



XV ENCAC Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído

XI ELACAC Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído

JOÃO PESSOA | 18 a 21 de setembro de 2019

A INFLUÊNCIA DA DENSIFICAÇÃO URBANA SOBRE O CONFORTO TÉRMICO NO INTERIOR DE APARTAMENTOS RESIDENCIAIS

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

- (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
- (3) Mestrando, Arquiteto e Urbanista, bmnsamuel@gmail.com, Universidade Presbiteriana Mackenzie

RESUMO

O conforto térmico em edificações é fortemente influenciado pela legislação urbana. As prescrições edilícias são responsáveis diretas pelas formas resultantes do tecido urbano, alterando a permeabilidade ao vento e as parcelas de radiação solar que incidem sobre as superfícies de edificações. Tais aspectos têm impactos sobre o desempenho termoenergético de edifícios, questionando-se a ação combinada desses dois parâmetros. Nesta pesquisa, buscou-se comprovar a hipótese de que há compatibilidade entre níveis mais elevados de densidade urbana e o conforto térmico em edifícios residenciais naturalmente ventilados em 80% do ano. Avaliou-se a ventilação urbana segundo duas direções predominantes e testada em quatro níveis de adensamento construtivo utilizando ferramenta CFD. Estes dados foram aplicados às análises dos fluxos em apartamentos de um edifício modelo em diferentes alturas. O modelo adaptativo da ASHRAE (2004) foi aplicado para verificar o total de horas dentro da zona de conforto nas simulações computacionais. Em alguns dos casos, cenários urbanos mais verticalizados apresentaram maiores quantidades de horas em conforto mesmo com taxas de renovação do ar até 40% mais baixas que cenários menos adensados. Contribuindo, portanto, com a discussão sobre o impacto do adensamento urbano e seus impactos ambientais, bem como concluindo que na condição quente e úmida analisada, assegura-se a premissa de que, desde que mantidas condições de ventilação natural para resfriamento dos ocupantes, é possível compatibilizar maiores níveis de densidade e condições ambientais satisfatórias em edifícios residenciais durante a maior parte do tempo.

Palavras-chave: densidade construída, conforto térmico, ventilação natural.

ABSTRACT

Thermal comfort in buildings is strongly influenced by urban legislation. The building prescriptions are directly responsible for the resulting forms of the urban fabric, altering the permeability to the wind and the parcels of solar radiation that affect the surfaces of buildings. These aspects have impacts on the thermal energy performance of buildings, questioning the combined action of these two parameters. In this research, we tried to prove the hypothesis that there is compatibility between higher levels of urban density and thermal comfort in naturally ventilated residential buildings in 80% of the year. It was evaluated the urban ventilation according to two predominant directions and tested in four levels of constructive densification using CFD tool. These data were applied to the analysis of flows in apartments of a model building at different heights. The adaptive model of ASHRAE (2004) was applied to verify the total hours within the comfort zone in the computational simulations. In some cases, more upright urban scenarios presented greater amounts of hours in comfort even with air renewal rates up to 40% lower than less densified scenarios. Thus, contributing to the discussion on the impact of urban densification and its environmental impacts, as well as concluding that in the hot and humid conditions analysed, the assumption is made that, provided that natural ventilation conditions are maintained for occupant cooling, higher levels of density and satisfactory environmental conditions in residential buildings for most of the time.

Keywords: built density, thermal comfort, natural ventilation.

1. INTRODUÇÃO

Em todo o mundo, o crescimento urbano constitui desafio na agenda de governos. As crescentes taxas de urbanização associadas à carência de planejamento urbano amplo, incluyente e eficaz trazem consigo uma série de problemas, com reconhecidos reflexos na qualidade ambiental dos principais assentamentos humanos do planeta. Sob outro ponto de vista, no entanto, a urbanização pode ser um meio para alcançar a desejada sustentabilidade. Ao criar espaços de interação social e efervescência cultural, aliviam-se, também, as pressões do crescimento populacional sobre remanescentes rurais. Uma população mais concentrada significa melhor prestação de serviços ao aproveitar a infraestrutura instalada, reduzindo investimentos, deslocamentos e o consumo energético (UNFPA, 2011).

É válido ressaltar que a relação entre densidade construída e o conforto térmico em edifícios é um complexo equilíbrio entre parâmetros climáticos locais, organização espacial urbana e características arquitetônicas. Mesmo considerando as reconhecidas vantagens da maior concentração urbana, é preciso atentar para o fato de que o adensamento vertical é determinante para a qualidade ambiental de edifícios. Em grandes centros urbanos, a temperatura tende a ser mais elevada em função da alteração no balanço radiativo e o comportamento dos fluxos de ar é significativamente alterado.

Por outro lado, ao reduzir parcelas visíveis de céu e sol devido à presença de obstáculos no entorno imediato, diminui-se, também, a radiação solar incidente e absorvida por suas superfícies do edifício. Os impactos dessa obstrução variam de acordo com a latitude e as necessidades de condicionamento local.

Em clima quente, a diminuição da quantidade de radiação solar absorvida pelas superfícies da edificação pode ser válida para a melhoria das condições ambientais internas. Gupta (1987) investigou a relação entre a forma urbana mais protegida em comparação à ocupação mais aberta em clima quente e seco, enfatizando os benefícios da primeira. Lam (2000) avaliou a possibilidade efetiva de reduzir a demanda por resfriamento em edifícios comerciais em condições mais adensadas com o uso de simulações computacionais. Mais tarde, Li & Wong (2007) realizaram estudos semelhantes e verificaram que o aumento nos ângulos de obstrução do céu é acompanhado pela redução na carga térmica interna nestas edificações.

