

XIV ENCAC Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído

X ELACAC Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído

BALNEÁRIO CAMBORIU | 27 a 29 de setembro de 2017

PROPOSTA PARA ANÁLISE COMBINADA DOS EFEITOS DA VENTILAÇÃO DESDE A ESCALA URBANA ATÉ OS AMBIENTES INTERNOS

Renan C. V. Leite (1); Anésia B. Frota (2)

(1) Doutor, Professor do Departamento de Arquitetura e Urbanismo, renancid@bol.com.br, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 60020-181, Tel.: (85)33667300

(2) Doutora, Professora da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, arfrota@uol.com.br, Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 05508-080, Tel.: (11) 3091 4795

RESUMO

O potencial de aplicação da ventilação natural em edificações depende das características de vento no local e da forma como os fluxos incidem sobre as suas superfícies. A pressão sobre as aberturas constitui um dos parâmetros fundamentais ao processo de ventilação natural. Contudo, a obtenção de dados de Coeficientes de pressão (C_p) adequados a cada caso específico é tarefa complexa e quase sempre inacessível a projetistas de edifícios. O dinamismo e a variabilidade da morfologia urbana reduzem a aplicabilidade das informações disponíveis em bibliotecas padrão de programas, modelos analíticos, entre outros, o que pode levar a erros significativos. É proposto método para analisar o comportamento do fluxo de ar desde a escala da cidade até seus reflexos na ventilação de ambientes internos. Utiliza-se um modelo de dinâmica dos fluidos computadorizada (CFD) para analisar o vento em quatro diferentes cenários representativos da densidade urbana. Um apartamento padrão foi elaborado para testar a influência da forma urbana em cada caso. A metodologia é aplicável às condições em que o vento domina o processo, desprezando-se o efeito chaminé e em edificações de porosidade reduzida. É possível ajustar quaisquer direções de vento e os principais parâmetros das simulações são descritos. Verificou-se a redução nos valores da diferença de C_p e menores taxas de renovação do ar de acordo com o nível de adensamento e verticalização em cada cenário. Contudo, a segunda predominância de vento associada à presença de obstáculos do entorno determinou valores mais próximos dos demais cenários, reforçando a premissa de que cada configuração espacial gera condições específicas de circulação do ar. A metodologia empreendida representa alternativa viável e, almeja-se, mais prática e acessível a projetistas para avaliar os impactos da forma urbana sobre o potencial de ventilação natural de edifícios.

Palavras-chave: ventilação natural, coeficiente de pressão, simulação computacional.

ABSTRACT

The potential for applying natural ventilation in buildings depends upon wind site characteristics and the way the flows hit its surfaces. Pressure over openings constitutes one of the main parameters for natural ventilation process. However, obtaining Pressure Coefficient (C_p) data suitable for each specific case is a complex task almost inaccessible to building designers. Dynamism and variability of the urban morphology reduce the applicability of available default data within softwares, analytical models and other sources, which might lead to significant errors. A method is proposed to analyse the airflow course since the city's scale and its reflects on indoor ventilation. A computational fluid dynamic (CFD) is applied to analyse the wind in four different urban density representative scenarios. A standard dwelling was elaborated to test the influence of urban form in each case. The methodology is applicable in conditions such as the wind is dominating natural ventilation process, despising stack effect and in low porosity buildings. It is possible do adjust any wind direction and the main parameters in the simulations are described. It was verified the reduction on C_p difference values and lower airflow rates according to urban density level and verticalization of each scenario. However, the secondary wind direction associated to surrounding obstacles determined values close to those verified on other scenarios, reinforcing the premise that each special configuration leads

to specific conditions of air circulation. The methodology undertaken represents a viable and accessible alternative to designers to evaluate the impacts of urban form on natural ventilation of buildings.

Keywords: natural ventilation, pressure coefficient, computational simulation.

1. INTRODUÇÃO

Entre os elementos que compõem o clima, o vento é o parâmetro mais facilmente alterado em sua interação com a cidade. A complexidade da morfologia verificada em grande parte dos atuais centros urbanos torna imprevisível o comportamento do vento. A maior ou menor permeabilidade ao vento no tecido da cidade é ditada pela 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, entre outros (GIVONI, 1994; 1998).

