ANÁLISE DA VENTILAÇÃO NATURAL EM SALAS DE AULAS: SIMULAÇÕES CFD

Marieli Azoia Lukiantchuki (1); Ana Clara de Almeida Xavier (2)
(1) Professora Doutora, Arquitetura e urbanista, malukiantchuki2@uem.br, Universidade Estadual de Maringá, Avenida Colombo, 5790
(2) Mestranda, Arquitetura e urbanista, anaclaraxavier48@gmail.com, Instituto de Arquitetura de São Carlos, Universidade de São Paulo, Avenida trabalhador São Carlense, 400

RESUMO
A ventilação natural nas edificações é uma importante estratégia de condicionamento térmico passivo, possibilitando o conforto térmico e a salubridade do ar para os usuários, principalmente em regiões de clima quente e úmido, como o Brasil. A discussão sobre o uso desta estratégia, principalmente em ambientes de ensino, vem sendo bastante discutida após a pandemia da COVID-19. Diante disso, o objetivo deste artigo é avaliar a influência do parâmetro de abertura na velocidade do fluxo de ar interno e nas taxas de renovação de ar/hora em uma sala de aula existente na Universidade Estadual de Maringá (UEM). A metodologia utilizada foram simulações CFD e foram analisados o caso de referência e 4 casos com alterações projetuais nas aberturas. Dentre os principais resultados, destaca-se que a ventilação natural do caso de referência e no caso 1 e 2 são inadequadas e insuficientes para manter a qualidade do ar interno. Em contrapartida, percebe-se que as alterações nos demais casos, que permitem uma ventilação cruzada no ambiente, apresentaram melhores resultados quanto a velocidade e quantidade de fluxo do ar na sala de aula, aumentando, também, as taxas de renovação de ar/hora.
Palavras-chave: ventilação natural, taxas de renovação de ar/hora, simulação computacional CFD, salas de aula.

ABSTRACT
Natural ventilation in buildings is an important strategy for passive thermal accommodation, often offering thermal comfort and healthy air for users, especially in regions with hot and humid climates, such as Brazil. In addition, after the COVID-19 pandemic, the extension of natural ventilation and air quality in indoor spaces, especially in teaching environments, has been very welcoming. Therefore, the objective of this article is to evaluate the influence of the opening parameter on the indoor airflow velocity and on the air exchange rates/hour in an existing classroom at the State University of Maringá. The methodology used was CFD simulations and the reference case and 4 cases with design changes in the openings were analyzed. Among the main results, it should be noted that natural ventilation in the reference case and in cases 1 and 2 are satisfactory and insufficient to maintain indoor air quality. Similarly, it can be seen that the changes in the other cases, which allow cross ventilation in the environment, showed better results regarding the speed and amount of air flow in the classroom, also increasing the air renewal rates/hour.
Keywords: natural ventilation, air exchange rates/hour, CFD simulation, classrooms.

1. INTRODUÇÃO

A ventilação natural se configura como uma das estratégias projetuais mais efetivas para o alcance do conforto térmico dos usuários, através de meios passivos, em regiões de clima quente e úmido, como é o caso de maior parte do território brasileiro (BITTENCOURT, CÂNDIDO, 2010; LAMBERTS, DUTRA, PEREIRA, 2014). Além disso, auxilia na manutenção da qualidade do ar interno, por meio da renovação contínua do ar, possibilitando melhores condições de salubridade aos ambientes e a seus ocupantes (ALLARD, 1998; BITTENCOURT, CÂNDIDO, 2010; GIVONI, 1976) e na redução do consumo de energia elétrica (GIVONI, 1976; BITTENCOURT, CÂNDIDO, 2010), ao evitar o uso exagerado do ar condicionado.

