A INFLUÊNCIA DA MUDANÇA NOS PADRÕES DE OCUPAÇÃO DO SOLO SOBRE A VENTILAÇÃO NATURAL URBANA: ESTUDO DE CASO NA CIDADE DE FORTALEZA, CEARÁ

Renan Cid Varela Leite[(1)]; Anésia Barros Frota[(2)]
(1) Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, e-mail: renancid@bol.com.br
(2) Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, e-mail: arfrota@uol.com.br

Resumo
A pesquisa analisou a influência da mudança nos padrões de ocupação do solo sobre a ventilação natural em trecho urbano a sudeste de Fortaleza, Ceará. O vento é elemento chave à qualidade do ar e conforto térmico em localidades de clima quente e úmido. Entretanto, este elemento do clima urbano é estruturalmente modificado pela urbanização. A morfologia urbana é resultado de prescrições edilícias tais como gabarito, taxa de ocupação e recuos, modificando a permeabilidade do vento no espaço urbano. O estudo aborda o sudeste da capital cearense, que atravessa um processo de expansão urbana vinculado ao mercado imobiliário, intensificando a ocupação do solo através da verticalização e adensamento construtivo permitidos pela legislação urbana. Modelos virtuais de ocupação do solo representando a situação atual, ocupação máxima permitida pela legislação e uma proposta intermediária como crítica à permissividade prevista pela lei foram elaborados e simulados em ambiente de mecânica dos fluidos computadorizada. Planos horizontais ao nível do pedestre, 10 m do solo e metade do gabarito permitido foram utilizados para comparar a velocidade do ar em cada cenário. Ainda, 39 pontos de medição no interior de quadras e em pontos específicos reforçam o aumento da rugosidade (Z_0). Os resultados indicam o comprometimento da ventilação natural a sotavento do cenário de máxima ocupação devido à elevação no gradiente de vento. No nível local, a maioria dos pontos de comparação no modelo de máxima ocupação indicou maiores velocidades na altura das edificações em relação ao modelo intermediário, atestando a influência da diminuição na taxa de ocupação.

***Palavras-chave**: Ventilação natural, Morfologia urbana, Simulação computacional.*

Abstract
This research analyzed the influence of changing land occupation patterns over natural ventilation in a part of the southeast of Fortaleza, Ceará. Wind is a key element for air quality and thermal comfort in hot and humid climate regions. However, this urban climate element is structurally modified by urbanization. Urban form results from urban standards such as building height, occupancy rate and space between buildings, changing the wind permeability within the urban space. The study covers the southeast of the city which experiences an urban expansion process linked to housing market, intensifying land occupation as tall buildings are inserted. Virtual models representing the present situation, maximum occupancy allowed and an intermediate proposal as a criticism of the law permissiveness were reproduced and simulated using a fluid dynamics software. Horizontal planes at pedestrian height, 10 m above ground level and half of building´s height were used to compare wind speed in each scenario. Also 39 points of comparison in the center of blocks and at specific points indicated the increasing in roughness level (Z_0). Results pointed out that natural ventilation was prejudiced in downwind area of maximum occupancy scenario. At local level most of comparison points within the maximum occupancy model indicated higher speeds about building's height comparing to intermediate model as an influence of a lower occupancy rate.

***Keywords**: Natural ventilation, urban morphology, computational simulation.*

1. INTRODUÇÃO

O crescimento urbano desordenado é responsável pela alteração no comportamento dos parâmetros climáticos locais com consequências diretas sobre as condições de conforto térmico, mantendo estreita ligação com a atividade de planejamento urbano (CHANDLER, 1976; OKE, 1987; BITAN, 1992; KATZSCHNER, 1997; ASSIS, 2000; DUARTE, 2000).

Dentre os principais impactos negativos causados pela urbanização sobre o clima, as condições de ventilação natural são estruturalmente modificadas em meio urbano. A morfologia urbana é resultado das interações entre parâmetros construtivos tais como altura da edificação, afastamentos e taxa de ocupação do lote, alterando a permeabilidade do vento na malha urbana e seu comportamento próximo aos edifícios.

A ventilação natural para o conforto térmico é considerada uma das estratégias de condicionamento passivo mais eficientes do ponto de vista energético. A técnica, onde é possível a sua aplicação, proporciona a renovação do ar interior, contribuindo para a higiene e salubridade dos espaços internos, e reforça a sensação de resfriamento ao acelerar as trocas térmicas entre o indivíduo e o ambiente (FROTA; SCHIFFER, 2000; YARKE, 2005). Sobretudo em regiões de clima quente e úmido, em que há pouca variação da temperatura do ar ao longo do dia e elevados níveis de umidade relativa, é fundamental o controle da radiação solar e o incremento da ventilação natural no espaço urbano e interior das edificações.

