



O IMPACTO DA VERTICALIZAÇÃO DOS EDIFÍCIOS NAS CONDIÇÕES MICROCLIMÁTICAS EM CLIMA TROPICAL QUENTE E ÚMIDO.

Samuel Bertrand Melo Nazareth

Universidade Presbiteriana mackenzie

samuel.nazareth@outlook.com

Natacha Viana Seabra de Freitas

Universidade Presbiteriana mackenzie

arqnatachaseabra@hotmail.com

Maria Augusta Justi Pisani

Universidade Presbiteriana mackenzie

augustajp@gmail.com



O IMPACTO DA VERTICALIZAÇÃO DOS EDIFÍCIOS NAS CONDIÇÕES MICROCLIMÁTICAS EM CLIMA TROPICAL QUENTE E ÚMIDO.

S. B. M. Nazareth, N. V. S. De Freitas e M. A. J. Pisani

RESUMO

A urbanização altera significativamente o microclima das cidades contemporâneas. Esse processo provoca um aumento na densidade urbana e tem influência direta nas características morfológicas das cidades. Esta pesquisa analisa as interações aerodinâmicas no nível do pedestre em um cenário de possível verticalização das edificações de um centro urbano localizado em clima quente e úmido no Nordeste brasileiro. O método da pesquisa consistiu em uma análise exploratória, onde utilizou a ferramenta computacional ANSYS para simular dois cenários. Os resultados demonstraram que a verticalização na área estudada potencializou a ventilação no nível do pedestre no eixo Leste-Oeste e a reduziu no eixo Norte-Sul. No sotavento dos edifícios foram detectadas regiões de recirculação de ar entre as edificações, o que pode acarretar a diminuição da qualidade do ar urbano. Conclui-se que a verticalização das edificações pode provocar efeitos indesejáveis para o pedestre, mitigar a capacidade ventilativa das construções e diminuir a salubridade urbana.

1 INTRODUÇÃO

Algumas cidades ao redor do mundo vêm enfrentando o problema de ilhas de calor, e a mitigação desse problema é imprescindível no planejamento urbano. Visando essa causa, vários autores têm buscado soluções para mitigar os efeitos causados pelas ilhas de calor através de estudos sobre o vento (Hsieh e Huang, 2016; Qiao *et al.*, 2017; Yang *et al.*, 2019). Em Hong Kong, uma das cidades mais verticalizadas do mundo, diversos estudos observaram o impacto direto dos edifícios altos no usuário. Galdies e Lau (2020) estudaram nos anos de 2013 e 2018 duas ondas de calor e seus efeitos em diferentes áreas urbanas, os autores constataram que o impacto ao usuário foi maior em regiões de alta densidade, provocando o aumento nos problemas de saúde na população local. Yang *et al.* (2020) avaliaram como a tríade ventilação urbana, qualidade do ar e morfologia urbana interagem na China, os autores concluíram que a morfologia urbana é o fator fundamental para a manutenção da salubridade, contribuindo na dispersão de poluentes atmosféricos

No entanto, durante os cálculos são considerados os edifícios de forma isolada, com poucas ou nenhuma característica circunscrita, alegando que apenas a forma da construção é mandatória para a avaliação dos esforços estruturais. Extrapolando a ideia do edifício isolado, a ação aerodinâmica desse é sensível em diversas esferas, como na capacidade ventilativa no interior das edificações circundantes (Leite, 2015; Leite *et al.*, 2019; Nazareth

et al., 2019) e na qualidade do ar no nível do pedestre (King *et al.*, 2009; Krüger *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2020). É imprescindível que o estudo do impacto aerodinâmico dos edifícios altos faça parte das propostas de projeto urbano, uma vez que as simulações de fluidodinâmicas *Computational Fluid Dynamics* (CFD) auxiliam na prevenção e mitigação dos impactos provocados por estes edifícios. Antoniou *et al.* (2019) validaram simulações CFD a partir da comparação entre os dados coletados no local com os simulados, os autores relatam que no caso estudado, as simulações CFD deveriam ser mais empregadas na produção e no planejamento das cidades, com o intuito de melhorar a condição de vida e diminuir os possíveis efeitos negativos do ambiente urbano nos usuários.

Além da velocidade do ar, outro fator determinante para a definição da altura máxima da camada limite urbana é a rugosidade, ou seja, a diferença entre alturas das edificações (Lopes, 2003), constituindo uma condicionante da qualidade e intensidade da ventilação natural citadina, criando gradientes de ventilação no eixo vertical distintos para cada área em função da inércia promovida pela modificação da superfície (Landsberg, 1981). Devido à diversidade morfológica urbana, a verticalização das cidades é consequência do projeto urbano proposto a elas. Quando essa não é planejada de forma sistêmica, levando em considerações a interdisciplinaridades e os diferentes impactos ambientais, tende-se a criar regiões de maiores riscos à saúde do cidadão, contribuindo para a criação de patologias urbanas como a intensificação da ilha de calor e a diminuição da qualidade do ar na cidade (Landsberg, 1981; Acioly, 1998; Makvandi *et al.*, 2019). Tendo em vista as possíveis intempéries em áreas com edifícios verticalizados se faz necessário investigar e compreender os efeitos ambientais ocasionados por ela e como as modificações morfológicas de ocupação urbana podem alterar o caminhamento e a qualidade do ar em uma região urbana verticalizada e densa.