A complexa morfologia verificada nos centros urbanos torna imprevisível o comportamento do vento, impedindo a determinação de quais formas comprometerão ou mesmo incrementarão o movimento do ar (FARIAS; RAVIOLO; CAVALCANTE, 2017). Edifícios mais altos situados em determinados contextos desviam fluxos e elevam a turbulência, podendo gerar zonas de recirculação do ar e criar condições mais favoráveis à ventilação natural se comparadas a trechos nos quais os edifícios possuem a mesma altura, podendo atingir o nível de pedestre e as aberturas de edifícios mais baixos (GOLANY, 1996; GIVONI, 1998; DUARTE; SERRA, 2003; GONÇALVES, 2003; BRANDÃO, 2010; LEITE, 2015; COSTA FILHO, 2017). O planejamento criterioso da verticalização da paisagem urbana pode determinar, inclusive, maiores velocidades aos fluxos, imprimir maior intensidade ao campo de pressões devido ao vento sobre as fachadas, aumentando as taxas de renovação do ar e contribuindo para a qualidade do ar em edifícios (ALLARD; GHIAUS; SZUCS, 2010).

A opção por uma cidade de clima tropical quente e úmido deve-se ao fato de que, nessas localidades, as principais estratégias passivas para obter conforto térmico consistem na ventilação natural associada à proteção solar (FROTA; SCHIFFER, 2003). Ademais, no processo de adensamento por verticalização pelo qual atravessam a maioria das cidades litorâneas nordestinas, entre as quais se inclui Fortaleza, escolhida para basear o estudo, é possível identificar, em uma série de formas urbanas, situações que retratam as condições de obstrução de parte do percurso solar e ao fluxo de ar que são determinantes para o desempenho térmico de edificações.

A tipologia escolhida, o edifício residencial multifamiliar vertical constitui elemento cada vez mais incorporado à paisagem urbana. Nestes, a carga térmica interna devido à ocupação, iluminação e equipamentos é comumente mais baixa se comparada a outros tipos de edificações, o que contribui para a maior possibilidade de adoção de diretrizes passivas para o condicionamento térmico.

2. OBJETIVO

A partir de metodologia empreendida são avaliados os efeitos combinados da obstrução ao sol e aos ventos que invariavelmente resultam do processo de adensamento urbano sobre a qualidade ambiental de edifícios residenciais.

3. MÉTODO

Na presente pesquisa a metodologia em si representa um dos principais produtos da investigação. O método teve papel fundamental ao tornar possível analisar duas das principais variáveis que influenciam o conforto

térmico de edifícios naturalmente ventilados na condição tropical quente e úmida: a radiação solar e a ventilação natural. Valeu-se de simulações computacionais em diferentes escalas de abordagem, em etapas sucessivas e que se complementam a partir de dados obtidos em fases anteriores, refinando as análises e fornecendo condições de contorno mais precisas para o estágio seguinte.

As análises favoreceram-se de uma abordagem em escalas mais adequadas, tornando-as mais precisas. Verificou-se o campo de vento gerado a partir de arranjos urbanos específicos que contornam um edifício modelo elaborado com base na produção imobiliária recente na capital cearense. Posteriormente e com base nos fluxos na escala urbana, verificaram-se os seus reflexos no comportamento dos fluxos em ambientes internos. Paralelamente, para atender o objetivo traçado, analisaram-se os impactos de diferentes formas urbanas sobre as parcelas da radiação solar que atingem as superfícies do edifício e seus impactos no desempenho térmico dos ambientes de permanência prolongada escolhidos. Diferentemente de outras pesquisas, a abordagem utiliza diferentes ferramentas de simulação computacional de acordo com o potencial específico de cada uma, em etapas sequenciais e que se complementam a partir dos dados obtidos na fase anterior, fornecendo condições de contorno mais definidas e precisas para o estágio seguinte.

Nesse sentido, a reconhecida qualidade dos modelos CFD foi empregada para analisar o comportamento dos parâmetros ambientais envolvidos no processo de ventilação natural. Simulou-se o campo de vento em quatro diferentes cenários urbanos presentes no tecido urbano de Fortaleza e escolhidos devido à sua representatividade quanto à morfologia urbana (figura 1). A representatividade de cada cenário espelha-se na metodologia empreendida por Martins; Adolphe; Bastos (2014).

Os cenários, contendo doze quadras, foram modelados num arranjo 3 x 4 (3 quadras de largura e 4 na profundidade) e submetidos às duas direções de vento leste e sudeste, predominantes em Fortaleza durante 80% do ano, aproximadamente. No total, oito análises CFD nesta escala foram realizadas.

