XXI ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
14 a 16 de outubro de 2026 | Goiânia-Brasil
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8480

Entre cheios e vazios: o efeito de pavimentos vazados em edifícios altos na ventilação natural - estudo de caso em Fortaleza, Ceará

Between Solids and Voids: the effect of open-floor on natural ventilation – a case study in Fortaleza, Ceará

Paulo Sérgio Sales da Silva Filho
Universidade Federal do Ceará | Fortaleza | Brasil | ppaulofilho@alu.ufc.br
Renan Cid Varela Leite
UFC - Universidade Federal do Ceará | Fortaleza | Brasil | renancid@daud.ufc.br

Resumo

Em localidades de clima quente e úmido o planejamento urbano deve preservar as condições de ventilação natural. Objetivou-se avaliar o impacto de vazaduras na volumetria de edifícios altos nas condições de ventilação natural na escala urbana através de simulações CFD. O comportamento dos fluxos a sotavento gerados pelo edifício residencial dotado de praças elevadas e utilizado como estudo de caso é comparado ao mesmo modelo completamente selado. As direções leste e sudeste mostraram discretas diferenças entre os dois modelos, reforçando o papel da implantação do edifício. O vento sul atravessa efetivamente as praças elevadas, confirmando o seu papel enquanto elementos capazes de aumentar a porosidade urbana e reduzir o efeito de barreira ao acelerar fluxos na região posterior do edifício.

Palavras-chave: Ventilação natural. Simulação computacional. Modelo CFD. Praças elevadas.

Abstract

In hot and humid climates, urban planning should preserve natural ventilation conditions. This study aimed to evaluate the impact of voids within the volumetry of high-rise buildings on urban-scale natural ventilation using CFD simulations. The behavior of leeward airflow patterns generated by the residential building with sky-courts and used as a case study is compared with the same model in a fully sealed configuration. The east and southeast wind directions showed minor differences between the two models, reinforcing the role of building siting. Southern winds effectively pass through the sky-courts, confirming their role as elements for increasing urban porosity and reducing the barrier effect by accelerating airflow in the downstream region of the building.

Keywords: Natural ventilation. Computational simulation. CFD model. Sky courts

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8480

INTRODUÇÃO

A ventilação natural constitui a mais simples estratégia para obtenção de conforto quando a temperatura do ar está elevada [1]. Sobretudo em contextos quentes e úmidos, o aproveitamento dos ventos pode remover parte do calor sensível e ampliar a aceitabilidade térmica pela elevação da velocidade do ar [2].

Entretanto, a presença de obstáculos no entorno pode reduzir a intensidade das correntes de ar, comprometendo o potencial de arrefecimento das edificações e de seus ocupantes. Em centros urbanos, o maior adensamento construtivo e a verticalização excessiva restringem fluxos, elevam a turbulência e a permeabilidade aos ventos, contribuindo para a formação de ilhas de calor e zonas de estagnação, entre outros impactos sobre as condições ambientais urbanas.

Edifícios altos atuam como barreiras aerodinâmica, alterando a dinâmica da ventilação natural e a possibilidade de dispersão de poluentes atmosféricos, afetando diretamente a qualidade do ar e o vento no nível do pedestre [3]. Os efeitos variam conforme a orientação, o espaçamento entre torres, o tipo de revestimento e o contexto climático local, o que exige análises específicas para cada realidade. Geometrias compactas e com arestas aumentam o arrasto aerodinâmico na camada limite urbana, dificultando a circulação do ar e, consequentemente, o conforto térmico, principalmente em realidades quentes e úmidas [4].

Na paisagem das principais cidades brasileiras predominam edificações em altura, produto resultante das dinâmicas econômicas e imobiliárias associadas, também, à escassez de solo urbano. Inseridos nesses contextos, edifícios altos assumem papel determinante na porosidade urbana, compreendida como as características morfológicas do conjunto edificado que podem favorecer a permeabilidade, a circulação e a redistribuição dos fluxos de ar.

A cidade de Fortaleza não foge a este panorama. A proposta de revisão do Plano Diretor [5] em desenvolvimento incluiu a redução dos gabaritos máximos em áreas onde a verticalização avançou nas últimas décadas. O setor imobiliário reagiu, associando as restrições a uma forma de estagnação. No entanto, é necessário assegurar que a altura dos edifícios corresponda à capacidade de suporte da infraestrutura e contribua efetivamente para a qualidade do ambiente urbano.

No atual contexto, a produção de edifícios altos tem sido frequentemente conduzida por lógicas predominantemente econômicas, maximizando o aproveitamento dos índices urbanísticos. Sob outro viés, propõe-se analisar seu potencial enquanto estrutura passível de atuação para melhoria das condições ambientais urbanas. Considerando que a presença de edificações em altura promove alterações no comportamento do vento, desviando os fluxos e ocasionando uma redução significativa das velocidades do ar a sotavento, pretende-se verificar os impactos da maior porosidade provocada por um desenho de edifício que incorpore espaços abertos enquanto vazaduras em sua volumetria.

Ao permitir a passagem das correntes de ar, pavimentos vazados contendo pátios ou praças elevadas em níveis intermediários do edifício podem contribuir para melhoria

das condições de ventilação natural na escala da cidade. A mecânica dos Fluidos Computacional (ou *Computational Fluid Dynamics*, em inglês - CFD) configura ferramenta relevante para a identificação de diretrizes projetuais capazes de ampliar a permeabilidade aos fluxos e otimizar a ventilação urbana, sem prejuízo à intensidade de ocupação do solo, fornecendo, assim, subsídios práticos para o planejamento [4] [6] [7].

A técnica CFD foi aplicada para avaliar a ventilação natural em jardins elevados incorporados à edifícios altos sob diferentes configurações geométricas. Como principais resultados, a intensidade das correntes de ar nestes espaços foi significativa, situando-se em torno de 10 m/s, o que pode comprometer a permanência de ocupantes [8].

