diversidade de alturas encontrada na área de estudo.

## Abstract

*Studies that aim at evaluating the urban environment impact in indoor natural ventilation of buildings usually uses theoretical urban*

*models. In literature, these models vary in dimensions, shape and gap between buildings, but keep their heights constant. This urban arrangement is consistent with American and European city reality, but Brazilian cities have arrangements with quite varied altimetry. This study aims at evaluating building context impact in air change per hour rates of dwellings comparing a constant and a variable height theoretical urban model. They were simulated in a CFD software and the opening pressure coefficients were obtained. With these data, annual building performance simulations were conducted on EnergyPlus and the air change per hour rates were obtained. Analyzing the velocity profiles and ACH rates, it is possible to realize a significant difference between the two models, where the model with variable height presents ACH rates on average 23 % higher, reaching 40 % in comparison with the constant height urban model. According to the found results, the use of theoretical models, that represents the diversity of heights found in the studied area, is recommended for cities with significant variation building heights.*

## 1 Introdução

Diferentemente de países e regiões desenvolvidos como Estados Unidos e os países da União Europeia, as residências brasileiras utilizam a ventilação natural como estratégia padrão para ventilação e condicionamento passivo de ar, o clima do país é um dos fatores que contribuem para este fato. Adicionado a isso, a crescente preocupação com a eficiência energética de edificações faz da ventilação natural uma forte aliada em locais de clima ameno. O estudo do potencial de uso da ventilação natural por edificações localizadas em centros urbanos adensados está diretamente ligado à forma como o meio urbano é representado. O escoamento do vento no tecido urbano e consequentemente as pressões de vento nas fachadas das edificações são dependentes da forma urbana, da geometria das edificações, dos parâmetros urbanísticos, altura das edificações e da densidade construída (RAMPONI et al., 2015).

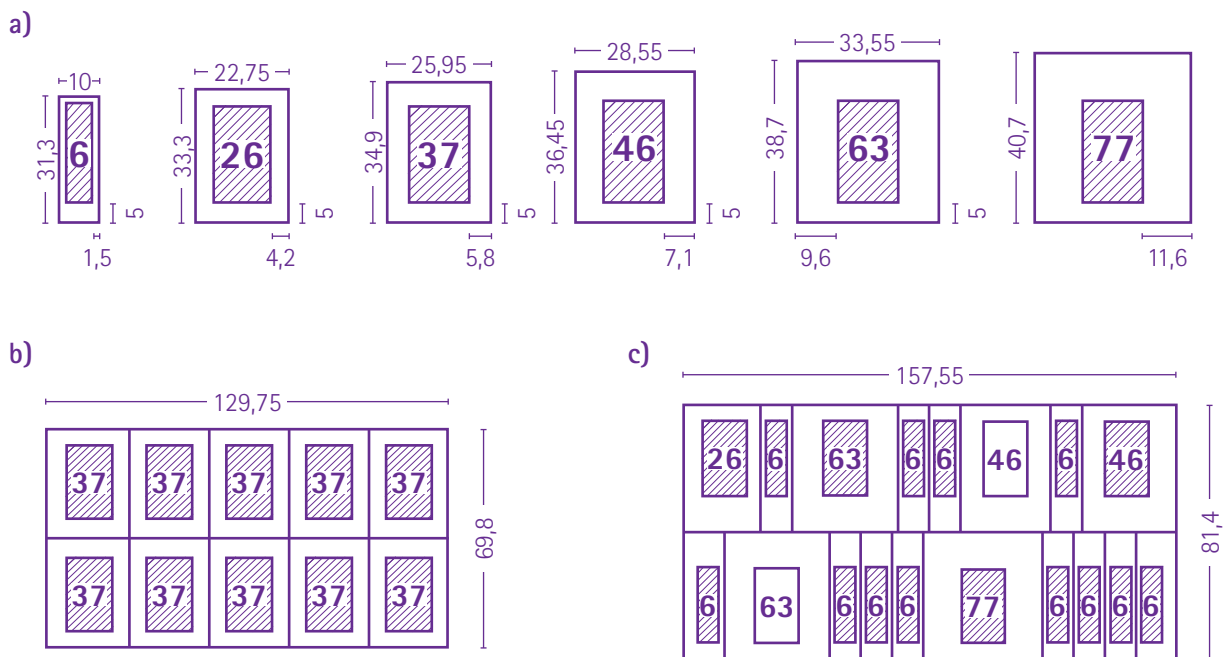
Na maioria dos artigos encontrados na literatura sobre o tema, o meio urbano é representado através de um modelo teórico no qual usualmente são variadas a altura e os afastamentos e todas as edificações possuem a mesma área de projeção e altura, distribuídas uniformemente ou intercaladas e equidistantes (WANG et al., 2012; BUCCOLIERI; SANDERBERG; SABATINO, 2010; LIN et al., 2014; RAMPONI et al., 2015). Essas representações urbanas fazem sentido para os contextos europeu e norte-americano, mas não para as cidades brasileiras e de países em desenvolvimento, que em geral possuem cidades formadas por arranjos com altimetria bastante variada.

