INFERÊNCIAS PARA A VENTILAÇÃO CRUZADA EM AMBIENTES INTERNOS A PARTIR DA SIMULAÇÃO AERODINÂMICA

Mariana Bittar (1); André Araujo (2); Odenir Almeida (3); Themis Martins (4); Maurício Sousa (5)
(1) Graduanda em Arquitetura e Urbanismo, mariana.bittar@ufu.br, Universidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1i, 105, Campus Santa Mônica 38 400 902, Uberlândia, 34 3239 4058
(2) Doutor, Arquiteto e Urbanista andre.araujo@ufu.br, Universidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1i, 105, Campus Santa Mônica 38 400 902, Uberlândia, 34 3239 4058
(3) Doutor, Engenheiro Mecânico, odenir.almeida@ufu.br, Universidade Federal de Uberlândia, Rodovia BR 050, km 78, Campus Glória 38 410 337, Uberlândia, 34 3239 4411
(4) Mestre, Arquiteta e Urbanista themis.martins@ufu.br, Universidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1i, 105, Campus Santa Mônica 38 400 902, Uberlândia, 34 3239 4058
(5) Graduando em Arquitetura e Urbanismo, mauriciodsousa@ufu.br, Universidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1i, 105, Campus Santa Mônica 38 400 902, Uberlândia, 34 3239 4058

RESUMO
Nos últimos anos, o processo projetual na arquitetura experimentou incrementos significativos decorrentes do projeto computacional, o que permitiu a exploração de alternativas de projeto em tempo real com base na modelagem paramétrica. No projeto do edifício, o entendimento da maioria dos sistemas de medição do contexto da ventilação natural pode direcionar a tomada de decisão a partir das simulações computacionais. Este trabalho apresenta um esforço para determinar o padrão de fluxo da ventilação natural em ambientes internos sob condições específicas, a partir da simulação aerodinâmica no Ansys Fluent® R22 composto por cinco configurações analisadas comparativamente a uma amostra controle. Respeitando as reduções científicas e utilizando diversas soluções de aferição consolidadas na Engenharia Aeronáutica, objetiva-se analisar o padrão do fluxo aerodinâmico em ambientes internos fundamentado a partir do registro de inferências significativas. Verificou-se que o posicionamento diagonal das aberturas acelera substancialmente a velocidade do vento em ambientes internos, fazendo com que essa estratégia de projeto se sobreponha à proposição de mais aberturas quando a intenção é aumentar a velocidade e a renovação do ar interno.

Palavras-chave: Ventilação natural, Ventilação interna. CFD. Arquitetura baseada em simulação.

ABSTRACT
In recent years, the design process in architecture has experienced significant increments arising from computational design, which allowed the exploration of design alternatives in real time based on parametric modeling. In the building's design, understanding most of the measurement systems in the context of natural ventilation could drive the decision-making process from the tests with computational simulations. This paper attempts to determine the flow pattern of natural ventilation in indoor environments under specific conditions from the CFD Ansys Fluent® R22 comprising five configurations analyzed comparatively to a control sample. Respecting the scientific reductions and using computational techniques for measurement from Aeronautics, satisfactory inferences were registered. We concluded that the diagonal positioning of the openings substantially accelerates the wind speed in indoor environments. This design strategy overrides the proposition of more openings when the intention is to increase the speed and renewal of indoor air.

Keywords: Natural ventilation. Indoor ventilation. CFD. Simulation-Based Architectural Design

1. INTRODUÇÃO

Nos processos de simulação ambiental, as variáveis objetivas mais facilmente mensuráveis são as que possuem um comportamento recursivo, como a trajetória solar. No entanto, as estratégias de projeto que visam promover conforto combinam estas com outras variáveis que não possuem o mesmo tipo de comportamento, como a radiação ou o movimento do ar, conforme os estudos seminais sobre a zona bioclimática de Olgyay (1963) e Givoni (1962; 1998). A partir desses autores, a ventilação natural tornou-se uma alternativa de projeto para a remoção de massa térmica das edificações e, embora haja um consenso entre os pesquisadores de que a ventilação cruzada representa benefícios no interior dos edifícios (CIBSE, 2005; ASHRAE, 2019), a epistemologia explícita sobre o seu preciso funcionamento permanece com incertezas. Por vezes, isso pode conduzir à tomada de decisão incerta sobre a influência das aberturas em seus efeitos. Mesmo considerando que as janelas paralelas, por exemplo, elevam os níveis de ventilação interna, a decisão sobre as posições delas pode levar a aumentos ou diminuições consideráveis na velocidade e direção do ar interno.

Os modelos numéricos sobre o fenômeno de ventilação natural no interior dos edifícios demonstram seu comportamento complexo e caótico e muitas destas conclusões advém das pesquisas sobre porosidade a partir Análise Fluidodinâmica Computacional (CFD) e Ventilação Automotiva (HVAC), a fim de determinar condições térmicas e aumento de ruído (TAN; YUAN, 2022). Na Arquitetura, a inserção da ventilação natural ao longo do processo de projeto comumente se dá pela consulta de arquivos climáticos, enquanto a pesquisa científica da área avança em estratégias instrucionais, a partir de teste em túnel de vento e simulações aerodinâmicas com um viés epistemológico (IRWIN; DENOON; SCOTT, 2013; CUCE *et al*., 2019). Estudos qualitativos recentes estas conclusões, a fim de antever os efeitos da ventilação cruzada em ambientes internos, visando orientar as tomadas de decisão em projeto (ZHENG *et al.*, 2018).

Nos últimos anos, a Arquitetura experimentou incrementos significativos decorrentes da simulação computacional, o que permitiu a exploração de alternativas de projeto em tempo real com base na modelagem paramétrica. A integração entre estas ferramentas e a simulação aerodinâmica em CFD permitiu explorar a geometria de edifícios e a percepção simultânea dos efeitos da ventilação (KABOŠOVÁ, 2020; ABBAS; DINO, 2019), inclusive durante os processos documentais em Building Information Modeling (POH *et al.*, 2019). Embora a maioria dos aplicativos utilizadas nos projetos arquitetônicos não possuam instruções CFD nativas, é possível relacionar outras propriedades, como estimativas prévias de desempenho térmico, combinadas com avaliações de ventilação em CFD, para reduzir os ganhos de calor dos edifícios (KWOK *et al.*, 2022).

