XIX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
ENTAC 2022

Ambiente Construído: Resiliente e Sustentável
Canela, Brasil, 9 a 11 novembro de 2022

Análise da ventilação natural no Hospital Escola de São Carlos por meio de simulações CFD

Analysis of natural ventilation at School Hospital of São Carlos through CFD simulations

Ana Clara de Almeida Xavier
Universidade de São Paulo | São Carlos | Brasil | anaclaraxavier48@usp.br
Marieli Azoia Lukiantchuki
Universidade Estadual de Maringá | Maringá | Brasil | malukiantchuki2@uem.br
Kelen Almeida Dornelles
Universidade de São Paulo | São Carlos | Brasil | kelend@usp.br

Resumo

Atualmente, a COVID-19 nos instiga a refletir sobre a ventilação natural e a qualidade do ar nos ambientes construídos, principalmente em ambientes hospitalares. Assim, o objetivo desse trabalho é analisar o desempenho da ventilação natural no Hospital Escola de São Carlos. Como método, adotou-se a simulação por Dinâmica dos Fluidos Computacionais. São apresentados resultados de ordem quantitativa e qualitativa que indicaram que o sistema de ventilação adotado no projeto proporciona níveis de ventilação natural satisfatórios para os usuários. Além disso, a troca do ar acontece constantemente, aumentando a qualidade do ar interno e potencialmente diminuindo a transmissão de patógenos aéreos.

Palavras-chave: Hospital Escola de São Carlos, ventilação natural, simulações CFD, conforto térmico, qualidade do ar interno.

Abstract

Nowadays, COVID-19 instigates us to reflect on natural ventilation and air quality in built environments, especially in health environments. Therefore, this work aims to analyze the performance of natural ventilation at Hospital Escola de São Carlos. Computational Fluid Dynamics simulation was embraced as the method. Quantitative and qualitative results are presented, indicating that the ventilation system adopted in the project provides satisfactory levels of natural ventilation for users. In addition, air exchange happens constantly, increasing indoor air quality and potentially decreasing the transmission of airborne pathogens.

Keywords: School Hospital of São Carlos, natural ventilation, CFD simulations, thermal comfort, indoor air quality.

Como citar:
XAVIER, A. C. A; LUKIANTCHUKI, M. A.; DORNELLES, K. A. Análise da ventilação natural no Hospital Escola de São Carlos por meio de simulações CFD. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 19., 2022, Canela. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2022. p. XXX-XXX.

INTRODUÇÃO

A ventilação natural, além de ser uma importante estratégia de resfriamento passivo das edificações em climas quentes e úmidos, como na maior parte do território brasileiro, ela também exerce a função de manter a qualidade dos ambientes internos a partir da renovação constante do ar interno pelo ar externo, auxiliando, portanto, no controle da disseminação de patógenos aéreos (GIVONI, 1976; BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2008).

No início de 2020, o mundo se deparou com uma pandemia de proporções alarmantes. A síndrome conhecida como SARS-CoV-2 (*Severe Acute Respiratory Syndrome* advinda do *Corona Virus* 2) ou COVID-19 é uma doença respiratória que está presente no ar em forma de pequenas partículas. Dessa forma, sua principal forma de transmissão é por via aérea em locais de potencial aglomeração e, principalmente, em ambientes internos não ventilados e fechados (WHO, 2020; MEGAHED, GHONEIM, 2021; WANG et al., 2021; SUN, ZHAI, 2020; KONG et al., 2021, CORREIA et al., 2020).

Diante disso, muitas discussões a respeito das formas de controle da transmissão aérea de patógenos nos ambientes internos vêm sendo feitas e, nesse contexto, a ventilação natural e a renovação do ar interno ganham destaque. Para Buonanno, Morawska e Stabile (2020) e Miller *et al.* (2020), ambientes fechados com pouca ventilação, com usuários falando alto ou fazendo exercícios, permitem uma transmissão aérea altamente virulenta para a disseminação do SARS-CoV-2.

Além dos materiais orientativos elaborados pelas autoridades públicas, diversos estudos estão sendo desenvolvidos no intuito de mitigar a propagação viral, tendo grande parte deles recomendado o uso da ventilação natural com o objetivo de promover a troca de ar nos ambientes, elevando a Qualidade do Ar Interno (QAI) (ABUHEGAZY et al., 2020; EUROPEAN CENTRE FOR DISEASE PREVENTION AND CONTROL, 2020; CANADIAN COMMITTEE ON INDOOR AIR QUALITY, 2020; MELIKOV, 2020; MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO, 2020; MORAWSKA e MILTON, 2021; SCHOOLS FOR HEALTH, 2020; UNICEF, 2020; ZEMOURI et al., 2020).

A importância da qualidade do ar ganha destaque em ambientes assistenciais de saúde. Nesse sentido, Lima (2012) já havia destacado que os ambientes hospitalares precisam de um alto controle de assepsia do sistema de condicionamento artificial por ele ser um potencial proliferador de bactérias e fungos nos dutos e tubulações. Assim, cada vez mais, o uso da ventilação natural se configura como uma boa estratégia na redução do risco de infecção hospitalar e em aspectos de salubridade, por configurar um ambiente com alta taxa de renovação de ar interno (LUKIANTCHUKI, 2010; DE QUADROS; MIZGIER, 2017). Segundo Prather *et al.,* (2020) e Tellier *et al*., (2019) a transmissão aérea também pode ser parcialmente responsável pelas altas taxas de transmissão secundária para a equipe médica, bem como surtos em instalações de enfermagem.