A incorporação de pavimentos vazados em edifícios em diferentes zonas climáticas tem potencial para melhoria nas condições de ventilação natural ao favorecer a distribuição de fluxos em edificações, contribuindo para o conforto térmico, independentemente da tipologia e altura do edifício [9]. Também por meio de simulações CFD, o desempenho microclimático destes pavimentos em um edifício em clima tropical subúmido foi investigado. Diferentes geometrias de pavimentos vazados em diferentes alturas foram testadas, indicando que desempenho ambiental destes espaços depende mais da dinâmica dos ventos do que da temperatura do ar [10].

Ao categorizar três tipologias de edifício e classificar os pavimentos vazados segundo sua posição no corpo do edifício, [11] estabeleceram uma base para formulação de diretrizes de projeto a partir de uma abordagem integrada que considera variáveis determinantes para o desempenho microclimático e a qualidade ambiental destes espaços. Os autores antecipam, que, pavimentos vazados em edifícios de médio a grande porte desempenharão papel fundamental no desenvolvimento e fortalecimento da habitação em altura.

OBJETIVO

Analisar, por meio de modelo CFD, a influência da permeabilidade volumétrica de um edifício residencial multifamiliar no comportamento da ventilação natural urbana.

METODOLOGIA

A pesquisa caracteriza-se como experimental de natureza preditiva, empregando simulações CFD para a avaliação dos impactos de um edifício sobre a ventilação natural na região a sotavento.

O edifício

Um edifício residencial multifamiliar de 16 pavimentos-tipo e 40 apartamentos localizado em Fortaleza, Ceará, em processo de construção é utilizado como estudo de caso. Nos pavimentos 1 e 2, 5 e 6, 9 e 10, 13 e 14, o corpo deste edifício é vazado e, no lugar da unidade habitacional, é inserido um espaço aberto com pé-direito duplo, permitindo a passagem do ar, como na imagem a seguir.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8480

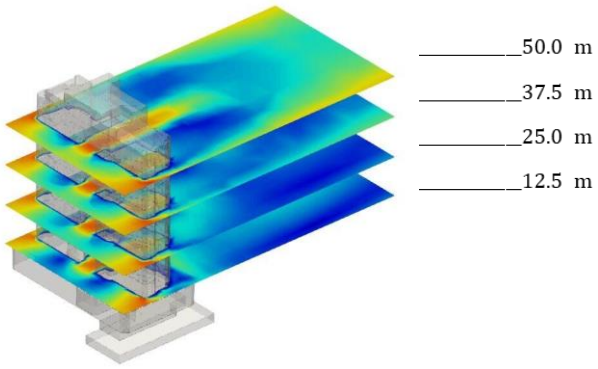
Figura 1: Volumetria geral do edifício (esq.), corte esquemático do edifício com a passagem do vento nos níveis dos pavimentos vazados (centro) e Planta baixa dos pavimentos-tipo 1, 2, 5, 6, 9, 10, 13 e 14 (dir.)



Fonte: Os autores com base em documentação fornecida pelo projetista

Para o presente estudo, compara-se a proposta, dotada de vazaduras em sua volumetria, ao mesmo modelo completamente selado. O campo de velocidades do ar será plotado em planos horizontais correspondentes às aberturas na volumetria do edifício, nos níveis dos pavimentos vazados, a 12.5 m, 25 m, 37.5 m e 50 m de altura, como demonstra a figura 2, a seguir. Comparam-se os fluxos na região à sotavento provocados por cada modelo. Adicionalmente, linhas de corrente e perfis de velocidade do ar também serão utilizados como forma de quantificar esta influência.

Figura 2: Planos horizontais nos níveis dos pavimentos vazados para plotagem do campo de velocidades



Fonte: Os autores.

A simulação computacional

O modelo de referência foi importado no programa Rhinoceros, escolhido em razão da capacidade de integração ao Grasshopper e plugin Eddy3D. O Eddy3D permite realizar o pré-processamento, o cálculo e o pós-processamento da simulação fluidodinâmica, que tem como motor o OpenFOAM [12].

O OpenFOAM é um programa de código aberto que oferece flexibilidade para a modelagem de escoamentos complexos e vem se consolidando como alternativa confiável para estudos de ventilação urbana e no interior de edifícios.

Através de uma metodologia desassociada que avaliou o comportamento do vento e da temperatura radiante média, [13] investigaram a ambiência térmica de espaços

abertos de um campus universitário. Da mesma forma, [14] avançaram ao integrar a modelagem da transferência de calor por convecção e a umidade relativa ao módulo de vento do Eddy3D, incluindo a representação em regime transiente.

A definição do domínio

Após a importação da geometria e a modelagem tridimensional do edifício, confeccionou-se o domínio para as simulações. Este constitui o volume fluido e estanque que contém os objetos de interesse e as fronteiras onde são impostas as condições de entrada e saída e demais limites do escoamento.

Adotou-se um domínio retangular, uma vez que há apenas as direções de vento leste e sudeste como predominantes de acordo com os dados climáticos (TMY) para a Fortaleza, como demonstra a figura 3.

Utilizou-se uma malha predominantemente hexaédrica em arranjo semiestruturado devido à complexidade geométrica do modelo. O domínio foi discretizado com diferentes níveis de refinamento, adotando-se menores elementos próximo à edificação, visando à acurácia na captura dos gradientes de velocidade e turbulência, e dimensões progressivamente maiores nas regiões de entrada (*inlet*), saída (*outlet*) e fronteiras laterais, com o objetivo de reduzir o custo computacional sem comprometer os resultados.

Figura 3: Rosa dos ventos para Fortaleza, formato de domínio adotado e o refinamento da malha.