O presente estudo tem como objetivo analisar as interações aerodinâmicas com o pedestre em um cenário de possível verticalização das edificações de um centro urbano localizado em clima quente e úmido.

2 LOCAL DE ESTUDO

O objeto de estudo desta pesquisa está inserido na cidade de Fortaleza, no estado do Ceará, na região nordeste brasileira, sob as seguintes coordenadas geográficas 3°43'6" Sul e 38°32'36" Oeste e altitude de 15 metros (ver Figura 1). A metrópole está inserida em clima tropical quente e úmido, caracterizado por invernos secos e verões chuvosos (Köppen, 1918). O dados coletados a partir das normais climatológicas mensais disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) entre os anos de 1961 e 2010, demonstra que a cidade de Fortaleza possui as maiores temperaturas entre os meses de outubro e dezembro, com média de 31,4 °C; e as menores temperaturas entre junho e agosto, com média de 22,9 °C (INMET, 2010).



Fig. 1 Localização de Fortaleza

De forma mais específica, foram utilizados dados de organização acreditada pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (DAE) a *Climate.OneBuilding*¹, para a análise da ventilação na região, onde foi encontrado uma maior recorrência no sentido leste e sudeste a uma velocidade de 3,05 m/s (Climate, 2020), conforme a Figura 2.

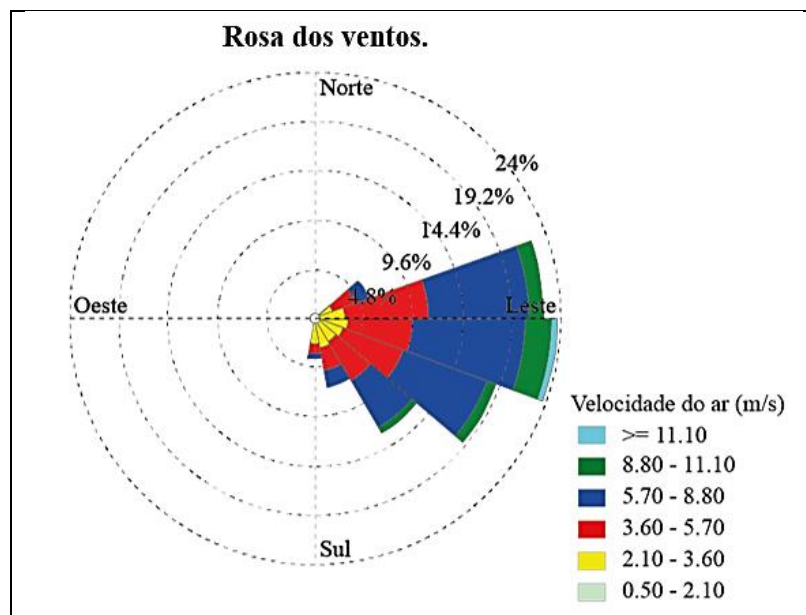


Fig. 2 Rosa dos ventos a partir do ano modelo (2004 a 2018)

A Figura 3 ilustra a localização das 9 quadras utilizadas para a análise e sua inserção dentro do bairro Centro, no qual tem atravessado por um processo de degradação física nos últimos anos. Foi observado pontos comerciais populares mais frequentados e mantidos em detrimento de regiões com falta de manutenção e uso.

¹ Disponível em: <http://climate.onebuilding.org/>. Acesso em: 4 ago. 2020.



Fig. 3 Ampliação das quadras estudadas

Com o intuito de promover uma mudança morfológica e de uso no local, o plano direto de Fortaleza sofreu uma atualização a partir da lei de uso e ocupação do solo de 2017, transformando esse bairro em uma Zona de Dinamização urbanísticas e socioeconômica (ZEDUS) que se caracteriza por porções do território destinadas à implantação e/ou intensificação de atividades sociais e econômicas, com respeito a diversidade local e visando o atendimento dos princípios da sustentabilidade. De maneira geral, as modificações legislativas pertinentes para esse projeto estão dispostas na tabela 1, onde ilustra o aumento da capacidade construtiva vertical e do uso do solo.

Tabela 1 Comparação entre índices urbanísticos

| Bairro Centro | |
|---|--|
| Lei de Uso e Ocupação do Solo 1996 | Lei de Uso e Ocupação do Solo 2017 |
| Zona de Ocupação Prioritária 1 | Zona de Dinamização Urbanística e socioeconômica |
| Índice de Aproveitamento: 3 | Índice de Aproveitamento: 4 |
| Altura máxima da edificação: 72 metros | Altura máxima da edificação: 95 metros |

3 MÉTODO

O método aplicado foi estruturado em cinco fases distintas e consecutivas, como visto na Figura 4. Primeiramente foi realizada uma visita em campo para a escolha do objeto da pesquisa. Em segundo lugar, após a escolha do objeto, dados relacionados a área foram coletados para as simulações. Na terceira fase foram realizadas modelagens em três dimensões de forma digital das quadras analisadas no *software* Rhinoceros 3D. Na quarta fase inicia-se o processo de simulação computacional com o *software* ANSYS no seu módulo de cálculo CFX, nele constituindo os demais passos: modelagem, criação de malha (*meshing*), inserção das condicionantes iniciais do modelo (CFX-pre), cálculo da simulação (CFX-solver), pós produção e tratamento dos dados (CFX-post). Por fim, quinta fase aborda a análise dos dados produzidos.