Nesse contexto, destaca-se a figura do arquiteto João Filgueiras Lima, o Lelé, que é mundialmente conhecido pelo uso de estratégias passivas de conforto e salubridade do ar em edificações hospitalares (LUKIANTCHUKI, 2010; MONTERO, 2006). Segundo

Toledo (2020), diante do contexto da pandemia da COVID-19, mais do que nunca será preciso revisitar a obra de Lelé que, ao utilizar recursos como ventilação e iluminação natural, bem como a paisagem natural dentro dos projetos, já nos dava uma pista de como deveriam ser os hospitais do futuro.

O Lelé, ao longo de toda a sua trajetória, produziu diversos projetos hospitalares que são conhecidos como a Rede Sarah de Hospitais de Reabilitação. Segundo Lukiantchuki (2010), é possível notar a evolução das estratégias de projeto e conforto térmico ao longo de sua obra, com a clara preocupação na melhoria da qualidade de sua arquitetura e, consequentemente, de seus usuários. O Hospital Escola de São Carlos (HU-UFSCar) é um projeto de hospital geral público contemporâneo ao projeto da Rede Sarah do Rio de Janeiro, a última unidade. Diante disso, o projeto do HU apresenta diversas estratégias de projeto que potencializam a ventilação natural, a salubridade dos ambientes e, consequentemente, o conforto e saúde dos usuários.

Diante dessas questões, fica evidente a necessidade de estudos a respeito dos projetos e dos sistemas de ventilação natural das obras de Lelé. Para isso, diversos são os métodos para predição do desempenho da ventilação natural, como o uso da simulação computacional por dinâmica dos fluidos computacionais – CFD, túneis de vento e ensaios da mesa d'água. Nesse contexto, o uso de simulações CFD tem sido amplamente conhecido, tanto para edificações como para o meio urbano, o que comprova a eficiência do método (COSTA, 2001; PRATA-SHIMOMURA, 2005; LEITE, 2010; CÓSTOLA, 2006; LUKIANTCHUKI, 2015; ANDRADE, 2001).

OBJETIVO

O objetivo dessa pesquisa é realizar uma análise do desempenho das estratégias de ventilação natural no Hospital Escola de São Carlos, por meio de simulações CFD.

MATERIAIS E MÉTODOS

O método adotado para esta pesquisa está dividido em quatro etapas principais:

(1) Caracterização climática de São Carlos;

(2) Descrição e caracterização do Hospital Escola de São Carlos;

(3) Simulações computacionais, utilizando o *software Ansys CFX*; e

(4) Forma de análise dos resultados.

CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA DE SÃO CARLOS

Para a realização da simulação computacional, realizou-se a caracterização climática da cidade de São Carlos - SP com o intuito de obter os dados de entrada na simulação computacional. Nesse sentido, foram selecionados os dados climatológicos das séries históricas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMet), do ano de 2016. Com base nesses dados, adotou-se como velocidade média dos ventos o valor de 2,3m/s (tabela

1) e definiu-se como direção predominante dos ventos a orientação sudeste (tabela 2). Com relação à velocidade dos ventos externos, ressalta-se que este valor é referente aos dados medidos nas estações climatológicas, a 10 m de altura. Diante disso, é importante considerar o entorno urbano que a edificação está implantada e, assim, gerar o perfil das velocidades médias de uma Camada Limite Atmosférica (CLA) através de equações de correção existentes na literatura especializada. Essa correção será adotada nas próximas etapas da referida pesquisa.

Tabela 1: Velocidade média do vento (m/s)

Mês	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
Velocidade	2,6	2	2,3	2	1,9	2	2,1	2,6	2,8	2,6	2,6	2
Média anual da velocidade	2,3											

Fonte: INMET, 2016. Adaptado pelas autoras, 2022.

Tabela 2: Direção predominante dos ventos e a frequência do tempo de incidência (%)

Mês	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
Norte	7	13	8	9	7	12	6	9	7	10	8	9
Nordeste	15	16	15	14	9	15	16	21	11	15	15	16
Leste	19	16	17	22	28	25	37	20	18	23	16	20
Sudeste	26	18	29	29	27	21	29	29	32	30	34	29
Sul	8	6	7	6	6	7	4	8	13	7	8	9
Sudoeste	3	4	4	2	4	2	2	2	6	4	9	3
Oeste	7	8	9	5	9	5	1	2	6	5	4	5
Noroeste	14	19	12	13	11	12	6	8	7	6	6	9

Fonte: INMET, 2016. Adaptado pelas autoras, 2022.

DESCRIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO HOSPITAL ESCOLA DE SÃO CARLOS

A segunda etapa da pesquisa consiste no levantamento das peças gráficas do projeto do Hospital Escola para a identificação das estratégias de ventilação natural adotadas na obra. Para isso, foram consultados diversos materiais, como livros, artigos de congresso e periódicos e os projetos executivos fornecidos pelo escritório do Brasil Arquitetura, responsável pela segunda etapa do projeto.