Fonte: Os autores a partir dos plugins Ladybug e Eddy3d para Grasshopper e Rhinoceros

As condições iniciais e de contorno

Adotou-se o ar como fluido incompressível a 25 °C e densidade de 1,225 kg/m³. Utilizou-se o *SimpleFOAM*, apropriado para escoamentos em regime estacionário.

As condições de contorno foram definidas a partir de uma entrada de ar com magnitude de 4.54m/s, normal à superfície, utilizando-se um perfil de velocidade nas direções leste-sudeste, respectivamente 90° e 135°, com uma condição de velocidade prescrita (*fixedValue*), considerando parâmetros de rugosidade superficial (Z_o) representativos do entorno urbano, adotando-se Z_o = 0,3m com base em [15]. Na saída, adotou-se um referencial absoluto para o escoamento reverso (*backflow*) e direção normal à superfície.

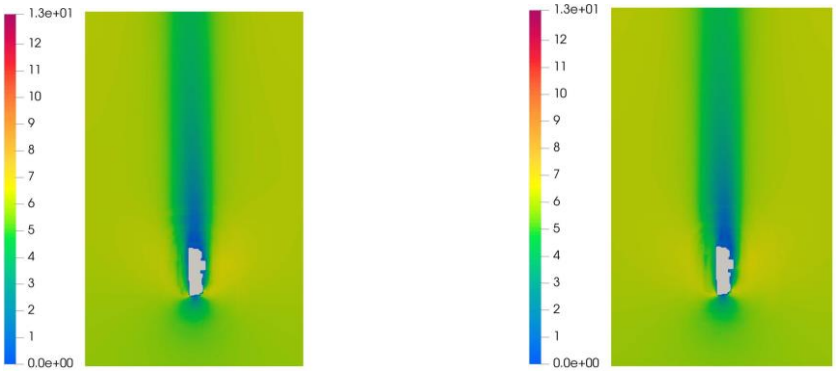
O modelo de turbulência utilizado foi o RNG k–ε com intensidade de turbulência na entrada e na saída especificadas em 5%. Para garantir a estabilidade numérica e a convergência foram utilizados fatores de relaxamento de 0,3 para a pressão e 0,5 para as equações de velocidade, energia cinética turbulenta (k) e taxa de dissipação (ε). O nível de resíduos esperado para as simulações é de 10^{-4} para pressão e 10^{-6} para as demais variáveis. Além do nível de resíduos baixos e estáveis, analisou-se o comportamento de variáveis como pressão e velocidade, que devem atingir equilíbrio numérico em uma simulação estacionária.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados são organizados segundo as direções de vento, no nível de cada praça elevada e comparando as configurações com e sem vazaduras. Todo o conjunto de simulações atingiu os níveis de convergência almejados.

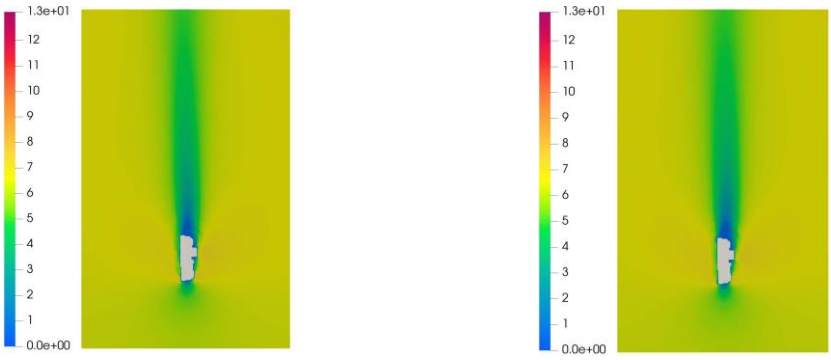
No caso do vento proveniente de leste, os fluxos incidem predominantemente sobre a fachada lateral, completamente vedada. Uma vez que não há atravessamento pelas vazaduras das praças elevadas, a presença dessas aberturas não interfere na dinâmica das correntes de ar na região de sotavento, que apresenta velocidades semelhantes à condição sem aberturas.

Figura 4: Velocidades do ar a 12.5 m do solo com vento leste modelo com vazaduras (esq.) e selado (dir.)



Fonte: Os autores.

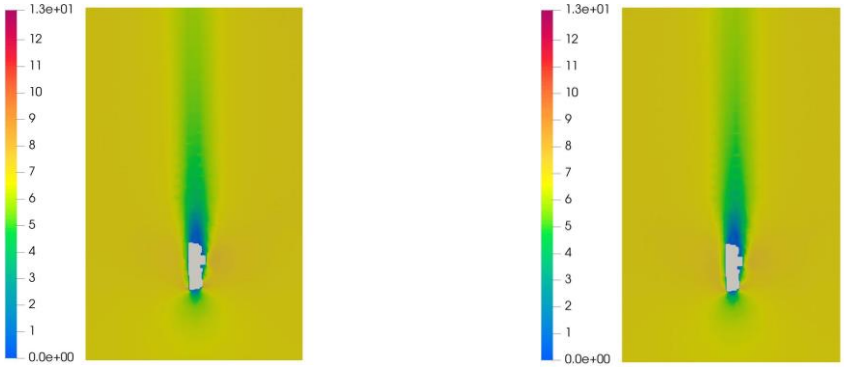
Figura 5: Velocidades do ar a 25 m do solo com vento leste modelo com vazaduras (esq.) e selado (dir.)



Fonte: Os autores.

