



A FORMA URBANA E O FLUXO DE AR EM EDIFICAÇÕES: PROPOSTA DE MÉTODO PARA ANÁLISE DA VENTILAÇÃO NATURAL URBANA E SUA INFLUÊNCIA EM AMBIENTES INTERNOS¹

LEITE, Renan C. V. (1); FROTA, Anésia B. (2)

(1) UNIFOR, e-mail: renancid@bol.com.br; (2) FAUUSP, e-mail: arfrota@uol.com.br

RESUMO

O aproveitamento da ventilação natural depende das condições de vento no local e da forma como este atinge as fachadas. O campo de pressões sobre as superfícies é um dos principais parâmetros no processo de ventilação natural. Porém, a determinação de dados de C_p adequados é tarefa complexa e quase sempre inacessível aos projetistas. A complexa morfologia urbana e a variabilidade da geometria dos edifícios reduz a aplicabilidade das informações disponíveis, podendo produzir erros significativos. Propõe-se um método para analisar detalhadamente o comportamento do fluxo de ar desde o ambiente exterior até seus reflexos na ventilação interna. Utiliza-se um modelo de dinâmica dos fluidos computadorizada (CFD) e quatro diferentes cenários representativos da densidade urbana. Formulou-se um apartamento típico para testar a influência da forma urbana em cada caso. A metodologia é aplicável às condições em que o vento domina o processo de ventilação, desprezando-se o efeito chaminé e em edifícios de porosidade reduzida. Quaisquer direções de vento podem ser ajustadas e os principais parâmetros das simulações são descritos. Os resultados apontaram a redução nos valores da diferença de Coeficientes de Pressão (C_p) e menores taxas de renovação do ar de acordo com o nível de adensamento e verticalização em cada cenário.

Palavras-chave: Ventilação natural urbana, Ventilação natural interna, Vazão de ar.

ABSTRACT

The use of natural ventilation depends on wind conditions at the site and how it affects the facades. Pressure field on the surfaces is one of the main parameters involved in natural ventilation process. However, determining suitable C_p data is a complex task and often inaccessible to designers. Complex urban morphology and variability of building geometry reduce the applicability of available information and might produce significant errors. It is proposed a method to analyze airflow from external environments to its effects on internal natural ventilation. A Computational Fluid Dynamics (CFD) code was used and four different representative urban density scenarios. A typical apartment was formulated to test the influence of higher urban roughness in each case. The methodology can be applied in conditions which the wind dominates natural ventilation process, disregarding the air stack effect and in low porosity buildings. Any wind direction can be adjusted and the main parameters involved in simulations are described. Results pointed the reduction of Pressure Coefficients (C_p) difference across facades and lower airflow rates in accordance to the urban density level in each scenario.

¹ LEITE, Renan C. V.; FROTA, Anésia B. A forma urbana e o fluxo de ar em edificações: proposta de método para análise da ventilação natural urbana e sua influência em ambientes internos. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16., 2016, São Paulo. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2016.

Keywords: *Urban natural ventilation, Internal natural ventilation. Airflow.*

1 INTRODUÇÃO

Entre os elementos que compõem o clima, o vento é o que mais facilmente pode ter seu comportamento alterado e, ao mesmo tempo, controlado pelo desenho urbano. A densidade construída, a altura e a largura dos edifícios, a orientação das ruas e o espaçamento entre as edificações, o tamanho e a distribuição das áreas livres são responsáveis pela permeabilidade do vento no meio urbano (GIVONI, 1998).

O nível de rugosidade do meio, os desvios sofridos pelos fluxos, a criação de zonas de redução da velocidade do ar ou mesmo a formação de corredores de aceleração das correntes influenciam diretamente o campo de pressões nas fachadas. A esse processo associa-se a variabilidade formal que os objetos arquitetônicos podem assumir na prática projetual. Combinados, tais aspectos tornam inadequada grande parte das referências contendo dados de coeficientes de pressão (C_p), parâmetro determinante para o processo de ventilação natural, impedindo o uso de bibliotecas padrão, modelos simplificados, paramétricos ou matemáticos e recursos gráficos como forma de obter informações adequadas.

Em edifícios residenciais situados em regiões de clima quente e úmido, onde a maior necessidade é por resfriamento, a ventilação natural constitui a mais simples estratégia para obtenção de conforto quando a temperatura interna é elevada (GIVONI, 1994). Nessas localidades há pouca variação da temperatura do ar ao longo do dia e elevados níveis de umidade relativa, que dificultam o efeito de resfriamento promovido pelo suor. Torna-se fundamental o controle da radiação solar e o incremento da ventilação no espaço urbano e no interior das edificações. Os edifícios devem evitar ganhos de calor do meio externo, dissipando aqueles produzidos em seu interior através do movimento do ar, principal responsável pelo reestabelecimento da condição de conforto térmico (KOENIGSBERGER et al, 1974; FANGER, 1987, AYNSLEY, 1999; FROTA; SCHIFFER, 2003).

Uma limitação à ventilação natural, entretanto, deve-se à redução da velocidade do ar devido aos obstáculos no entorno. Apesar dos benefícios da condição urbana mais concentrada, o maior nível de densidade construída alcançado através da verticalização pode se converter em dificuldade para ventilar as fachadas, comprometendo o potencial de resfriamento proporcionado pelo movimento do ar.

Ao considerar o adensamento como uma das formas mais eficientes para reduzir os impactos ambientais provocados pela condição urbana, e sendo o edifício multifamiliar um produto cada vez mais incorporado à paisagem da cidade, tornam-se necessários meios mais acessíveis para avaliar a influência de cada forma urbana específica sobre a possibilidade de manutenção das condições de ventilação natural em edificações.

1.1 Objetivo

Objetiva-se elaborar um método para avaliar de maneira mais simples os impactos provocados por diferentes formas urbanas na ventilação natural até seus reflexos no comportamento dos fluxos de ar em edificações.