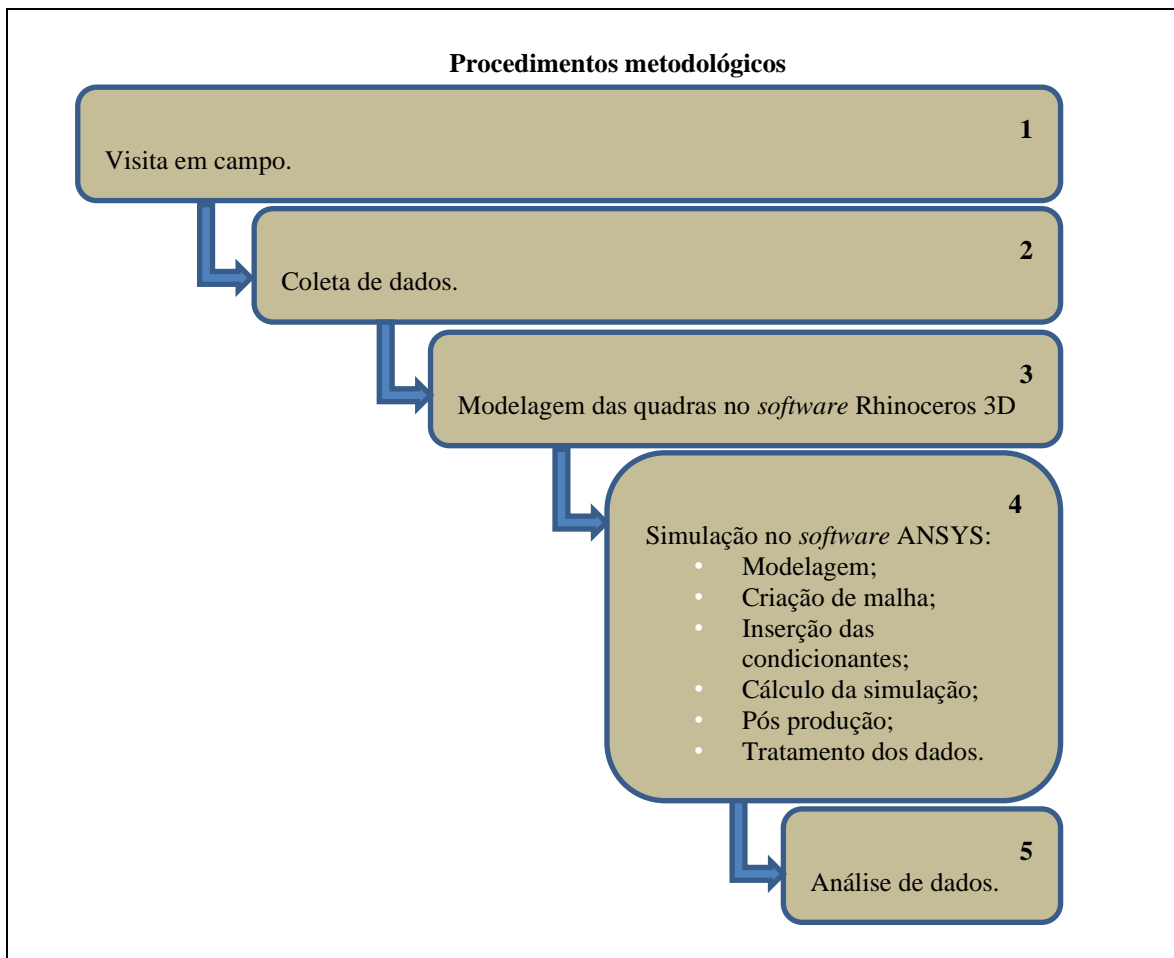


Fig. 4 Procedimentos metodológicos aplicados na pesquisa.

3.1 Modelo padrão das simulações

Por se tratar de um método exploratório, condicionou-se as edificações propostas para simulação com a máxima capacidade construtiva prevista pela legislação vigente, com o principal critério para dimensionamento de lajes a capacidade de alcançar o máximo potencial do gabarito proposto.

Após o término da modelagem do objeto de estudo, é necessário a criação de uma geometria que envolva o todo, denominada de domínio. Cost (2004) aconselha que a relação entre a área de obstrução dos elementos modelados e o domínio seja de 3%. Harries (2005) indica que a largura, a partir dos objetos de análise, devem ser 6 vezes a maior altura encontrada no modelo, assim como o topo e o barlavento. O sotavento recomenda-se 15 vezes a maior altura encontrada no modelo.

Todavia, Cóstola (2006) indica na Figura 5 que o domínio pode ser circular, dando maior flexibilidade para o modelo, uma vez que com esta geometria é possível calcular diferentes ângulos de incidência de ventilação com o mesmo modelo. A partir da relação de Harries, produziu-se um domínio com diâmetro de 15 vezes a maior altura encontrada no modelo, uma vez que qualquer direção é passível de se tornar sotavento.