No entanto, o aproveitamento do potencial dos ventos para resfriamento dos edifícios torna necessário compreender o fenômeno físico e os aspectos que influenciam o comportamento da ventilação natural (fatores variáveis e características dos elementos do entorno e das edificações). Para Shimomura et al (2010) a análise das condições de ventilação natural urbana através de modelos auxilia a elaboração de projetos arquitetônicos ou de planejamento, permitindo maior precisão na avaliação do desempenho da ventilação natural em ambientes internos e externos a partir de um melhor conhecimento das condições do entorno.

A simulação do comportamento do vento utilizando ferramentas de dinâmica dos fluidos computacional, mais conhecida pela sigla cfd, constitui uma valiosa ferramenta na análise da adequação climática de ambientes construídos. O método foi testado na avaliação das condições de ventilação natural urbana em diversos trabalhos, permitindo identificar a influência de diferentes formas de ocupação do solo sobre o escoamento do ar (COSTA, 2001; PRATA, 2005; LEITE, 2008; LEITE, 2010).

Considerando a ventilação natural como a principal estratégia passiva para condicionamento térmico de edificações situadas em Fortaleza (3º 43’ S), torna-se essencial incorpora-la ao processo de expansão urbana que ocorre no sudeste da capital cearense. A atuação do mercado imobiliário encontra respaldo na permissividade da atual legislação urbana para verticalizar a paisagem e promover o adensamento construtivo em um trecho específico inserido nessa região. A modificação nos padrões de ocupação do solo influencia diretamente o comportamento do vento, o que despertou o interesse em se avaliar os impactos do aumento do índice de aproveitamento, taxa de ocupação do solo e elevação na altura das edificações sobre as condições de ventilação natural nessa parte do tecido urbano.

1.1. Objetivo

O objetivo é identificar os impactos da verticalização e adensamento construtivo sobre a ventilação natural em trecho urbano de Fortaleza utilizando ferramenta cfd.

2. METODOLOGIA

A pesquisa partiu da análise dos padrões de vento sobre a cidade de Fortaleza. A organização da série de dados climáticos coletada pela Estação Meteorológica situada no aeroporto da cidade visa determinar a frequência e intensidade do vento a serem aplicados às simulações.

Em seguida, três diferentes cenários de ocupação do solo foram elaborados tomando como base o trecho urbano objeto de estudo: a situação atual, constituída pelos edifícios presentes na área; a máxima ocupação permitida pela legislação urbana vigente; e uma proposta de ocupação intermediária como uma crítica à permissividade promovida pelo parágrafo único do artigo 103 do Plano Diretor Participativo de Fortaleza (PDPFOR, 2009). O trecho da referida lei eleva a altura máxima de 48 m para 72 m e aumenta o coeficiente de aproveitamento de 1,5 para 2 nos terrenos contidos em um determinado polígono em meio à Zona de Ocupação Moderada 2 (ZOM2) e dentro do qual está inserida a área de estudo.

Os três cenários elaborados foram submetidos à ferramenta cfd para simular as condições de ventilação no entorno dos edifícios, evidenciando áreas de estagnação e aceleração dos fluxos de acordo com diferentes formas de ocupação do solo. Três planos horizontais foram inseridos em cada cenário para plotar os contornos e vetores de velocidade do ar. O primeiro plano horizontal (PH1) está ao nível do pedestre (1,5 m), o segundo plano (PH2) a 10 m do solo (altura da estação meteorológica do aeroporto), o terceiro plano (PH3) localiza-se na metade do gabarito de 72 m permitido às edificações (36 m). Ainda, 39 pontos de medição no interior de quadras e em pontos específicos foram utilizados para calcular o perfil vertical da velocidade do ar e reforçam o aumento da rugosidade (Z0).

Os resultados nos dois cenários foram comparados entre si e com situação atual, utilizada como referência para determinar a influência de cada padrão de ocupação do solo.

2.1. Análise dos dados de vento

A utilização adequada da ventilação natural como estratégia passiva para condicionamento de edifícios torna necessário avaliar frequência e intensidade do vento local. A existência de períodos de baixa velocidade, sobretudo durante o verão e durante o dia, impede a adoção desta estratégia (BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2005).

A análise dos dados de vento compreendeu o período entre 12 de fevereiro de 2002 a 30 de janeiro de 2009, totalizando 61.032 horas. Durante esse período, 47.178 registros foram considerados válidos (77% do total). As informações de velocidade e direção do vento foram estratificadas em oito direções. A rosa dos ventos confeccionada pelo programa WRPLOT View 6.5.1 aponta duas direções principais. A predominância de ventos na direção leste (40% do total) tem velocidade média calculada em 3,85 m/s e é acompanhada pela incidência sudeste (37% da frequência), de maior intensidade, com velocidade média de 4,51 m/s.