Este estudo tem como objetivo avaliar o impacto da representação do contexto urbano na simulação do potencial de ventilação natural de edificações residenciais, comparando dois modelos urbanos teóricos, um com altura constante e outro com altura variável entre as edificações. Ambos os modelos foram criados baseados em dados de características urbanas de cidades brasileiras e foram comparados através de simulações conjuntas de Fluidodinâmica Computacional (CFD, no acrônimo em inglês) e *AirFlow Network* para obter as renovações de ar por hora das habitações.

## 2 Metodologia

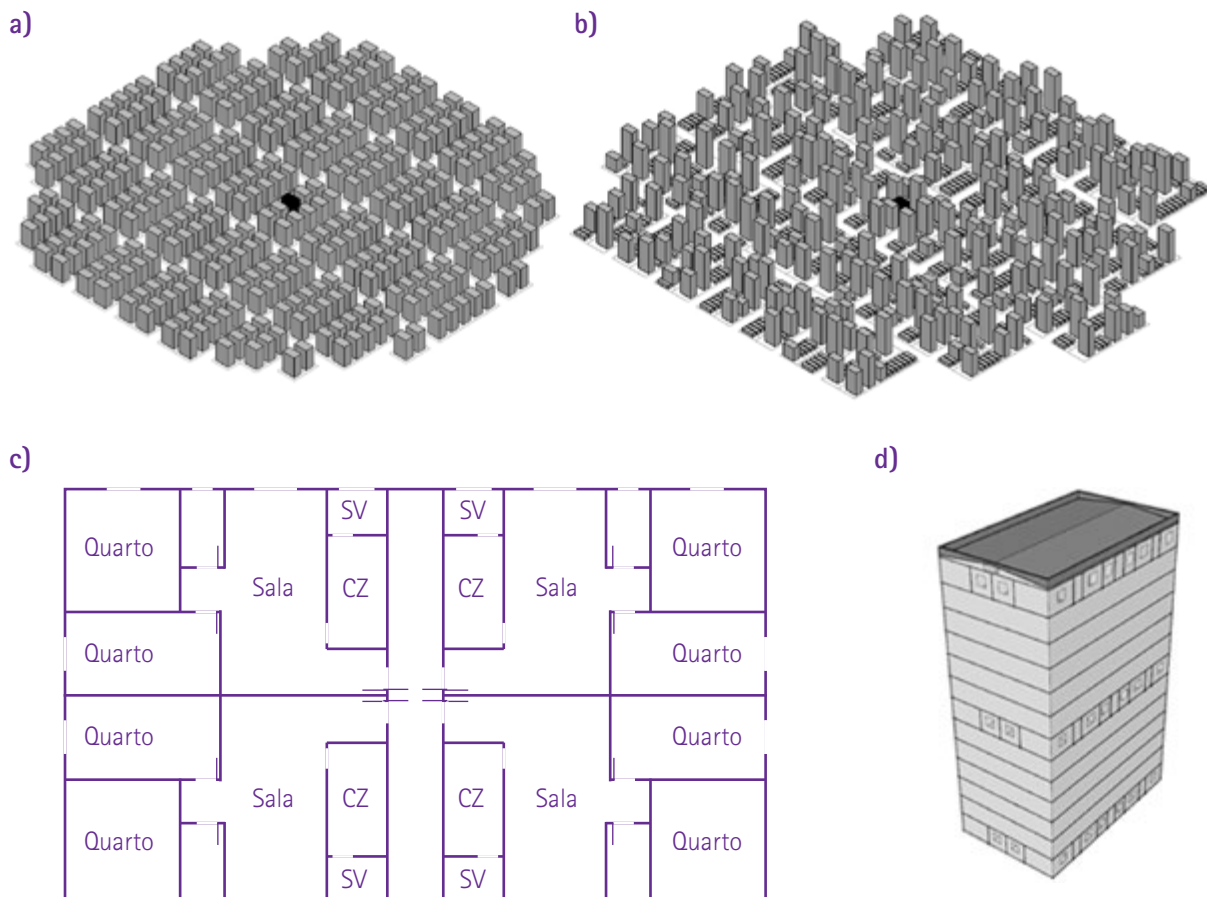
Para conduzir este estudo, foram criados dois modelos urbanos teóricos de alta densidade de ocupação, com altura constante e altura variável, baseados nas características de morfologia urbana das cidades de Belo Horizonte e Curitiba. Inicialmente, foram identificados os parâmetros urbanísticos dos zoneamentos residenciais de maior densidade, como coeficiente de aproveitamento e afastamentos. Com os dados de densidade populacional, foram selecionadas as regiões de onde foram coletados os dados como largura de via, dimensões de quadra e número de pavimentos das edificações. A edificação estudada e as edificações do modelo de altura constante foram definidas em 37 metros, treze pavimentos, média obtida dos dados coletados. Para a definição das alturas das edificações no modelo com alturas variáveis, foi feita uma análise de frequência de ocorrência e foram definidas seis alturas. Com o número