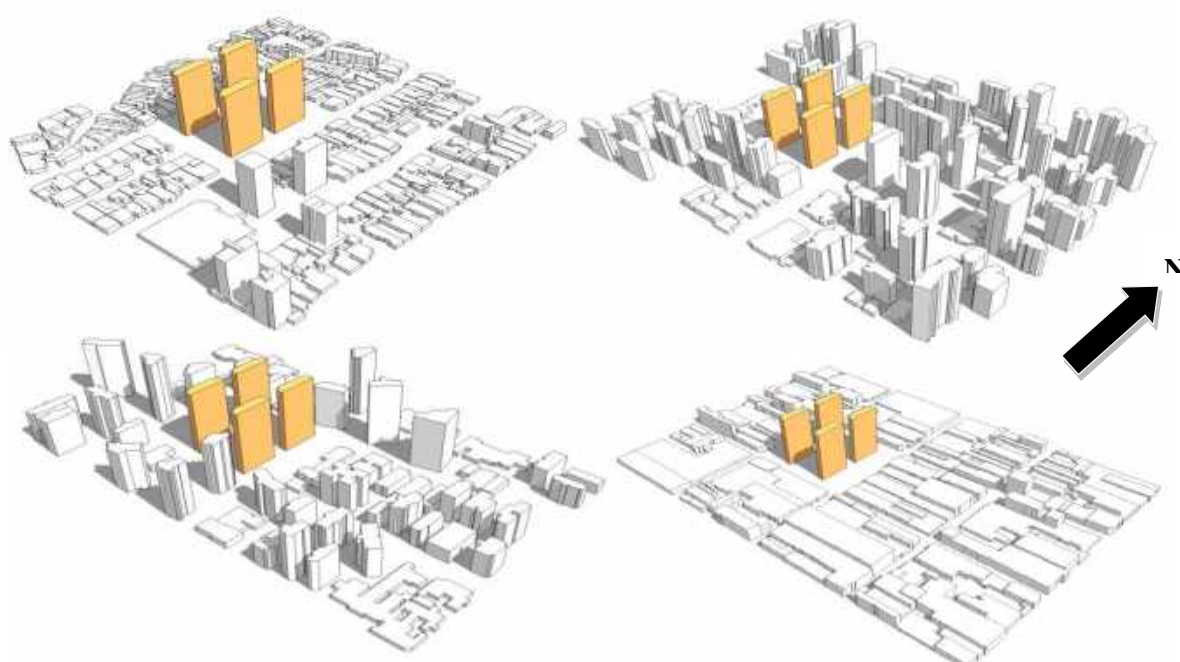


Figura 1 – Quatro cenários representativos da densidade urbana escolhidos.

Como principal resultado das oito simulações de ventilação na escala urbana, o campo de pressões sobre as aberturas do edifício modelo formulado foi determinado, colhendo-se os valores específicos sobre as janelas em três pavimentos diferentes, o primeiro, décimo primeiro (intermediário) e vigésimo terceiro (abaixo da cobertura). Tais dados geraram vinte e quatro simulações dos fluxos internos, com diferentes vazões de ar cada e a indicação do campo de pressões em cada um dos ambientes escolhidos. Para a definição de um domínio para a simulação fluidodinâmica, utilizou-se o método de Cost (2004) considera 5 vezes a maior altura de uma edificação no modelo de estudo como a distância a barlamento, lateral e superior e 15 vezes a sotavento. Gerando assim, portanto um modelo com uma malha tetraédrica com uma camada de prismas nos prédios e na parte inferior do domínio para melhor apreender o desprendimento da camada limite.

Finalmente, os dados de vazão de ar obtidos em cada simulação da ventilação interna alimentaram as simulações anuais de desempenho térmico dos ambientes sala, suíte casal e dormitório.

Nas análises de desempenho térmico utilizou-se o programa DesingBuilder 3.2.0, interface gráfica do EnergyPlus. Adotou-se o arquivo climático TMY e todos os elementos do entorno foram modelados como elementos adiabáticos, servindo apenas para obstruir em maior ou menor nível a radiação solar, como demonstra a figura 2.

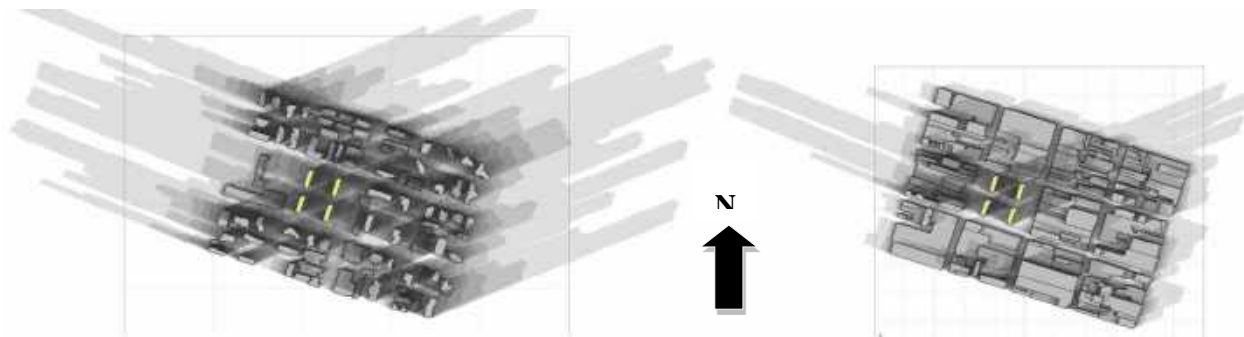


Figura 2 – Diferença de obstrução solar provocada pelos cenários 2 (esq.) e 4 (dir.) escolhidos.

A envoltória da unidade habitacional estudada é em alvenaria convencional (15 cm) revestida por peças cerâmicas ($U = 2,356 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$) e as janelas de correr com vidro simples ($FS = 0,86$). O padrão de cargas internas considerou a rotina de ocupação de uma família de quatro membros em atividade sedentária, com carga térmica de 6 W/m^2 devido à iluminação artificial e equipamentos. A ventilação natural permaneceu ativa durante todo o ano.