O uso da ventilação como uma estratégia de resfriamento tem sido objeto de diversas pesquisas que buscam soluções passivas, sem a utilização dos sistemas mecânicos (OBEIDAT; KAMAL; ALMALKAWI, 2021). As simulações de CFD possibilitaram conclusões importantes sobre os elementos utilizados nas coberturas, a fim de reduzir a temperatura nos ambientes internos, a partir das torres ventiladas WEERASURIYAA, 2019), das chaminés para fins de promoção da ventilação (LI et al., 2022; LAURINI *et al.*, 2018), da aerodinâmica das geometrias das cúpulas (KHOSROWJERDI; SARKARDEH; KIOUMARSI, 2021) e da influência da profundidade das varandas (IZADYAR *et al.*, 2020). Simulações semelhantes permitiram aos pesquisadores mensurar a influência de elementos arquitetônicos em bloquear a ventilação cruzada ou promovê-la com um movimento de ar mais significativo. O posicionamento das paredes, por exemplo, pode ser um aspecto crucial para melhorar a distribuição do fluxo de ar interno (HAWENDI, 2017), assim como a geometria e a posição das janelas, que permitem que o vento atinja mais profundidade internamente (ELWAN; DEWAIR, 2019; YIN *et al.*, 2022).

Com o mesmo viés, investigações numéricas e experimentais também buscaram delinear a ventilação natural em ambientes internos com base na análise da envoltória do edifício (LEZCANO; BURGOS, 2021). Alternativas de projeto têm sido propostas em edifícios de escritórios com base em mensurações *in loco* e em modelos numéricos (KWOK et al, 2020; NASROLLAHI; GHOBADI, 2022), embora existam diferenças entre o entendimento da ventilação natural nas etapas de projeto e na vida útil de construção (FU; HAN, 2020). Em prédios escolares tem-se buscado efeitos positivos da ventilação cruzada, principalmente considerando a orientação das janelas e a porcentagem de aberturas (ELSHAFEI *et al.*, 2017; SUBHASHINI; THIRUMARAN, 2019; ZHANG; YIN; WANG, 2022). Por outro lado, efeitos adversos da ventilação natural foram observados em ambientes hospitalares (D'ALICANDRO; MAURO, 2022; DAO; KIM, 2022). Outras pesquisas usaram as simulações de CFD para antever o comportamento do fluxo de ar para a remoção de substâncias (ZHANG *et al.*, 2022), para melhorar o bem-estar da criação de gado e aves (BOVO *et al.*, 2022; KÜÇÜKTOPCU *et al.*, 2022) e para aprimorar a qualidade de algumas culturas (ZHANG; KACIRA, 2022).

A validação CFD para fins de mensuração de efeitos de ventilação natural foi efetuada em contraposição com resultados obtidos em túneis de vento, com o objetivo de confirmar uma medição adequada para diferentes sólidos geométricos, como uma representação simplificada de edifícios (LUKIANTCHUKI *et al.*, 2020), visando efeitos macro de ventilação e dispersão de poluentes (CUI *et al*., 2022; MEI; ZENG; GONG, 2022). Outras

estratégias propuseram várias interações na geometria, para avaliar a sensibilidade das aplicações de CFD no projeto paramétrico (KUMAR *et al*., 2022; KONG *et al*., 2022; ZHANG *et al.*, 2022; SAKIYAMA *et al.*, 2021). Além disso, ferramentas de assistência permitiram estimativas manuais rápidas da perda de calor, a partir de processos de ventilação natural (DONN; BAKSHI, 2019). A tendência em manipular a ventilação natural como estratégia de projeto aumenta a necessidade de pesquisas científicas para um comportamento aerodinâmico mais preciso para a ventilação cruzada interna (SAKIYAMA *et al.*, 2020). Portanto, destaca-se a relevância do entendimento do padrão aerodinâmico em ambientes internos, de acordo com a configuração das aberturas e como isso implica na variação da velocidade e direção do ar, compreendendo o uso de simulações computacionais no auxílio na tomada de decisão mais efetiva no processo projetual.

2. OBJETIVO

Como aspecto inovador, este trabalho apresenta um esforço para determinar o comportamento da ventilação natural em ambientes internos sob condições específicas, a partir de simulações computacionais, foram propostas cinco configurações de aberturas analisadas comparativamente a uma amostra controle. Esses tratamentos buscaram reproduzir as estratégias de projeto conhecidas por ventilação cruzada, que contribuem no entendimento do fluxo aerodinâmico no momento da decisão projetual.

3. MÉTODO

A ventilação cruzada natural de um edifício baixo foi considerada para investigar numericamente os mecanismos de fluxo de ar e seus impactos na vida humana dentro de uma sala amostral hipotética. Inicialmente, considerou-se trabalhar com um protótipo físico que apresenta condições existentes na instituição. As dimensões do protótipo são proporcionais a um ambiente construído em escala real de 54 m² (9 x 6 m), que representa a configuração de módulos repetitivos do Bloco 1I da Universidade Federal de Uberlândia. A configuração básica apresenta apenas aberturas do tipo janelas, em posições opostas, para fins analíticos. Além disso, essas aberturas recortadas no protótipo não representam totalmente as autênticas molduras existentes nesses edifícios devido às reduções impostas pela experimentação e simulação.