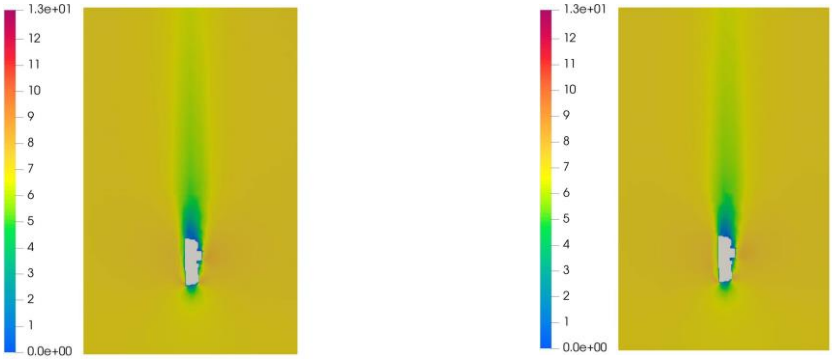
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8480

Figura 6: Velocidades do ar a 37.5 m do solo com vento leste modelo com vazaduras (esq.) e selado (dir.)



Fonte: Os autores.

Figura 7: Velocidades do ar a 50 m do solo com vento leste modelo com vazaduras (esq.) e selado (dir.)

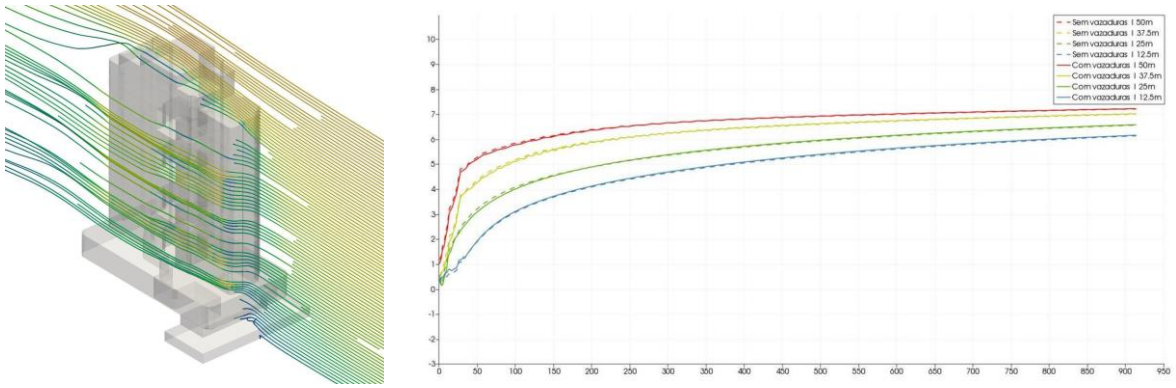


Fonte: Os autores.

Como percebido através dos planos horizontais, devido à orientação do edifício, o vento leste não consegue atravessar de modo efetivo as praças elevadas e, consequentemente, não promove alterações perceptíveis em seu comportamento na região a sotavento.

A visualização através de linhas de corrente na figura 8 (esq.) reforça o efeito barreira que a orientação determina aos fluxos incidentes. Adicionalmente, foram plotadas em gráfico (figura 8, à direita) as velocidades do ar na região a sotavento do modelo, que evidenciam a proximidade dos resultados para as duas configurações.

Figura 8: Linhas de corrente com vento leste (esq.) e velocidades do ar a sotavento comparando os dois modelos (dir.)

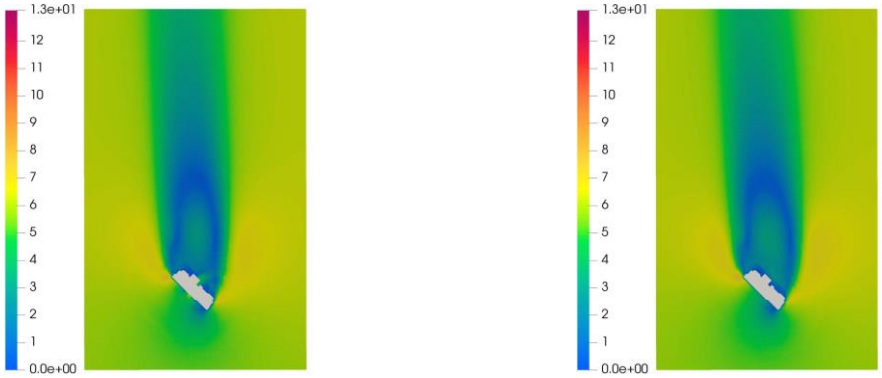


Fonte: Os autores.

Com o vento sudeste, de maneira geral, são notados valores mais elevados na velocidade do ar à sotavento, bem como uma zona de arrasto um pouco menor comparada ao modelo selado.

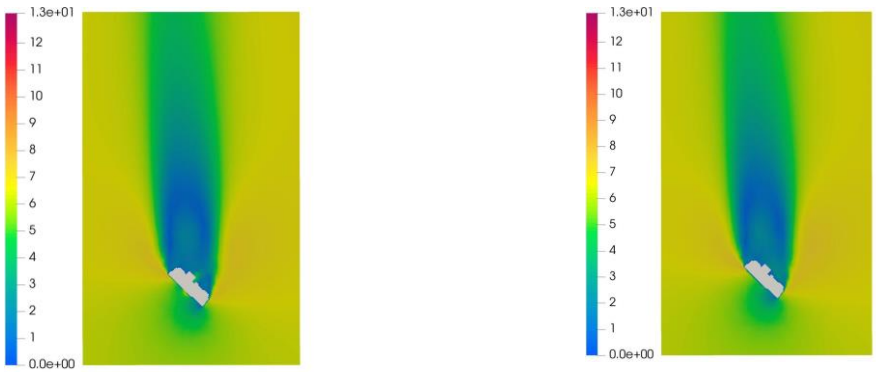
A 12,5 m do solo, a diferença entre os modelos é da ordem de 0,2 m/s. Enquanto um apresenta 4,5 m/s, o outro registra cerca de 4,3 m/s. A tendência se mantém ao longo dessas faixas. Na cota de 25m, a diferença reduz-se para cerca de 0,1 m/s. Em 37,5 m, tal discrepância torna-se ainda menor e, em 50m, passa a ser praticamente imperceptível.

Figura 9: Velocidades do ar a 12.5 m do solo com vento sudeste modelo com vazaduras (esq.) e selado (dir.)