Os dados de temperatura operativa na suíte, no dormitório e na sala foram comparados ao índice adaptativo da ASHRAE (2004) (figura 3). Os resultados são analisados em termos da quantidade de horas dentro dos limites da zona de conforto, adotando-se o intervalo de 2,5 graus a mais e a menos para retratar o rigor da condição de umidade relativa elevada.

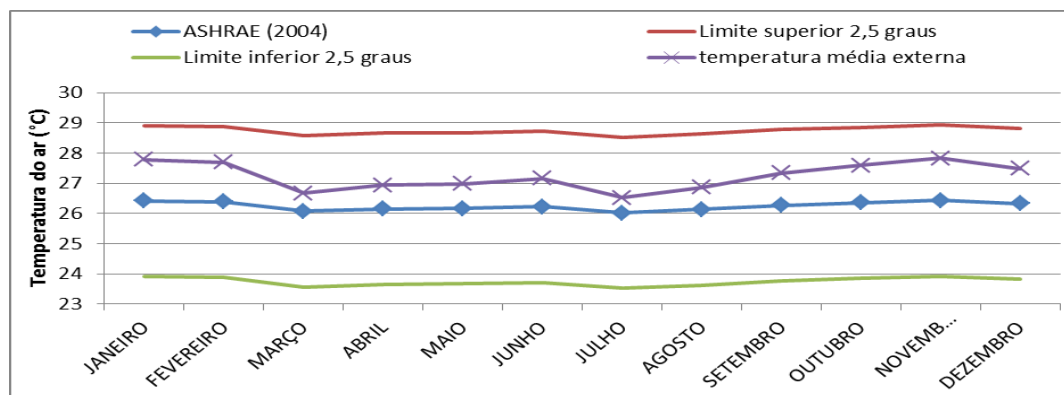


Figura 3 – Limites da zona de conforto estabelecida para Fortaleza segundo o modelo adaptativo da ASHRAE (2004)

A velocidade do ar no interior dos ambientes foi incorporada à análise dos resultados, calculada como a média entre três pontos alinhados na largura do ambiente, a 1,5 m do solo, como demonstra a figura 4, evitando que correntes concentradas em partes do ambiente segundo a direção do vento no exterior apontassem valores muito elevados ou muito baixos. O potencial para resfriamento fisiológico dos ocupantes, capaz de estender os limites aceitáveis de operativa, foi reconhecido em adendo à norma ASHRAE 55, que definiu valores (ASHRAE, 2012). A ampliação na temperatura operativa aceitável a partir da velocidade do ar, como previsto na figura 5.

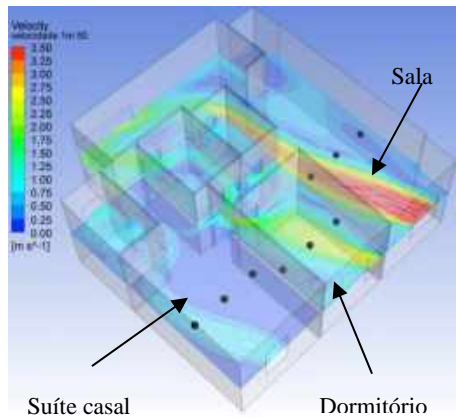


Figura 4 – Contornos de velocidade do ar em simulação no apartamento modelo

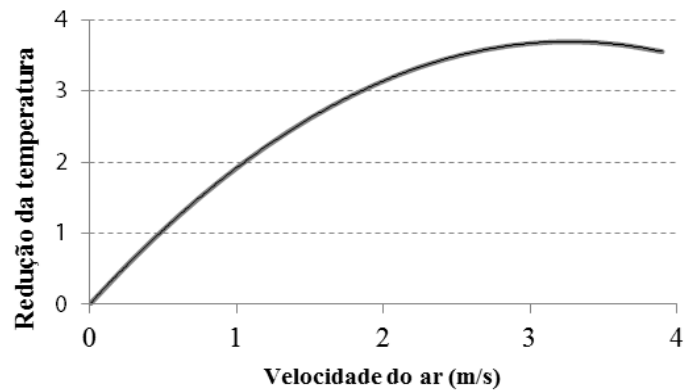


Figura 5 – redução da temperatura segundo o movimento do ar ASHRAE (2012)

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

As simulações de desempenho térmico foram realizadas para três apartamentos selecionados. Estas detalham o comportamento anual das variáveis ambientais em três ambientes de permanência prolongada submetidos a duas direções de vento, cujo comportamento é ditado pelas características específicas da morfologia urbana de cada um dos quatro cenários avaliados. Totaliza-se, assim, um universo de setenta e dois casos.

Fundamentalmente, o DesignBuilder deveria ser sensível à obstrução causada pelo entorno, haja vista que o programa utiliza como motor de cálculo o energyplus, utilizando séries de algoritmos certificados por associações como a ASHARE. Todavia, os cálculos expressaram uma redução dos ganhos de calor devido à radiação solar, com consequências sobre a temperatura operativa. Uma série de testes iniciais atestou a capacidade dos algoritmos inseridos no programa quanto aos dois aspectos fundamentais à pesquisa.

No mais verticalizado dos cenários, o segundo, por exemplo, a carga térmica anual devido à radiação solar no apartamento no vigésimo terceiro pavimento é 27% maior do que no pavimento intermediário e até 68% a mais se comparado ao primeiro pavimento, mais obstruído, como resume o a figura 6.