Desta forma, o protótipo representa dimensões, em escala reduzida de 1:25 visando condições similares para testes com túnel de vento, previsto para etapas subsequentes desta pesquisa. Esta escala foi definida para que pudesse ser introduzida no túnel de vento existente. Em uma primeira etapa, o protótipo foi originalmente criado para atingir este propósito com as seguintes dimensões: 300 × 450 × 150 mm (XYZ). A altura do edifício será utilizada, a partir de agora, para dimensionar as principais variáveis descritivas deste problema. Esta estrutura retangular possui 6 (seis) janelas de ventilação dispostas simetricamente em relação ao eixo do modelo, sendo 3 aberturas de ventilação na fachada frontal e 3 saídas de ventilação na fachada posterior. Todas as aberturas têm as mesmas dimensões w × h = 120 × 75 mm e a distância horizontal entre as aberturas é de 22,5 mm (Figura 1).

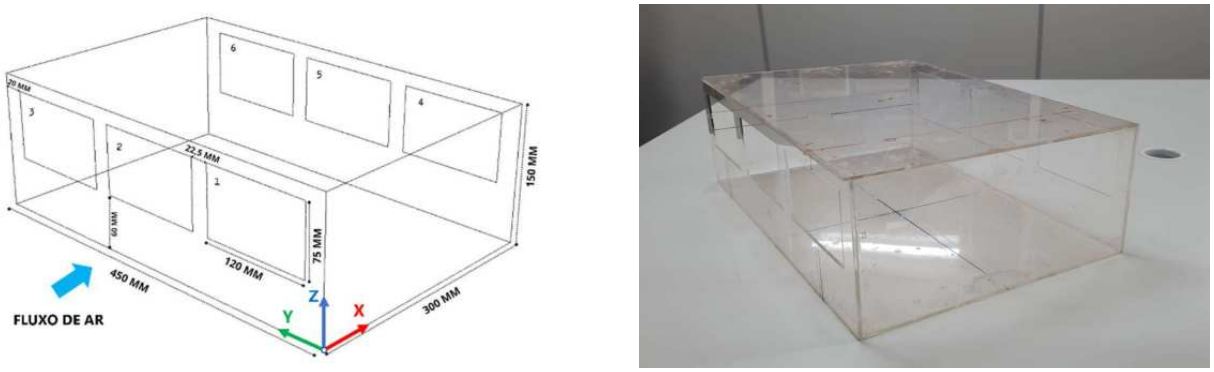

Figura 1 – Características do protótipo da sala amostral hipotética com seis aberturas: (A) dimensões e posição das janelas, com respectiva numeração; (B) espelhamento com o protótipo físico para etapas posteriores de mensuração empírica. Fonte: Autores (2023).

Para testar o efeito em diferentes padrões de ventilação cruzada, todas as entradas e saídas podem ser abertas e fechadas independentemente. Dependendo do número e da localização das janelas, foram considerados os seguintes casos para análise:

- Controle: ventilação cruzada face a face através de seis aberturas
- Tratamento 1: ventilação cruzada diagonal pelas janelas 1 e 6
- Tratamento 2: ventilação cruzada face a face através das janelas 2 e 5
- Tratamento 3: ventilação cruzada face a face com janela traseira 5 fechada
- Tratamento 4: ventilação cruzada face a face com as janelas frontais 1 e 3 fechadas
- Tratamento 5: ventilação cruzada diagonal pelas janelas 3 e 4

3.1. Modelagem numérica

Exatamente a mesma configuração de modelo de ventilação cruzada natural impulsionada pelo vento planejado para os experimentos posteriores com túnel de vento (WDN-CV), com velocidade constante de 5 ms^{-1}, foi simulada no código CFD comercial Ansys Fluent® R22. A suposição básica para a simulação CFD inclui um fluxo tridimensional, totalmente turbulento e incompressível. O escoamento interno e externo foi modelado usando o modelo de turbulência *Realable k-ε*. Esta técnica está bem estabelecida no campo da pesquisa de ventilação natural e suas limitações e restrições foram registradas por diversos trabalhos (OUYANG; HAGHIGHAT, 1991; BLOCKEN; CARMELIET; STATHOPOULOS, 2007). O código CFD utilizou a abordagem do Método dos Volumes Finitos (FVM) e empregou o algoritmo de acoplamento velocidade-pressão do Método Semi-Implicito para Equações Ligadas à Pressão (SIMPLE) com a discretização *upwind* de segunda ordem conforme sugerido na literatura. As equações governantes não serão repetidas aqui, mas estão disponíveis no manual do aplciativo (MANUAL, 2022).

Apesar do conhecimento de que diferentes modelos de turbulência têm sido usados para simulações WDN-CV e que alguns modelos melhorados podem levar a melhores resultados (PHILLIPS; SOLIGO, 2019), o objetivo principal desta abordagem foi usar um modelo *k-ε* tradicional e bem validado para obter a campo de fluxo médio e manter o foco na análise de fluxo. Segundo o trabalho de (CERMAK *et al.*, 1984), o escoamento ao redor de um edifício (*bluff body*) é totalmente turbulento quando $ReB > 2 \times 104$, enquanto o escoamento de ar descarregado através de uma janela (abertura) se tornaria turbulento quando $ReW > 300$ (CERMAK *et al.*, 1984). Neste estudo o escoamento ao redor do edifício é regido por um número de *Reynolds* de aproximadamente 50000 enquanto nas aberturas é próximo a 23000, sendo assim o escoamento considerado foi totalmente turbulento.

3.2. Dimensionamento e abordagem de malha

O espaçamento da malha é um parâmetro fundamental para permitir não apenas resultados precisos, mas também confiáveis, a partir do funcionamento adequando da malha e esforço computacional necessário. Considerando isso, quatro diferentes tamanhos de malha foram estudados para alcançar tais objetivos. As simulações computacionais usaram malhas tetraédricas não estruturadas com os seguintes parâmetros de malha global (*Meshes*) (Tabela 1).

Tabela 1: Parâmetros de malha para as configurações de malhas tetraédricas não estruturadas.

Configuração	**Número de Elementos**	**Tamanho da parede de barlavento**	**Camada de prisma**
Mesh #1	400951	~ 8,7 x 10^{-3}	nenhum
Mesh #2	540801	~ 7,8 x 10^{-3}	0,6 x 10^{-4} m
Mesh #3	1216556	~ 4,5 x 10^{-3}	
Mesh #4	2719642	~ 3,3 x 10^{-3}	
Mesh #5	4344228	~ 2,7 x 10^{-3}	

Fonte: Autores (2023).