De maneira geral, ao adentrar a cidade, o vento sofre desvios, modificando seu perfil vertical de velocidades em função do atrito com as superfícies que formam a paisagem urbana, elevando a chamada camada limite atmosférica e, paralelamente, reduzindo a velocidade do ar próximo ao chão. Os obstáculos no entorno de edifícios invariavelmente elevam a turbulência, podendo diminuir a intensidade com que os fluxos incidem sobre as fachadas, agravando as condições ambientais internas porque se reduzem a possibilidade de arrefecimento da envoltória, a retirada do calor acumulado no interior dos edifícios e o resfriamento dos ocupantes (OKE, 1987). O nível de rugosidade do meio, 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.

As principais normas disponíveis (ASHRAE, 1985; BS 5925, 1991; CIBSE, 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. Allard (1998) resume que a compreensão dos fenômenos envolvidos e o conhecimento das características específicas do escoamento de ar num determinado espaço, assim como prever as taxas de vazão de ar em edifícios, tornam-se necessários por razões de conforto e face à questão do consumo energético.

Em regiões de clima quente e úmido, onde a maior necessidade é por resfriamento, a compreensão do comportamento dos fluxos de ar é aspecto fundamental, uma vez que a ventilação natural constitui a mais simples e econômica estratégia para obtenção de conforto térmico quando a temperatura interna é elevada (GIVONI, 1994). Em tais localidades, a variação da temperatura do ar é pouco expressiva ao longo do dia, agravada pelos elevados níveis de umidade relativa, o que dificulta o potencial de resfriamento evaporativo promovido pela evaporação do suor sobre a pele. Torna-se, portanto, crucial 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; AYNLEY, 1999; FROTA; SCHIFFER, 2003).

Por outro lado, uma séria limitação ao potencial da ventilação natural deve-se à redução da velocidade do ar em função da presença de obstáculos no entorno. A despeito dos benefícios da condição urbana mais concentrada alardeada pelas atuais correntes do urbanismo, categóricas em defender maiores níveis de densidade construída através da verticalização, tal característica pode se converter em dificuldade para ventilar as fachadas, comprometendo o potencial de resfriamento proporcionado pelo movimento do ar.

Assim, 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 das cidades brasileiras contemporâneas, tornam-se necessários meios mais simples para avaliar a influência de cada forma urbana específica sobre a possibilidade de manutenção das condições de ventilação natural em edificações. 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 no interior de edifícios permanece pouco explorada (CHEUNG; LIU, 2011).

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.

2. OBJETIVO

Apresenta-se, neste artigo, método para avaliar de maneira mais acessível os impactos sobre a ventilação natural provocados por diferentes arranjos urbanos e seus reflexos nos fluxos de ar em ambientes internos.

3. MÉTODO

O método, baseado em simulações computacionais em escalas diferentes, sequenciais e complementares, pretende-se mais completo e preciso ao integrar a análise da ventilação natural em ambientes internos ao que ocorre no meio urbano externo. Desta forma, 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 ao processo de ventilação natural, evitando, assim, limitações recorrentemente verificadas em outras pesquisas que, na maioria dos casos, não associam as condições de vento no entorno à ventilação natural interna.

Na presente pesquisa, no entanto, simulam-se as condições de vento em duas direções principais (leste e sudeste) para um contexto urbano específico. Estas simulações fornecerão dados de pressão devido ao vento em pontos de interesse na fachada, notadamente três aberturas a barlavento (janelas da sala, quarto dos filhos e suíte do casal) e três aberturas a sotavento (janelas do banheiro do casal e duas janelas na área de serviço) nos pavimentos primeiro, décimo primeiro e vigésimo terceiro. No estágio seguinte, são simulados os fluxos nos ambientes internos com base no comportamento da pressão sobre tais aberturas, gerando dados de vazão de ar e o campo de velocidades nos ambientes internos avaliados, como resume a figura 1.