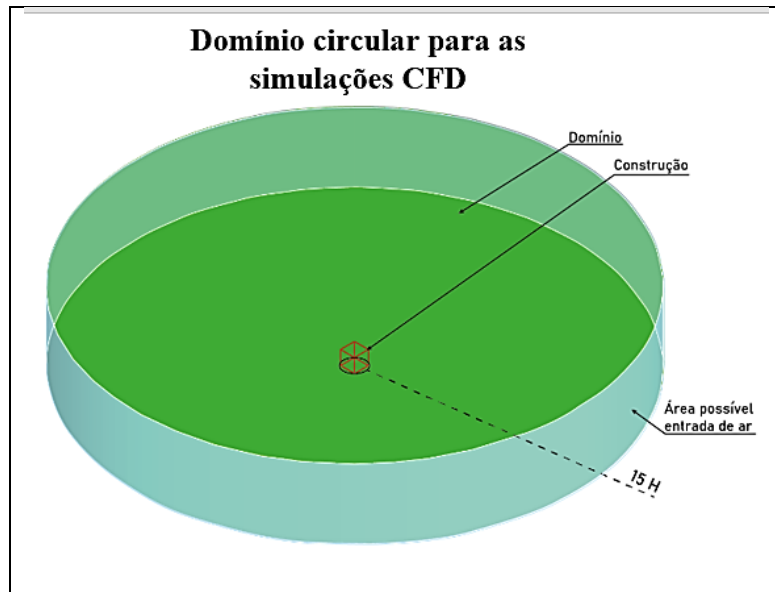


Fig. 5 Domínio circular para as simulações CFD

Uma vez produzida esta relação entre objeto analisado e domínio, descontrói-se a geometria em subdivisões, criando a malha a qual compõem a análise (*meshing*). A malha produzida neste estudo foi subdividida, em maior parte, em tetraedros com camadas de hexaedros nos objetos onde se é necessário maior fineza dos dados, neste caso, nos edifícios e o piso próximo dele. A inserção das condições de contorno (CFX-pre) é realizada de maneira a indicar aonde o vento irá iniciar, que pode ser uma abertura (*opening*) ou uma entrada (*inlet*), neste estudo optou-se por indicar toda circunferência como *opening*. As demais geometrias são indicadas como paredes lisas (*smooth wall*), uma vez que a rugosidade dos materiais em uma escala grande se torna um fator secundário (Brandão, 2009). A entrada de dados na *opening* é configurada para produzir um gradiente de ventilação baseada na equação do *Building research establishment* (BRE) de 1978, Equação (1).

$$V = V_M \times k \times Z^a \quad (1)$$

Onde:

V: Velocidade média do vento à determinada altura;

V_m: Velocidade inicial de referência do estudo;

Z: Altura determinada;

k, a: Coeficientes de rugosidade do terreno.

Os coeficientes de rugosidades do terreno foram baseados em função da relação apontada por Jackman (1980) *apud* (Bittencourt e Cândido, 2005) na Tabela 2, sendo utilizados os parâmetros de “Centro de cidade”.

Tabela 2 Coeficientes para caracterização de terrenos

| Coeficientes do terreno | k | a |
|--------------------------------|------|------|
| Área aberta plana | 0,68 | 0,17 |
| Campo com obstáculos espaçados | 0,52 | 0,20 |
| Área urbana | 0,35 | 0,25 |
| Centro de cidade | 0,21 | 0,33 |

Com as condições de contorno definidas, inicia-se o processo de cálculo numérico da simulação com base na quantidade de interações solicitadas pelo pesquisador. Durante este cálculo, as interações são comparadas entre si e são produzidos os resíduos, ou seja, a diferença entre os resultados dos cálculos em cada interação solicitada. Espera-se que ao final do processamento, este número esteja na magnitude igual ou inferior a 1×10^{-4} (Cóstola, 2006; Leite, 2010).

Com o intuito de produzir cenários ainda mais aceitáveis, utilizou-se pontos de monitoramento dentro da simulação, onde é possível constatar variáveis específicas durante o CFX-solver. Nestas simulações foram inseridos três pontos em locais distintos onde foi monitorado a pressão incidente do vento entre várias simulações com diferentes níveis de refinamento até estabilizar os dados coletados, não maiores que 10%, aferindo, portanto, uma estabilidade física no modelo fluidodinâmico (Cost, 2004; Leite, 2015).