O dimensionamento da malha nº 3 (*Mesh #3*) é representado na Figura 2 com o detalhe do refinamento na parede de barlavento próxima ao piso do protótipo. Como visto, o menor espaçamento da malha foi definido para a parede próxima (dentro e fora do edifício), a fim de capturar o efeito de limite no campo de fluxo

corretamente. Esse refinamento da malha próximo à parede seguiu as regras da abordagem RANS, onde y+ (relação entre a distância do primeiro ponto da grade até a borda sólida) foi mantida entre 1 e 30 (Figura 2).

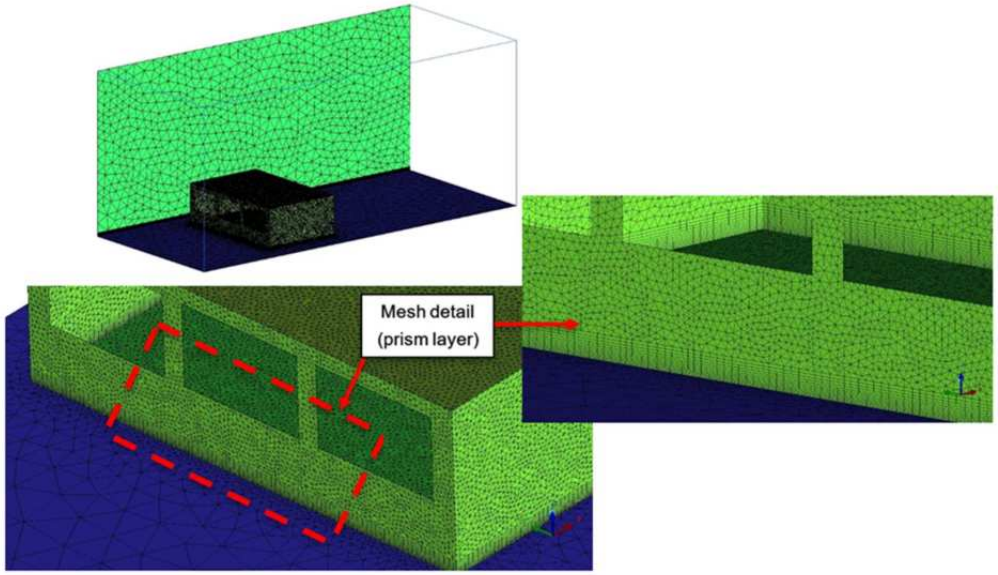

Figura 2: Detalhes da malha utilizada nesta pesquisa (Mesh#3 com 2,7 × 106 elementos). Fonte: Autores (2023).

Uma abordagem de validação foi necessária para mostrar dados confiáveis, bem como as limitações do modelo de turbulência *k-ε* realizável neste estudo. Um conjunto de verificações de validação foi realizado, a saber, a influência do espaçamento da malha nos dados, as medições da velocidade *u* nas entradas e saídas do protótipo, a fim de verificar a taxa de fluxo volumétrico, a distribuição de velocidade *u* ao longo de uma linha horizontal dentro do protótipo e o vento medição da camada limite. A partir destas aferições, os resultados obtidos são mostrados em sequência.

4. RESULTADOS

A primeira simulação analisada foi a situação Controle: ventilação cruzada face a face através das seis aberturas, na qual se propôs a distribuição de velocidade adimensional em uma linha horizontal colocada na posição média-altura das aberturas de entrada com saída para as respectivas janelas traseiras. Os vetores de fluxo e contornos da simulação CFD foram obtidos no plano horizontal, posicionado no meio das aberturas. Na faixa intermediária às janelas foi verificado o padrão de fluxo de entrada e saída através do campo vetorial. É fundamental ressaltar que a resposta da simulação do Ansys Fluent® R22 é um quadro estático com um comportamento médio de velocidades e direções por cores e vetores. Apesar da discrepância dos valores de velocidade no meio do ambiente, o valor de pico no local de entrada é quase atingido, assim como a recuperação da velocidade na abertura de saída. Pode-se notar a interferência dos pontos fechados que provocam uma visualização de uma forma com menores velocidades que se arrastam e se unem numa massa central, também com menores velocidades. A abertura central de saída da ventilação (5) tem velocidades consideravelmente menores que as saídas laterais (4 e 6). Isso pode explicar o quão bem a vazão volumétrica é alcançada nas aberturas de entrada e de saída como poderá ser observado nos tratamentos adiante (Figura 3).