de pavimentos definido, foram criadas as dimensões dos lotes baseados nos coeficientes de aproveitamento e dos afastamentos (**Figura 1a**). Os lotes foram distribuídos nas quadras usando a função "ALEATÓRIO" do Excel® para emular o aspecto randômico das cidades e garantir nenhuma interferência dos autores no resultado do trabalho (**Figura 1b**). De acordo com as diretrizes para simulações CFD encontradas na literatura (FRANKE et al., 2007), a representação do modelo urbano foi definida em um raio de 6H a partir da edificação de estudo totalizando 462 m, sendo H a maior altura de edificação no modelo, 77 m (**Figura 2a e 2b**).

Figura 1 - a) implantação em cada tipo de lote, b) quadra do modelo de altura constante c) exemplo de quadra do modelo de altura variável (unidade em m)



Fonte: elaborado pelos autores

Figura 2 – a) modelo de altura constante, b) modelo de altura variável, c) planta tipo da edificação estudada, d) modelo da edificação com os três pavimentos analisados: o primeiro, sétimo e décimo terceiro



Fonte: elaborado pelos autores

A planta do apartamento utilizada neste trabalho foi retirada do relatório de simulações computacionais do programa brasileiro de etiquetagem de eficiência energética de edificações (SORGATO, 2011) e é representativa de uma habitação média encontrada no país (Figura 2c). Os apartamentos do primeiro, sétimo e décimo terceiro pavimentos foram simulados para que fosse possível representar o comportamento médio da ventilação natural da edificação (Figura 2d).