Em 30 de janeiro de 2020, a *World Health Organization* (WHO) declarou o surto da COVID-19, uma emergência de saúde pública, representando um alto risco ao mundo todo (SOHRABI *et al.*, 2020). Sua propagação acontece com maior intensidade em ambientes fechados e com aglomeração de pessoas, através de gotículas respiratórias e aerossóis que permanecem por horas no ar (ECDC, 2020; LI *et al.,* 2007; QIAN *et al.,* 2010; MELIKOV, 2020; SCHOOLS FOR HEALTH, 2020; WHO, 2020a; ZEMOURI *et al.,* 2020). Com essa situação emergencial, materiais orientativos elaborados por autoridades públicas e pesquisas foram desenvolvidos para mitigar a propagação viral, tendo como recomendação principal o uso da ventilação natural para promover a renovação do ar, melhorando a sua qualidade (ABUHEGAZY *et al.*, 2020; ASHRAE, 2020; CCIAQ, 2020; ECDC, 2020; MELIKOV, 2020; BRASIL, 2020; MORAWSKA, MILTON, 2020; REHVA, 2020; SCHOOLS FOR HEALTH, 2020; WHO, 2020a; WHO, 2020b; ZEMOURI *et al.,* 2020).

Associações, tais como *Canadian Committee on Indoor Air Quality* (CCIAQ), *Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning associations* (REHVA), *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE) e a *European Centre for Disease Prevention and Control* (ECDC) enfatizaram a importância do aumento do número de trocas de ar por hora nos ambientes internos, a fim de promover a ventilação natural para salubridade dos ambientes. Segundo WHO (2020), a renovação do ar interno pode ser obtida por ventilação natural ou mecânica, dependendo da configuração das aberturas da edificação e, quando associadas, podem aumentar a qualidade do ar interno.

Com a pandemia, os primeiros estabelecimentos a serem fechados foram Instituições de Ensino devido ao alto risco de contaminação. Tem-se uma ampla discussão sobre as condições seguras dos ambientes para a retomada das atividades presenciais nas instituições de ensino e como os projetos de arquitetura poderiam contribuir para melhorar a qualidade do ar nas salas de aula. Para Pulimeno *et al.* (2020) as condições de ventilação, temperatura e umidade das salas de aula, determinam se o ambiente é saudável ou nocivo ao usuário. Sobre isso Deng, Zou e Lau (2021) ressaltam que a qualidade do ar interno e os fatores de condição térmica podem estar associados com absenteísmo em salas de aula. Para Van Dijken (2020) uma boa Qualidade Interna do Ar (QAI) é alcançada com o uso de sistemas de ventilação com taxas de renovação de ar adequadas.

Diante das questões oriundas do COVID-19, a importância da ventilação natural assume proporções cada vez maiores com a finalidade de promover ambientes mais salubres. Dentre as estratégias projetuais que ajudam no incremento da ventilação natural destacam-se as aberturas (BITTENCOURT, CÂNDIDO, 2010; CHO *et al.,* 2021; CÂNDIDO, 2006; FERREIRA, 2019; MELIKOV, 2020; NICO-RODRIGUES, 2015; TOLEDO, 1999). O Ministério da Saúde (2020) recomenda abrir as portas e janelas dos ambientes para aumentar a circulação do ar e, nesse sentido, o uso das aberturas é uma alternativa de baixo investimento financeiro, fácil implementação e pouca manutenção, além de facilitar o manuseio pelo usuário, proporcionando o controle das condições microclimáticas do ambiente (ABUHEGAZY *et al.,* 2020; CHO *et al.,* 2021; ECDC*.,* 2020; GRATIA *et al.,* 2004; MORAWSKA, MILTON, 2020; NICO-RODRIGUES, 2015).

Diversas publicações recentes emitiram recomendações para a ventilação adequada de salas de aula, tais como: abrir as janelas das salas de aula; ventilar as salas durante todo o intervalo; abrir janelas em paredes opostas para proporcionar a ventilação cruzada; e entre outros (UBA, 2021; VAN DIJKEN, 2020; WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2020). Além disso, o Ministério da Saúde Brasileiro emitiu algumas recomendações para a retomada das atividades escolares de forma presencial, destacando a importância de abrir as portas e janelas para aumentar a circulação do ar no ambiente (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2020).