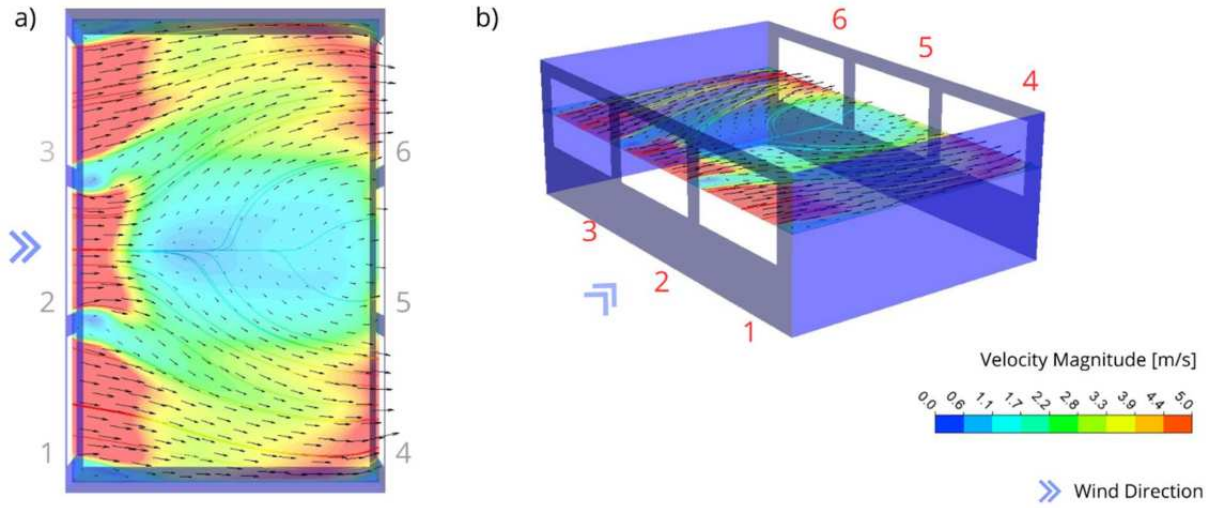

Figura 3: Simulação aerodinâmica no Ansys Fluent® R22: (A) Vista superior do plano horizontal posicionado no meio das janelas; (B) Vista em perspectiva do plano horizontal posicionado no meio das janelas. Fonte: Autores (2023).

4.1. Ventilação cruzada face a face: Tratamentos 2, 3 e 4

O traço comum destes tratamentos é uma forma de arrasto do fluxo de ar que adentra o protótipo e, logo em seguida, se desloca no sentido contrário à entrada de ar. A partir de um movimento que adentra as janelas frontais, esse fluxo se comprime no peitoril das janelas opostas e cria vórtices mais estreitos do que na situação Controle amostral. Além disso, os vórtices no plano vertical são vistos com mais clareza do que no controle de amostra.

No Tratamento 2, fluxos de ar paralelos podem ser percebidos no plano intermediário, com grandes acelerações nas laterais, reproduzindo a simetria das janelas abertas. O comportamento de espelhamento é esperado, uma vez que as janelas abertas estão em posições opostas e simétricas, o que não ocorre nos outros tratamentos deste grupo. Essa simetria ou espelhamento é mais precisa do que na situação da amostra Controle (Figura 4a, b). Além da área central apresentar velocidades consideravelmente menores e condições de menor exposição à ventilação.

No Tratamento 3, que reproduz a forma de um funil, verifica-se o deslocamento de ar na zona central. Próximo ao peitoril das janelas 4, 5 e 6, o movimento do ar acontece no verso. Foram observados vórtices mais estreitos do que na amostra Controle e uma deposição mais significativa de vento estacionário nas janelas 1 e 3. Zonas com pouca atividade nos cantos do protótipo se assemelham à amostra Controle (Figura 4c, d). Além disso, pode-se constatar, de acordo com a literatura, a aceleração na abertura de saída.

No Tratamento 4, que reproduz a forma de um funil invertido, o deslocamento de ar no plano intermediário é substancialmente mais intenso no corredor central. Esse movimento é mais bem observado do centro para as laterais e apresenta velocidades menores conforme se afasta da área central. Isso mostra que a ventilação de entrada neste caso promove vórtices maiores, advindos das periferias para o centro do protótipo (Figura 4e, f). Além de mostrar que na abertura de entrada tem-se maiores velocidades que nas laterais do ambiente.

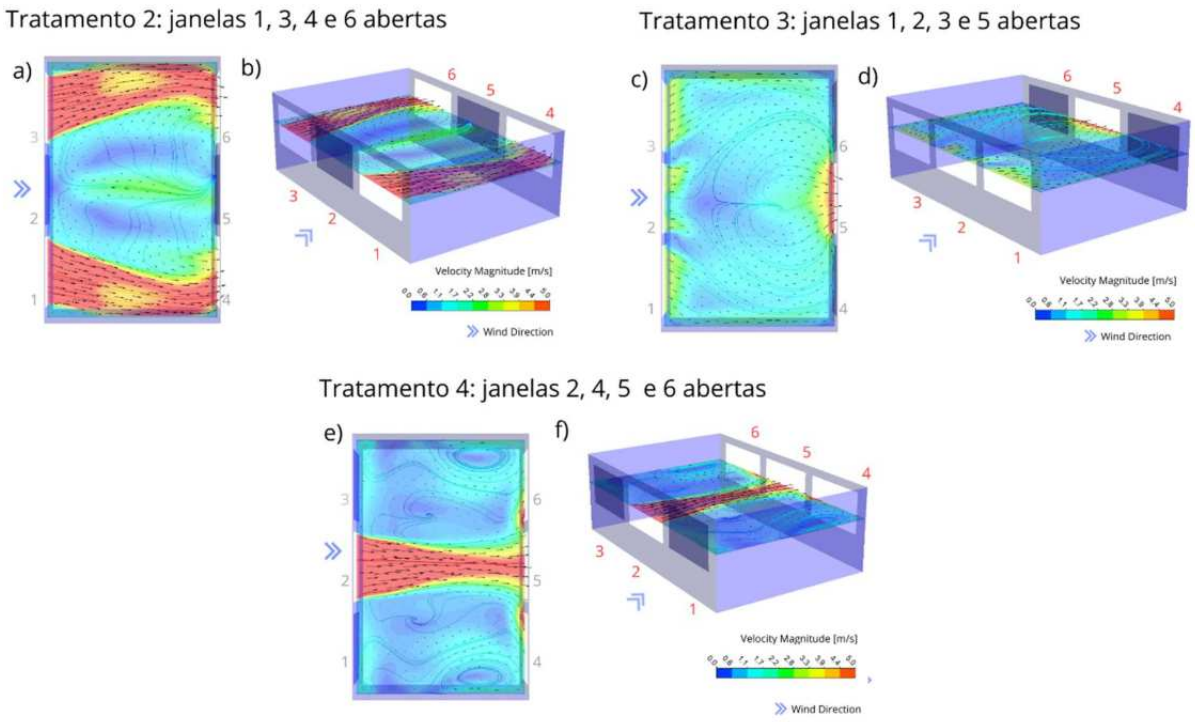

Figura 4: Simulação aerodinâmica no Ansys Fluent® R22: (A) Tratamento 2: vista superior do plano horizontal posicionado no meio das janelas; (B) Tratamento 2: vista em perspectiva do plano horizontal; (C) Tratamento 3: vista superior do plano horizontal posicionado no meio das janelas; (D) Tratamento 3: vista em perspectiva do plano horizontal; (E) Tratamento 4: vista superior do plano horizontal posicionado no meio das janelas; (F) Tratamento 4: vista em perspectiva do plano horizontal. Fonte: Autores (2023).