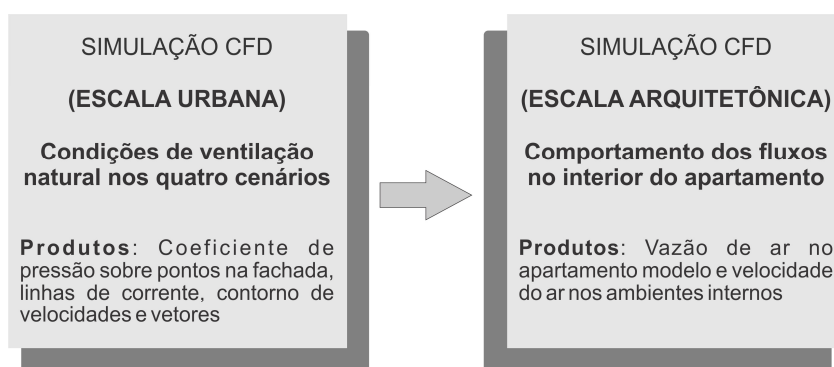


Figura 1 – Esquema da metodologia empregada e resultados obtidos em cada etapa

A abordagem utiliza a reconhecida qualidade dos códigos de dinâmica dos fluidos computadorizada (em inglês, 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.

Aplicação do método aqui empreendido é possível se ação do vento dominar o processo de ventilação natural, desprezando-se o efeito chaminé. Ademais, a separação das simulações de fluxos internos das análises de ventilação urbana somente é precisa se a área total de aberturas for inferior a 20% da área de fachada. Tal consideração decorre 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.

Um edifício modelo, representativo da produção imobiliária local, foi elaborado. Este, com vinte e quatro pavimentos, foi implantado ao centro de cada cenário estudado, em conjunto com outros três edifícios para compor a ocupação da quadra central, simulando o máximo aproveitamento permitido pela legislação. 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 quatro edifícios modelo. Escolheu-se, para a análise, o edifício à frente, voltado para o quadrante leste/sudeste, como destacado na figura 2. Tal configuração é recomendada devido à necessidade em analisar os efeitos aerodinâmicos a barlavento. Contudo, o arranjo urbano deve ser ajustado a cada situação em função dos efeitos a avaliar.

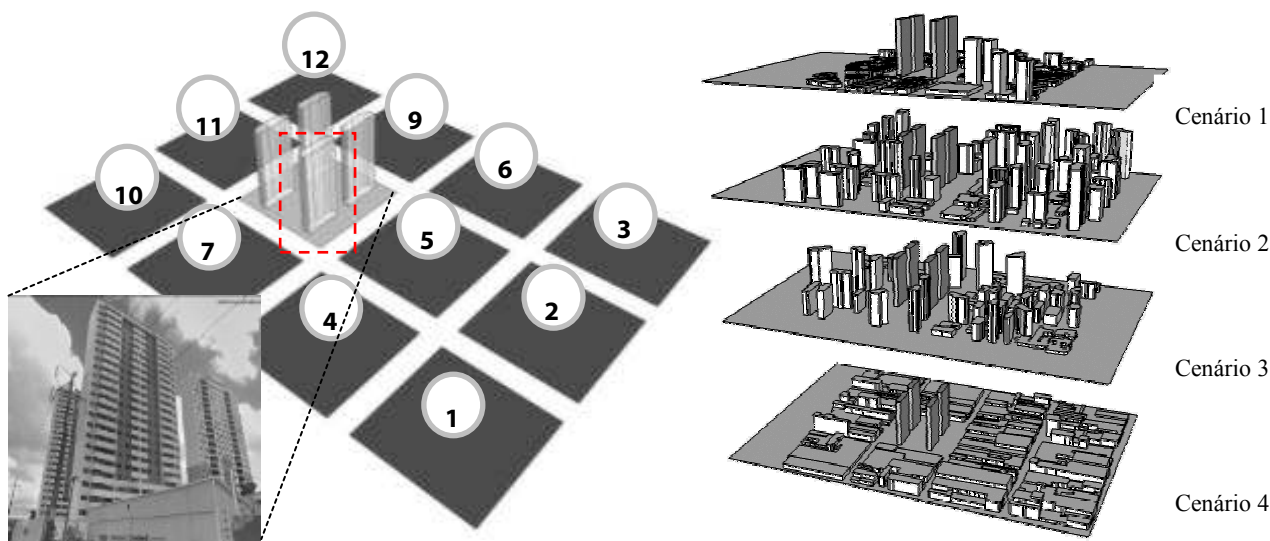


Figura 2 – Esquema de modelagem e os quatro diferentes cenários representativos do adensamento urbano utilizados