Por fim, foram produzidas as imagens para a análise, incluindo na simulação os dois sentidos distintos de ventilação, com base nos dados das normas climatológicas supracitadas. Considerou-se a ventilação predominantemente leste e sudeste a uma velocidade média de 3,05 m/s. Retirou-se planos de dados de velocidade de ar no nível do pedestre (1,5 m do solo) para melhor compreender a dinâmica da ventilação e sua interação com o cidadão, bem como a 40 e 90 metros de altura para analisar a influência de edificações altas e seus reflexos no meio urbano.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 6 apresenta, um plano a 1,5 metros em relação ao solo, no cenário não verticalizado e verticalizados, respectivamente, com a ventilação no sentido Leste-Oeste. O cenário não verticalizado demonstra uma velocidade do ar maior nos eixos perpendiculares ao sentido do vento, enquanto nos arruamentos paralelos, constata-se velocidades próximas a estagnação. Já no cenário verticalizado, é possível indicar uma potencialização na velocidade em função das alturas das obstruções propostas. Este cenário apresenta maior velocidade que as observadas anteriormente (1,5 m/s) sendo aceleradas em até 30% ($< 2,0$ m/s). A 45 e 90 metros de altura em relação ao solo, em cenário não verticalizado, não foi apresentado relevantes modificações fluidodinâmicas, uma vez que a altura das edificações da região é relativamente baixa (entre 2 e 3 pavimentos).

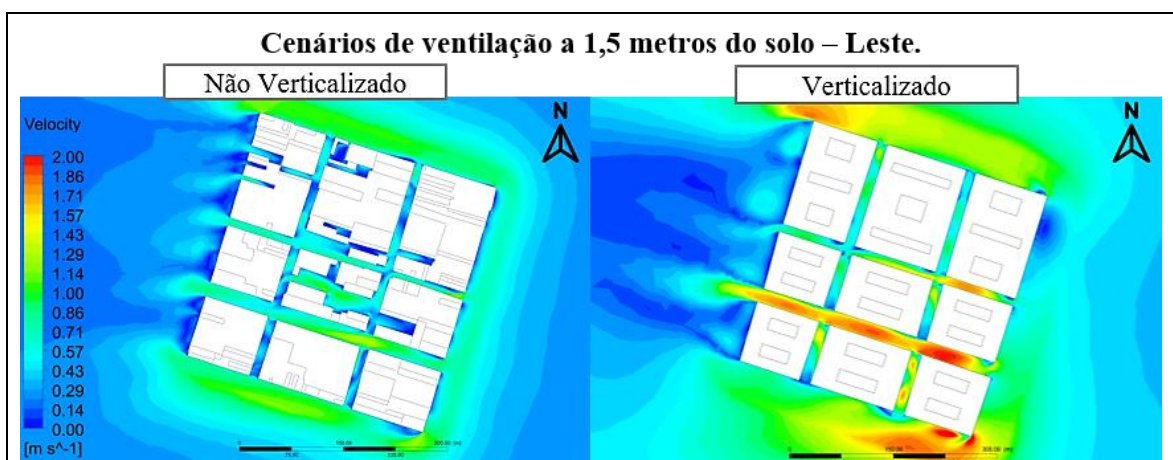


Fig. 6 Ventilação a 1,5 metros do solo – Leste – Cenário não verticalizado e verticalizado, respectivamente

A Figura 7 exibe cortes realizados no sentido do vento leste, em cenário não verticalizado e verticalizado, respectivamente. Em região não verticalizada, o perfil de vento vertical não apresenta significativas modificações, a não ser uma região de esteira (estagnação do ar) provocada pela atual maior edificação desta área de estudo (70 metros), indicada em vermelho. Por sua dimensão, aproximadamente 50 metros, esse fenômeno possivelmente não apresenta potencial problemas aos pedestres. Em região verticalizada, a altura das edificações promove fenômenos potencialmente danosos ao pedestre e a salubridade cidadina como um todo. Em laranja, indica-se uma região de recirculação de ar que é criada em função da nova morfologia urbana. Este fenômeno é um indicador que há uma possível deficiência ventilativa no local relacionada a dificuldade da penetração do fluxo de vento urbano, o que acarreta a diminuição da salubridade do ar, que por sua vez aumenta a possibilidade de contração de doenças respiratórias pela população. Em azul foi identificado uma região de esteira com a dimensão de aproximadamente 600 metros, refletindo em uma possível diminuição da velocidade do ar e capacidade ventilativa a malhas urbanas e edificações localizadas no sotavento.

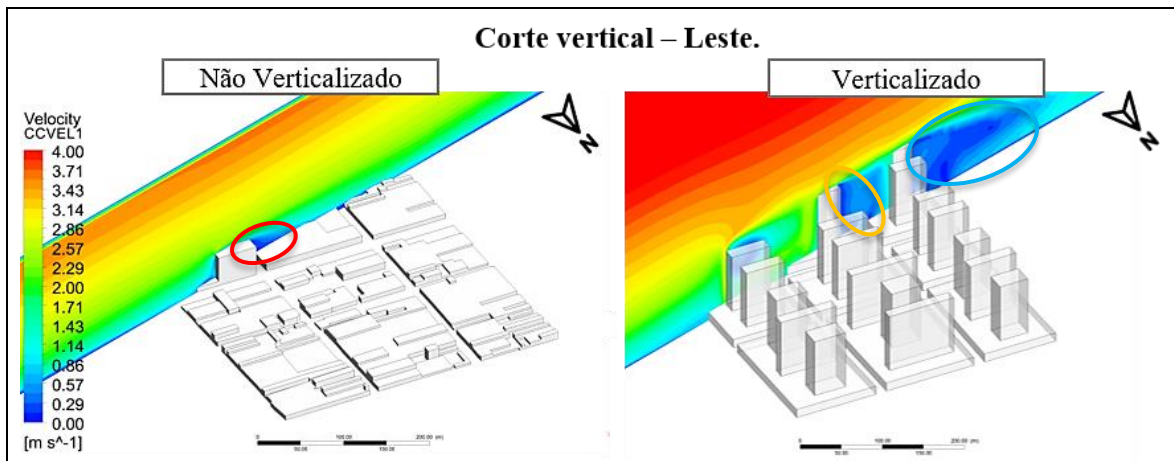


Fig 7. Corte vertical – Leste – Cenário não verticalizado e verticalizado, respectivamente