Para configurar e conduzir as simulações em CFD, foram consultados diretrizes de referência na literatura para obter parâmetros que permitissem resultados os mais confiáveis possíveis (FRANKE et al. 2007; TOMINAGA et al., 2008; TAMURA; NOZAWA; KONDO, 2008). Primeiramente, o domínio foi dimensionado definindo distância dos seus limites até o modelo, sendo a entrada de ar e as

laterais em 5H, a saída de ar em 15H e a altura total do domínio em 6H. Entretanto, com essa configuração a blocagem, porcentagem da área de ensaio bloqueado pela vista frontal do modelo, foi superior que o limite de 3 % encontrado na literatura. Assim o domínio foi redimensionado conforme recomendação de Franke (2006) para modelos mais horizontais, usando a razão largura/altura do modelo e mantendo a altura do domínio em 6H. O modelo de turbulência usado foi o Standard  $k-\epsilon$ , largamente utilizado em estudos que tratam do escoamento do vento ao redor de edificações (MONTAZERI; BLOCKEN, 2013; LIN et al., 2014; MARTINS; GRAÇA, 2016). As condições de contorno foram definidas como: *free-slip* para a lateral e topo do domínio, que é uma condição de livre escorregamento do escoamento; *smooth wall* para as superfícies das edificações e para o piso do domínio, que é uma condição em que há resistência superficial ao escoamento do fluido; e *opening* para a saída de ar com pressão relativa igual a 0 atm, escoamento normal à superfície e turbulência com média intensidade (5 %). A entrada de ar foi configurada com o perfil vertical logarítmico de vento calculado por um arquivo .ccl baseado na rugosidade de um centro urbano adensado.

Foi criada uma malha tetraédrica desestruturada, com cinco camadas de prismas nas fronteiras sólidas e fator de crescimento de 1,2, o que atendeu aos parâmetros de qualidade de malha como *orthogonal quality* maior que 0,1 e *skewness* menor que 0,95 com 4.777.801,00 elementos. Foi feito um teste de refinamento de malha de acordo com a metodologia apresentada pela norma *American Society of Mechanical Engineers* (2009). Foram criadas duas outras malhas, uma menos refinada e outra mais refinada que a inicial, com um fator de refinamento igual a 1,3, resultando em um número de elementos de 2.143.014,00 e 10.569.709,00, respectivamente. Comparando os resultados, a malha mais refinada apresentou os melhores parâmetros de qualidade de malha e as menores diferenças entre os valores de coeficiente de pressão obtidos com as outras malhas, portanto, esta foi escolhida para ser usada nas simulações deste estudo.

O clima escolhido para conduzir as simulações foi o de Belo Horizonte, MG. Foi feita uma análise de frequência de ocorrência dos ventos dominantes e quatro orientações apresentaram percentuais significativos: 0°, 45°, 90° e 135°. Para que fossem simuladas também três orientações solares no *EnergyPlus*, 0°, 45° e 90°, foi necessário também considerar as orientações de vento 180° e 225°. Portanto seis direções de vento foram simuladas e os dados de coeficientes de pressão sobre a fachada da edificação estudada foram usados como dados de entrada no modelo *Airflow Network* do *EnergyPlus*. O arquivo climático utilizado nas simulações anuais conduzidas no *EnergyPlus* foi o arquivo TMY da cidade de Belo Horizonte, MG. A ventilação natural foi modelada com o modelo *Airflow Network*, no qual todas as janelas externas e portas internas foram consideradas aptas à ventilação, exceto as do banheiro. O coeficiente de descarga das aberturas foi definido em 0,6 (MARTINS; GRAÇA, 2016). O controle de abertura das janelas externas foi definido pela temperatura interna com o termostato configurado a 20 °C, ou seja, as aberturas são abertas caso a temperatura interna seja maior que 20 °C e a temperatura externa seja menor que a temperatura interna. O contexto urbano foi modelado como elementos de sombreamento, portanto a quantidade de radiação solar direta recebida pela edificação estudada foi afetada pelo