No entanto, muitas dessas recomendações só são possíveis de serem implantadas se as configurações do ambiente foram adequadas para a ventilação natural. Para um maior desempenho, a definição de estratégias de projeto que potencializem a ventilação natural deve ser incorporada desde a concepção do projeto. No entanto, diversos edifícios escolares existentes apresentam condições inadequadas para a renovação do ar e devem ser repensados e alterados, visando alcançar uma maior qualidade do ar interno, em especial, após a pandemia. É inviável tornar os edifícios educacionais existentes inutilizados e muitas vezes construir novos edifícios não é possível devido ao custo elevado para a execução de novas construções. Diante disso, torna-se de grande importância pesquisas que analisam o desempenho da ventilação natural em salas de aulas existentes, discutindo alterações projetuais viáveis e que melhorem a qualidade do ar interno.

2. OBJETIVO

O objetivo do artigo é avaliar a influência do parâmetro de abertura na velocidade do fluxo de ar interno e na taxa de renovação de ar/hora em uma sala de aula existente, por meio de simulações CFD.

3. MÉTODO

O método é baseado em Simulações por Dinâmica dos Fluídos Computacional (CFD) e foi dividido em cinco etapas: 1. Caracterização climática; 2. Caracterização do objeto de estudo; 3. Parâmetros projetuais analisados; 4. Simulações computacionais e 5. Forma e análise dos resultados.

3.1. Caracterização climática

Maringá está localizada no norte do Paraná, na latitude -23° 25' 31", longitude -51° 56' 19" e altitude de 596m. Segundo INMET (2018) as temperaturas médias variam de 28,4ºC a 18ºC, a umidade relativa média é de 68,4% e, de acordo com a classificação de Koppen (1948), a cidade possui clima tipo Cfa, subtropical úmido de altitude, com verões quentes, concentração das chuvas no verão e sem estação de seca definida e um alto nível de radiação solar durante todo ano. Com relação aos ventos, têm-se a direção predominante entre leste e nordeste com velocidades entre 0 e 4m,/s, com maior predominância de 2,0m/s (Figura 1).

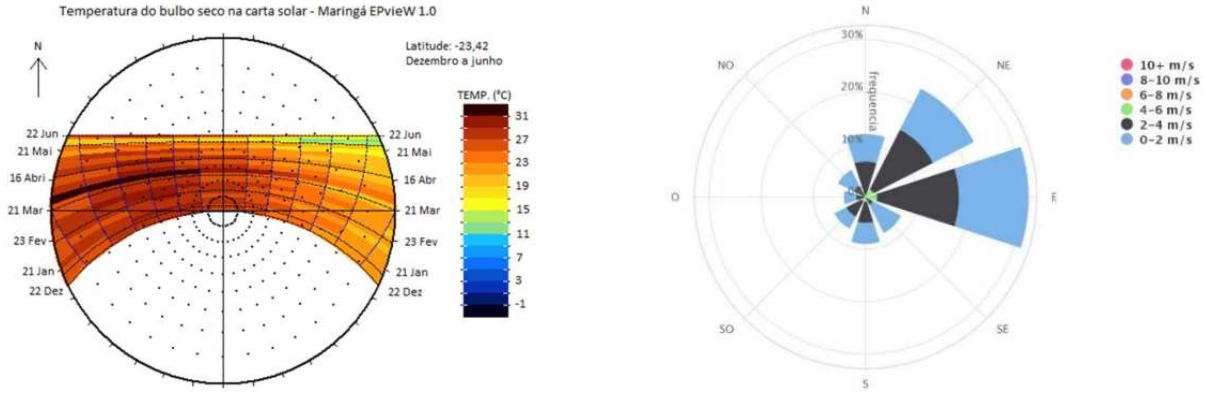

Figura 1 –carta solar com temperaturas para Maringá (Fonte: *software* Epview, com base nos Epw. Editado pelas autoras, 2019) e rosa dos ventos de Maringá (Fonte: ProjetEEE, 2023)