O método pretende-se mais completo e preciso, fugindo às limitações recorrentes ao integrar a análise da ventilação natural em ambientes internos ao que ocorre na escala da cidade.

2 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

Quando o ar flui das áreas adjacentes para o ambiente urbano, este se ajusta às novas condições definidas pela cidade. A altura da camada limite atmosférica é elevada e a velocidade do ar próximo à superfície é reduzida. É justamente no nível obstruído desta primeira camada que o fluxo de ar livre tem seu momento transformado em pressão sobre as fachadas de edifícios, afetando o comportamento do vento nas regiões adjacentes.

A presença de obstáculos no entorno modifica o comportamento do vento, invariavelmente elevando a turbulência e diminuindo a sua intensidade, o que pode agravar as condições ambientais internas ao reduzir a possibilidade de arrefecimento da envoltória, a retirada do calor acumulado no interior dos edifícios e o resfriamento dos ocupantes (OKE, 1987). Por outro lado, a complexa morfologia verificada nos centros urbanos torna imprevisível o comportamento do vento. Do ponto de vista do desenho da cidade, a variação da altura de edificações desvia fluxos e pode gerar áreas de maior e menor circulação do ar, atingindo o nível do pedestre e até aberturas de edifícios mais baixos (GIVONI, 1998).

As principais normas disponíveis (ASHRAE, 1985; BS 5925, 1991; CISBE, 1997), apesar de reconhecerem a significativa influência das estruturas urbanas sobre o comportamento do ar no interior das edificações, não contém informação suficiente. Santamouris (2006) adverte que, apesar do desenvolvimento das análises da ventilação natural em edifícios nos últimos cinquenta anos, mais especificamente em relação à medição da vazão e o campo de velocidades do ar, inexistem métodos capazes de abranger as possibilidades que se colocam diante da diversidade de condições.

Muito embora o tema da ventilação natural urbana tenha sido abordado em diversas pesquisas, a interferência da forma urbana no potencial de ventilação para o conforto térmico e a redução do consumo de energia de edifícios permanece pouco explorada (CHEUNG; LIU, 2011). Pesquisas recentes investigaram o potencial da ventilação natural para redução da carga térmica em edificações residenciais (CARRILHO DA GRAÇA et al, 2002; KOTANI; SATOH; YAMANAKA, 2003; PRIYADARSINI; CHEONG; WONG; 2004; LIPING; HIEN, 2007; LIU et al, 2014). Alguns estudos abordam, mais especificamente, a aplicação da estratégia para o conforto térmico na condição tropical quente e úmida (WONG et al, 2002; HIRANO et al, 2006; PRAJONGSAN; SHARPLES, 2012).

A escolha por edificações residenciais deve-se ao fato de que nestas é maior o potencial para aplicação de meios naturais para garantir o conforto térmico. Os ganhos de calor devido à ocupação, iluminação e outros sistemas são menores se comparados a outros edifícios (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). Ainda, a adaptação ao campo térmico envolvente também são maiores no ambiente residencial, sobretudo em clima quente e úmido, onde a preferência é pelo maior movimento do ar (ASHRAE, 2004).

3 MÉTODO

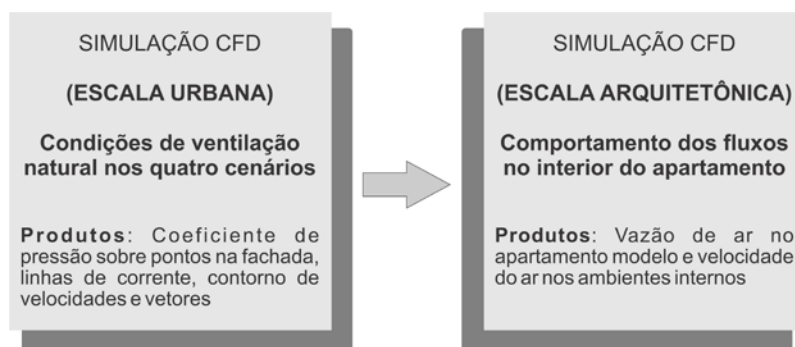
O método empreendido permite avaliar impactos da forma urbana sobre o vento desde a dimensão urbana até seus reflexos no fluxo de ar em edifícios.

A metodologia desenvolve-se em etapas sequenciais e complementares, sendo considerada desassociada porque os dados são incorporados em dois momentos distintos. Busca-se integrar duas escalas de análise diferentes em relação à ventilação natural, evitando, assim, limitações verificadas em pesquisas semelhantes que, na maioria dos casos, não associam as condições de vento no entorno à ventilação natural interna.

Comumente, análises dos fluxos de ar na edificação assumem dados de Coeficientes de Pressão (C_p) e taxas de renovação do ar de forma arbitrária, padronizada ou baseada em dados estatísticos preestabelecidos em situações genéricas. É ainda permitido ao usuário informar tais dados. Contudo, a dificuldade está em relacionar o que ocorre na especificidade de cada arranjo construtivo urbano, determinante para o campo de pressões sobre as aberturas e à velocidade do ar nos ambientes internos.

Na presente pesquisa, no entanto, simulam-se as condições de vento para o contexto urbano em questão, fornecendo dados de pressão devido ao vento em pontos de interesse na fachada (aberturas) de um edifício selado para, no estágio seguinte, serem simulados os fluxos nos ambientes internos.