Diante da identificação das estratégias adotadas no projeto, percebe-se que o sistema de ventilação do hospital ocorre, então, a partir da união entre o efeito chaminé e a ventilação cruzada. O efeito chaminé ocorre com a diferença de pressão e temperatura do ar, enquanto que a ventilação cruzada ocorre a partir da ação dos ventos. A modo

de simplificação, para essa simulação, definiu-se que a análise vai se concentrar na ventilação cruzada pela ação dos ventos (modelo de transferência de calor: isotérmico), devido à complexidade de uma simulação que considere diferenças de pressão e temperatura do ar, como seria o caso de uma análise por meio do efeito chaminé.

SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS, UTILIZANDO O *SOFTWARE ANSYS CFX*

Para analisar a ventilação cruzada que acontece no HU da UFSCar, vai ser utilizado o *software Ansys CFX* - 2022 R1, na versão estudantil. Dentro do *software*, a simulação ocorre ao longo das seguintes etapas: 1) confecção da geometria da edificação; 2) geração da malha computacional; 3) determinação das condições de contorno do domínio e da edificação e 4) simulação computacional.

Dessa forma, como foi dito anteriormente, a primeira etapa é a confecção do modelo 3D (geometria) do modelo. Para a sua realização foi utilizado o *software AutoCAD* da Autodesk, na interface 3D. O estudo de caso foi modelado de maneira simplicada e considerando um recorte latitudinal devido a limitação do *software* e para a diminuição do tempo de simulação. Nesse recorte é possível notar todo o sistema de cobertura em *sheds*, o duto de captação do ar e uma das enfermarias que possui os forros basculantes para ventilação, sendo possível, portanto, analisar todo o sistema.

Além da geometria do hospital, é preciso modelar um volume externo sem aberturas – em formato de cubo – que representa o meio por onde o fluido irá escoar, ou seja, o domínio da simulação. As dimensões do domínio seguiram as recomendações de Harries (2005), sendo a distância à barlavento e das laterais de 5H, à sotavento de 10H e a altura total de de 6H, onde H = maior medida em altura da geometria do modelo de estudo. A partir das geometrias estruturadas, realiza-se a subtração do modelo do hospital com o domínio, gerando um negativo volumétrico da área de estudo e um volume único.

Já no *software Ansys CFX,* primeiramente definiu-se a malha computacional do domínio e do modelo, aspecto que influencia diretamente na precisão e na confiança dos resultados. A característica da malha é de natureza tetraédrica e, para aumentar a precisão, foi feito um refinamento das arestas verticais e das arestas da base do domínio no valor de 10m (*bias factor* de 5) e 2,5m, respectivamente. Na geometria do estudo de caso, foi feito um refinamento em todo o modelo e de ordem 0,75m, visando uma melhor visualização do escoamento do fluido.

Por fim, define-se as condições de contorno da geometria no *CFX-Pre.* No domínio, o local por onde irá acontecer a entrada do fluido foi definida como *INLET* e a saída como *OUTLET*. Ainda, o chão do domínio – que faz interface com a geometria – foi definido como *GROUND* e as superfícies laterais e superior como *SKY*. Em relação a característica e a rugosidade, o *INLET*, o *OUTLET* e o *SKY,* foram definidos como *WALL – free slip wall* (sem atrito, por estarem longe da edificação e não provocarem interferências na mesma), o *GROUND* apresenta a característica de *no slip wall* (com rugosidade *smooth wall)* e a geometria, nomeada de *BUILDING*, como *no slip wall* (com rugosidade *rough wall*). Segundo algumas referências (CALAUTIT e HUGHES, 2014;

HARGREAVES, MORVAN e WRIGHT, 2014; LUKIANTCHUKI, 2015), o modelo de turbulência utilizado foi o *K-epsilon* e o fluido utilizado foi o ar nas condições isotérmicas de 25°C, como foi dito anteriormente. Ademais, os parâmetros de controle de convergência foram de 900 iterações e nível de convergência MÁX de 10^{-4}.

FORMA DE ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para avaliar o desempenho da ventilação natural, foi realizada uma análise qualitativa por meio da plotagem de vetores de intensidade e direção do fluxo do ar em representação de planta e corte. Foi utilizado uma escala em que cada cor representa um valor de velocidade correspondente. A análise foi realizada diante dos valores de velocidade média do ar no ambiente interno e como base referencial, foi utilizado os valores propostos no trabalho de Cândido *et al.* (2010), por considerar que nossos limites são diferentes dos praticados em países europeus, uma vez que em climas quentes, ou até mesmo moderadamente quentes, o mesmo movimento de ar que é considerado como desconfortável em climas frios e temperados, pode ser tido como extremamente bem-vindo pelos usuários para fins de conforto térmico (tabela 3).