A Figura 8 ilustra, em um plano a 1,5 metros em relação ao solo, no cenário não verticalizado e verticalizados, respectivamente, a ventilação no sentido Sudeste-Noroeste, respectivamente. Observa-se as mesmas constatações apresentadas na Figura 6, com a indicação que neste sentido há uma maior resistências ao caminhamento do ar dentro da malha urbana, e assim, neste cenário, as velocidades encontradas são menores que as dos sentidos Leste-Oeste e apresentam uma região de esteira expressivamente maior.

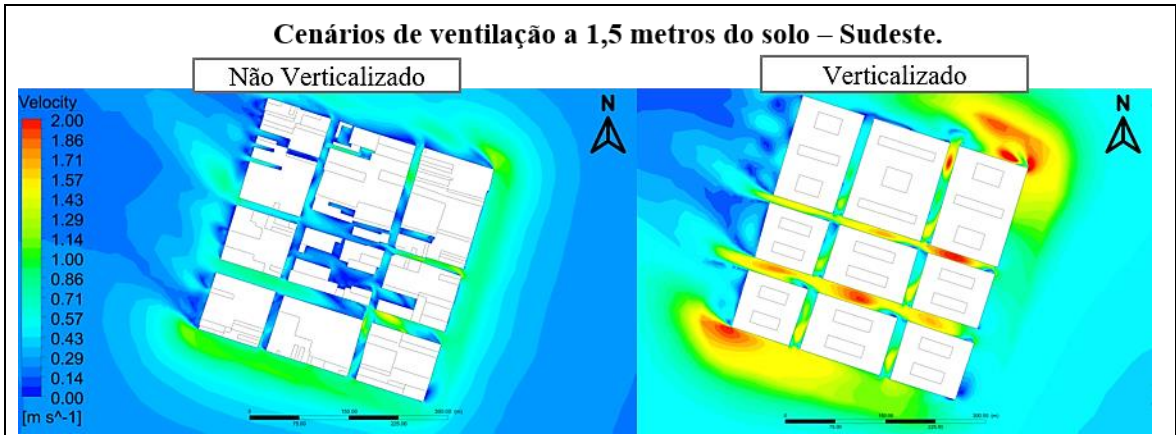


Fig. 8 Ventilação a 1,5 metros do solo – Sudeste – Cenário não verticalizado e verticalizado, respectivamente

Em relação ao plano de dados retirado a 45 e 90 metros de altura representados na Figura 9, observa-se que a verticalização produz grande regiões de esteira além de promover áreas de recirculação de ar entre os edifícios. Estas resistências aerodinâmicas, além de potencialmente diminuir a salubridade do ar urbano, ocasionam a mitigação da capacidade da ventilação passiva de prédios o barlavento, como indicado anteriormente.