3.1. Desenvolvimento das simulações computacionais

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.

$$V = (V_0 \cdot k \cdot z^a) \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

V é a velocidade do ar (m/s);

V₀ é a velocidade medida na estação (m/s);

K e a são coeficientes de rugosidade para meio urbano, com valores de 0,35 e 0,25, respectivamente;

Z é a altura da abertura de interesse em relação ao solo (m)

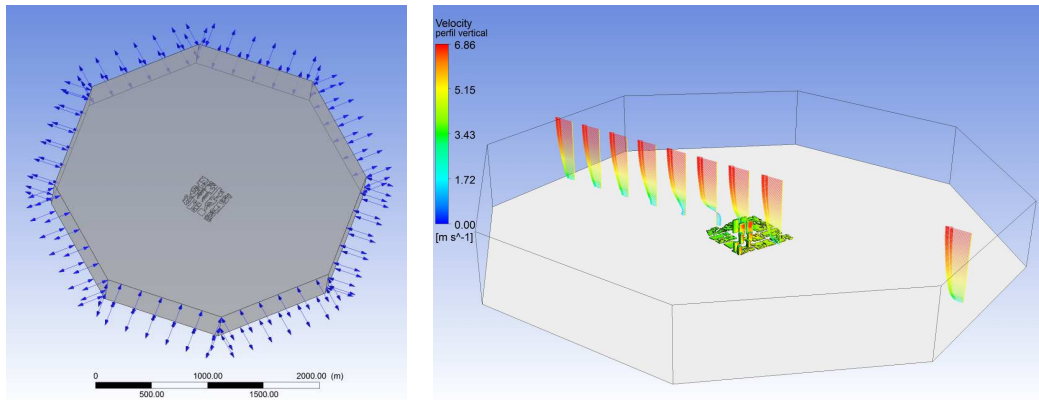


Figura 3 – Domínio para simulação da ventilação urbana e perfil de vento

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.