Tabela 3: Limites de aceitabilidade da velocidade do ar nos ambientes internos

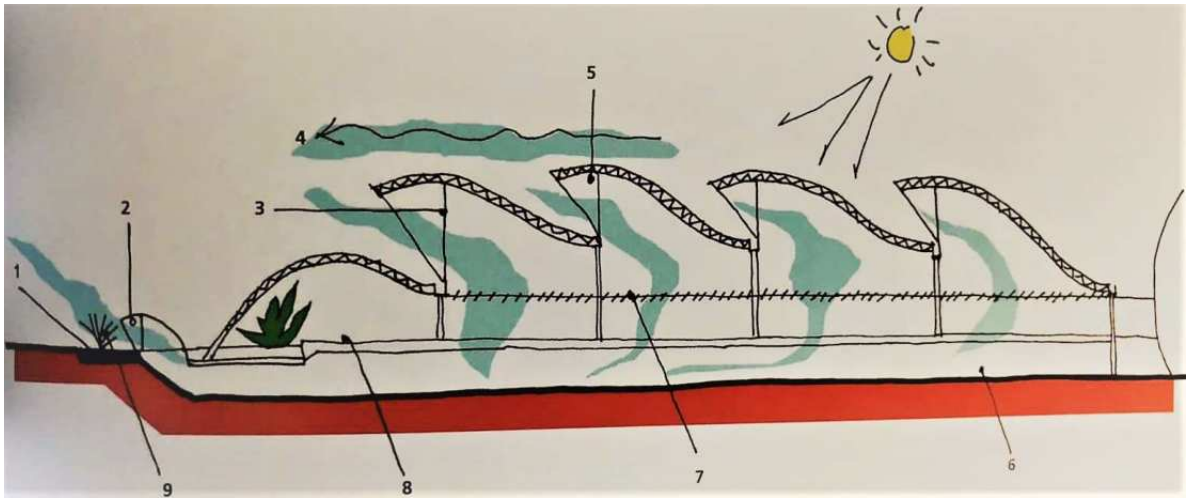
Velocidade do ar (m/s)	Situação ocasionada
0 – 0,2	Ventilação natural imperceptível
0,2 – 0,4	Ventilação natural perceptível
0,4 – 0,8	Ventilação natural satisfatória (há redução da carga térmica e contribui para o conforto)
Acima de 0,8	Controle necessário (causa incômodos como levantamento de papéis, desordem de cabelos, roupas e objetos)

Fonte: Cândido *et al.*, 2010.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Finalizada a etapa de definição das condições de contorno e depois de rodar a simulação, é possível extrair os resultados qualitativos e quantitativos para a análise. Dessa forma, a seguir, é evidenciado o desempenho da ventilação natural do projeto do Hospital Escola de São Carlos, projetado por Lelé, em meados de 2004. O sistema de ventilação natural adotado no hospital, como foi visto anteriormente, compreende algumas estratégias projetuais já então adotadas pelo arquiteto (figura 1). As galerias de captação de ar, a princípio, tinham a função de receber o ar externo, ser resfriado no pavimento técnico e, então, ser direcionado aos ambientes internos por meio das venezianas. Os *sheds,* por sua vez, desempenham diversas funções, como extrair o ar interno aquecido, proteger da radiação solar e permitir iluminação e ventilação natural a grande maioria dos ambientes (LIMA, 2012).

Figura 1: Estratégias para ventilação natural no Hospital Escola de São Carlos

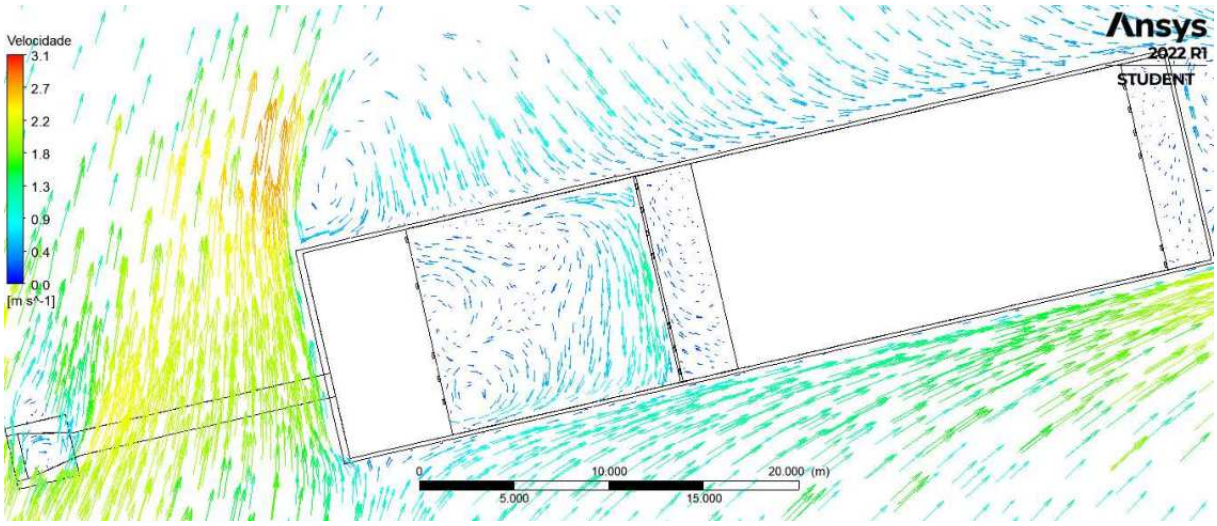


Fonte: LIMA, 2012.

É evidente, segundo a figura 02 e 03, que os *sheds* projetado por Lelé desempenham um importante papel na captação e extração dos ventos externos e, consequentemente, na ventilação dos ambientes internos do hospital. Ainda sobre esse fenômeno, percebe-se que o *shed* na extrema esquerda é a principal estrutura de captação dos ventos, fazendo com que o fluxo de ar percorra por toda a edificação. Ainda, é possível perceber que esse *shed,* por meio da aceleração do fluxo na extremidade superior da estrutura, cria pequenas regiões de sombra de vento próximo as saídas dos demais *sheds,* fazendo com que eles desempenhem a função de extrair o ar que foi captado anteriormente. Esse processo é potencializado a cada *shed*, sendo possível notar que o *shed* da extrema direita é a principal estrutura de extração do ar, com velocidade de fluxo de saída que ultrapassa os 2,2 m/s.