Com base nessa caracterização climática e segundo a plataforma digital ProjetEEE (2018), o clima de Maringá proporciona 41% das horas do ano de conforto térmico, sendo que do restante 29% do ano está em desconforto por frio e 30% do ano em desconforto por calor, demonstrando um clima temperado e em equilíbrio entre verão e inverno. Diante disso, as principais estratégias bioclimáticas recomendadas são: inércia térmica para aquecimento, ventilação natural e sombreamento das aberturas.

3.2. Caracterização do objeto de estudo

A sala de aula analisada está localizada na Universidade Estadual de Maringá, no Paraná. O entorno é caracterizado pela presença de vegetações, que não causam obstruções aos ventos externos, e um edifício na parte frontal, distante da sala analisada em 11m (Figura 2). A sala está localizada no canto direito do referido bloco, apresentando duas faces externas (a maior orientada para nordeste e a menor para sudeste) e duas faces internas, sem contato com o ambiente exterior.

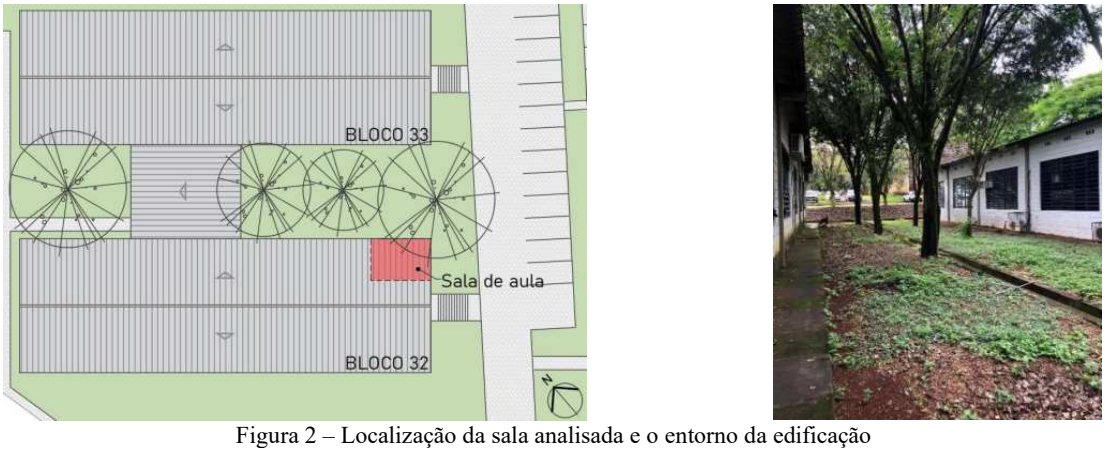

Figura 2 – Localização da sala analisada e o entorno da edificação

A referida sala apresenta dimensões de 10,2 x 5,8m (área=59,16m^2), com pé-direito de 3,3m (Figura 3). Com relação as aberturas, tem-se duas janelas localizadas na fachada de maior extensão, apresentando dimensões iguais de 3,44m x 2,20m, cujo peitoril é de 1,05m. Cada janela é dividida em 5 partes de 0,68m, sendo estas subdivididas em 13 partes de 0,17cm cada, composta por: 3 janelas basculantes superiores; 5 folhas de vidro fixas; 4 janelas basculantes na parte inferior e 1 última folha fixa. Cada janela basculante apresenta uma inclinação de 30% de abertura, possibilitando uma área efetiva de abertura para circulação do ar de 13%, o que seria equivalente a 0,034m^2 de área efetiva para circulação de ar, para cada janela basculante (Figura 4). Por fim, tem-se uma porta localizada na parede interna, com dimensão de 0,80m x 2,10m, ou seja, a ventilação cruzada neste ambiente só é possível por meio da abertura da porta.