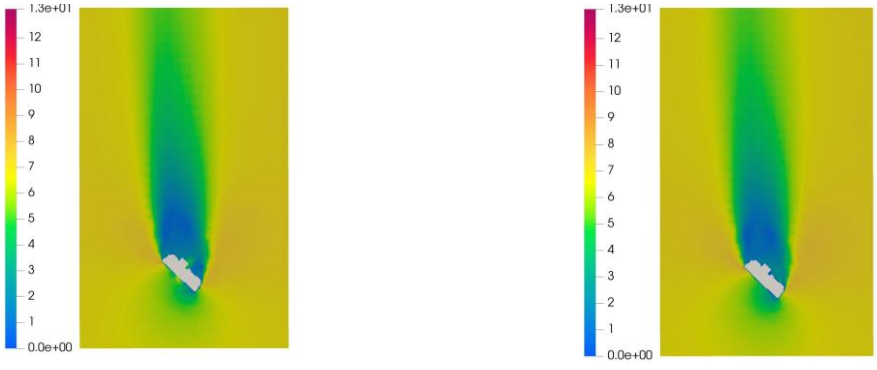
Fonte: Os autores.

Figura 10: Velocidades do ar a 25 m do solo com vento sudeste modelo com vazaduras (esq.) e selado (dir.)



Fonte: Os autores.

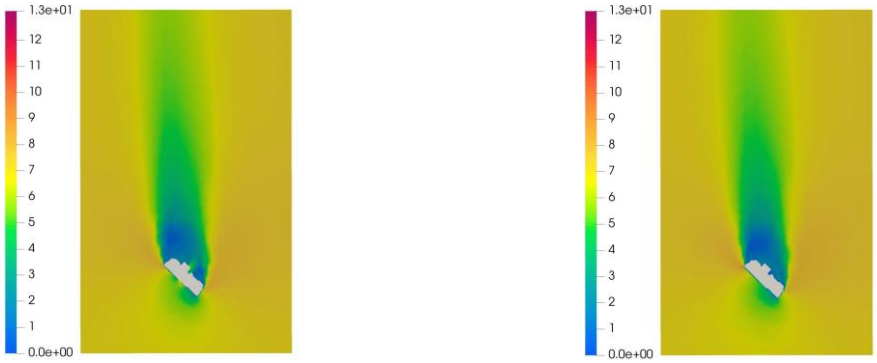
Figura 11: Velocidades do ar a 37.5 m do solo com vento sudeste modelo com vazaduras (esq.) e selado (dir.)



Fonte: Os autores.

Figura 12: Velocidades do ar a 50 m do solo com vento sudeste modelo com vazaduras (esq.) e selado (dir.)

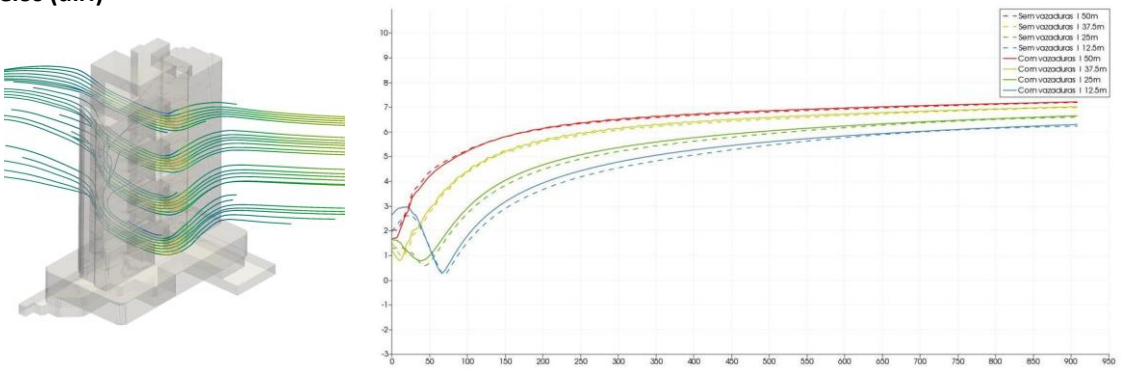
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8480



Fonte: Os autores.

Uma vez que o edifício está orientado para o quadrante sul (azimute 180°), os fluxos de sudeste atravessam as praças elevadas de forma oblíqua, como demonstram as linhas de corrente. Contudo, apesar de verificar-se a passagem de através destes espaços, as correntes alteram pouco a intensidade dos fluxos na região posterior, como demonstrado no gráfico (figura 13, à direita).

Figura 13: Linhas de corrente com vento sudeste (esq.) e velocidades do ar a sotavento comparando os dois modelos (dir.)

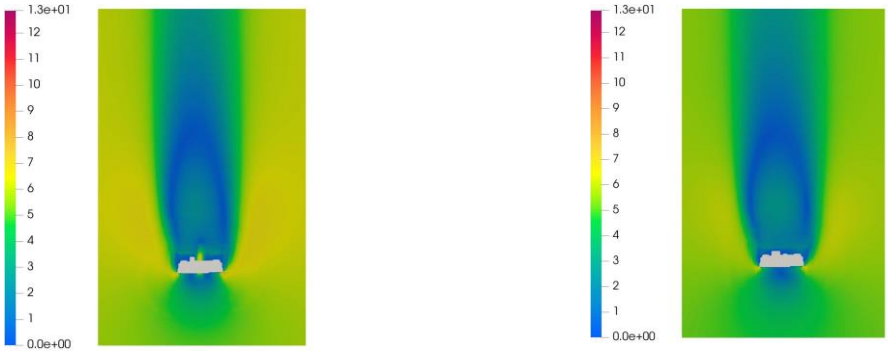


Fonte: Os autores.