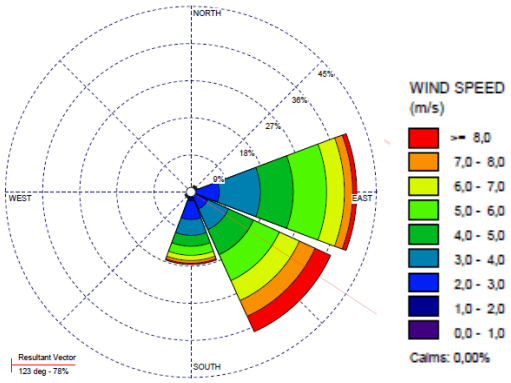

Figura 1 – Rosa dos ventos para a cidade de Fortaleza

2.2. A simulação computacional da ventilação natural

Modelos CFD baseiam-se em equações Navier-Stokes solucionadas em todos os pontos de uma malha em duas ou três dimensões. Esta malha pode representar as edificações e suas áreas adjacentes (KOLOKOTRONI; SANTAMOURIS, 2007).

Atualmente, diversos aplicativos cfd estão disponíveis. A opção pelo ANSYS CFX 5.6 deveu-se à disponibilidade de licença no Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética (LABAUT) durante o período em que foram realizadas as simulações. As experiências acumuladas na utilização deste aplicativo nos trabalhos de doutoramento de Prata (2006) e Brandão (2009), dissertações de mestrado de Cóstola (2006) e Leite (2008) também contribuíram para a escolha deste programa.

O ANSYS CFX 5.6 é um exemplo de cfd que permite simular qualquer situação envolvendo a mecânica dos fluidos em variadas escalas e condições de contorno, desde que exista a capacidade de processamento computacional (BRANDÃO, 2009).

O software compõe-se de algumas etapas. Inicialmente, desenvolve-se a geometria do domínio, dando origem ao modelo a ser adaptado no ICEM CFD para a parametrização e elaboração da malha. Em seguida, determina-se o regime da simulação, as equações a serem utilizadas para cálculo, condições iniciais e de contorno e o modelo de turbulência no CFX-Pre. A simulação é então calculada no CFX-Solver e os resultados são visualizados através de imagens tridimensionais e gráficos no CFX-Post.

2.3. Condições iniciais e de contorno

Para a realização das simulações optou-se por construir dois domínios retangulares orientados para leste e sudeste, direções mais frequentes determinadas pela análise do vento em Fortaleza. Os dois domínios possuem dimensões de 2681 m x 2104 m x 432 m.

A definição das condições de contorno é realizada determinando características às faces do modelo. Os planos a leste e sudeste foram classificados com entradas de vento no modelo, com velocidades iniciais de 3,85 e 4,51 m/s, respectivamente. As faces opostas a oeste e noroeste foram indicadas como saídas com pressão estática zero. As laterais e topo do modelo foram consideradas paredes livres de atrito. Ao piso e faces dos edifícios indicou-se a condição de não escorregamento visando avaliar o resultado do contato do ar em escoamento.

Adotou-se o ar como gás ideal, na temperatura de 25ºC e pressão de referência como a pressão atmosférica local. Por se tratar de uma simulação de vento em condições de estabilidade neutra, as variações de temperatura são desprezadas. Empregou-se o modelo de turbulência K-epsilon. Tal escolha reside no fato deste oferecer a melhor relação entre o tempo para processamento e a precisão nos resultados.

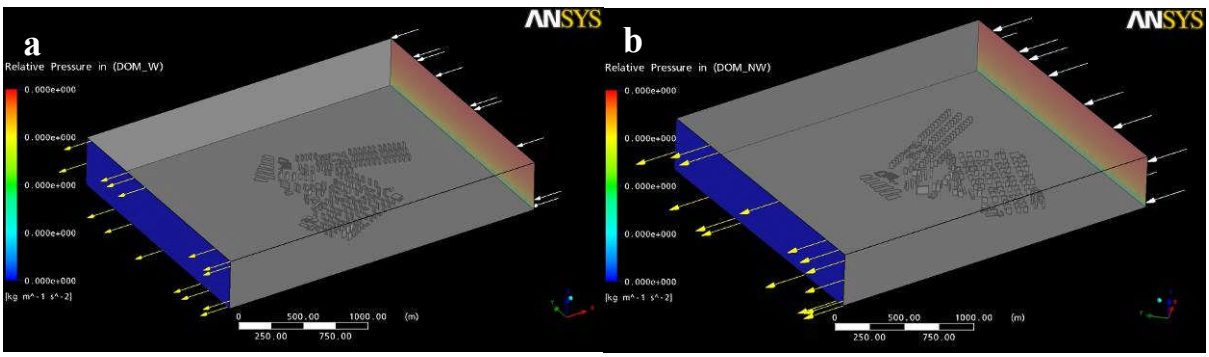

Figura 2 – Domínios confeccionados para simulações com vento a leste (a) e sudeste (b)