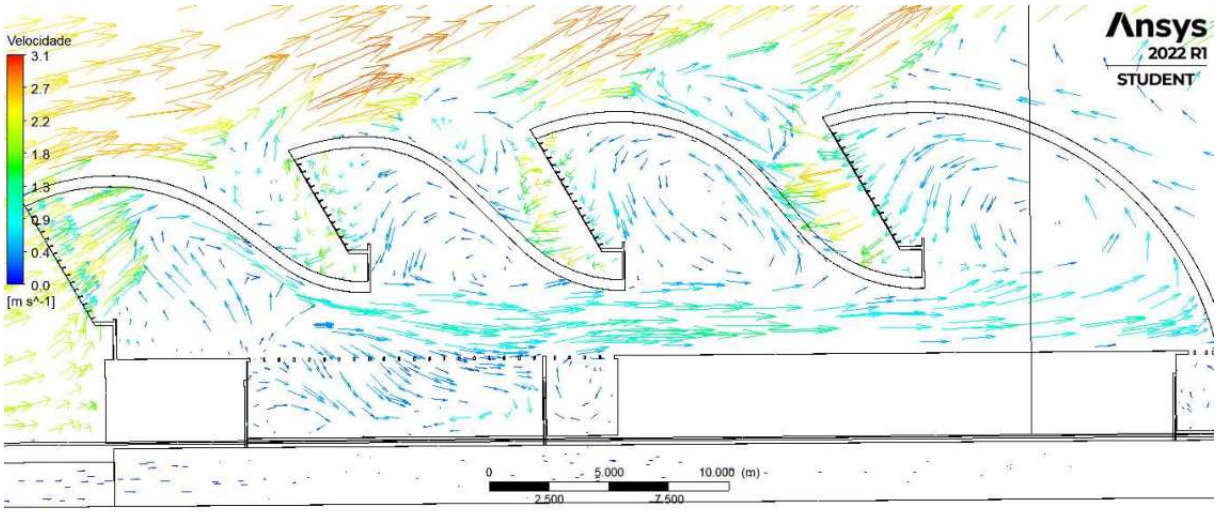
Outro aspecto evidenciado em relação aos *sheds,* é a quantidade e velocidade de fluxo de ar logo acima do forro. Essa corrente de ar pode ser uma boa forma de extrair zonas de calor que se formam na região superior dos ambientes, diminuindo a temperatura interna. Entretanto, para uma melhor avaliação dessa potencialidade, são necessárias mais pesquisas considerando todas as transferências de calor e no decorrer de toda a edificação.

Figura 2: Planta baixa geral da edificação com o fluxo de ar



Fonte: Elaborado pelas autoras, 2022.

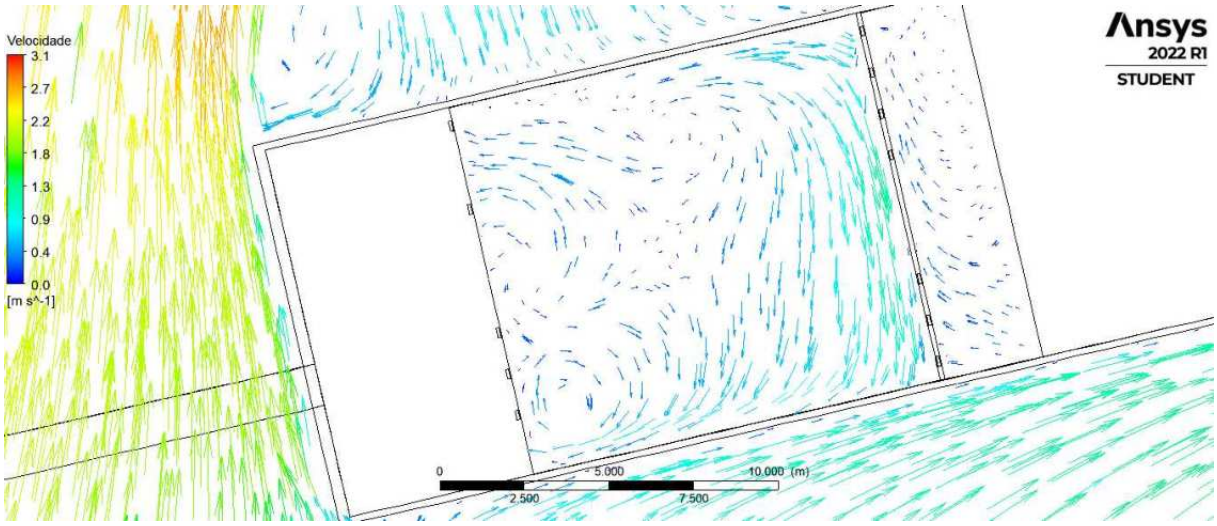
Figura 3: Corte da enfermaria e *sheds* com o fluxo de ar interno



Fonte: Elaborado pelas autoras, 2022.