Embora relativamente modestas, as diferenças tornam-se mais significativas quando analisada a distância para recuperação da velocidade de referência (4,54 m/s). A 12,5 m, o edifício vazado reestabelece o valor a aproximadamente 250 m a sotavento, enquanto no modelo vedado ocorre próximo de 300 m. Na cota de 25 m, observa-se comportamento semelhante: o modelo vazado recupera a velocidade inicial por volta de 175 m a sotavento e o modelo vedado somente após 200 m. Em cotas superiores, entretanto, a recuperação ocorre em distâncias muito próximas, sugerindo que a influência das aberturas se concentra em níveis inferiores e intermediários do fluxo.

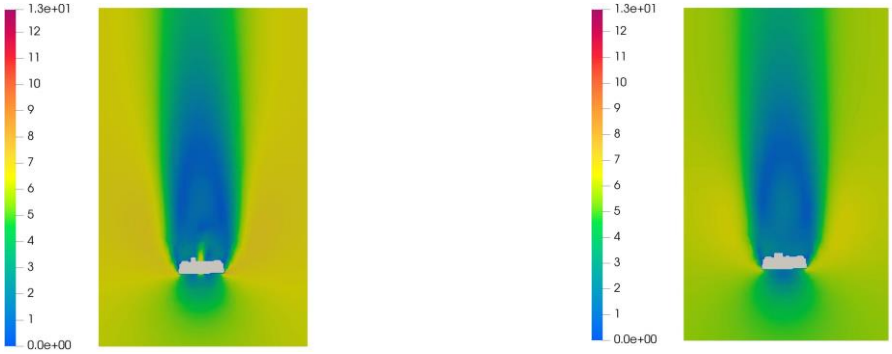
Ao final das análises das duas principais direções de vento, evidencia-se que o principal fator limitante para a efetiva passagem do vento através das praças elevadas é a implantação do edifício. Decidiu-se, então, simular uma direção de vento mais inclinada e perpendicular à fachada principal do edifício, a 180°, na tentativa de evidenciar a contribuição das praças elevadas com uma orientação que permita o atravessamento efetivo das correntes de ar.

Figura 14: Velocidades do ar a 12.5 m do solo com vento sul modelo com vazaduras (esq.) e selado (dir.)



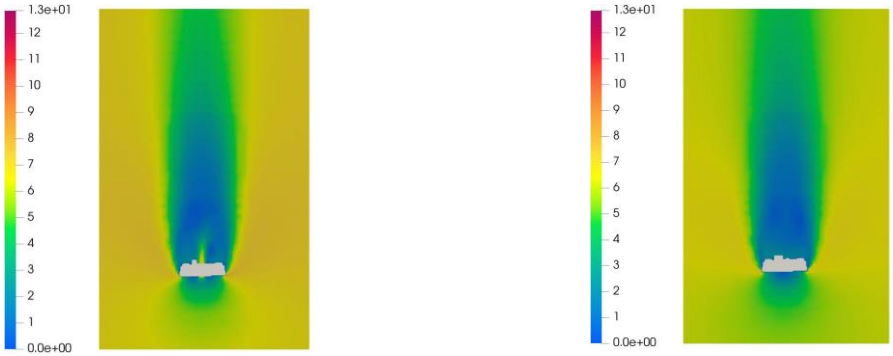
Fonte: Os autores.

Figura 15: Velocidades do ar a 25 m do solo com vento sul modelo com vazaduras (esq.) e selado (dir.)



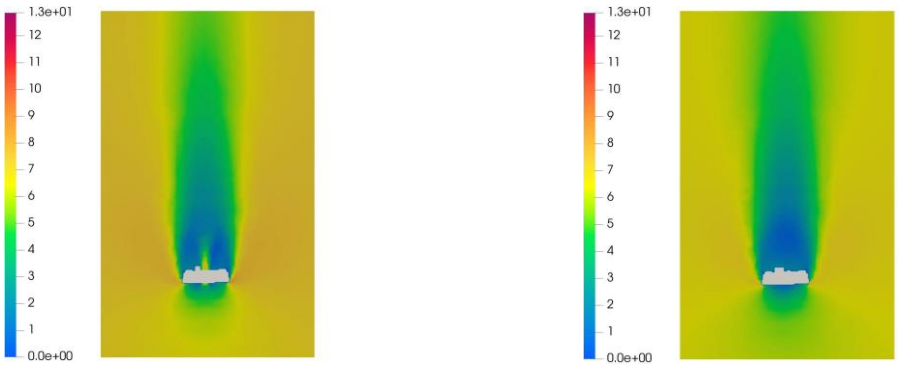
Fonte: Os autores.

Figura 16: Velocidades do ar a 37.5 m do solo com vento sul modelo com vazaduras (esq.) e selado (dir.)



Fonte: Os autores.

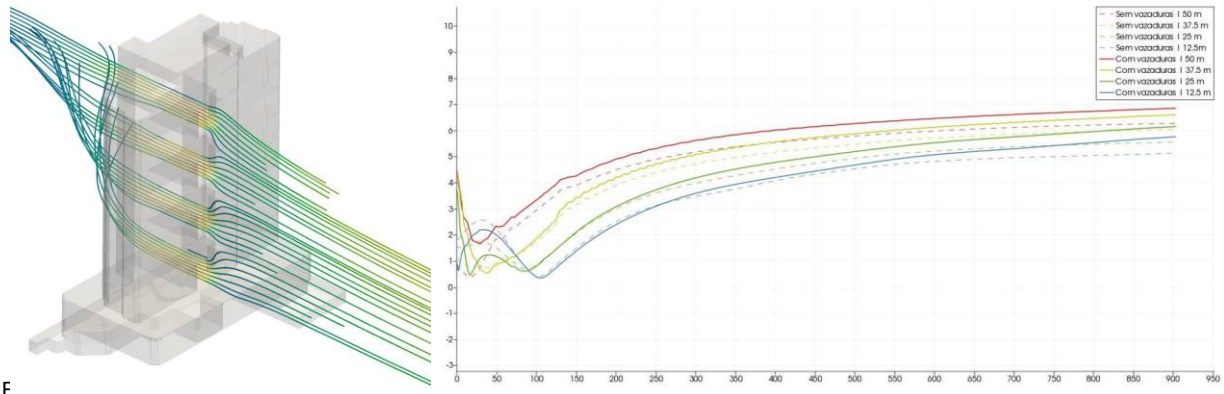
Figura 17: Velocidades do ar a 50 m do solo com vento sul modelo com vazaduras (esq.) e selado (dir.)