3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Ao todo foram realizadas seis simulações, sendo duas para cada um dos cenários de ocupação do solo a fim de visualizar os efeitos de vento a leste e sudeste. Todas as simulações atingiram valores de resíduos abaixo de 1 x 10^{-4}, finalizando após pouco mais de 3 horas e antes de atingir 200 interações (limite de cálculo determinado durante o módulo CFX-Pre).

Os contornos de velocidade plotados sobre cada um dos planos PH1, PH2 e PH3 permitem avaliar a formação de áreas de estagnação do ar e baixas velocidades (entre 0 e 0,2 m/s), destacadas em azul claro e azul escuro.

3.1. Vento a leste

Na situação atual com vento a leste, a visualização das linhas de contorno a 1,5 m do solo (PH1) permite inferir que, de maneira geral, as velocidades verificadas encontram-se no intervalo entre 1,1 e 2,2 m/s, determinadas pelas cores verde claro ate o laranja. São verificados efeitos de canto e, no início das vias cujo sentido coincide com o vento a leste, registra-se uma relativa aceleração dos fluxos (marcadas em laranja e vermelho) devido à canalização destes ao longo do eixo das ruas.

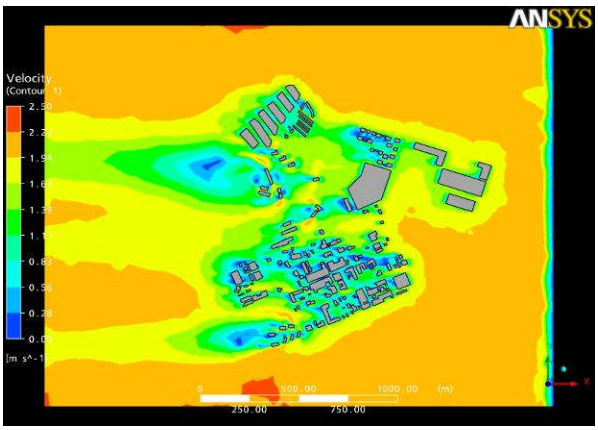

Figura 3 – Contornos de velocidade do ar para o PH1 no cenário de ocupação atual

No cenário de máxima ocupação, a figura 4a indica que no PH1 os vórtices a sotavento, marcados em azul escuro, estão mais afastados dos edifícios em uma área com dimensões aproximadas de 400 m. No modelo de ocupação intermediário, por sua vez, essas áreas estão mais próximas dos edifícios e apresentam menores dimensões, como mostra a figura 4b. No entanto, no modelo intermediário é possível verificar mais áreas de desaceleração entre as edificações (tons de azul escuro, azul claro e ciano), o que possivelmente se deve a uma maior taxa de ocupação devido à redução na altura dos edifícios.

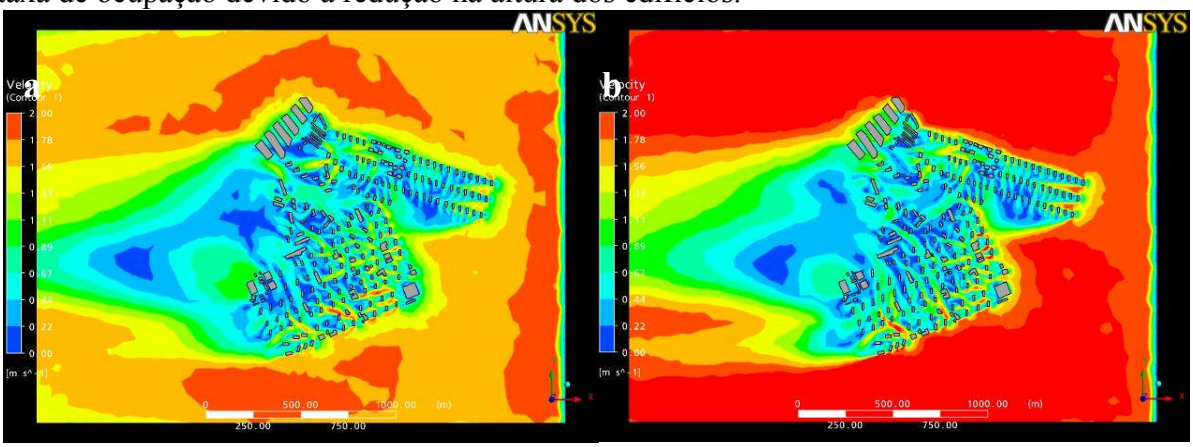

Figura 4 – Contornos de velocidade do ar no PH1 nos cenários de máxima ocupação (a) e intermediária (b)