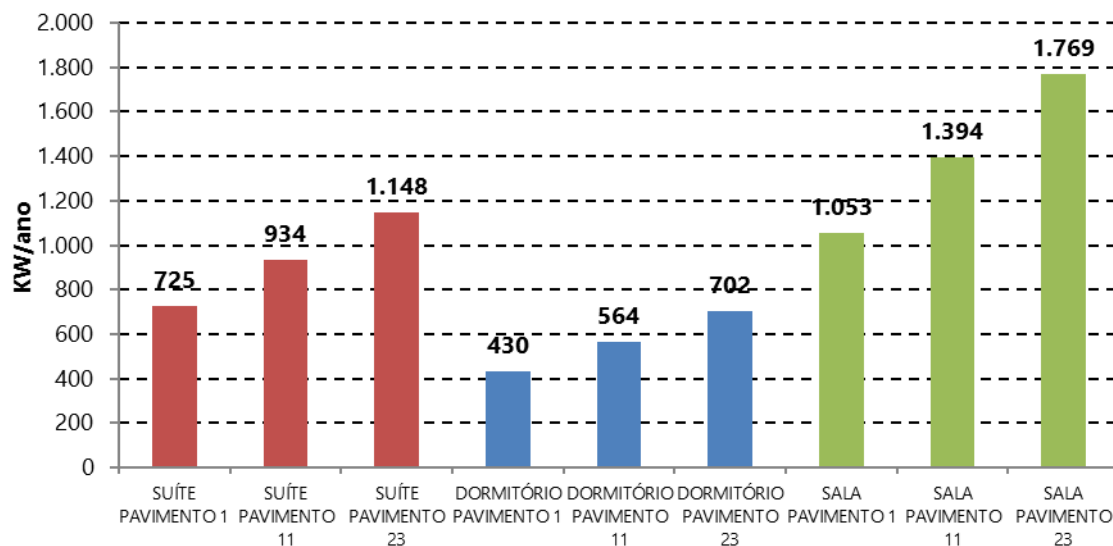


Figura 6 – Ganhos de calor devido à insolação entre os pavimentos no cenário 2

Confirmada a influência da obstrução do entorno na redução dos ganhos de calor, passou-se à avaliação do total de horas em conforto em cada caso. Os resultados do conjunto de simulações foram exportados para uma planilha eletrônica, reunindo-os segundo a incidência de vento (leste e sudeste) e apresentando-os sob a forma de gráfico. Nestes destaca-se a linha de 80% das horas para representar a maior parte do ano em situação de conforto térmico.

De maneira geral, os ambientes nos quatro cenários obtiveram a maioria das horas do ano dentro da zona de conforto. Os casos fora dos limites estabelecidos como confortáveis somente ocorrem em função do calor e, predominantemente, durante o período da tarde (entre 70% e 90% dos períodos em desconforto). Credita-se a maioria expressiva de horas dentro dos limites da zona de conforto térmico às vazões de ar

elevadas em grande parte dos casos simulados. Além das altas taxas de renovação do ar, a menor transmitância térmica das paredes externas, dotadas de revestimento cerâmico, contribui para a qualidade térmica nos ambientes internos. O valor de U na envoltória do edifício modelo é 10% mais baixo do que o admitido pela NBR 15.575.

Analisando os resultados para o vento leste, resumindo-se a figura 7, entre todos os casos, os que obtiveram maiores quantidades de horas dentro da zona de conforto foram aqueles situados no pavimento mais alto, independentemente do cenário urbano em questão. A quantidade de horas dentro dos limites estabelecidos como confortáveis foi menor quanto mais baixo fosse o pavimento analisado em virtude da redução nas taxas de renovação de ar, que na maior parte dos casos acompanhou a diminuição da altura do apartamento em relação ao solo. Mesmo diante da menor obstrução à radiação solar verificada nos pavimentos mais altos, tais ambientes obtiveram temperaturas operativas mais baixas do que aquelas verificadas em ambientes nos pavimentos mais baixos, reforçando a premissa da ventilação natural como fator preponderante para o resfriamento da construção em localidades quentes e de baixa amplitude térmica diária.

Analisando os resultados por ambiente, o mais agravado registrou 65% de horas em situação de conforto térmico, enquanto quatorze superaram 79% das horas do ano em que as condições foram satisfatórias, despontando como as melhores situações. Contudo, sem considerar a velocidade do ar para resfriamento dos ocupantes, nenhum destes atingiu o objetivo de 80% do ano (7.008 horas) em conforto, como resume a figura 7.