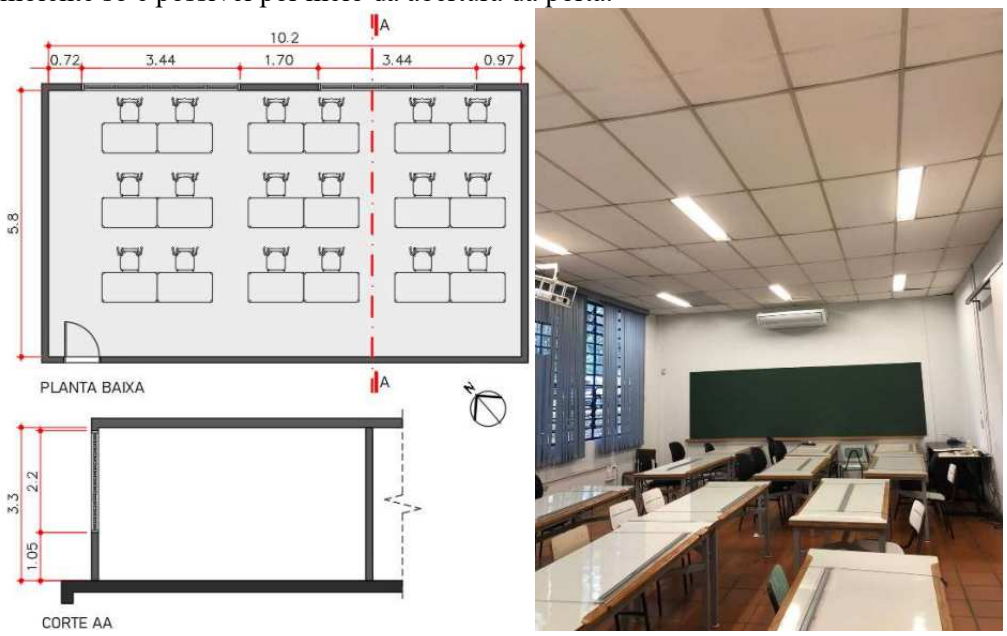

Figura 3 – Planta, corte e imagem da Sala analisada

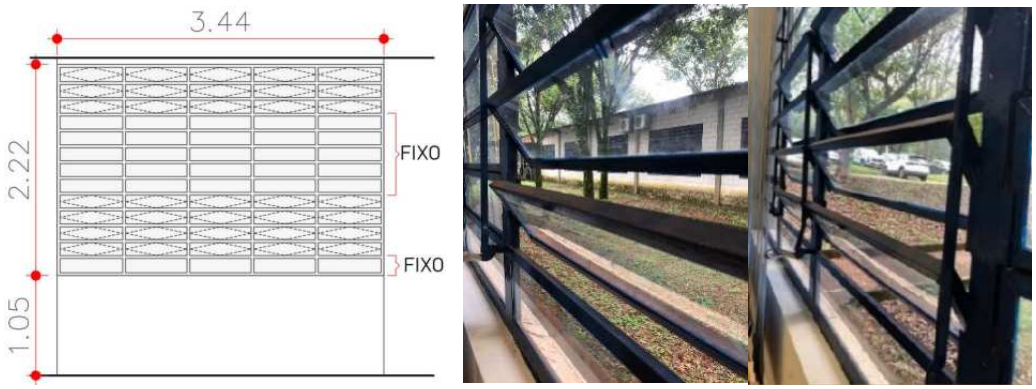

Figura 4 – detalhamento das janelas na sala de aula analisada

A sala tem capacidade para 20 alunos e atualmente, durante as aulas, é perceptível a falta de uma ventilação adequada, o que gera reclamação dos alunos e dos professores principalmente no período do verão. No entanto, não foram realizadas medições *in loco* que comprovem as condições de temperatura e umidade relativa do ar, bem como a Qualidade Interna do Ar, o que seria interessante de se realizar em pesquisas futuras.