Além disso, a área da enfermaria recebe, com menor intensidade e velocidade, um fluxo de ar por meio dos forros basculantes (figura 4). Essa ventilação percorre por todo o ambiente atingindo, inclusive, a altura do usuário. É possível perceber valores da velocidade do ar próximos a 0,4m/s, que, segundo Cândido *et al.* (2010) é considerado como uma ventilação natural satisfatória, que reduz as cargas térmicas do ambiente e favorece para o conforto térmico dos usuários. Os vetores da simulação indicam, a partir da visualização tanto em corte, quanto em planta, que a ventilação natural advinda da cobertura, não cria zonas de estagnação de vento no ambiente interno, criando, apenas, pequenas áreas de vórtices de ar, mas com uma velocidade considerada baixa, em torno de 0,2m/s, o que não se configura como um incômodo para os usuários.

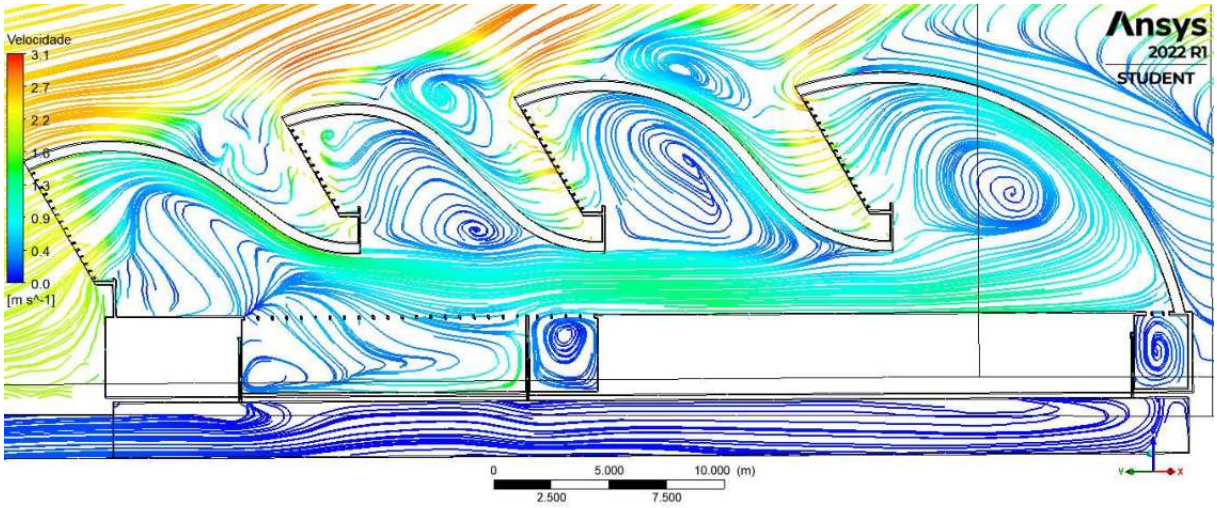
Figura 4: Planta baixa da enfermaria com o fluxo de ar interno



Fonte: Elaborado pelas autoras, 2022.

Outros vórtices de ar são formados também nas áreas de corredores e nos *sheds* da edificação, como é possível notar na figura 5, onde foi plotado linhas de fluxos – *streamline* – que auxiliam na visualização desse fenômeno. Em decorrência dos corredores serem locais de passagem, esse fenômeno, assim como na sala de enfermaria, não se configura como incômodo para os usuários. Os vórtices localizados nos *sheds* possuem velocidades superiores se comparados com os demais, dentre 0,5 e 1 m/s, mas por não estarem em contato com a área dos usuários, isso também não é considerado uma problemática para o conforto térmico e, por outro lado, auxilia na extração do ar interno para o ar externo.

Figura 5: Plotagem de linhas de fluxo (*streamline)* no corte da edificação



Fonte: Elaborado pelas autoras, 2022.

Por fim, diferentemente do que se acredita que o Lelé imaginou para o projeto, outro aspecto que se nota é que o sistema de captação e de resfriamento dos ventos por meio das galerias de captação e do pavimento técnico inferior não interfere de maneira significativa na ventilação natural dos ambientes internos, sendo os *sheds* as principais estruturas atuantes nesse processo no projeto do Hospital Escola de São Carlos. Nesse sentido, se reforça mais uma vez, que estudos mais aprofundados

considerando os efeitos de troca de calor no ambiente interno e a Camada Limite Atmosférica na correção da velocidade de entrada da simulação são necessários para uma análise mais precisa dos fenômenos que concernem o projeto do hospital.

CONCLUSÃO

A partir do resultado da pesquisa, é possível notar que o projeto de Lelé para o Hospital Escola de São Carlos apresenta diversas soluções projetuais para a adoção da ventilação natural nos ambientes internos. Percebe-se, além disso, diante dos resultados da simulação, que o desempenho dessas estratégias se configura como satisfatória de acordo com a literatura levantada de referência. Os resultados quantitativos e qualitativos demonstraram que a ventilação natural nos ambientes do hospital, como a enfermaria e os corredores, acontece de modo bem distribuído e com uma velocidade confortável para os usuários desses espaços.

Diante disso, retoma-se a discussão inicial no que concerne a ventilação natural para a promoção de espaços com qualidade do ar interno. A atual pandemia da COVID-19 ressalta a importância de ambientes saudáveis, com altas taxas de ventilação e renovação do ar interno, para a diminuição da transmissão de patógenos aéreos, como é o caso do vírus SARS-Cov-2. Nesse contexto, os hospitais de Lelé, como é o caso do Hospital Escola, e sua preocupação em fornecer ambientes humanizados e saudáveis são, no mínimo, uma pista de como podem e devem ser os hospitais do futuro.