Fonte: Os autores.

As linhas de corrente reforçam a efetiva passagem das correntes de ar através do espaço das praças elevadas. Desta forma torna-se possível quantificar a influência destes vazios na aceleração dos fluxos a sotavento. A partir do gráfico (figura 18, à direita) os níveis de velocidade do ar são cerca de 1,0 m/s mais elevados na parte posterior ao edifício, com tendência a se manter mais altas ao longo de todo o domínio e com o incremento em altura em comparação ao modelo selado.

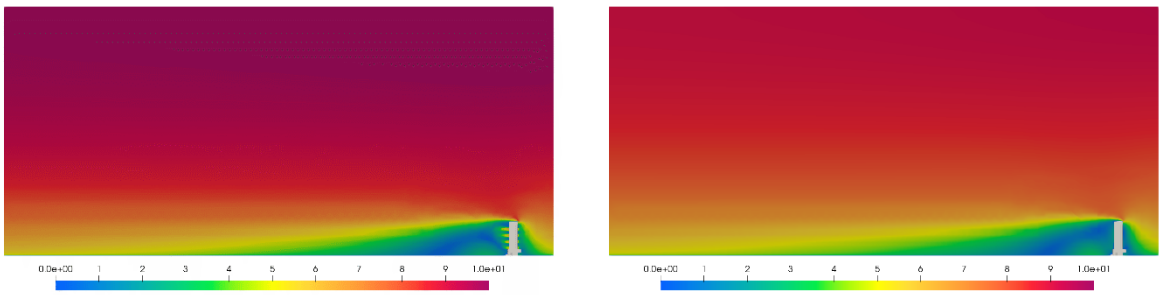
Figura 18: Linhas de corrente com vento sul (esq.) e velocidades do ar a sotavento comparando os dois modelos (dir.)



F

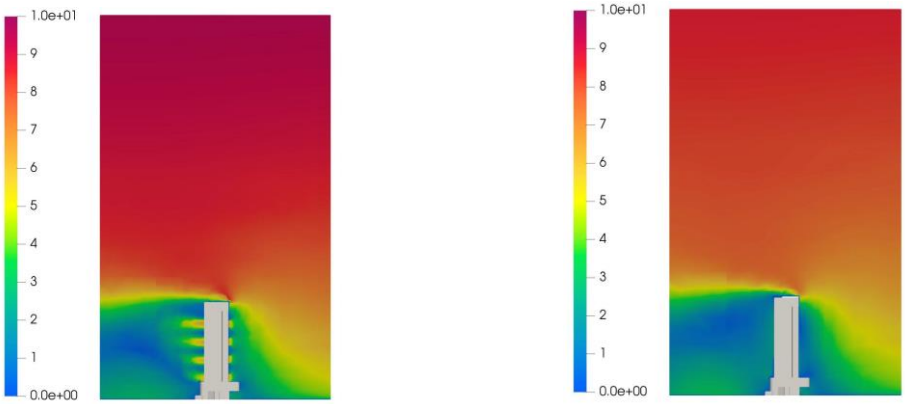
De fato, o vento sul (180°) consegue atravessar de maneira mais efetiva as aberturas das praças elevadas. Os planos verticais de velocidade do ar apresentados na figura 19 permitem perceber a mudança que ocorre na região a sotavento. São observadas esteiras de vórtices reduzidas com uma incidência de vento mais perpendicular à fachada. Tais aspectos são corroborados em detalhe, na figura 20, onde torna-se mais evidente a aceleração dos fluxos através do espaço das praças elevadas.

Figura 19: Plano vertical de velocidades do ar com vento de sul comparando o modelo vazado (esq.) ao completamente selado (dir.)



Fonte: Os autores.

Figura 20: Detalhe do plano no vertical de velocidades do ar com vento de sul comparando o modelo vazado (acima) ao completamente selado (abaixo)



Fonte: Os autores.

Por fim, se faz necessário destacar, no entanto, que, nas praças elevadas, a área efetiva de abertura corresponde a apenas 8% da fachada do edifício, aproximadamente. Tal aspecto, aliado à implantação, reduz sobremaneira o potencial destas aberturas para passagem do ar e explica, em parte, as discretas diferenças aqui demonstradas. Ainda, há que se considerar que a área de saída é menor do que a área de entrada.

CONCLUSÕES

Ainda que discretas diferenças tenham sido notadas no conjunto dos resultados para o vento de leste e sudeste, evidencia-se que a incorporação de vazaduras na volumetria do edifício pode contribuir na redução de seu arrasto aerodinâmico. Sobretudo com a simulação da incidência sul, proposta após a verificação da pouca influência das incidências principais devido à forma de implantação do edifício, foi possível perceber que o modelo com vazaduras apresenta valores de velocidade mais elevados na região a sotavento, com maiores diferenças ao longo de todo o domínio. Ademais, foram notadas zonas de recirculação menores e esteiras de vórtices reduzidas com uma orientação mais perpendicular ao vento incidente. Tal aspecto pode, então, beneficiar a ventilação natural na malha urbana em seu entorno.