3.3. Parâmetros projetuais analisados

Os parâmetros projetuais analisados foram selecionados considerando a viabilidade de sua execução em uma sala de aula existente. Os parâmetros analisados foram relacionados às aberturas, por serem alterações viáveis pela facilidade de execução e pelo reduzido custo, pensando em futuras alterações projetuais. Primeiramente, realizaram-se alterações na área efetiva de ventilação quando a janela está totalmente aberta. Este fator é diferente para cada tipo de abertura e tem uma influência significativa no fluxo de ar interno.

No caso de referência, ou seja, a tipologia da janela existente na sala de aula analisada, tem-se janelas basculantes, cujo ângulo de abertura é equivalente a 30°, o que possibilita uma área efetiva reduzida de ventilação (13% da área útil para a ventilação, possibilitando uma A_{total} = 0,49m^2). No caso 01, considerou-se

um ângulo de abertura equivalente a 90°, equivalente a 100% da área útil para a ventilação (3,8m^2), mantendo todos os outros parâmetros projetuais existentes no caso de referência. No caso 02, o desenho das esquadrias foi modificado, sendo que as folhas fixas de vidro foram substituídas por janelas basculantes, com um ângulo de abertura equivalente a 90°, equivalente a 100% da área útil para a ventilação (A_{total} = 7,6m^2) (tabela 1). Em todos esses casos, manteve-se a ventilação unilateral, ou seja, janelas em apenas uma fachada da sala de aula.

Tabela 1 – Áreas efetivas de ventilação nos casos de referência, caso 01 e caso 02. Fonte: Elaborado pelas autoras;

Casos analisados	Área efetiva total	Percentual de abertura da folha	Proporção de aumento da área efetiva
Caso de referência	0,49m^2	13%	x
Caso 01	3,8m^2	100%	7,5x
Caso 02	7,6m^2	100%	15,5x

Os próximos casos analisam o desempenho da ventilação cruzada no espaço. Utilizou-se a mesma configuração do caso 02, inserindo janelas em outras paredes. No caso 03, foi inserida uma janela com as mesmas dimensões na parede adjacente. No entanto, ressalta-se que as três janelas ficam localizadas em paredes na direção dos ventos dominantes (barlavento). No caso 04, foi inserida uma janela na parede oposta, na região superior, com dimensões de 3,44m x 1,00m, e peitoril de 2,20m. No caso 05, foi inserida uma janela na parede oposta, com dimensões de 6,88m x 2,20m, e peitoril de 1,05m (figura 5).