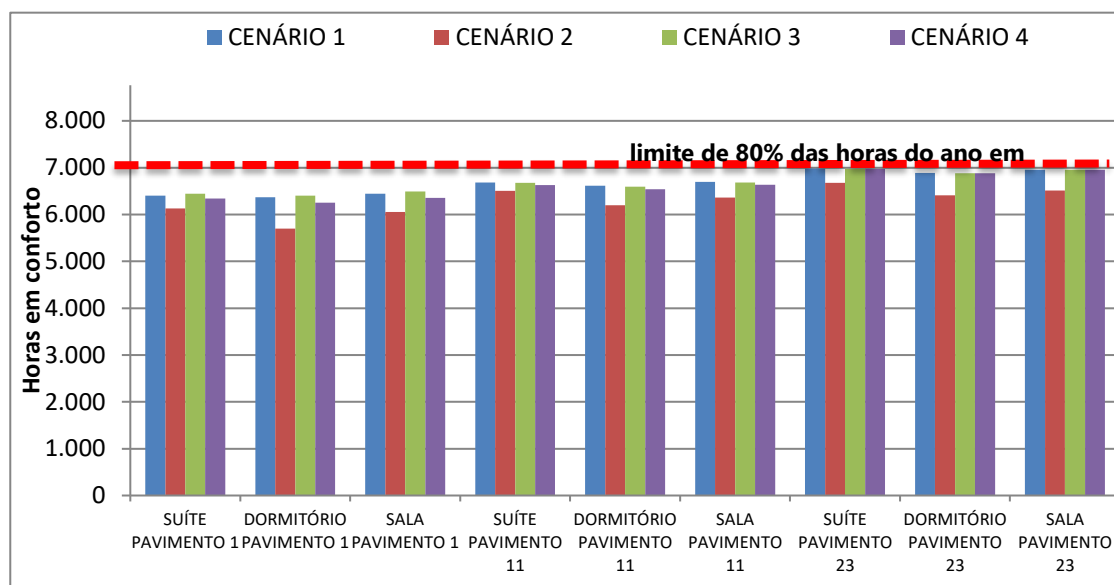


Figura 7 – Total de horas em conforto por ambiente nos quatro cenários com vento leste

Com o vento leste, as mais baixas quantidades de renovações do ar ocorrem no cenário 2. Neste arranjo, de elevada densidade construída, os ambientes situados no primeiro pavimento alcançaram os piores resultados. No cenário 1, em contrapartida, os ambientes no vigésimo terceiro pavimento obtiveram maiores percentuais de horas dentro da zona de conforto, em torno de 79%. Os valores alcançados pelos cômodos nos cenários 3 e 4, nesse mesmo nível, foram bastantes próximos, como foi possível perceber na figura 7.

Conclui-se, assim, que a obstrução à radiação solar não influencia significativamente a quantidade horas em conforto quando as taxas de vazão de ar são mais expressivas.

Entretanto, quando se analisam os três ambientes no primeiro pavimento dos cenários 1, 3 e 4, observa-se uma discreta diferença na quantidade de horas em conforto. Entre todos os casos neste nível, o cenário 3 apresentou os melhores resultados. As diferenças na vazão de ar neste cenário são menos de 10% menores do que nos cenários 1 e 4. É possível afirmar, portanto, que o melhor desempenho dos ambientes em meio ao cenário 3 ocorre devido a maior obstrução à radiação solar determinada por esse cenário, cuja verticalização é bem mais expressiva do que nos arranjos 1 e 4.

Com o vento sudeste, as situações em conforto térmico obedecem relações semelhantes àsquelas verificadas com o vento leste. Os maiores períodos de conforto foram anotados nos ambientes de pavimentos mais altos, sofrendo reduções nos pavimentos baixos, uma vez que são menores as taxas de vazão de ar.

O que se destaca, contudo, é a maior quantidade de horas em conforto em todos os ambientes nos pavimentos primeiro e décimo primeiro do cenário 2 em comparação aos demais cenários. Com o vento

sudeste, as taxas de vazão de ar no cenário 2 foram significativamente superiores ao vento leste e aproximam-se dos valores dos demais cenários, ainda que mais baixos.

No cenário 2, o primeiro pavimento apresenta taxa de renovação do ar 33% menor do que o verificado no mesmo nível no cenário 3 e 43% inferior em comparação ao cenário 4. No pavimento intermediário persistem tais diferenças, agora 31% menores em relação ao cenário 3 e 41% abaixo do cenário 4. Mesmo diante das menores vazões de ar registradas, o cenário 2 apresenta entre 150 e 370 horas a mais em conforto entre os casos envolvendo ambientes nos pavimentos primeiro e décimo primeiro, como percebe-se na figura 8. Tais valores atestam melhores condições ambientais neste contexto devido à redução da carga térmica em função da forma urbana mais obstruída, que promove maior sombreamento.

No pavimento mais alto, aonde as taxas de renovação do ar são semelhantes nas diferentes configurações morfológicas avaliadas, as horas em conforto não sofrem diferenças, como é possível perceber na figura 8.