Figura 1 – Esquema da metodologia empregada e produtos de cada etapa



Fonte: o autor

A abordagem utiliza a reconhecida qualidade dos códigos CFD. A técnica permite realizar um maior número de análises comparado a outros métodos, como ensaios em túnel de vento. Facilmente, pode-se variar-se a geometria e as condições de contorno sem grandes investimentos e em menor tempo. A medida representa, portanto, alternativa viável e, almeja-se, mais prática

e acessível a projetistas para avaliar mais precisamente os impactos da forma urbana sobre o potencial de ventilação natural de edifícios, como em Carrilho da Graça et al (2002); Hirano et al (2006); Carrilho da Graça et al (2012); Liu et al (2014). Ao separar as escalas de análise, reduz-se o esforço computacional e, conseqüentemente, o tempo de processamento, além de fundamental para a precisão dos resultados.

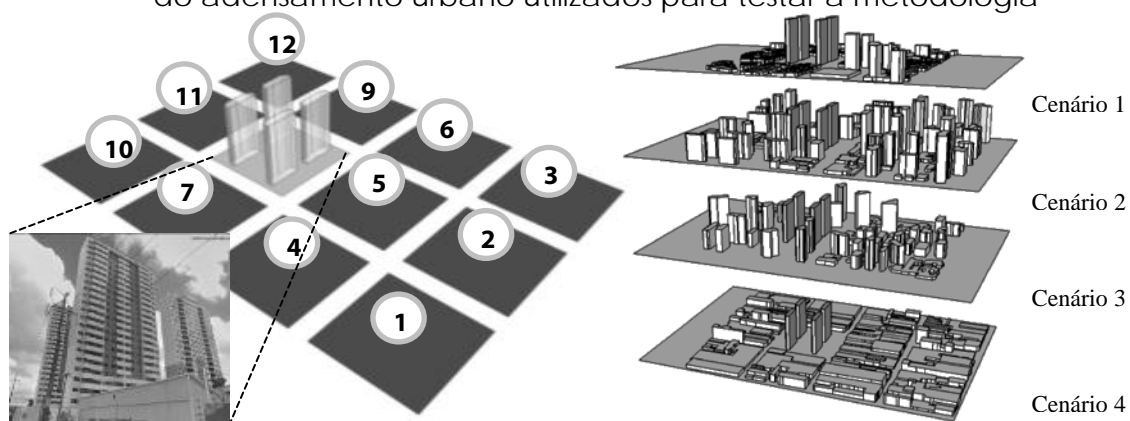
É necessário ressaltar que a aplicação do método aqui empreendido somente é possível se ação do vento deve dominar a ventilação natural, desprezando-se o efeito chaminé, aspecto comum às edificações no contexto quente e úmido. Ainda, e principalmente, a separação das simulações de fluxos internos das análises de ventilação urbana somente é adequada se a área total de aberturas for menor do que 20% da área de fachada. Tais considerações decorrem do fato de que edificações com maiores porosidades tendem a reduzir as pressões nas fachadas, induzindo a erros no cálculo da vazão de ar.

Para testar a metodologia, quatro trechos urbanos espalhados pela cidade de Fortaleza, com diferentes níveis de adensamento construtivo cada, foram selecionados devido à sua representatividade, como em Martins; Bonhomme; Adolphe (2013). O cenário 1 apresenta verticalização pouco expressiva, contrastando com a presença quase uniforme de edifícios altos no cenário 2. O cenário 3 representa uma transição entre o adensamento através da verticalização, enquanto que o cenário 4 possui elevada taxa de ocupação do solo, formado por edificações baixas.

Elaborou-se um edifício modelo baseado na produção imobiliária local, implantando-o em cada cenário. Adotaram-se os valores de pressão nas aberturas dos apartamentos no primeiro, décimo primeiro e vigésimo terceiro pavimentos como condição inicial às simulações na escala arquitetônica.

Na modelagem dos cenários urbanos adotou-se um conjunto de doze quadras, com seis quadras à frente de um trecho livre, onde se implantaram os edifícios modelo (figura 2). Tal configuração é recomendada devido à necessidade em analisar os efeitos aerodinâmicos a barlavento.

Figura 2 – Esquema de modelagem e os quatro diferentes cenários representativos do adensamento urbano utilizados para testar a metodologia



Fonte: o autor

3.1 Desenvolvimento das simulações

O empreendimento de um método inteiramente baseado em simulações computacionais torna necessário descrever quais os parâmetros envolvidos em cada etapa de análise, que, por sua vez, são determinantes para a qualidade e precisão das análises.

As simulações CFD foram realizadas pelo programa ANSYS CFX 13.0 e foram consideradas em condição estacionária, isotérmica, incompressível e turbulenta. A pressão adotada como referência é de 1 atm e a temperatura de 25 °C. Empregou-se o modelo de turbulência K-epsilon padrão. O fechamento de toda a série de simulações situou-se dentro do nível de resíduos considerado adequado (10^{-4} ou inferior).

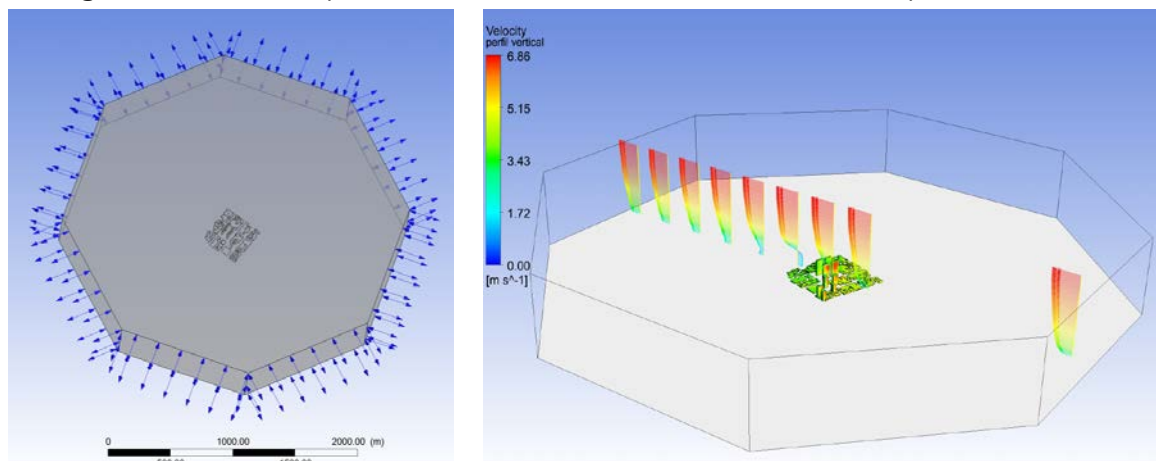
As malhas, compostas por elementos tetraédricos e prismáticos em formação desestruturada para melhor se adaptar às formas urbanas, passaram por testes de independência, sendo avaliada sua qualidade ortogonal e assimetria dentro de valores recomendados (CFX, 2003).