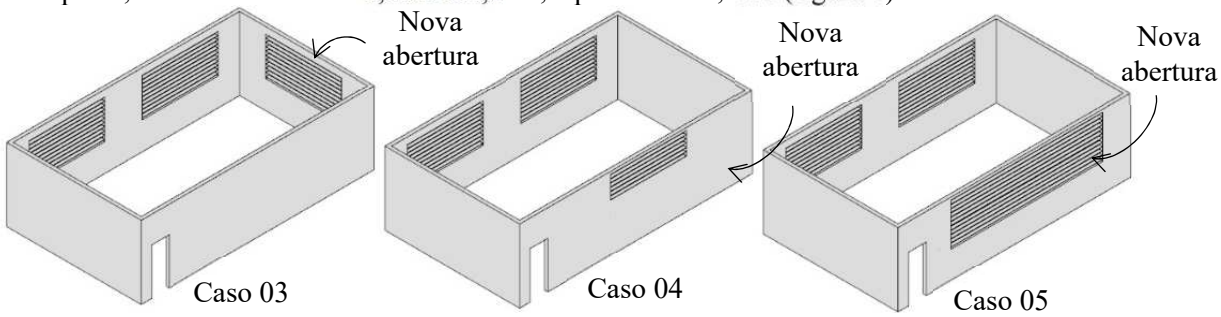

Figura 5 – configuração das aberturas nos casos 03, 04 e 05

3.4. Simulações computacionais

Para a realização das simulações computacionais, utilizou-se o *software* Workbench 15.0. Essa ferramenta é baseada na Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) e é amplamente utilizada nas pesquisas de análise de fluidos nas áreas de arquitetura, apresentando boa coerência dos resultados com os fenômenos físicos.

3.4. 1. Construção do modelo

A preparação do modelo tridimensional foi realizada no *software* AutoCAD, de modo que os objetos sejam compreendidos como sólidos no Workbench. Todas as janelas foram consideradas abertas e a porta fechada, pois é a condição real de uso das salas de aula. Junto ao edifício, elaborou-se um volume externo sem aberturas, representando o domínio pelo qual o fluido escoará. Optou-se pelo domínio retangular, cujas dimensões seguiram as recomendações de Harries (2005): distâncias a barlavento e nas laterais = 5H (15m); altura = 6H (18m); distância a sotavento = 10H (30m), sendo H=3m, que corresponde à altura do modelo simulado (figura 6). A área de obstrução do edifício no domínio foi de 1,1%, na seção transversal no sentido do fluxo e 1,5% no sentido perpendicular ao fluxo, atendendo a sugestão de Cost (2004), cujo valor não deve exceder 3%.

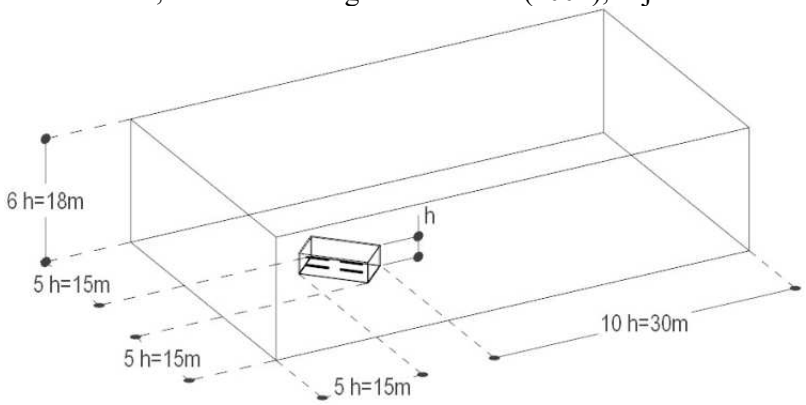

Figura 6 – Dimensões adotadas para o domínio retangular

3.2.2. Geração da malha computacional

Para todas as simulações utilizou-se uma malha estruturada tetraédrica. A geração da malha do domínio apresentou um refinamento nas arestas do chão e nas arestas das laterais, apresentando menor precisão

conforme ia se distanciando do solo. Para as arestas da edificação, da mesma forma que para o domínio, foi preciso um maior cuidado nas proximidades das aberturas, por ser o meio por onde ocorre o escoamento do fluxo de ar, a fim de possibilitar uma maior qualidade nos resultados (Figura 7).