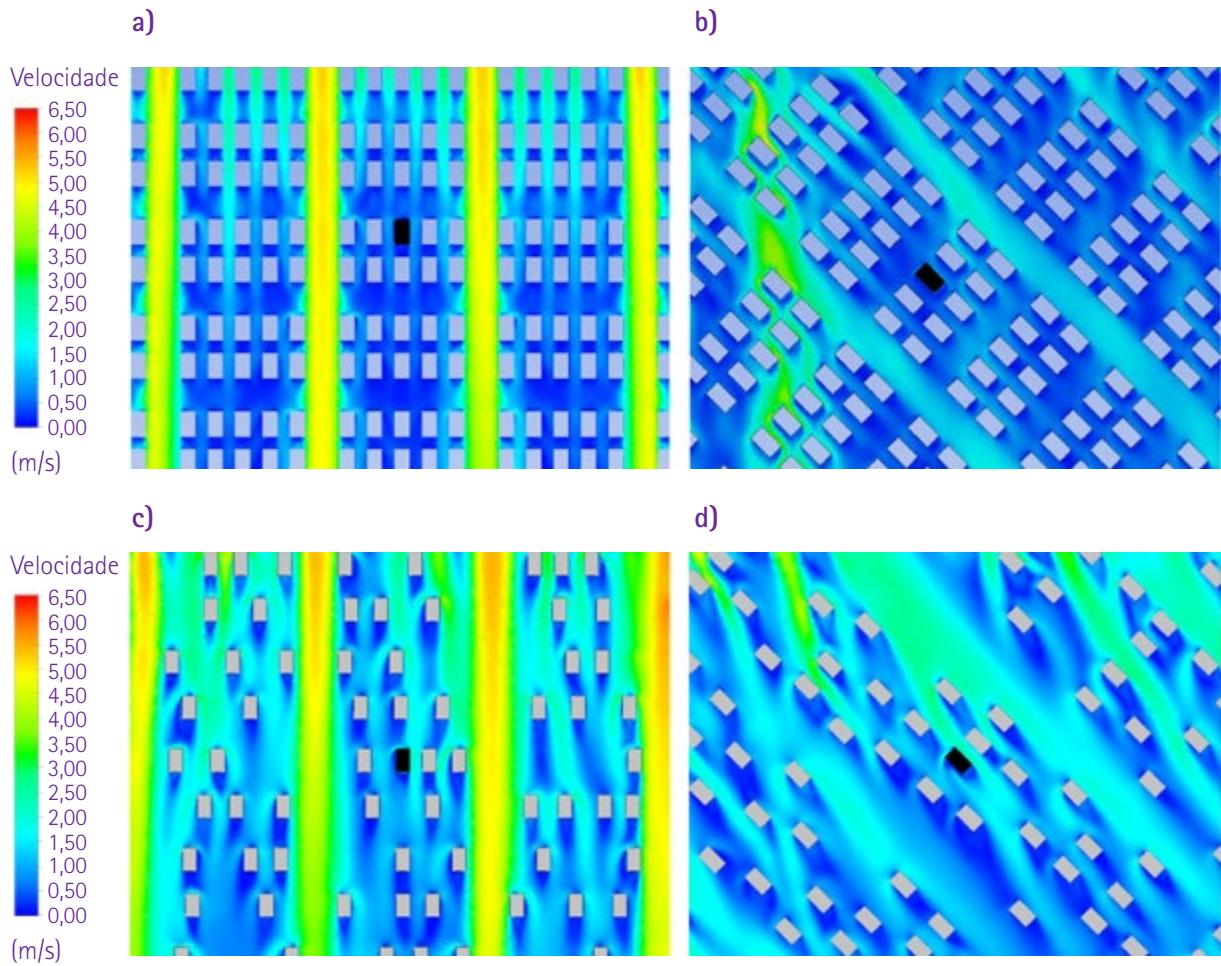
entorno. Foram consideradas cargas internas de ocupação, equipamentos e iluminação artificial de acordo com a metodologia do Regulamento Técnico da Qualidade para o nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais, RTQ-R (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA, 2012).