Nas análises do comportamento do vento utilizou-se um domínio fluido em formato octogonal (figura 3). A opção permitiu simular as duas principais direções dos fluxos indicadas pelo diagnóstico climático (leste e sudeste). O formato evita o efeito de blocagem e facilita a alteração da direção dos ventos a partir da indicação do ângulo. As fronteiras do domínio foram consideradas aberturas (0 Pa).

Recomenda-se a inserção de uma equação para representar a alteração da camada limite imposta pela rugosidade do meio. A metodologia utilizou a equação do BRE (1978) apud Bittencourt & Cândido (2005) para descrever o perfil vertical de vento, onde a velocidade do ar (V) numa determinada altura (z) é a velocidade medida na estação (V_0) corrigida pelos coeficientes k e a , com valores de 0,35 e 0,25, respectivamente, representando um entorno urbano.

$$V = (V_0 \cdot k \cdot z^a) \quad (1)$$

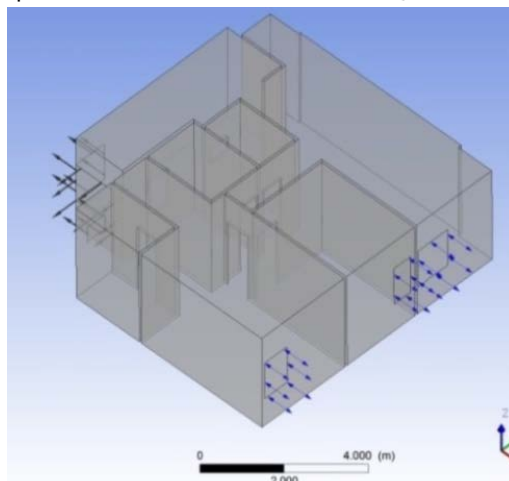
Figura 3 – Domínio para simulação da ventilação urbana e perfil de vento



Fonte: o autor

As avaliações da ventilação natural no apartamento modelo tomam este como domínio, como mostra a figura 4. As janelas constituem entradas e saídas do ar, sendo o valor de pressão adotado como o necessário para forçar os percursos das correntes.

Figura 4 – Domínio para as análises de ventilação natural no apartamento

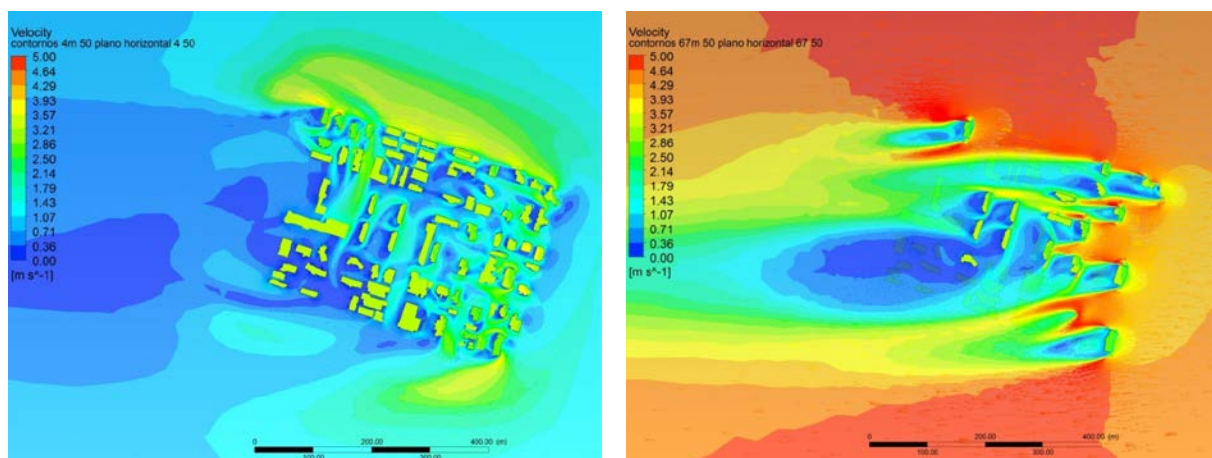


Fonte: o autor

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados das simulações de ventilação natural nos quatro cenários urbanos podem ser avaliados com base em aspectos qualitativos e quantitativos. Do ponto de vista qualitativo, as análises foram realizadas através de planos horizontais a 4,5 m, 34,5 m e 67,5 m do piso, que correspondem ao centro das aberturas nos pavimentos selecionados e permitem compreender os efeitos aerodinâmicos específicos que determinam o campo de pressão incidente, como exemplifica a figura 5.