A 10 m de altura (PH2), os fluxos gerados no modelo de máxima ocupação (figura 5a) reforçam o estabelecimento de duas grandes áreas de estagnação logo após os edifícios e numa área mais afastada destes. No modelo de ocupação intermediária (figura 5b) tais áreas são expressivamente menores. No entanto, os trechos com vórtices são mais evidentes no cenário intermediário, destacados em cor vermelha e velocidades acima de 1,8m/s. É possível notar que fluxos mais acelerados (em tons laranja e amarelo) adentram mais facilmente o modelo de máxima ocupação, o que não ocorre tão frequentemente no cenário intermediário.

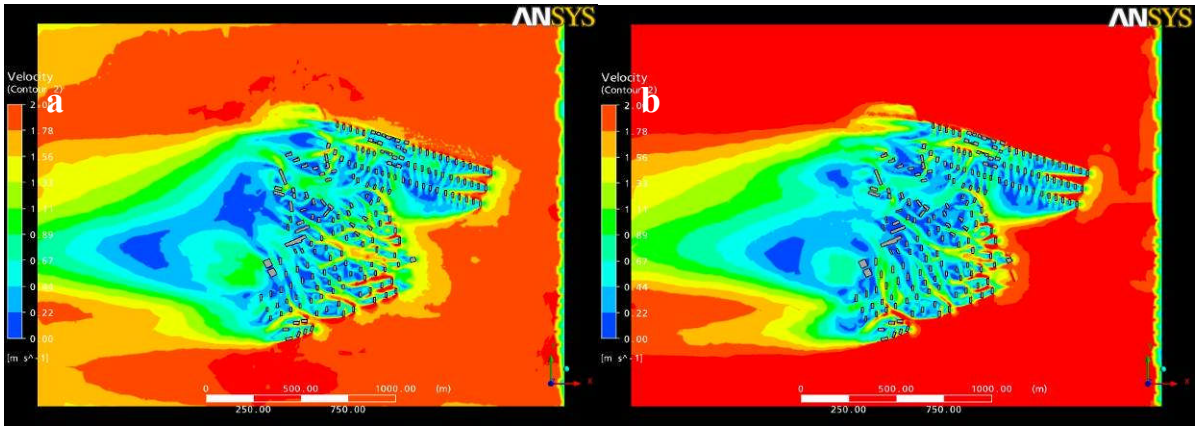

Figura 5 – Contornos de velocidade do ar no PH2 nos cenários de máxima ocupação (a) e intermediária (b)

Comparando o cenário de máxima ocupação permitida (figura 6a) ao modelo intermediário (figura 6b) a 36 m de altura (PH3), os efeitos são similares. No entanto, a diluição do vórtice após os edifícios em menores zonas de estagnação é evidente no modelo intermediário, onde são combinados tons de azul com verde claro, indicando velocidades acima dos 0,5 m/s.