### 3 Resultado

Os resultados obtidos mostram o escoamento, a velocidade do vento ao redor do edifício estudado, e o desempenho anual da ventilação natural em renovações de ar por hora em ambos os modelos urbanos teóricos criados. Na **Figura 3**, são mostrados os perfis horizontais de velocidade de vento a uma altura de 34 m, equivalente à altura da abertura do décimo terceiro pavimento, e os perfis verticais de velocidade de vento locados no eixo do centro da edificação estudada. No modelo de altura constante, nas duas orientações de vento apresentadas ( $\theta = 0^\circ$  e  $\theta = 45^\circ$ ) (**Figura 3a e 3b**) as velocidades de vento ao redor da edificação de interesse é claramente mais baixa do que aquelas encontradas nas duas orientações de vento do modelo de alturas variáveis (**Figura 3c e 3d**). Outro importante resultado encontrado nas simulações no CFD é a elevação do perfil vertical de velocidades de vento no modelo de altura constante logo após a primeira linha de edificações do entorno urbano a barlavento, como mostrado na **Figura 4**. Essa elevação cria praticamente um novo nível de chão acima do nível das edificações, com velocidades muito baixas abaixo da camada dossel urbana, ou *urban canopy layer* (UCL), causando um baixo potencial uso de ventilação natural. No perfil vertical de velocidades do modelo urbano de alturas variáveis, é possível perceber que essa elevação não ocorre, e que são encontradas velocidades de vento mais altas em toda a extensão do modelo na camada dossel urbana, indicando um melhor potencial de uso da ventilação natural.

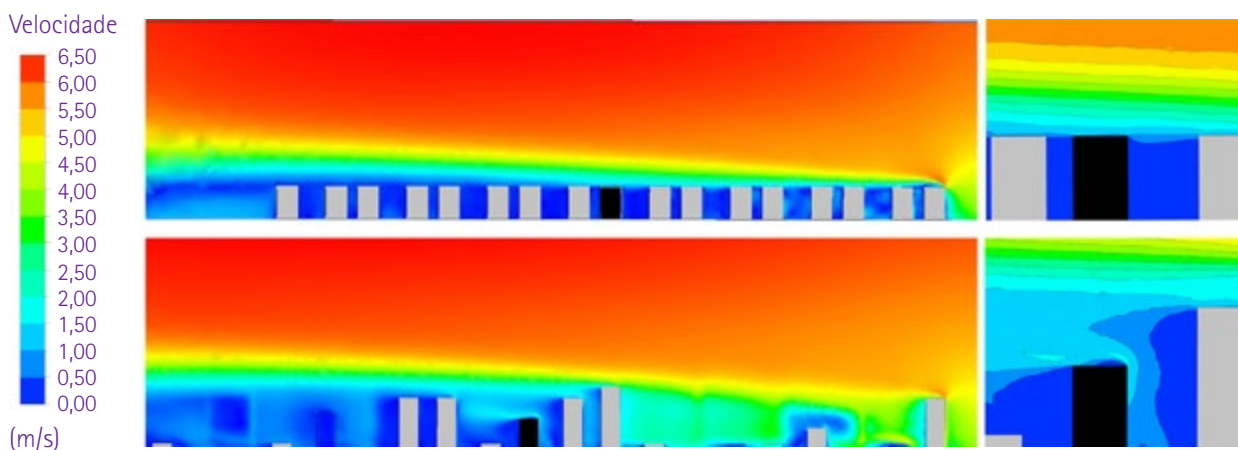
Os resultados de renovação de ar por hora obtidos nas simulações anuais de desempenho da ventilação natural conduzidos no *EnergyPlus* são mostrados na **Figura 5**. No gráfico de frequência de ocorrência de renovações de ar por hora, o modelo de alturas variáveis apresenta a maior frequência em intervalos com maiores taxas de Ren/h em todos os pavimentos e para a média global da edificação. No gráfico de média anual de renovação de ar por hora, **Figura 5b**, são também claramente mais elevadas as taxas de Ren/h obtidas pelo modelo urbano de alturas variáveis em comparação com o modelo de alturas constantes, sendo as taxas em média 23 % mais altas e no sétimo andar essa diferença atinge o patamar de 40 %, onde o modelo de alturas constantes apresenta 2,11 Ren/h e o modelo de alturas variáveis apresenta 2,96 Ren/h.