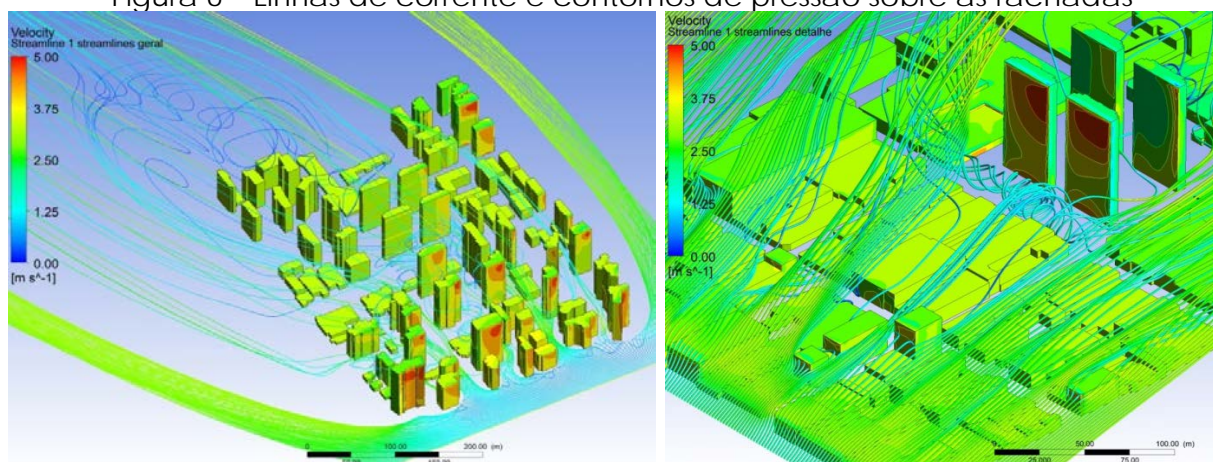
Figura 5 – Contornos de velocidade a 4,5 m do piso (esq.) e 67,5 m de altura (dir.)



Fonte: o autor

Adicionalmente, linhas de corrente e contornos de pressão sobre as superfícies complementam as análises, como resume a figura 6.

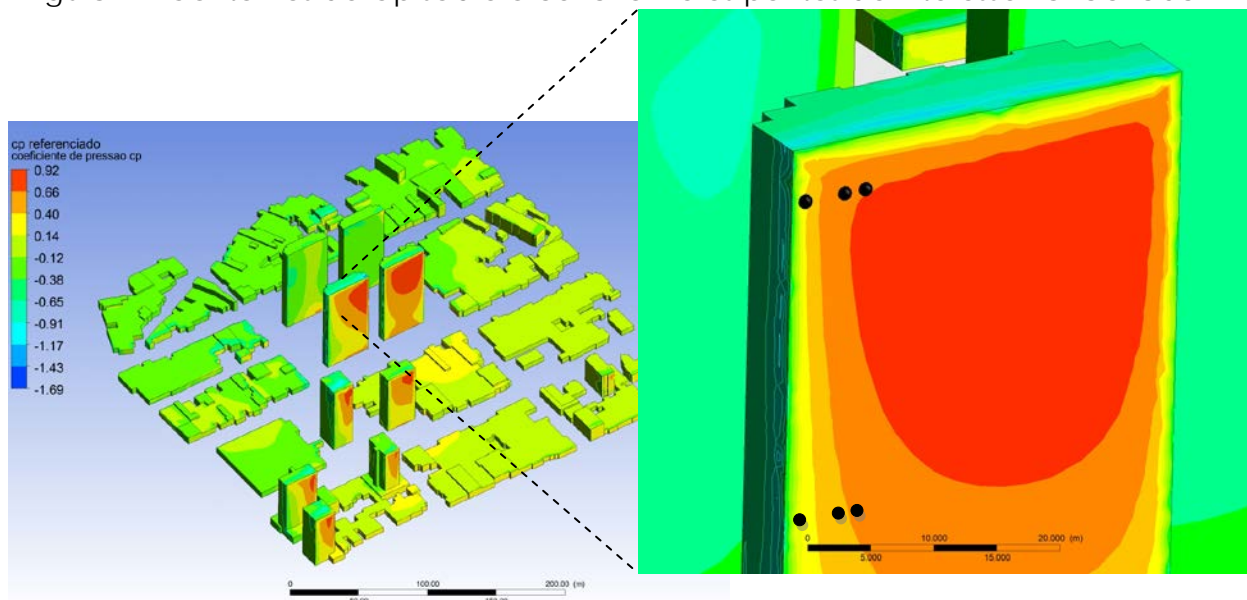
Figura 6 – Linhas de corrente e contornos de pressão sobre as fachadas



Fonte: o autor

Mais especificamente, no entanto, um dos parâmetros de maior influência no potencial de ventilação natural é a diferença de C_p nas aberturas a barlavento e a sotavento (ΔC_p). A variável é facilmente alterada pela forma urbana e uma das principais vantagens da metodologia é a possibilidade de obtê-lo de forma mais acessível como um dos resultados da etapa inicial (ventilação urbana) e condição de contorno na fase seguinte, como destacado na figura 7.

Figura 7 – Contornos de C_p sobre o cenário 1 e os pontos de interesse na fachada

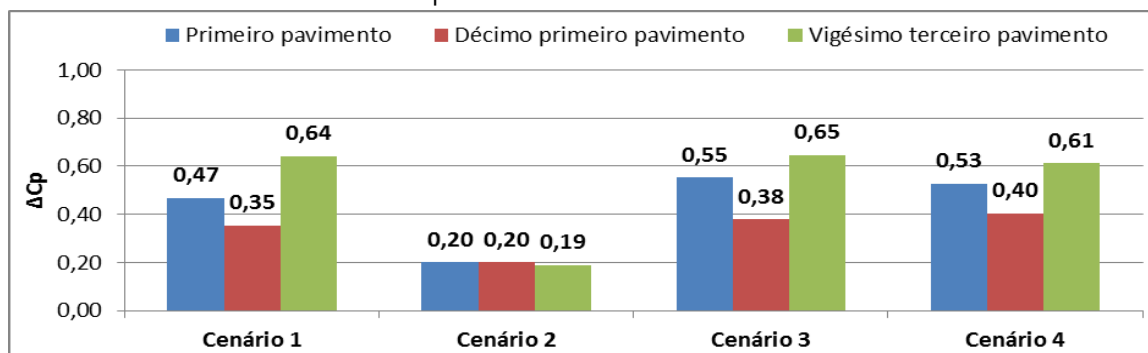


Fonte: o autor

Uma vez que o apartamento modelo dispõe de três janelas a barlavento e três a sotavento, o ΔC_p foi assumido como a média ponderada entre as que funcionam como entrada de ar e aquelas que funcionam como saídas.