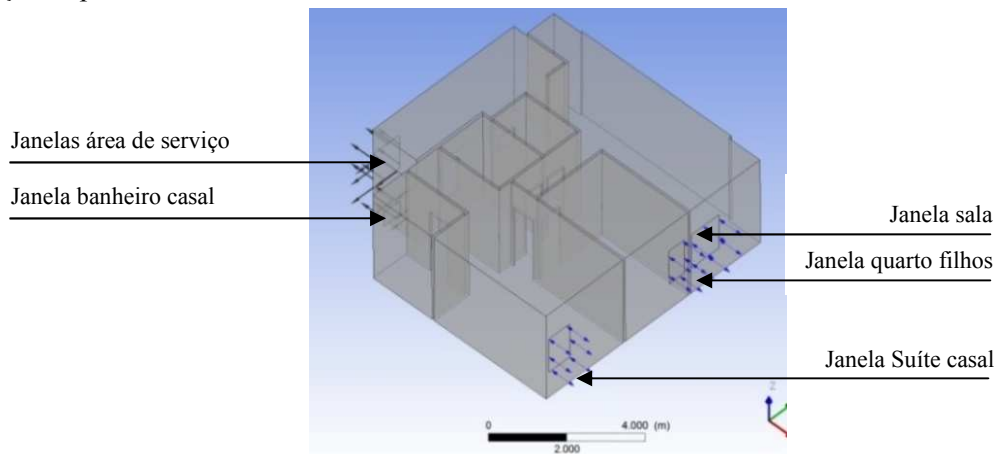


Figura 4 – Domínio para as análises de ventilação natural no apartamento

4. ANÁLISE DE 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 exemplificam as figuras 5 e 6.

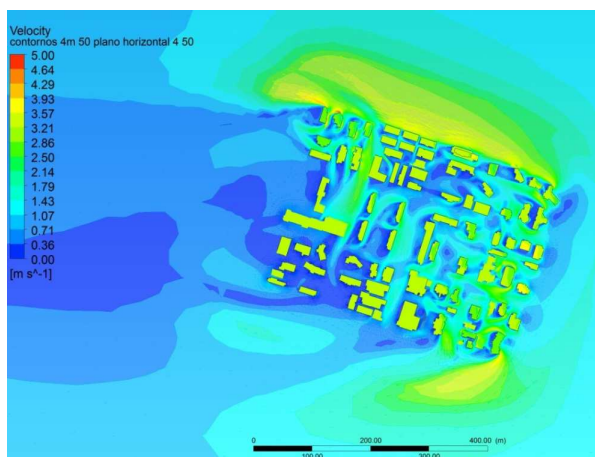


Figura 5 – Contornos de velocidade a 4,5 m do piso

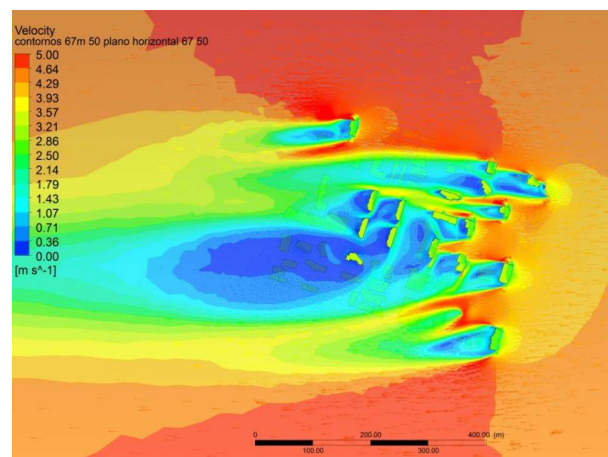


Figura 6 – Contornos de velocidade a 67,5 m de altura

Adicionalmente, linhas de corrente e contornos de pressão sobre as superfícies complementam as análises, como indicam as figuras 7 e 8.

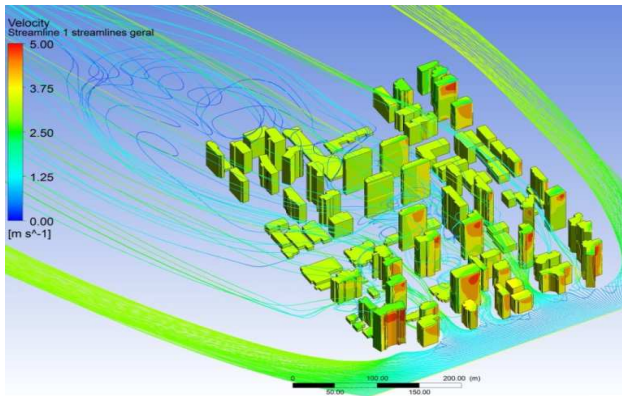


Figura 7 – Linhas de corrente sobre o cenário 3

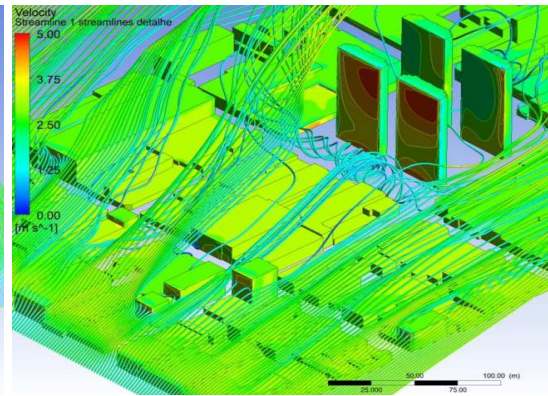


Figura 8 – Linhas de corrente sobre o cenário 4

Mais especificamente, no entanto, um dos parâmetros de maior influência no potencial de ventilação natural é a diferença de C_p entre as aberturas a barlavento e a sotavento (ΔC_p), realizada como a média ponderada pela área entre as aberturas a barlavento (suíte do casal, dormitório filhos e sala) e a sotavento (banheiro casal, duas janelas da área de serviço). A variável ΔC_p 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 9.