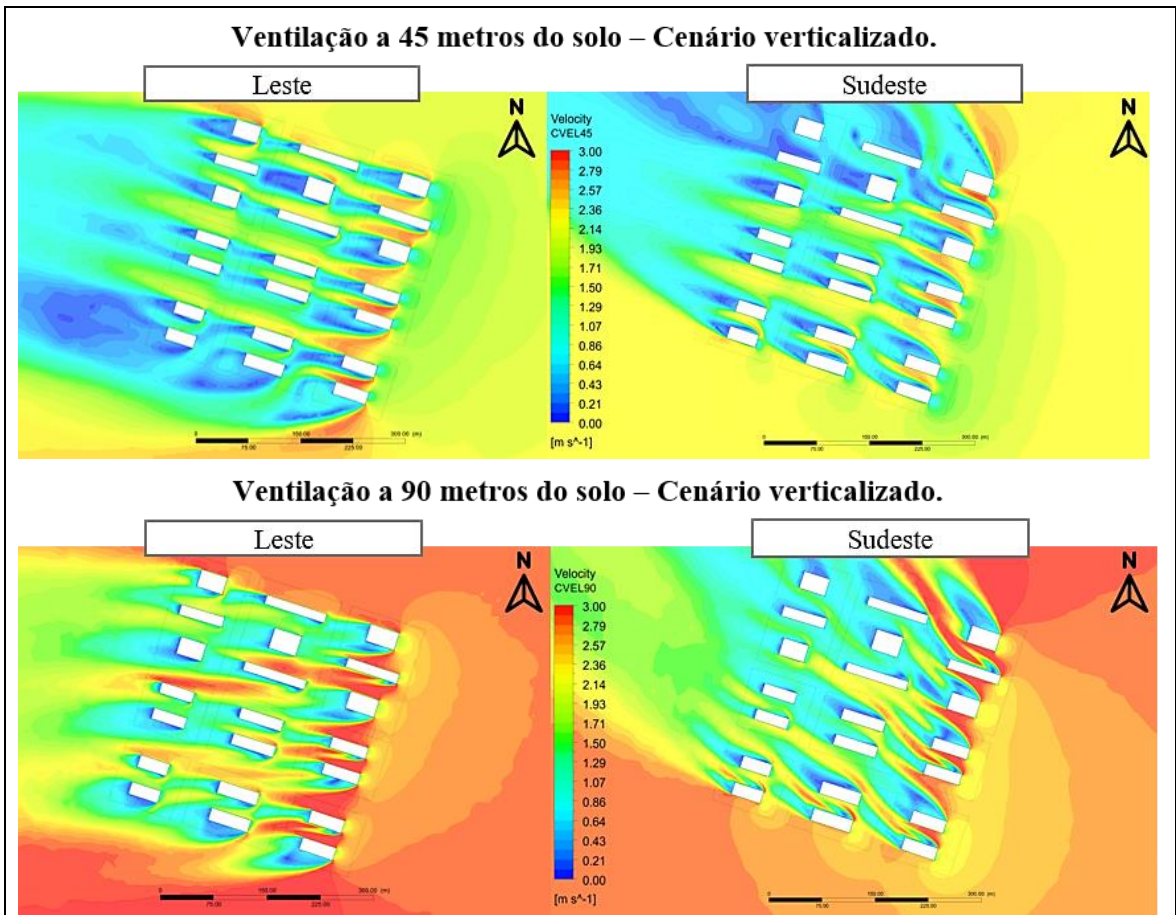


Fig. 9 Ventilação a 45 e 90 metros do solo – Leste e Sudeste, respectivamente, em cenário verticalizado

A Figura 10 demonstra de maneira clara os efeitos supracitados de recirculação de ar e esteira ocasionados pela verticalização desta região em função da maior inércia promovida pelas obstruções, em vermelho. Constata-se também a modificação da camada limite intraurbana em função da verticalização, bem como o gradiente de vento urbano.

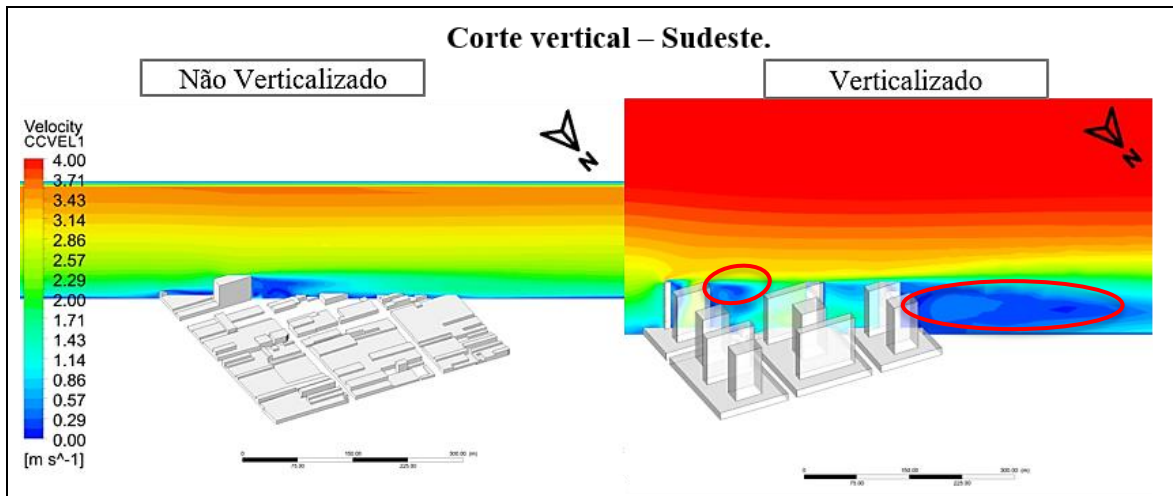


Fig. 10. Corte vertical – Sudeste – Cenário não verticalizado e verticalizado, respectivamente

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como foi apresentado nos tópicos anteriores, esta pesquisa teve como objetivo principal analisar as interações aerodinâmicas com o pedestre em um cenário de possível verticalização das edificações de um centro urbano localizado em clima quente e úmido. A partir das constatações deste trabalho houve um avanço em relação ao conhecimento sobre os efeitos da ventilação na escala microclimática.

Portanto, pode-se concluir que: o modelo proposto pela Lei de Ocupação do Solo da cidade de Fortaleza, acarretará o aumento das alturas dos edifícios e como consequência uma modificação expressiva na camada limite intraurbana; o aumento da altura dos edifícios pode provocar efeitos indesejáveis para o pedestre devido a capacidade de potencializar a velocidade do ar; a verticalização da região pode causar um aumento nas zonas de recirculação de ar, conseqüentemente, impactando a salubridade cidadina e haverá uma diminuição da capacidade ventilativa em edificações no sotavento em função dos obstáculos verticais.

Os resultados deste estudo introduzem a formulação de pesquisas futuras, tais como: buscar conhecer sobre o benefício da variação de alturas em edifícios; incluir análises da percepção de conforto dos pedestres e ampliar a pesquisa para outras variáveis microclimáticas.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores da pesquisa agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Instituto Presbiteriano Mackenzie.