Em relação à morfologia urbana, no cenário 3 os valores de ΔC_p foram os mais altos em quase todos os pavimentos. No cenário 4, as diferenças foram próximas àquelas verificadas no cenário 1, mesmo que este último apresente características morfológicas diferentes. No cenário 2 verificam-se as menores diferenças de C_p , como era esperado em virtude do elevado nível de obstrução ao vento. Este arranjo urbano apresentou valores de ΔC_p mais baixos entre as fachadas, o que reduz o potencial da ventilação natural quando o vento incide nessa direção (gráfico 1).

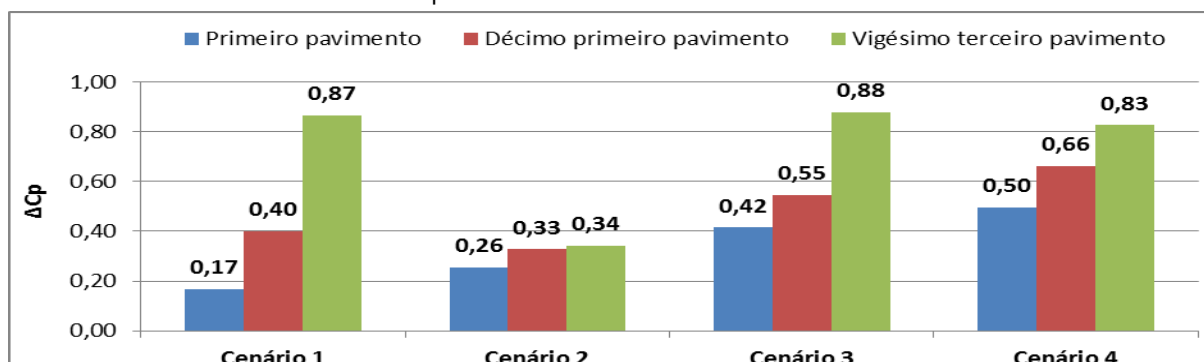
Gráfico 1 – ΔC_p entre as fachadas com vento leste



Fonte: o autor

Com o vento de sudeste, os valores de ΔC_p foram mais elevados, sobretudo nos pavimentos mais altos, como esperado. Novamente, a influência da maior verticalização do cenário 2 é significativa, indicada pelos valores mais baixos, como resume o gráfico 2. Mais especificamente, no entanto, no caso do pavimento mais baixo, a diferença calculada neste cenário foi superior ao cenário 1. O fato é isolado e deve-se à presença de um conjunto verticalizado que, no cenário inicial, se coloca à frente do edifício modelo quando a incidência de vento é sudeste, gerando uma zona de estagnação do ar cujos efeitos se estendem até próximo da fachada principal.

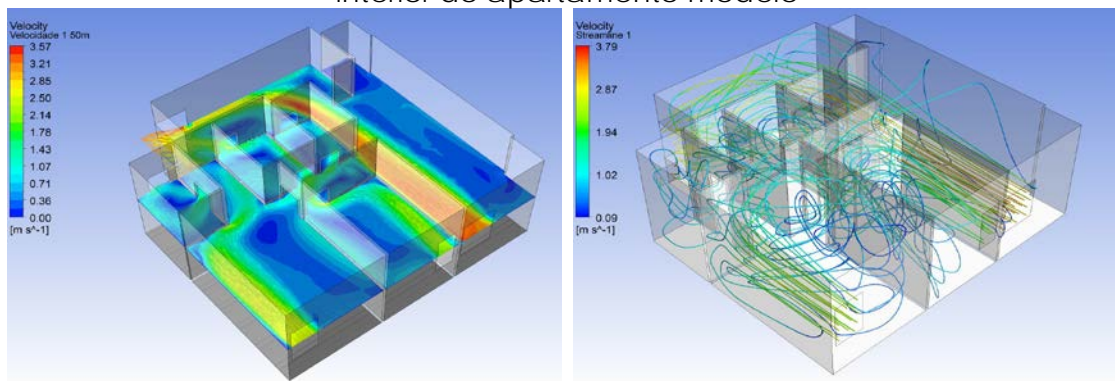
Gráfico 2 – ΔC_p entre as fachadas com vento sudeste



Fonte: o autor

A metodologia permite a verificação do campo de velocidades do ar em qualquer ponto no interior do apartamento e a visualização do comportamento das correntes, como apresentado pela figura 8.

Figura 8 – Visualização dos contornos de velocidades e as linhas de corrente no interior do apartamento modelo