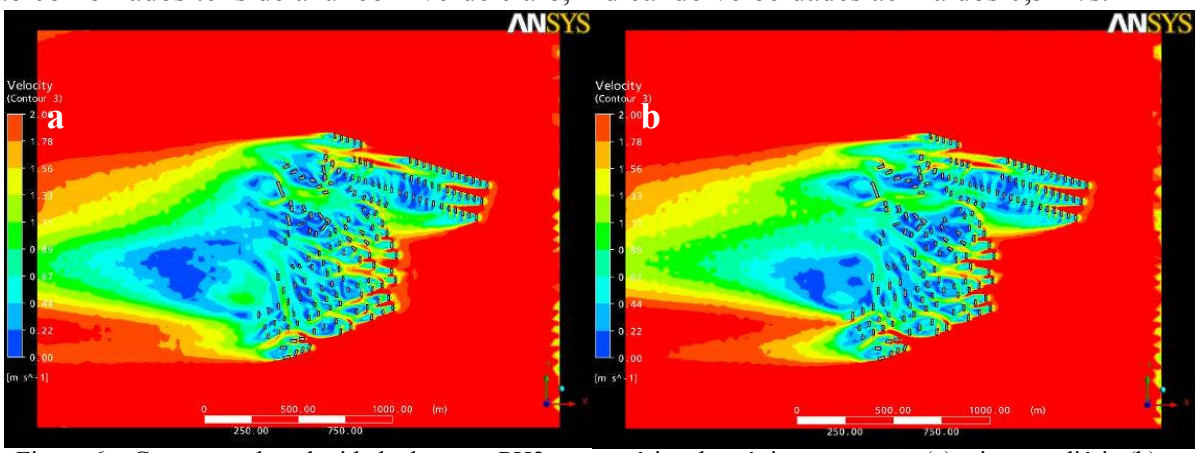

Figura 6 – Contornos de velocidade do ar no PH3 nos cenários de máxima ocupação (a) e intermediária (b)

Como é possível perceber, os edifícios ao centro dos modelos atuam como barreiras ao vento leste, que, ao incidir perpendicularmente, gera vórtices de grandes dimensões e um fluxo turbulento a sotavento. Ainda, o aumento na velocidade em níveis mais elevados do modelo de máxima ocupação altera significativamente a circulação do ar nas fachadas situadas após os edifícios mais altos devido à elevação no gradiente de vento neste trecho urbano.

3.2. Vento a sudeste

De maneira geral, nas simulações com vento a sudeste, o efeito mais significante causado pelos edifícios é a canalização dos fluxos ao longo das vias e nos espaços entre os edifícios. Entretanto, apesar dos efeitos de canalização, um vórtice alongado, mas de grandes proporções é verificado tanto no modelo de máxima ocupação como no cenário intermediário.

A influência da maior taxa de ocupação do solo do modelo intermediário (figura 7b) pode ser melhor visualizada nas simulações com vento a sudeste devido a presença de mais áreas de estagnação do ar junto aos edifícios desse modelo em comparação à máxima ocupação permitida (figura 7a), como pode-se verificar a 1,5 m de altura (PH1) em tons de azul escuro.

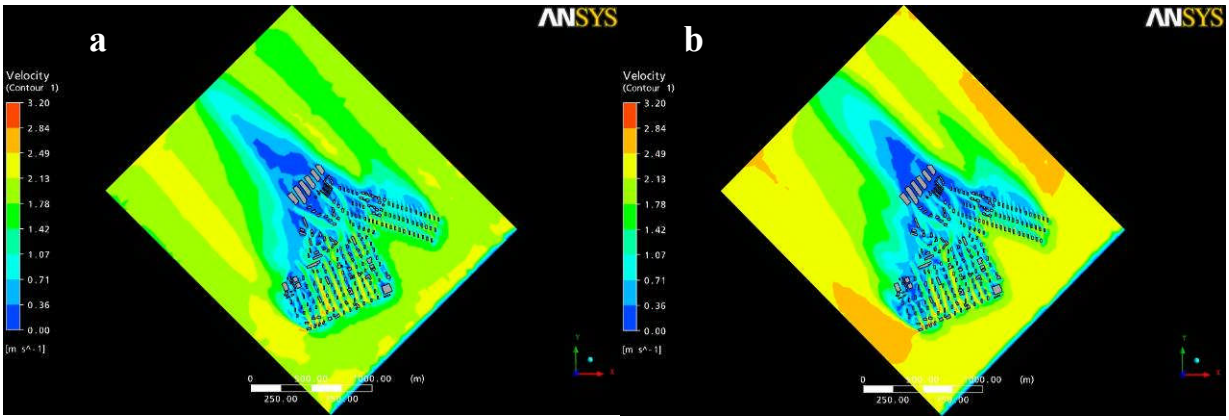

Figura 7– Contornos de velocidade do ar no PH1 nos cenários de máxima ocupação (a) e intermediária (b)

Com uma ocupação do solo mais espaçada definida pela máxima ocupação permitida à área (figura 8a) de estudo, o vórtice principal é dividido no PH2. Nesta forma de ocupação do solo, com edifícios mais altos, porém mais afastados entre si, o efeito negativo sobre o vento na região posterior dos edifícios parece ser minimizado. No cenário intermediário (figura 8b), por sua vez, apesar da presença de edifícios mais baixos, a área de vórtices surge mais concentrada, representando uma significativa desaceleração do ar na região a sotavento.