Em uma comparação geral com a amostra Controle os tratamentos face a face apresentam poucas situações em que as velocidades de entrada e saída se mantém constantes. O Tratamento 2 apresenta velocidades maiores nas laterais e menores na área central, já o Tratamento 4 apresente velocidades consideráveis no corredor central e as laterais menos ventiladas. Enquanto o Tratamento 3 apresenta, no ambiente, de forma geral as menores velocidades.

4.2. Ventilação cruzada diagonal: Tratamentos 1 e 5

Velocidades muito superiores e uma distribuição maior da camada de ar foram percebidas nos tratamentos diagonais. Nesses casos, o deslocamento ocorreu na diagonal quando as camadas de ar são substancialmente aceleradas para a saída. Foram observados vórtices nos planos horizontais e verticais, mas pela análise conjunta das velocidades dos planos intermediários, conclui-se que estes vórtices apresentam torções diagonais, o que configura uma zona de ventilação espiral muito mais acelerada. Percebe-se também uma área considerável com velocidades muito menores muito próximas à área central. Os fluxos de ar primário se mantêm constante e, em alguns pontos a velocidade observada foi superior à velocidade de entrada de $5ms^{-1}$. Esse espraiamento de partículas de ar são indícios de vórtices em torção, fazendo com que mais quantidades de ar consigam se desprender dos fluxos das camadas baixas, atingindo as camadas mais próximas às janelas, sendo então “capturados” e empurrados para fora do protótipo pelos fluxos de ar de grandes velocidades nestas regiões.

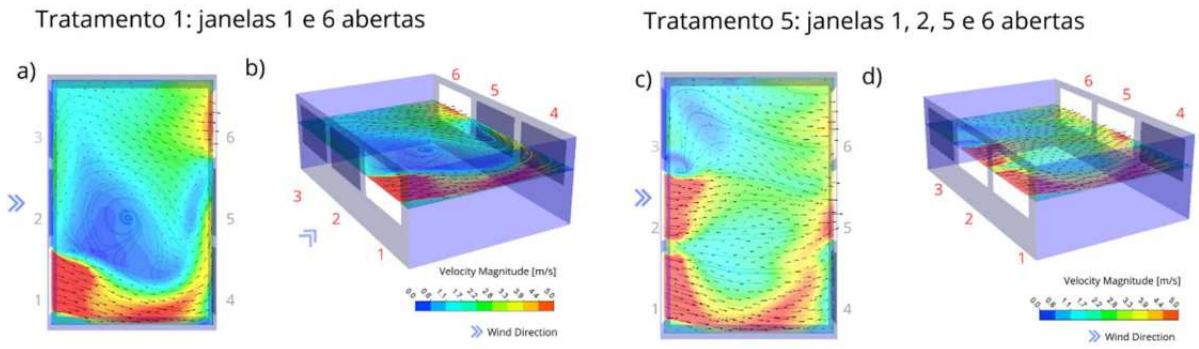

Figura 5: Simulação aerodinâmica no Ansys Fluent® R22: (A) Tratamento 1: vista superior do plano horizontal posicionado no meio das janelas; (B) Tratamento 1: vista em perspectiva do plano horizontal; (C) Tratamento 5: vista superior do plano horizontal posicionado no meio das janelas; (D) Tratamento 5: vista em perspectiva do plano horizontal. Fonte: Autores (2023).

Embora as diferenças arquitetônicas entre os Tratamentos 1 e 5 sejam significativas, uma vez que o Tratamento 5 possui o dobro em área de janelas que o Tratamento 1, os ganhos do primeiro em relação ao segundo não são tão substanciais. As regiões centrais do plano intermediário do Tratamento 5 possuem velocidades menores, mas apresentam também uma maior dispersão que o Tratamento 1. Além disso, nos dois casos o experimento mostrou velocidades mais baixas sob as janelas fechadas no lado de barlavento.

5. CONCLUSÕES

As principais incertezas experimentais da simulação computacional se concentram na representação média dos movimentos de movimentos em planos discretos, como uma fotografia do comportamento médio das ventilações em fluxos constantes. Respeitando essas reduções científicas, concluímos que o posicionamento diagonal das aberturas acelera substancialmente a velocidade do vento em ambientes internos, tornando essa estratégia de projeto mais preponderante do que a proposição de mais aberturas, quando a intenção é aumentar a velocidade e renovação do ar interior. Em uma analogia, as partículas de ar podem funcionar como pessoas de uma multidão que desejam adentrar em um ambiente interno. Se houver muitas possibilidades de entrada, a multidão se moverá em passos mais lentos. Por outro lado, um menor número de aberturas posicionadas na diagonal significa um caminho mais longo e estreito a ser percorrido, permitindo maiores acelerações e, portanto, maiores velocidades.

Atualmente, entre os temas mais discutidos está a qualidade do ar no interior dos edifícios, principalmente no que se refere à saúde e conforto de seus ocupantes. Segundo esta e outras descobertas científicas, entender e controlar a ventilação por aberturas pode ter relevância na qualidade do ar respirado por muitas pessoas, que às vezes passam várias horas respirando em ambientes fechados com poucas trocas de ar. Aspectos como filtragem de poluentes, conforto térmico, bem-estar e controle de doenças respiratórias tornaram-se considerações essenciais no projeto arquitetônico. Desta forma, a adoção de medidas capazes de conferir qualidade e renovação do ar interior, como o posicionamento de aberturas, podem representar decisões cruciais para se prevenir o contágio de vírus presentes no ar, como o SARS-CoV-2, mitigando os efeitos nocivos que afetam a saúde e a capacidade produtiva das pessoas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBAS, G.; DINO, İ. A parametric design method for CFD-supported wind-driven ventilation. IOP Conference Series: **Materials Science and Engineering**, Reino Unido, v. 609, p. 1-7, 2019. DOI: 10.1088/1757-899X/609/3/032010

ASHRAE – AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS **ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2019**. Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality (2019).