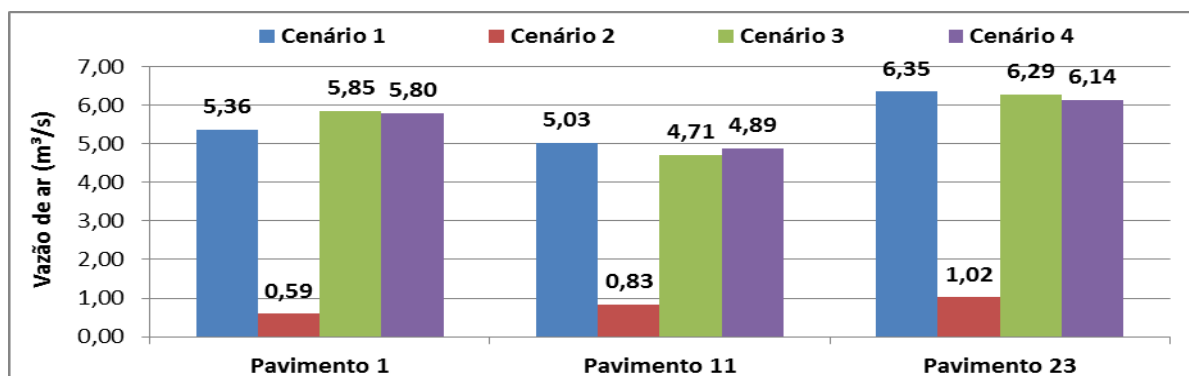


Fonte: o autor

Do ponto de vista quantitativo, um dos principais produtos almejados pela metodologia consistia na obtenção da vazão de ar de acordo com a pressão obtida na etapa anterior. No total foram vinte e quatro simulações da ventilação natural interna, uma vez que cada cenário foi submetido a duas direções de vento, gerando pressões em três pavimentos diferentes.

Como descreve o gráfico 3, no cenário 1, o pavimento mais alto atinge as maiores taxas de renovação do ar, com 6,35 m³/s. Este valor é cerca de 520% superior ao verificado no cenário 2, como esperado, porém bastante próximo dos valores alcançados pelos cenários 3 e cenário 4. Mais uma vez, reforça-se o papel da morfologia urbana na geração de condições específicas de circulação do ar, impedindo determinação imediata de quais formas impedirão o aproveitamento da ventilação natural.

Gráfico 3 – Vazão de ar por pavimento em cada cenário com vento leste

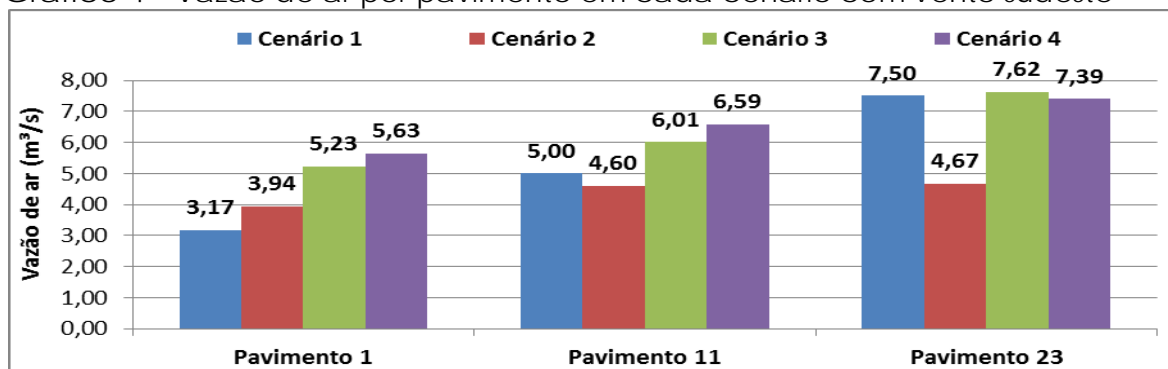


Fonte: o autor

De maneira geral, com o vento sudeste, os valores se elevam e, mesmo no

obstruído cenário 2, as vazões de ar atingem valores mais elevados comparados ao vento leste. O cenário 4 apresenta as melhores condições de ventilação natural em quase todos os níveis. Comparado ao último cenário simulado, o primeiro pavimento do cenário 1 tem a mais baixa quantidade de renovações de ar, valor 78% menor. Ainda, o cenário 3, bem mais verticalizado que o 1 e o 4, obtém valores próximos a estes (gráfico 4).

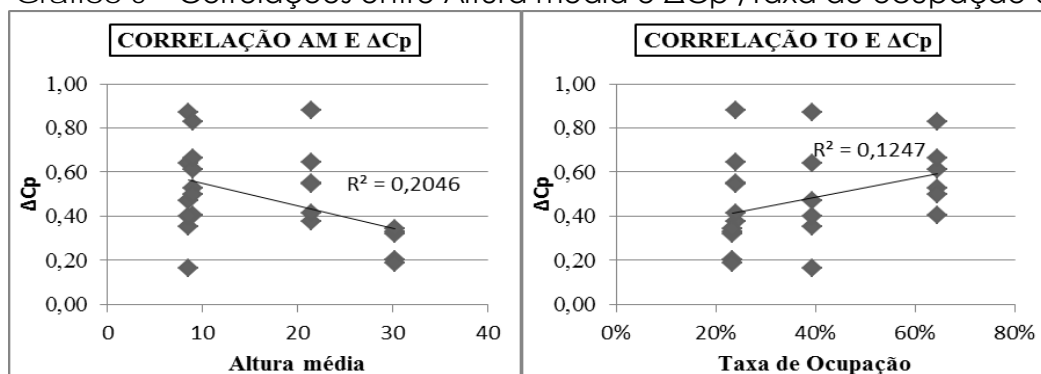
Gráfico 4 - Vazão de ar por pavimento em cada cenário com vento sudeste



Fonte: o autor

Em síntese, apresentam-se as fracas correlações entre a altura média dos edifícios (AM) e o ΔC_p e entre a Taxa de Ocupação do solo (TO) e o ΔC_p , reunidas no gráfico 5. Os valores baixos de R^2 nos dois casos corroboram tal premissa.

Gráfico 5 – Correlações entre Altura média e ΔC_p /Taxa de ocupação e ΔC_p



Fonte: o autor

5 CONCLUSÕES

Através do conjunto de simulações CFD da ventilação natural urbana reforçou-se a premissa de que cada configuração espacial gera condições específicas de circulação do ar. Os efeitos aerodinâmicos e a turbulência inerentes ao comportamento do vento em contato com os obstáculos que compõem o meio urbano impedem a determinação imediata, e num nível de precisão adequado, quais formas serão prejudicadas ou mesmo beneficiadas em relação à ventilação natural.