Figura 3 – Resultados da simulação em CFD. a) modelo de alturas constantes  $\theta = 0^\circ$ , b) modelo de alturas variáveis  $\theta = 0^\circ$ , c) modelo de alturas constantes  $\theta = 45^\circ$ , d) modelo de alturas variáveis  $\theta = 45^\circ$



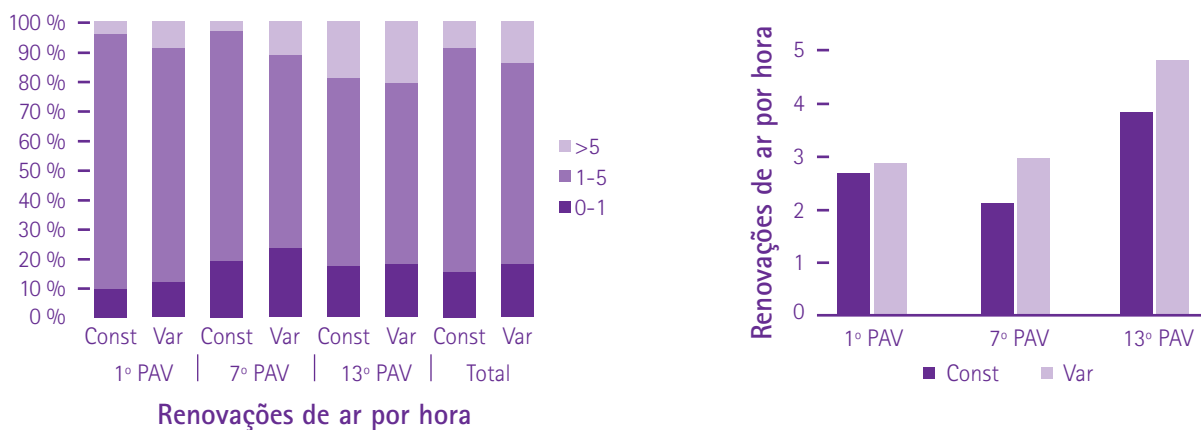
Fonte: elaborado pelos autores

Figura 4 – Resultados da simulação em CFD. a) perfil vertical de velocidade de vento modelo com alturas constantes e variáveis, respectivamente, direção de vento a 0°, e detalhes do escoamento ao redor da edificação de interesse



Fonte: elaborado pelos autores

Figura 5 – a) comparação de frequência de ocorrência de Ren/h entre os modelos urbanos de alturas constantes e variáveis, b) médias anuais de renovação de ar por hora



Fonte: elaborado pelos autores



## 4 Discussão

A maioria dos estudos que analisam a ventilação natural em edificações usando modelos urbanos teóricos consideram volumes com alturas constantes, um arranjo que não é representativo de uma situação típica encontrada nos grandes centros urbanos brasileiros. A metodologia apresentada neste trabalho para a criação de um modelo de alturas variáveis tem como objetivo emular essa variação e seu caráter randômico. Os resultados apresentados na seção anterior mostram que há uma grande divergência entre o comportamento do ar ao redor da edificação estudada e nos valores de renovação de ar por hora obtidos de acordo com o modelo urbano teórico utilizado na simulação. Isto é, devido principalmente à elevação do perfil vertical de velocidade de vento logo após a primeira linha de edificações a barlavento no modelo urbano de alturas constantes, causando uma zona de baixas velocidades de vento na camada dossel urbana ao longo de todo o modelo. No modelo de alturas variáveis, há uma maior permeabilidade ao escoamento do vento, permitindo maiores velocidades ao redor da edificação de interesse, criando maiores diferenças de coeficientes de pressão na fachada e, conseqüentemente, resultando em maiores taxas de renovação de ar por hora nas simulações no modelo *Airflow Network*. Este estudo foi conduzido considerando as orientações dos principais guias de simulações de escoamento de vento ao redor de edificações em CFD com intuito de obter os resultados mais confiáveis, entretanto, para a apropriada validação dos resultados, são necessários experimentos em túneis de vento com os modelos urbanos teóricos criados. Outras limitações deste trabalho foram não terem sido consideradas as trocas térmicas no escoamento e a simulação de apenas um cenário para cada tipo de modelo. Uma análise com uma amostra maior de cenários de modelo urbano teórico simulados certamente permitiria resultados mais consistentes.