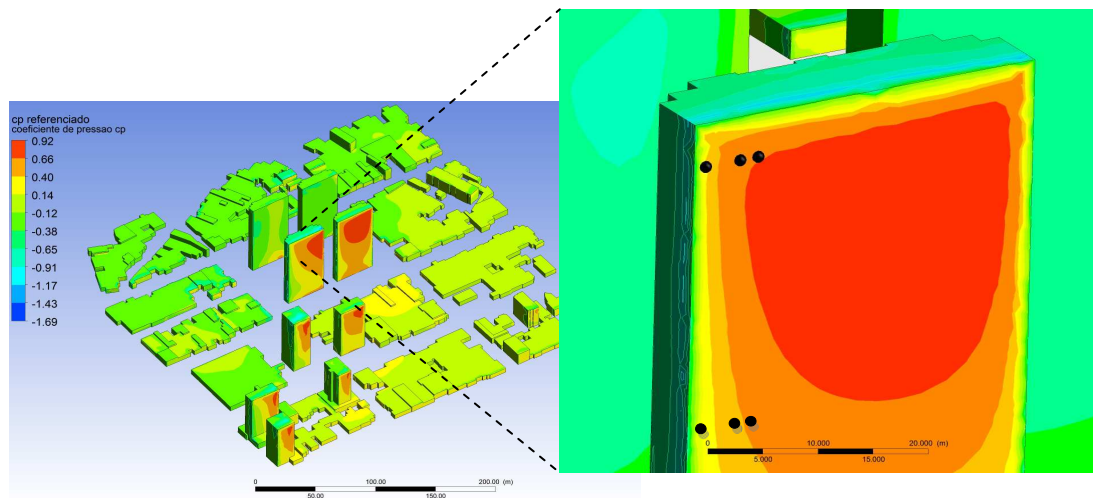


Figura 9 – Contornos de C_p sobre o cenário 1 e detalhe dos pontos de interesse na fachada

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 (figura 10).

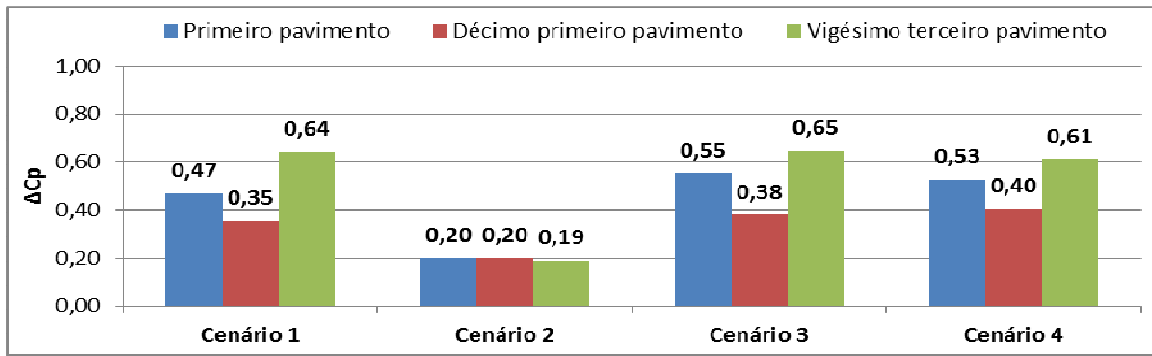


Figura 10 – ΔC_p entre as fachadas com vento leste

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 a figura 11. 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.