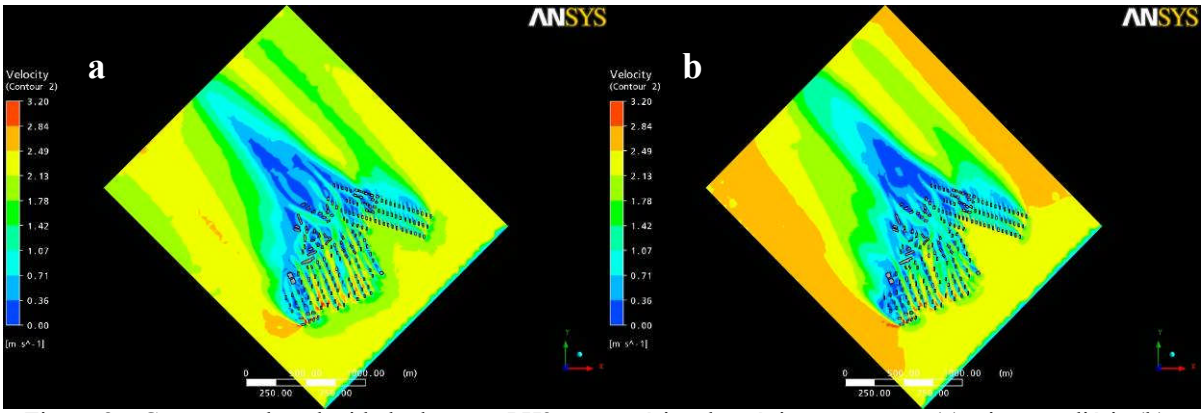

Figura 8 – Contornos de velocidade do ar no PH2 nos cenários de máxima ocupação (a) e intermediária (b)

Finalmente, analisando o fluxo a 36 m de altura (PH3) os trechos de ventilação mais comprometidos, representados pelas cores azul escuro e azul mais claro, aparecem mais alongados para o caso do cenário de máxima ocupação (figura 9a), estendendo-se em direção noroeste, ao passo que surgem mais concentrados no modelo intermediário (figura 9b) devido a maior dimensão de obstrução ocasionada pelo aumento na taxa de ocupação do solo.

Ainda, no interior do cenário intermediário, alguns trechos com velocidades abaixo de 1.0 m/s são verificados. A geração de pequenos vórtices junto aos edifícios neste modelo deve-se, também, ao aumento na taxa de ocupação. No modelo de máxima ocupação, áreas com velocidade do ar abaixo de 0.6 m/s (tons de azul e ciano) estão localizadas longe dos edifícios. Ainda, é possível verificar que o grande vórtice surge mais estreito do que no cenário de ocupação intermediária, aspecto que se deve à menor obstrução causada pelos edifícios mais altos e menos largos.

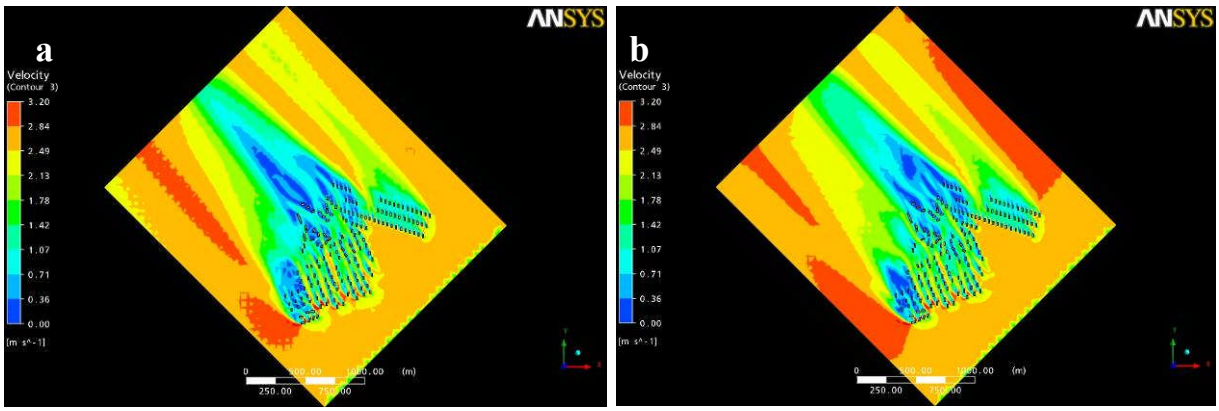

Figura 9 – Contornos de velocidade do ar no PH3 nos cenários de máxima ocupação (a) e intermediária (b)

3.3. Pontos de comparação para registro do perfil vertical de vento

Pontos de medição dos perfis verticais de vento foram inseridos no interior de quadras e em algumas vias para calcular a alteração na rugosidade à medida que os fluxos adentravam cada um dos três cenários de ocupação do solo tanto com vento a leste como sudeste.