BLOCKEN, B.; CARMELIET, J. CFD evaluation of wind speed conditions in passages between parallel buildings—effect of wall-function roughness modifications for the atmospheric boundary layer flow. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 95, p. 941-962, 2007. DOI: 10.1016/j.jweia.2007.01.013

BOVO, M.; SANTOLINI, E.; BARBARESI, A.; P. TASSINARI, P.; TORREGGIANI, D. Assessment of geometrical and seasonal effects on the natural ventilation of a pig barn using CFD simulations. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 193, p. 1-17, 2022. DOI: 10.1016/j.compag.2021.106652

CERMAK, J. E.; POREH, M.; PETERKA, J. A.; AYAD, S. S. Wind tunnel investigations of natural ventilation, **Journal of Transportation Engineering**, v. 110, p. 67–79, 1984.

CIBSE – Chartered Institution of Building Services Engineers. **Natural ventilation in non-domestic buildings**, Londres, 2005. ISBN: 1 903287 56 1

CUCE, E.; SHER, F.; SADIQ, H.; CUCE, P.; BESIR, A. Sustainable ventilation strategies in buildings: CFD research, **Sustainable Energy Technologies and Assessments**. Vol. 36, p. 1-10, 2019. DOI: 10.1016/j.seta.2019.100540

CUI, P.; CHEN, W.; WANG, J.; ZHANG, J.; HUANG, Y.; TAO, W. Numerical studies on issues of Re-independence for indoor airflow and pollutant dispersion within an isolated building. **Building Simulation**, v. 15, p. 1259-1276, 2022. DOI: 10.1007/s12273-021-0846-z

D'ALICANDRO, A.; MAURO, A. Effects of operating room layout and ventilation system on ultrafine particle transport and deposition. **Atmospheric Environment**, v. 270, p. 1-15, 2022. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2021.118901

DAO, H.; KIM, K. Behavior of cough droplets emitted from Covid-19 patient in hospital isolation room with different ventilation configurations. **Building and Environment**, v. 209, p. 1-11, 2022. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108649

DONN, M. R.; BAKSHI, N. A natural ventilation "calculator": The challenge of defining a representative 'performance sketch' in practice and research. **Materials Science and Engineering**, v. 609, p. 1-7, 2019. DOI:10.1088/1757-899X/609/7/072045

ELSHAFEI, G.; NEGM, A.; BADY, M.; SUZUKI, M.; IBRAHIM, M. Numerical and experimental investigations of the impacts of window parameters on indoor natural ventilation in a residential building. **Energy and Buildings**, v. 141, p. 321-332, 2017. DOI:10.1016/j.enbuild.2017.02.055

ELWAN, M.; DEWAIR, H. Lattice windows as a natural ventilation strategy in hot, humid regions. **Simulation for a Sustainable Built Environment**, v. 397, p, 1-15, 2019. DOI: 10.1088/1755-1315/397/1/012022

FU, X.; HAN, M. Analysis of Natural Ventilation Performance Gap between Design Stage and Actual Operation of Office Buildings. **Web of Conferences**, v. 172, p. 1-6, 2020. DOI: 10.1051/e3sconf/20201720 0 9 10

GIVONI, B. Basic **Study of Ventilation Problems in Housing in Hot Countries**. Haifa: Building Research Station, Technion, Israel Institute of Technology, 1962

GIVONI, B. Climate **Considerations in Building and Urban Design**. Londres: John Wiley & Sons, 1998. ISBN: 978-0-471-29177-0

HAWENDI, S.; GAO, S. Impact of an external boundary wall on indoor flow field and natural cross-ventilation in an isolated family house using numerical simulations. **Journal of Building Engineering**, v.10, p. 109-123, 2017. DOI: 10.1016/j.jobe.2017.03.002

IRWIN, P.; DENOON, R.; SCOTT, D. **Wind Tunnel Testing of High-Rise Buildings**. Londres, 2013. ISBN: 9780415714594

IZADYAR, N.; MILLER, W.; RISMANCHI, B.; GARCIA-HANSEN, V. Numerical simulation of single-sided natural ventilation: Impacts of balconies opening and depth scale on indoor environment, IOP Conference Series: **Earth and Environmental Science**, Reino Unido, v. 463, p. 1-6, 2020. DOI: 10.1088/1755-1315/463/1/012037

KABOŠOVÁ, L. Analysis of wind-adaptive architecture. IOP Conference Series: **Materials Science and Engineering**, Reino Unido, v. 867, p. 1-8, 2020. DOI: 10.1088/1757-899X/867/1/012014

KHOSROWJERDI, S.; SARKARDEH, H.; KIOURMARSI, M. Effect of wind load on different heritage dome buildings. **European Physical Journal Plus**, v. 136 p. 1-18, 2021. DOI: 10.1140/epjp/s13360-021-02133-0

KONG, X; CHANG, N.; LI, H.; LI, W. Comparison study of thermal comfort and energy saving under eight different ventilation modes for space heating. **Building Simulation**, v. 15, p. 1323-1337, 2022. DOI: 10.1007/s12273-021-0814-7

KÜÇÜKTOPCU, E.; CEMEK, B.; SIMSEK, H.; NI, J. Computational Fluid Dynamics modeling of a broiler house microclimate in summer and winter. **Animals**, v. 12, p .1-16, 2022. DOI: 10.3390/ani12070867

KUMAR, N.; BARDHAN, R.; KUBOTA, T.; TOMINAGA, Y.; SHIRZADI, M. Parametric study on vertical void configurations for improving ventilation performance in the mid-rise apartment building. **Building and Environment**, v. 215, p. 1-16, 2022. DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.108969