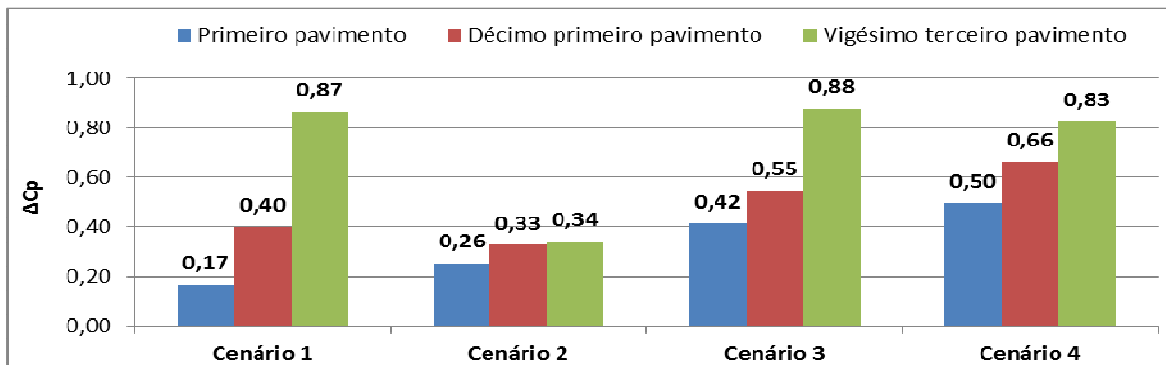


Figura 11 – ΔC_p entre as fachadas com vento sudeste

Verificou-se, ainda, o campo de velocidades do ar em qualquer ponto no interior do apartamento e a visualização do comportamento das correntes, como apresentado pelas figuras 12 e 13.

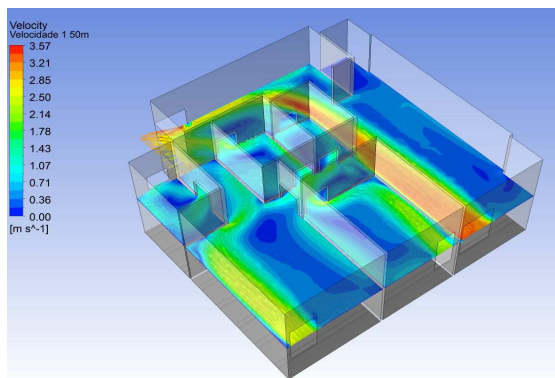


Figura 12 – Visualização dos contornos de velocidades no interior do apartamento modelo

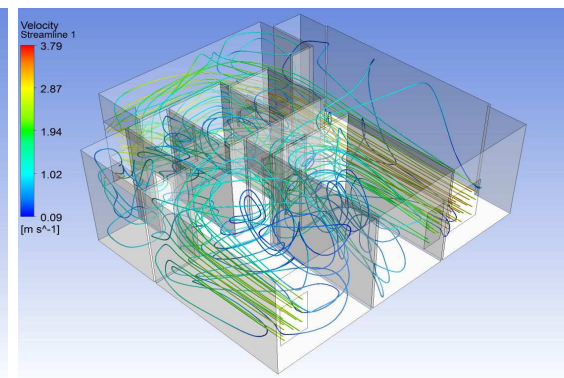


Figura 13 – Visualização das linhas de corrente no interior do apartamento modelo

Do ponto de vista quantitativo, um dos principais produtos almejados pela metodologia consistia na obtenção da vazão de ar que atravessa o apartamento. O programa permite o seu cálculo a partir do campo de pressões incidentes, que variou de acordo com a posição da abertura no edifício e que foi obtido na etapa análise do vento na escala urbana.

Como descreve a figura 14, 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.