Demonstrou-se, assim, a relevância da orientação do edifício em relação ao vento incidente, que se mostrou fundamental para o aproveitamento do potencial destas aberturas como estratégia de mudança nos padrões de ventilação a sotavento. Nesse sentido, a porosidade arquitetônica percebida no edifício não constitui apenas um recurso estético, mas tem potencial estratégico para elevar a permeabilidade urbana. Ao mitigar a formação de zonas de baixa pressão e reduzir o efeito de barreira, demonstra-se a necessidade de considerar o efeito aerodinâmico de edifícios durante a etapa de concepção, sobretudo avaliando formas de implantação.

Importante destacar que a medida constitui prática pouco convencional ao mercado imobiliário ao abdicar de áreas privativas comercializáveis em função de preocupações ambientais tanto na escala do edifício como em relação à porosidade urbana, o que denota caráter inovador.

A incorporação de vazaduras no desenho de edifícios altos configura-se, então, como solução viável à melhoria das condições de ventilação na escala da cidade. Ainda, outros potenciais não verificados neste estudo suscitam desdobramentos e análises futuras, tais como a minimização do efeito de ilhas de calor, a melhoria do conforto térmico na escala urbana e a redução das cargas de vento sobre a estrutura.

A análise desenvolvida neste artigo limitou-se ao edifício isoladamente. A volumetria do entorno foi desconsiderada para simplificar análises preliminares presentemente estabelecidas como meta. A medida permitiu o fechamento mais rápido das simulações num momento de familiarização com a ferramenta CFD. Entretanto, ressalta-se que a alternativa não compromete os resultados, uma vez que o foco consistiu no impacto das vazaduras na volumetria do edifício na ventilação natural.

Em análises futuras, reforça-se a necessidade de considerar o contexto urbano, uma vez que que as intensidades das correntes de ar seriam estruturalmente reduzidas. Da mesma sorte, reconhece-se a necessidade de refinamentos em termos do modelo de turbulência, como o RANS k–ω SST para captar melhor os campos de pressão e padrões de escoamento, além de outros testes para reduzir taxas de relaxamento.

Há consciência de limitações inerentes à simulação de um objeto real, cuja implantação comprometeu avaliações mais específicas da influência das praças elevadas sobre o vento a partir de direções ortogonais como leste e sudeste, recorrendo-se a direção sul como forma de contornar tais limitações.

AGRADECIMENTOS

Ao arquiteto responsável, pela cessão do projeto e demais informações técnicas.

DECLARAÇÃO

Os autores declaram que não utilizaram IA generativa nem tecnologias assistidas por IA no processo de preparação do manuscrito.

REFERÊNCIAS

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

[2] BITTENCOURT, L.; CÂNDIDO, C. **Ventilação Natural em Edificações**. PROCEL EDIFICA: Rio de Janeiro, 2010.

[3] BLOCKEN, B., STATHOPOULOS, T., VAN BEECK J. P. A. J. (2016). **Pedestrian-level wind conditions around buildings: review of wind-tunnel and CFD techniques and their accuracy for wind comfort assessment**. Building and Environment, 100, 50-81. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.02.004

[4] YUAN, C; NG, E. **Building porosity for better urban ventilation in high-density cities - A computational parametric study. Build Environ**. 2012 Apr;50:176-189. doi: 10.1016/j.buildenv.2011.10.023. Epub 2011 Nov 7. PMID: 32288020; PMCID: PMC7126212.

[5] FORTALEZA. **Lei Complementar nº 450, de 27 de novembro de 2025. Institui o Plano Diretor Participativo e Sustentável do Município de Fortaleza e dá outras providências**. Diário Oficial do Município, Fortaleza, 2025.

[6] NG, E. **An investigation into parameters affecting an optimum ventilation design of high density cities**. International Journal of Ventilation, n. 4. V.6, 2008.

[7] _____. **Policies and technical guidelines for urban planning of high-density cities – air ventilation assessment (AVA) of Hong Kong**. Building and Environment 44: 1478–1488, 2009.

[8] MOHAMMADI, M.; CALAUTIT, J. K. **Numerical Investigation of the Wind and Thermal Conditions in Sky Gardens in High-Rise Buildings**, Energies, MDPI, vol. 12(7), pages 1-33, April, 2019.

[9] ALI, R.A., MEGAHED, N.A., SHALDA, M. M. **Natural ventilation as a passive cooling strategy for multi-story buildings: analytic vertical skycourt formations**. City Territ Archit 10, 28 (2023). https://doi.org/10.1186/s40410-023-00212-6

[10] TIEN, P. W.; CALAUTIT, J. K. **Numerical analysis of the wind and thermal comfort in courtyards "skycourts" in high rise buildings**. Journal of Building Engineering, Volume 24, 2019, 100735, ISSN 2352-7102. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100735

[11] DING, M.; SHEN, G.; LIU, Y.; YUAN; H., ZHENG, Q. **Simulating micro-climatic effects of sky-gardens designed with middle-to-high rise buildings. Journal of Building Engineering**, Volume 97, 2024, 110825, ISSN 2352-7102. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110825

[12] OPENFOAM FOUNDATION. **OpenFOAM: the open source CFD toolbox**. Version 24.12. London: OpenFOAM Foundation, 2025. Disponível em: https://www.openfoam.org. Acesso em: 04 fev. 2026.

[13] KASTNER, P.; DOGAN, T. Eddy3D: **A toolkit for decoupled outdoor thermal comfort simulations in urban areas.** Building and Environment, Volume 212, 2022, 108639, ISSN 0360-1323, https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108639

[14] RAHIMI, S.; BERARDI, U.; KASTNER, P. **How Much Computational Complexity is Necessary to Model Relevant Aspects in Microclimate Urban Physics?.** In: Berardi, U. (eds) Multiphysics and Multiscale Building Physics. IABP 2024. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 553. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-8309-0_51

[15] BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT. **BREEAM: Building Research Establishment Environmental Assessment Method**. Watford: BRE, 2024. Disponível em: https://www.breeam.com. Acesso em: 15 abr. 2026.