A determinação dos valores de C_p e o cálculo da vazão de ar que não considere as condições morfológicas do entorno torna-se impreciso e, conseqüentemente, a predição da performance termoenergética de edifícios pode assumir erros significativos, levando a avaliações equivocadas ou mesmo irreais. É justamente nesse sentido que a metodologia aqui empreendida se coloca: diante da inexistência de métodos e normas capazes de abranger as possibilidades que se colocam com a diversidade de formas espaciais urbanas, tencionou-se reduzir a imprecisão das análises de ventilação natural em ambientes adensados.

Recomenda-se, dentro das especificidades climáticas de cada lugar, simular ao menos duas principais incidências de vento como forma de melhor explorar o comportamento dos fluxos. Da mesma forma, a análise em diferentes níveis do edifício permite detalhar alguns efeitos específicos que ocorrem com o ganho em altura.

O método aqui proposto pretendeu avançar no desafio que consiste em elaborar meios mais acessíveis ao projetista para avaliar de forma mais rápida, porém não menos precisa, o que é positivo tanto do ponto de vista do desenho de cidade como para a melhoria da ambiência térmica nos edifícios. Contudo, é sabido, não existe uma proposta de planejamento universal e cada caso deve ser examinado individualmente.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING (ASHRAE). **ASHRAE Handbook – Fundamentals**. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers: Atlanta, 1985.

_____. **ASHRAE Handbook – Fundamentals**. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers: Atlanta, 2001.

AYNSLEY, R. **Estimating summer wind driven natural ventilation potential for indoor thermal comfort**. Journal of wind Engineering and Industrial Aerodynamics, v. 83, 1999.

BITTENCOURT, L.; CÂNDIDO, C. **Introdução à ventilação natural**. Maceió: EDUFAL, 2005.

BRITISH STANDARD INSTITUTE. **BSI – BS 5925: Code of Practice for Ventilation Principles and Designing for Natural Ventilation**. Londres, 1991.

CARRILHO DA GRAÇA, G.; CHEN, Q.; GLICKSMAN, L. R.; NORFORD, L.K. **Simulation of wind-driven ventilative cooling systems for an apartment building in Beijing and Shanghai**. Energy and Buildings 34: 1-11, 2002.

CARRILHO DA GRAÇA, G.; MARTINS, N. R.; HORTA, C. S. **Thermal and airflow simulation of a naturally ventilated shopping mall**. Energy and Buildings 50: 177–188, 2012.

CFX. **CFX 5 Solver Models**. Didcot Oxfordshire: CFX, 2003.

CHEUNG, J. O. P.; LIU, C. **CFD simulations of natural ventilation behaviour in high-rise buildings in regular and staggered arrangements at various spacings**. Energy and Buildings. V. 43: 1149 – 1158, 2011.

CIBSE Applications Manual. **The chartered institution of building services engineers**. Londres, 1997.

FANGER, P. O. **Airflow characteristics of occupied zone of ventilated space**. ASHRAE Transactions. New York: ASHRAE, 1987.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto térmico**. Editora Nobel, 7 ed., São Paulo, 2003.

GIVONI, B. **Passive and low energy cooling of buildings**. New York: John Wiley and Sons, 1994.

_____. **Climate considerations in buildings and urban design**. New York: John Wiley e Sons, 1998.

HIRANO, T.; KATO, S.; MURAKAMI, S.; IKAGA, T.; SHIRAISHI, Y. **A study on a porous residential building model in hot and humid regions: Part 1—the natural ventilation performance and the cooling load reduction effect of the building model**. Building and Environment 41: 21–32, 2006.

KOENIGSBERGER, O.; INGERSOL, T. G.; MAYHEW, A.; SZOKOLAY, S. V. **Manual of Tropical Housing and Building. Part I: Climatic Design**. London: Longman, 1974.

KOTANI, H.; SATOH, R.; YAMANAKA, T. **Natural ventilation of light well in high-rise apartment building**. Energy and Buildings 35: 427 – 434, 2003.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. 3 ed. Rio de Janeiro, 2014.

LIU, S.; LIU, J.; YANG, Q. PEI, J.; LAI, D.; CAO, X.; CHAO, J.; ZHOU, C. **Coupled simulation of natural ventilation and daylighting for a residential community design**. Energy and Buildings 68: 686 – 695, 2014.

MARTINS, T. A. L.; BONHOMME, M.; ADOLPHE, L. **Análise do impacto da morfologia urbana na demanda estimada de energia das edificações: um estudo de caso na cidade de Maceió, AL**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 13, n. 4, p. 213-233, out./dez. 2013.

OKE, T. R. **Boundary Layer Climates**. 2 ed. London: Methuen, 1987.

PRAJONGSAN, P.; SHARPLES, S. **Enhancing natural ventilation, thermal comfort and energy savings in high-rise residential buildings in Bangkok through the use of ventilation shafts.** Building and Environment 50: 104 – 113, 2012.

PRIYADARSINI, R.; CHEONG, K. W.; WONG, N. H. **Enhancement of natural ventilation in high-rise residential buildings using stack system.** Energy and Buildings 36: 61 – 71, 2004.

SANTAMOURIS, M. **Ventilation for comfort and cooling: the state of the art.** In: SANTAMOURIS, M.; WOUTERS, P. (ed). Building ventilation: the state of the art. Londres: Earthscan, 2006.

WONG, N. H.; FERIADI, H.; LIM, P. Y.; THAM, K. W.; SEK HAR, C.; CHEONG, K. W. **Thermal comfort evaluation of naturally ventilated public housing in Singapore.** Building and Environment 37: 1267 – 1277, 2002.