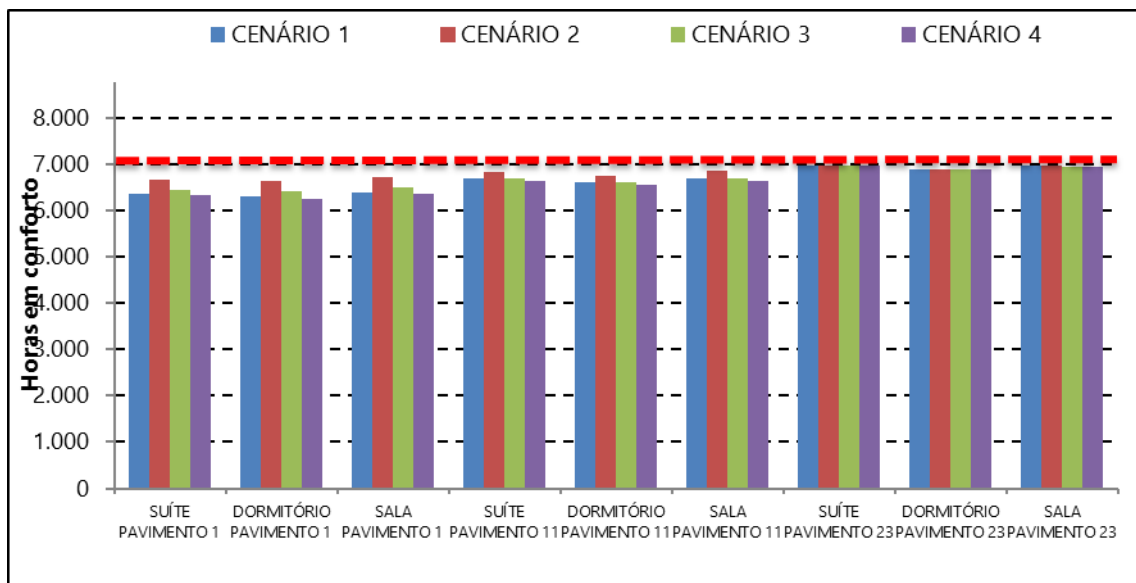


Figura 8 – Total de horas em conforto por ambiente nos quatro cenários com vento sudeste

Após rodar a série de simulações de desempenho térmico, acrescentou-se aos resultados os dados de velocidade do ar nos ambientes, uma vez que as simulações CFD dos fluxos internos permitem a indicação da intensidade das correntes em qualquer ponto do cômodo analisado.

A alteração na sensação de desconforto por calor no interior do apartamento é evidente e, então, em 85% dos casos é possível atingir a maior parte do ano (pelo menos 80% do período) em conforto térmico, como indica a figura 9.

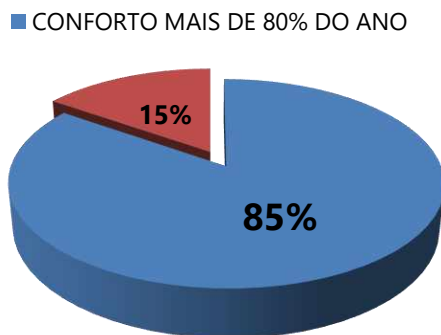


Figura 9 – Percentual de casos com mais de 80% das horas do ano em conforto térmico considerando o movimento do ar nos ambientes

A alteração na sensação de desconforto por calor a partir do movimento do ar no interior do apartamento é evidente. As reduções na temperatura operativa foram da ordem 0,05 a 0,25 grau nos casos em que o movimento de ar foi bastante baixo, como verificado em alguns casos do cenário 2, pouco incrementando as condições ambientais internas. Em situações de menor obstrução do meio urbano e,

portanto, valores acima de 1 m/s, o que corresponde a grande parte dos casos, foi possível reduzir entre 1 e 2,5 graus no valor da temperatura operativa percebida pelo organismo.

5. CONCLUSÕES

É sabido que o desempenho térmico, as condições de conforto e o consumo de energia em edifícios são, em grande parte, definidos pelas trocas térmicas que ocorrem entre sua envoltória e o entorno imediato. Na maioria dos casos, esse meio é o contexto urbano, com suas formas, dimensões, materiais e tipologias, responsáveis pelas características físicas, térmicas e aerodinâmicas que determinarão a qualidade ambiental em edificações.

As simulações CFD, não detalhadas neste artigo, mas que integram o estudo, indicaram condições específicas de circulação do ar em cada cenário e reforçaram a imprevisibilidade do comportamento da ventilação natural em meio urbano, reforçando a necessidade de avaliar precisamente as especificidades que o dinamismo formal inerente às cidades determina.

A análise isolada dos ganhos de calor solar atestou reduções significativas devido à obstrução de cada cenário urbano, como esperado. Apesar de impedir que parcelas significativas de radiação solar atingissem as superfícies verticais dos ambientes situados nos pavimentos mais baixos, sobretudo nos cenários 2 e 3, a ventilação natural mostrou-se fator de maior peso sobre o desempenho térmico e, conseqüentemente, o conforto nos ambientes avaliados.

Contudo, tomando como base seis casos do cenário 2 com vento sudeste, apresentados pelo gráfico 4, e mais quatro casos do cenário 3 com vento leste, expostos pelo gráfico 3, pode-se concluir que, em climas quentes e úmidos, sob condições de ventilação natural semelhantes ou até mesmo um pouco mais baixas, a obstrução ao sol provocada pelo entorno passa a ser fator importante para a melhoria das condições ambientais internas. Os resultados indicam que mesmo que a ventilação natural em contextos urbanos mais verticalizados atinja valores abaixo daqueles verificados em um meio menos obstruído, como as diferenças na vazão de ar entre 30% e 40% menores no cenário 2 em relação aos arranjos urbanos 1 e 4, dentro de certos níveis, o sombreamento pode compensar a ausência de fluxos mais intensos e garantir condições ambientais semelhantes àsquelas possíveis em situações urbanas de baixa densidade.

Como visto, o maior nível de obstrução à radiação solar devido aos edifícios altos no entorno não implicou na redução direta da temperatura operativa, uma vez que, em todos os cenários, os pavimentos mais baixos do edifício modelo apresentaram menores períodos de conforto térmico comparados aos apartamentos em níveis mais elevados. Por outro lado, considerando os casos em que não houve diferenças significativas na vazão de ar entre os pavimentos intermediário e o mais alto, como em grande parte das situações envolvendo os cenários 1, 3 e 4, as diferenças na qualidade ambiental interna fundavam-se somente na quantidade de carga térmica devido ao sol acumulada e perdida durante o ciclo diário.