## 5 Conclusão

A maior parte dos estudos de ventilação natural em edificações inseridas em contextos urbanos teóricos tem como objetivo a apresentação de análises que visam a generalização dos resultados obtidos para aplicações e a criação de parâmetros normativos ou métodos prescritivos de cálculo de alguma variável. Este trabalho mostra a necessidade de se avaliar com mais critério a forma de se representar o contexto urbano estudado, uma vez que a metodologia escolhida terá grande impacto nos resultados obtidos. Essa divergência pode vir a ser uma fonte de erros nos resultados e conduzir a decisões equivocadas, seja na construção de métodos de cálculo ou de parâmetros normativos.

## 6 Agradecimentos

O trabalho apresentado neste artigo foi financiado pela CAPES.

## 7 Referências

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME V&V 20, Standard for verification and validation in computational fluid dynamics and heat transfer**. New York: ASME, 2009.

BUCCOLIERI, R.; SANDERBERG, M.; SABATINO, S. D. City breathability and its link to pollutant concentration distribution within urban-like geometries. **Atmospheric Environment**, v. 44, n. 15, p. 1894-1903, May 2010.

FRANKE, J. Recommendations of the COST action C14 on the use of CFD in predicting pedestrian wind environment. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMPUTATIONAL WIND ENGINEERING, 4., 2006, Yokohama. **Proceedings...** Yokohama: Japan Association for Wind Engineering, 2006.

FRANKE, J.; HELLSTEN, A.; SCHLUNZEN, H.; CARISSIMO, B. **Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment**. Brussels: COST, 2007. 52 p.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA **Portaria nº 18, de 16 de janeiro de 2012**. Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais. Rio de Janeiro: INMETRO, 2012.

LIN, M.; HANG, J.; LI, Y.; ZHIWEN, L.; SANDERBERG, M. Quantitative ventilation assessments of idealized urban canopy layers with various urban layouts and the same building packing density. **Building and Environment**, v. 79, p. 152-167, Sept. 2014.

MARTINS, N.; GRAÇA, G. Validation of numerical simulation tools for wind-driven natural ventilation design. **Building Simulation**, v. 9, n. 1, p. 75-87, Feb. 2016.

MONTAZERI 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, Feb. 2013.

RAMPONI, R.; BLOCKEN, B.; COO, L. B.; JANSSEN, W. CFD simulation of outdoor ventilation of generic urban configurations with different urban densities and equal and unequal street widths. **Building and Environment**, v. 92, p. 152-166, Oct. 2015.

SORGATO, M. J. **Relatório Técnico da Base de Simulações para o RTQ-R. ELETROBRAS/PROCEL**. [S.l.: s.n.], 2011.

TAMURA, T.; NOZAWA, K.; KONDO, K. AIJ guide for numerical prediction of Wind loads on buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 96, n. 10-11, p. 1974-1984, Oct./Nov. 2008.

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, n. 10-11, p. 1749-1761, 2008.

WANG, B.; DOGAN, T.; PAL, D.; REINHART, C. 2012. Simulating naturally ventilated buildings with detailed CFD-based wind pressure database. In: NATIONAL CONFERENCE OF INTERNATIONAL BUILDING PERFORMANCE SIMULATION ASSOCIATION-USA, 5., 2012, Madison, WI. **Proceedings...** [S.l.]: IBPSA, 2012. p. 353-360.