AGRADECIMENTOS

À FAPESP, pela concessão da bolsa de Treinamento Técnico III e apoio do Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo.

REFERÊNCIAS

[1] WHO. World Health Organization. **Coronavirus disease (COVID-19)**. Disponível em: <https://www.who.int/health-topics/coronavirus#tab=tab_1>. Acesso em: 21 de fevereiro de 2022.

[2] MEGAHED, N. A.; GHONEIM, E. M. Indoor Air Quality: Rethinking rules of buildin design strategies post-pandemic architecture. **Environmental Research**, v. 193, 2021, n. 110471. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110471>.

[3] WANG, J.; HUANG, J.; FENG, Z.; CAO, S. J.; HAGHIGHAT, F. Occupant-density-detection based energy efficient ventilation system: Prevention of infection transmission. **Energy and Buildings**, v. 240, n. 110883, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110883>.

[4] SUN, C.; ZHAI, Z. The efficacy of social distance and ventilation effectiveness in preventing COVID-19 transmission. **Sustainable Cities and Society**, v. 62, n. 102390, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102390>.

[5] KONG, X.; GUO, C; LIN, Z.; DUAN, S.; HE, J.; REN, Y.; REN, J. Experimental study on the control effect of different ventilation systems on fine particles in a simulated hospital

ward. **Sustainable Cities and Society**, v. 73, n. 103102, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103102>.

[6] CORREIA, G.; RODRIGUES, L.; DA SILVA, M. G.; GONÇALVES, T. Airborne route and bad use of ventilation systems as non-negligible factors in SARS-CoV-2 transmission. **Medical hypotheses**, v. 141, n. 109781, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mehy.2020.109781>.

[7] BUONANNO, G.; MORAWSKA, L.; STABILE, L. Quantitative assessment of the risk of airborne transmission of SARS-CoV-2 infection: prospective and retrospective applications. **Environment international**, v. 145, p. 106112, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106112>.

[8] MILLER, S.L.; NAZAROFF, W. W.; JIMENEZ, J. L.; BOERSTRA, A.; BUONANNO, G.; DANCER, S. J.; KURNITSKI, J.; MARR, L. C.; MORAWSKA, L.; NOAKES, C. Transmission of SARS-CoV-2 by inhalation of respiratory aerosol in the Skagit Valley Chorale superspreading event. **Indoor air**, v. 31, n. 2, p. 314-323, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1111/ina.12751>.

[9] ABUHEGAZY, M.; TALAAT, K.; ANDEROGLU, O.; POROSEVA, S. V. Numerical investigation of aerosol transport in a classroom with relevance to COVID-19. **Physics of Fluids,** v. 32, n. 10, p. 103311, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0029118>.

[10] EUROPEAN CENTRE FOR DISEASE PREVENTION AND CONTROL. **Heating, ventilation and air-conditioning systems in the context of COVID-19**. Stockholm: ECDC; 2020. Disponível em: <https://www.ecdc.europa.eu/sites/default/files/documents/Heating-ventilation-air-conditioning-systems-in-the-context-of-COVID-19-first-update.pdf>. Acesso em: 23 de maio de 2022.

[11] CANADIAN COMMITTEE ON INDOOR AIR QUALITY. **Addressing COVID-19 in buildings: Module 15**. Disponível em: <https://iaqresource.ca/wp-content/uploads/2020/09/CCIAQB-Module15-Eng.pdf>. Acesso em: 23 de maio de 2022.

[12] MELIKOV, A. K. COVID-19: Reduction of airborne transmission needs paradigm shift in ventilation. **Building and environment**, v. 186, p. 107336, 2020. DOI: <10.1016/j.buildenv.2020.107336>.

[13] MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO. **Guia de retorno das Atividades Presenciais na Educação Básica**. Página 16. Disponível em: <https://www.gov.br/mec/pt-br/assuntos/GuiaderetornodasAtividadesPresenciaisnaEducaoBsica.pdf>. Acesso em: 23 de maio de 2022.

[14] MORAWSKA, L.; MILTON, D. K. Reply to Chagla et al and Thomas. **Clinical Infectious Diseases**, v. 73, i. 11, 2021, p. 3983-3984. DOI: <https://doi.org/10.1093/cid/ciaa1121>.

[15] SCHOOLS FOR HEALTH. JONES, E.; YOUNG, A.; CLEVENGER, K.; SALIMIFARD, P.; WU, E.; LUNA, M. L.; LAHVIS, M.; LANG, J.; BLISS, M.; AZIMI, P.; CEDENO-LAURENT, J.; WILSON, C.; ALLEN, J. Healthy Schools: Risk Reduction Strategies for Reopening Schools. **Harvard T.H. Chan School of Public Health Healthy Buildings program**. June, 2020. Disponível em: <https://schools.forhealth.org/wp-content/uploads/sites/19/2020/06/Harvard-Healthy-Buildings-Program-Schools-For-Health-Reopening-Covid19-June2020.pdf>. Acesso em: 23 de maio de 2022.

[16] UNICEF. **Precauções na sala de aula durante a pandemia de Covid-19: Dicas para proteger educadores, educadoras e estudantes.** Disponível em: <https://www.unicef.org/brazil/precaucoes-na-sala-de-aula-durante-pandemia-de-covid-19>. Acesso em: 23 de maio de 2022.