KWOK, H.; CHENG, J.; LI, A.; LAU, A. Impact of shaft design to thermal comfort and indoor air quality of floors using BIM technology. **Journal of Building Engineering**, v. 51, p. 1-19, 2022. DOI: 10.1016/j.jobe.2022.104326

KWOK, H.; CHENG, J.; LI, A.; TONG, J.; LAU, A. Multi-zone indoor CFD under limited information: An approach coupling solar analysis and BIM for improved accuracy. **Journal of Cleaner Production**, v. 244, p. 1-14, 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118912

LAURINI, E.; VITA, M.; BERARDINIS, P.; FRIEDMAN, A. Passive Ventilation for Indoor Comfort: a comparison of results from monitoring and simulation for a historical building in a temperate climate. **Sustainability**, v. 10, p. 1-20, 2018. DOI: 10.3390/su10051565

LEZCANO, R; BURGOS, M. Airflow analysis of the Haida plank house, a breathing envelope. **Energies**, v. 14, p. 1-14, 2021. DOI:10.3390/en14164871

LI, W.; SUBIANTORO, A.; MCCLEW, I.; SHARMA, R. CFD simulation of wind and thermal-induced ventilation flow of a roof cavity. **Building Simulation**, v. 15, p. 1611-1627, 2022. DOI: 10.1007/s12273-021-0880-x

LUKIANTCHUKI, M. A.; SHIMOMURA, A. P.; SILVA, F. M.; CARAM, R. M. Wind tunnel and CFD analysis of wind-induced natural ventilation in sheds roof building: impact of alignment and distance between sheds. **International Journal of Ventilation**, v. 19, p. 141-162, 2020. DOI: 10.1080/14733315.2019.1615219

MANUAL, U. D. F. ANSYS FLUENT 22.0. **Theory Guide**, Ansys INC, Pensilvânia, 2022.

MEI, X.; ZENG, C.; GONG G. Predicting indoor particle dispersion under dynamic ventilation modes with high-order Markov chain model. **Building Simulation**, v. 15, p. 1243-1258, 2022. DOI: 10.1007/s12273-021-0855-y

NASROLLAHI, N.; GHOBADI, P. Field measurement and numerical investigation of natural cross-ventilation in high-rise buildings; Thermal comfort analysis. **Applied Thermal Engineering**, v. 211, p. 1-25, 2022. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118500

OBEIDAT, B.; KAMAL, H.; ALMALKAWI, A. CFD Analysis of an Innovative Wind Tower Design with Wind-Inducing Natural Ventilation Technique for Arid Climatic Conditions. **Journal of Ecological Engineering**, v. 22, p. 86-97, 2021. DOI: 10.12911/22998993/130894

OLGYAY, V.; Olgyay, A. **Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism**. Princeton: University Press, Nova Jersey, 1963. ISBN: 9780691169736

OUYANG, K.; HAGHIGHAT, F. A procedure for calculating thermal response factors of multi-layered walls-state space method. **Building and Environment**, v. 26 (2), p. 173–177, 1991. DOI: 10.1016/0360-1323(91)90024-6

PHILLIPS, D. A.; SOLIGO, M. J. Will CFD ever replace wind tunnels for building wind simulations? **International Journal of High-Rise Buildings**, v. 8 n. 2, p. 107-116, 2019. DOI: 10.21022/IJHRB.2019.8.2.107

SAKIYAMA, N. R. M.; FRICK, J.; BEJAT, T; GARRECHT, H. Using CFD to Evaluate Natural Ventilation through a 3D Parametric Modeling Approach. **Energies**, v.14, p. 1-27, 2021. DOI: 10.3390/en14082197

SAKIYAMA, N.R.M.; CARLO, J. C.; FRICK, J.; GARRECHT, H. Perspectives of naturally ventilated buildings: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 130, p. 1-18, 2020. DOI: 10.1016/j.rser.2020.109933

SUBHASINI, S.; THIRUMARAN, K. CFD simulations for examining natural ventilation in the learning spaces of an educational building with courtyards in Madurai. **Building Services Engineering Research and Technology**, v. 41, p. 466 – 479, 2019. DOI: 10.1177/0143624419878798

TAN, L.; YUAN, Y. Computational fluid dynamics simulation and performance optimization of an electrical vehicle Air-conditioning system. **Alexandria Engineering Journal**, Alexandria, v. 61, p. 315-328, 2022. DOI: 10.1016/j.aej.2021.05.001

WEERASURIYAA, U.; ZHANGA, GANA, V.; TAN, Y. A holistic framework to utilize natural ventilation to optimize energy performance of residential high-rise buildings. **Building and Environment**, v. 153 p 218 – 232, 2019. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.02.027

ZHANG, T.; ZHANG, Y.; GAO, A.; RAO, Y.; ZHAO, Q. Study on the kinetic characteristics of indoor air pollutants removal by ventilation. **Building and Environment**, v. 207, p. 1-8, 2022. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108535

ZHANG, X.; WEERASURIYA, A. U.; WANG, J.; LI, C. Y.; CHEN, Z.; TSE, K. T. Cross-ventilation of a generic building with various configurations of external and internal openings. **Building and Environment**, v. 207, p. 1-18, 2022b. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108447

ZHANG, Y.; KACIRA, M. Analysis of climate uniformity in indoor plant factory system with computational fluid dynamics (CFD). **Biosystems Engineering**, v. 220, p.73-86, 2022. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2022.05.009

ZHANG, Z.; YIN, W.; WANG, T.; O'DONOVAN, A. Effect of cross-ventilation channel in classrooms with interior corridor estimated by computational fluid dynamics. **Indoor and Built Environment**, v. 31, p. 1047-1065, 2022a. DOI: 10.1177/1420326X211054341

ZHENG, X.; SHI, Z.; XUAN, Z.; QIAN, H. **Natural Ventilation**, Handbook of Energy Systems in Green Buildings. p. 1227-1270, 2018.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelos recursos financeiros aplicados no financiamento do projeto.