Comparados à situação atual, os pontos 1 a 5 dos cenários de máxima ocupação e intermediária e vento a leste apresentam reduções na velocidade do ar entre 30 e 70% até 10 m de altura. Em regiões a sotavento e interior de quadras (P7 a P10) da ocupação intermediária as reduções foram maior comparadas à situação atual: entre 65% a 95%.

Com vento sudeste, ressaltam-se os pontos 32, 33 e 34, situados no interior de quadras adensadas, onde a diminuição na velocidade do ar até os 50 m de altura (próximo da altura máxima permitida) é entre 50% e 70% menor. Em contrapartida, nos pontos 35 a 39, localizados na região a sotavento desse modelo de ocupação, as velocidades reduzem apenas reduções entre 5% e 15% em comparação à situação atual enquanto que no cenário de máxima ocupação o perfil vertical de velocidades passa a ter reduções entre 18% e 35%.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O modelo de ocupação máxima registrou valores de velocidade do ar mais baixos na região imediatamente posterior aos edifícios em comparação ao modelo intermediário. Os pontos de comparação inseridos na região a sotavento da máxima ocupação apresentam valores de velocidade do ar entre 30% a 90% mais baixos do que a situação atual.

Em contrapartida, os resultados das simulações reforçam que a elevação em altura associada a uma menor taxa de ocupação do solo pode resultar em melhores condições de circulação do ar no nível local, uma vez que esta forma urbana torna-se mais permeável ao vento incidente. Entretanto, alguns aspectos devem ser evidenciados, dentre eles a elevação na camada limite urbana e a consequente redução da velocidade na região posterior dos obstáculos.

Salienta-se, finalmente, que o estudo de condições de ventilação natural deve considerar as especificidades de cada localidade, sua legislação e condições climáticas, uma vez que o comportamento e regime do vento é facilmente alterado pelos parâmetros construtivos.

Esta pesquisa pretende auxiliar o planejamento e desenho urbano de áreas em processo de adensamento construtivo indicando que, apesar da elevação em altura, uma maior taxa de ocupação do solo associada a um gabarito mais baixo para as edificações pode gerar zonas de estagnação do ar no âmbito local, sendo necessário reavaliar tais impactos.

REFERÊNCIAS

ASSIS, E. S. **Impactos da forma Urbana na Mudança Climática: Método para a previsão do Comportamento Térmico e melhoria de Desempenho no Ambiente Urbano**. (Tese). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

BITAN, A. **The high climatic quality city of the future**. Atmospheric Environment, n. 26B, 1992.

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

BRANDÃO, R. S. **As Interações espaciais urbanas e o clima**. (Tese). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

CHANDLER, T. J. **Urban Climatology and its Relevance to Urban Design**. Geneva, WMO. Technical Note 149, 1976.

COSTA, F. J. M. **Ventilação e prescrições urbanísticas – Uma aplicação simulada no bairro de Petrópolis em Natal/RN**. (Dissertação) Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e urbanismo da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2001.

CÓSTOLA, D. **Ventilação por ação do vento no edifício: procedimentos para quantificação**. (Mestrado). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

DUARTE, D. H. S. **Padrões de ocupação do solo e microclimas urbanos na região de clima tropical continental**. (Tese) Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

PREFEITURA MUNICIPAL DE FORTALEZA. **Plano diretor participativo de Fortaleza – PDPFor**. Prefeitura Municipal de Fortaleza, 2009.

FROTA, A. B. & SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto térmico**. Editora Nobel, 4 ed., São Paulo, 2000.

KATZSCHNER, L. **Urban climate studies as tools for urban planning and architecture**. Anais do IV Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído. Salvador, 1997.

KOLOKOTRONI, M; SANTAMOURIS, M. 2007. Ventilation for cooling. In: Advances in passive cooling. SANTAMOURIS, M. (org.) Buildings, Energy, Solar Techonolgy, London, UK, 2007.

LEITE, C. G. **Alterações da ventilação urbana frente ao processo de verticalização de avenidas litorâneas: o caso da avenida litorânea de São Luís/MA**. (Dissertação). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

LEITE, R. C. V. **Fortaleza, terra do vento: a influência da mudança nos padrões de ocupação do solo sobre o regime de ventos em cidade de clima tropical úmido**. (Dissertação). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

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

PRATA, A. R. **Impacto da altura de edifícios nas condições de ventilação natural do meio urbano**. (Tese). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

PRATA-SHIMOMURA, A. R.; FROTA, A. B.; CELANI, G. **Modelos físicos na análise de ventilação urbana: o uso do túnel de vento.** FÓRUM - Clima Urbano e Planejamento das Cidades; vol. 3, n. 2, 2009.

YARKE, E. **Ventilación natural de edificios**. Buenos Aires: Nobuko, 2005.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo suporte financeiro à investigação.