De maneira geral, os resultados corroboram a afirmação de Givoni (1994) quanto à necessidade de priorizar a ventilação natural em relação à orientação solar em regiões quentes e úmidas, uma vez que a vazão de ar mais elevada nos casos em que os ambientes estavam mais expostos sobrepôs-se à influência da quantidade de radiação solar absorvida durante o ano.

Além de outros aspectos não descritos aqui, como valores da diferença de Coeficientes de Pressão (ΔC_p) entre as fachadas leste e oeste próximos entre os cenários simulados e baixas correlações entre a vazão de ar e a altura média dos edifícios, a quantidade expressiva de horas dentro da zona de conforto térmico obtida mesmo nos cenários mais verticalizados reforça a hipótese de que maiores níveis de densidade urbana são compatíveis com a manutenção de condições térmicas adequadas em edifícios residenciais.

A inserção dos dados de cada etapa foi realizada manualmente. Acredita-se ser possível desenvolver uma sistematização dos dados para alimentar o estágio de simulação seguinte de forma automatizada, com interfaces integradas aos programas como forma de aprimorar a metodologia aqui empreendida.

A forma urbana adensada a partir da verticalização, recorrentemente abordada sob o viés dos impactos negativos sobre a ventilação natural, foi aqui investigada segundo a possibilidade de contribuir para a melhoria das condições ambientais internas.

Acredita-se que a metodologia aqui desenvolvida concorre para reduzir imprecisões e incertezas que envolvem a especificidade de cada conjunto urbano em sua influência sobre o desempenho e o conforto térmico em ambientes internos. Constitui-se, assim, mais um meio 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.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- _____. **Addendum to ANSI/ASHRAE standard 55 – 2010: thermal environmental conditions for human occupancy.** American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers: Atlanta, 2012.
- _____. **Climate considerations in buildings and urban design.** New York: John Wiley e Sons, 1998.
- ALLARD, F.; GHIAUS, C.; SZUCS, A. **Natural ventilation in high-density cities.** In: Designing high-density cities for social and environmental sustainability. Edward Ng (org.). Earthscan: Londres, 2010.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING (ASHRAE). **ASHRAE Standard 55-2004: thermal environmental conditions for human occupancy.** American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers: Atlanta, 2004.
- BRANDÃO, R. S. Urban microclimate. In: GONÇALVES, J. C. S. UMAKOSHI, E. M. **The environmental performance of tall buildings.** London: Earthscan, 2010.
- COST. Cost Action 14- recommendations on the use of CFD in predicting pedestrian wind environment. Brussels- COST, 2004.
- COSTA FILHO, Amando C. Rugosidade e porosidade do tecido urbano como critérios de análise qualitativa da ventilação natural em cidades litorâneas. 2017. 200 p. TESE (DOUTORADO, ARQUITETURA E URBANISMO) - UNIVERSIDADE PRESBITERIANA MACKENZIE, SÃO PAULO, 2017. Disponível em: <<https://goo.gl/VcKq5n>>. Acesso em: 15 ago. 2018.
- DUARTE, D. H. S., SERRA, G. G. **Padrões de ocupação do solo e microclimas urbanos na região de clima tropical continental brasileira: correlações e proposta de um indicador.** Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Porto Alegre, 3: 7 – 20, 2003.
- FARIAS, DOROTHEU XIMENES DE; RAVIOLO, BRUNO DE PAIVA Y; CAVALCANTE, MÁRCIA. A VERTICALIZAÇÃO DE FORTALEZA E SUA INFLUÊNCIA SOBRE A VENTILAÇÃO NATURAL EM UMA EDIFICAÇÃO MULTIFAMILIAR. **Encontro Nacional do Conforto no Ambiente Construído**, [S. l.], p. 318-327, 29 set. 2017. Disponível em: <http://www.infohab.org.br/encac/files/2017/topico2artigo17.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2019.
- 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.
- GOLANY, G. S. **Urban design morphology and thermal performance.** Atmospheric Environment, 30: 455 – 465, 1996.
- GONÇALVES, J. C. S. **A sustentabilidade do edifício alto.** (Tese). Doutorado em Arquitetura e Urbanismo. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.
- GUPTA, V. **Thermal efficiency of building clusters: an index for non airconditioned buildings in hot climates.** In: D. Hawkes (Ed.), Energy and Urban Built Form, Butterworths, UK, 1987.
- LAM, J. C. **Shading effects due to nearby buildings and energy implications.** Energy Conversion & Management 41: 647 – 659, 2000.
- LEITE, Renan C. V. Limites de ampliação da ventilação natural para o conforto térmico face à densificação urbana em clima tropical úmido. 2015. 273 P. TESE (Doutorado Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de São Paulo, SÃO PAULO, 2015.
- LI, D. H.W.; WONG, S. L. **Daylighting and energy implications due to shading effects from nearby buildings.** Applied Energy 84: 1199 – 1209, 2007.
- MARTINS, T. A. L.; ADOLPHE, L.; BASTOS, L. E. G. **From solar constraints to urban design opportunities: optimization of built form typologies in a Brazilian tropical city.** Energy and Buildings 76: 43 – 56, 2014.
- UNFPA (United Nations Population Fund). People and possibilities in a world of 7 billion. United Nations. New York, 2011.

AGRADECIMENTOS

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