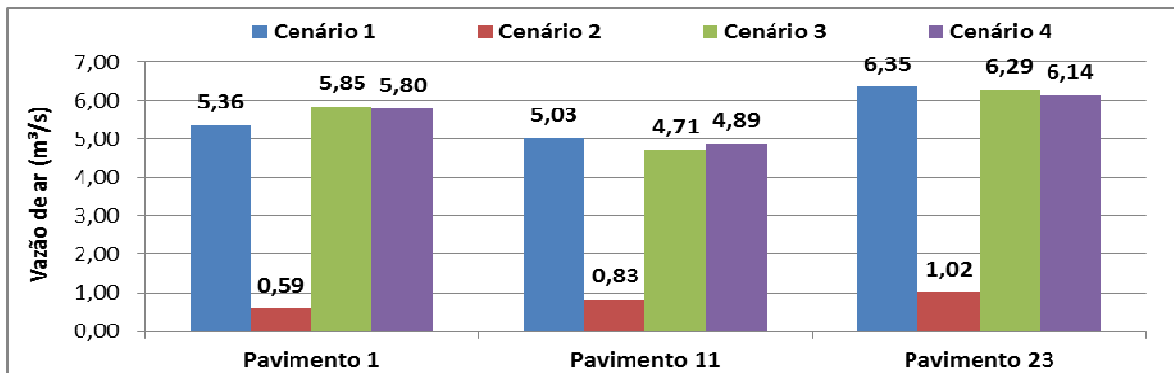


Figura 14 – Vazão de ar por pavimento em cada cenário com vento leste

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 (figura 15).

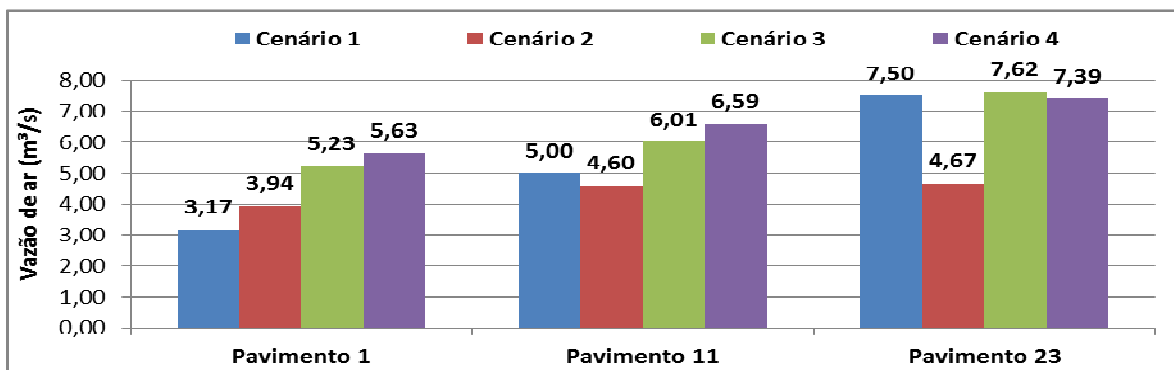


Figura 15 – Vazão de ar por pavimento em cada cenário com vento sudeste

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 na figura 16. Os valores baixos de R^2 nos dois casos corroboram tal premissa. Em resumo, a altura média das edificações em cada cenário, mais elevada no cenário 2 e mais baixa no cenário 4 não representou influência significativa para corresponder a uma redução da diferença de C_p no caso do segundo cenário ou mais eleva no caso do quarto conjunto urbano. O mesmo ocorre com a taxa de ocupação, que, a princípio, valores mais elevados poderiam significar valores de diferença de C_p mais baixos, o que não foi verificado.

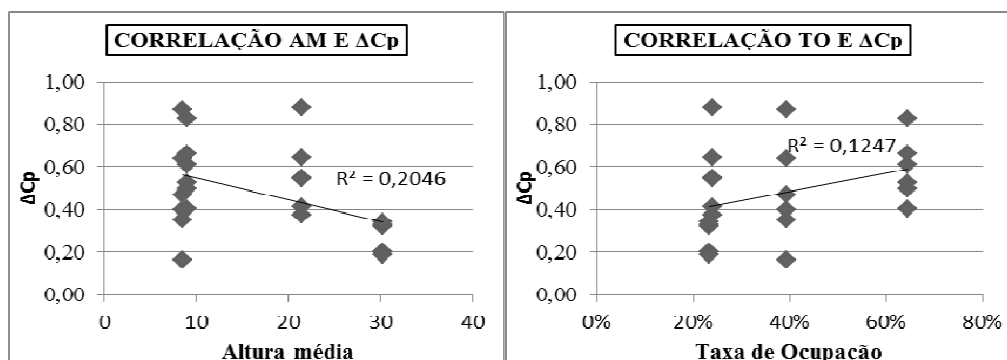


Figura 16 – Correlações entre Altura média e ΔC_p / Taxa de ocupação e ΔC_p

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.

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.

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.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

AGRADECIMENTOS

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