[17] ZEMOURI, C.; AWAD, S. F.; VOLGENANT, C. M. C.; CRIELAARD, W.; LAHEIJ, A. M. G. A.; DE SOET, J. J. Modeling of the transmission of coronaviruses, measles virus, influenza virus, Mycobacterium tuberculosis, and Legionella pneumophila in dental clinics. **Journal of dental research**, v. 99, n. 10, p. 1192-1198, 2020. DOI: <10.1177/0022034520940288>.

[18] LIMA, J. F. **Arquitetura: uma experiência na área da saúde / João Filgueiras Lima** – São Paulo: Romano Guerra Editora, 2012. 336 p.

[19] PRATHER, K. A.; MARR, L. C.; SCHOOLEY, R. T.; MCDIARMID, M. A.; WILSON, M. E.; MILTON, D. K. Airborne transmission of SARS-CoV-2. **Science**, v. 370, n. 6514, p. 303-304, 2020. DOI: <10.1126/science.abf0521>.

[20] TELLIER, R.; LI, Y.; COWLING, B.J.; TANG, J. W. Recognition of aerosol transmission of infectious agents: a commentary. **BMC infectious diseases,** v. 19, n. 1, p. 1-9, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12879-019-3707-y>.

[21] PEREIRA, D. V.; FABRÍCIO, M. M. Applying precasting and mass customization in the hospital escola municipal de São Carlos. Z**EMCH2014 International Conference**, 2014, Londrina - Brazil.

[22] GIVONI, B. **Man, climate and architecture**. London: Applied Science Publishers, 1976.

[23] BITTENCOURT, Leonardo; CÂNDIDO, Christhina. **Introdução à ventilação natural**. Edufal, 2008.

[24] LUKIANTCHUKI, M. A. **A evolução das estratégias de conforto térmico e ventilação natural na obra de João Filgueiras Lima, Lelé: Hospitais Sarah de Salvador e do Rio de Janeiro.** Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2010.

[25] DE QUADROS, B. M.; MIZGIER, M. O. **O impacto de Brises na Ventilação Natural: Avaliação Integrada em uma Enfermaria em Florianópolis (SC)**. Paranoá: cadernos de arquitetura e urbanismo, v. 19, n. 19, 11. 2017.

[26] MONTERO, J. I. P. **Ventilação e Iluminação Naturais na Obra de João Filgueiras Lima, Lelé. Estudo dos Hospitais da Rede Sarah Kubitschek Fortaleza e Rio de Janeiro**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2006.

[27] TOLEDO, Luiz Carlos. Arquitetura hospitalar. Ideias para combater a Covid-19 e as ameaças futuras. **Drops**, São Paulo, ano 20, n. 153.06, Vitruvius, jun. 2020. Disponível em: <https://vitruvius.com.br/revistas/read/drops/20.153/7793>. Acesso em: 23 de maio de 2022.

[28] COSTA, F. J. de M. **Ventilação e Prescrições Urbanísticas: uma aplicação simulada no bairro de Petrópolis em Natal/RN**. Natal, 2001. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2001.

[29] PRATA-SHIMOMURA, A. R. **Impacto da Altura de Edifícios nas Condições de Ventilação Natural do Meio Urbano**. São Paulo, 2005. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo, Tecnologia da Arquitetura) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

[30] LEITE, R. V**. Fortaleza, Terra do Vento: a influência da mudança nos padrões de ocupação do solo sobre a ventilação natural em cidade de clima tropical úmido**. São Paulo, 2010. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo, Tecnologia da Arquitetura) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

[31] CÓSTOLA, D. **Ventilação Por Ação do Vento no Edifício: procedimentos para quantificação**. São Paulo, 2006. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo, Tecnologia da Arquitetura) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

[32] LUKIANTCHUKI, Marieli Azoia. **Sheds extratores e captadores de ar para indução da ventilação natural em edificações**. 2015. Tese (Doutorado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia) - Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015. DOI: 10.11606/T.102.2015.de-07082015-180544.

[33] ANDRADE, N. C. **Estudo da Ventilação Natural em Edificações Com Captadores de Vento Multidirecionais Por Meio de Ensaios em Túnel de Vento e Simulações Computacionais**. Campinas, 2013. Tese (Doutorado em Arquitetura, Tecnologia e Cidade) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

[34] INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Arquivos climáticos de São Carlos**. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/inmet2016>. Acesso em: 23 de maio de 2022.

[35] SARAH. **A Rede Sarah**. Disponível em: <https://www.sarah.br/a-rede-sarah/>. Acesso em: 23 de maio de 2022.

[36] Ansys® Academic Research Mechanical, Release 2022 R1.

[37] AutoCAD®. Autodesk®, 2018.

[38] HARRIES, A. **Notas de aula**. In: Workshop: CFX – FAU/USP. São Paulo, 2005.

[39] CALAUTIT, J. K.; HUGHES, B. R. Wind tunnel and CFD study of the natural ventilation performance of a commercial multidirectional wind tower. **Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics** 2014; 125: 189-194.

[40] HARGREAVES, D. M.; MORVAN, H. P.; WRIGHT, N. G. Validation of the volume of fluid method for free surface calculation: the broad-crested weir. **Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics** 2014; 1 (2): 136-146.

[41] CÂNDIDO, C.; DEAR, R. J. de; LAMBERTS, R.; BITTENCOURT, L. Air movement acceptability limits and thermal comfort in Brazil's hot humid climate zone. Building and environment, v. 45, p. 222-229. 2010.