7 REFERÊNCIAS

Acioly, C. e Davidson, F. (1998) **Densidade Urbana: um instrumento de planejamento e gestão urbana**. Rio de Janeiro: Mauá.

Antoniou, N., Montazeri, H., Neophytou, M., e Blocken, B. (2019) CFD simulation of urban microclimate: Validation using high-resolution field measurements. **Science of the Total Environment**, 695, 133743.

Bittencourt, L e Cândido, C. (2005) **Introdução à ventilação natural**. Maceió: EDUFAL.

Brandão, R. (2009) As Interações Espaciais Urbanas E O Clima. Doutorado. Universidade de São Paulo.

Building Research Establishment (1978) **Principles of Natural Ventilation**. BRE Digest nº 210, Garston- BRE.

Climate (2020) **Repository of free climate data for building performance simulation**. Disponível em: http://climate.onebuilding.org/WMO_Region_3_South_America/BRA_Brazil/index.html. (Acessado em: 11 Março 2020).

Cost (2014) **Cost Action 14- recommendations on the use of CFD in predicting pedestrian wind environment**. Brussels.

Cóstola, D. (2006). Ventilação Por Ação Do Vento No Edifício - Procedimentos Para Quantificação. Mestrado. Universidade de São Paulo.

Galdies C., e Lau H.S. (2020) **Urban Heat Island Effect, Extreme Temperatures and Climate Change: A Case Study of Hong Kong SAR**. In: Leal Filho W., Nagy G., Borga M., Chávez Muñoz P., e Magnuszewski A. (eds) *Climate Change, Hazards and Adaptation Options*. Climate Change Management. Springer, Cham.

Harries, A. (2005) Notas de Aula. **In: Workshop: CFX – FAU-USP**. São Paulo, 2005.

Hsieh, C.M. e Huang, H.C. (2016) Mitigating urban heat islands: A method to identify potential wind corridor for cooling and ventilation. **Computers, Environment and Urban Systems**, 57, 130-143.

King, E. A., Murphy, E., e McNabola, A. (2009) Reducing pedestrian exposure to environmental pollutants: A combined noise exposure and air quality analysis approach. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, 14(5), 309–316.

Köppem, W. e Geiger, R. (1928) **Klimate der Erde**. Gotha: Verlag **Condicionadas**. Justus Perthes.

Krüger, E. L., Minella, F. O., e Rasia, F. (2011) Impact of urban geometry on outdoor thermal comfort and air quality from field measurements in Curitiba, Brazil. **Building and Environment**, 46(3), 621–634.

Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (2019) Normais climatológicas do Brasil, 1961-2010, disponível em: www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas (acessado em 20 de Janeiro, 2019).

Landsberg, H. E. (1981) **The urban climate**. Academic Press, New York.

Leite, R. (2015) Limites De Ampliação Da Ventilação Natural Para O Conforto Térmico Face À Densificação Urbana Em Clima Tropical Úmido. Doutorado. Universidade de São Paulo.

Leite, R., Frota, A., e Nazareth, S. (2019) A Influência Da Densificação Urbana Sobre O Conforto Térmico No Interior De Apartamentos Residenciais. **In: XV Encontro Nacional do Ambiente Construído. João Pessoa: ANTAC**, 912-920.

Li, Z., Zhang, H., Wen, C. Y., Yang, A. S., e Juan, Y. H. (2020) Effects of frontal area density on outdoor thermal comfort and air quality. **Building and Environment**, 180, 107028.

Lopes, A. (2003) Modificações No Clima De Lisboa Como Consequência Do Crescimento Urbano: Vento, Ilha De Calor De Superfície E Balanço Energético. Doutorado. Universidade de São Paulo.

Makvandi, M., Li, B., Elsadek, M., Khodabakhshi, Z., e Ahmadi, M. (2019) The interactive impact of building diversity on the thermal balance and micro-climate change under the influence of rapid urbanization. **Sustainability (Switzerland)**, 11(6).

Nazareth, S. B. M., Leite, R. C. V., Costa Filho, A. C. e Lins, S. C. R. (2019) A Volumetria Edificada E Seus Impactos Na Ventilação Natural Urbana. Um Estudo De Caso Em Fortaleza, Ceará. **In: XV Encontro Nacional do Ambiente Construído, 2019. XV ENCAC**, 15, 435-444.

Qiao, Z., Xu, X., Wu, F., Luo, W., Wang, F., Liu, L. e Sun, Z. (2017) Urban ventilation network model: A case study of the core zone of capital function in Beijing metropolitan area. **Journal of Cleaner Production**, 168, 526–535.

Yang, J., Wang, Y., Xiao, X., Jin, C., Xia, J. C. e Li, X. (2019) Spatial differentiation of urban wind and thermal environment in different grid sizes. **Urban Climate**, 28, 100458.

Yang, J., Shi, B., Shi, Y., Marvin, S., Zheng, Y., e Xia, G. (2020) Air pollution dispersal in high density urban areas: Research on the triadic relation of wind, air pollution, and urban form. **Sustainable Cities and Society**, 54.