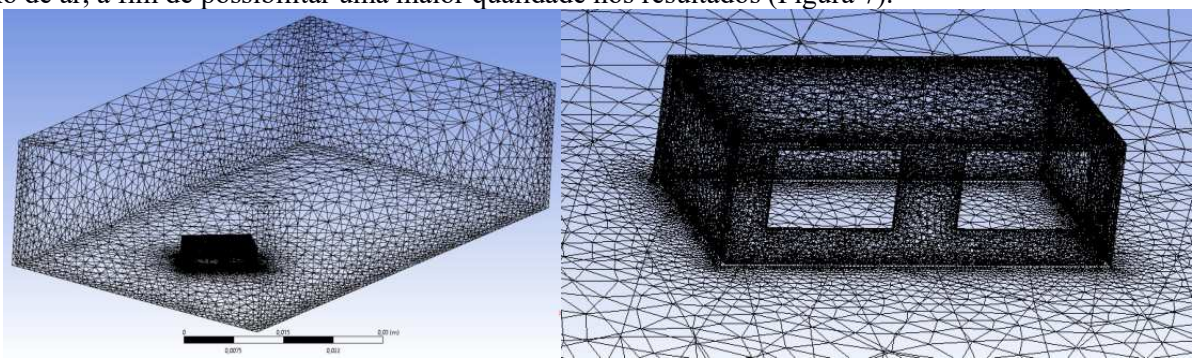

Figura 7 – Malha computacional tetraédrica

3.2.3. Definição das condições iniciais e de contorno

As condições do domínio foram definidas como: entrada como *INLET* e saída como *OUTLET*, as laterais e o topo como *WALL free slip wall* (sem atrito, pois estão longe da edificação e não provocam interferência na mesma), o chão como *GROUND no slip wall* (com atrito *smooth wall*) e a edificação *no slip* wall (com atrito *rough wall*). O fluido utilizado foi o ar nas condições isotérmicas de 25°C e o modelo de turbulência utilizado foi o *K-epsilon*, que é comum e bem estabelecido em diversas pesquisas de ventilação natural (CALAUTIT, HUGHES, 2014; HARGREAVES, MORVAN, WRIGHT, 2014). Na condição de entrada, a velocidade do fluxo de ar estabelecida foi de 2m/s, que é o padrão para a cidade de Maringá (ProjetEEE, 2018). Os parâmetros de controle de convergência foram de 1000 interações e nível de convergência MÁX de 10^{-4}.

3.5. Parâmetros e forma de análise dos resultados

Para avaliar o desempenho qualitativo da ventilação natural em planta, foi gerado um plano horizontal com a altura de 1,00m e plano vertical no meio do ambiente analisado, ambos passando pelas aberturas. Nesses planos, vetores de intensidade e direção do fluxo de ar foram plotados, sendo utilizada uma escala em que cada cor representa um valor de velocidade correspondente. Essa etapa foi realizada para todos os casos.

Posteriormente, uma análise quantitativa foi realizada visando o conforto dos usuários. Geralmente, os limites aceitáveis da velocidade do ar são fornecidos por normas internacionais como ASHRAE 55 (2004), ISO 7730 (2005) e EN15251 (2007). No entanto, esses e outros documentos especificam valores para a velocidade do ar inferiores aos desejados pelos usuários de regiões quentes, como a maior parte do território brasileiro, que demandam por maior movimento do ar. Diante disso, os valores de velocidade média do ar no ambiente interno foram analisados com base nos limites propostos no trabalho de Cândido *et al.* (2010), onde os autores questionaram os limites de aceitabilidade do movimento do ar previsto pelas referidas normas, como é possível perceber na Tabela 2.

Tabela 2 – Limites de aceitabilidade da velocidade do ar nos ambientes internos. Fonte: Adaptado de Cândido *et al.* (2010).

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 (incômodos como levantamento de papéis, desordem de cabelos, roupas e objetos)

Já com relação à transmissão da COVID-19, o parâmetro mais importante para análise é a taxa de renovação de ar/hora e este foi analisado de acordo com as faixas propostas por Allen *et al.* (2020) que trouxeram os parâmetros recomendáveis de taxas de renovação de ar/hora para ambientes de sala de aula, como é o caso de análise dessa pesquisa. Esse índice tem a seguinte classificação: ruim (abaixo de 3 trocas de ar por hora); regular (entre 3 e 4); bom (entre 4 e 5); excelente (entre 5 e 6) e ideal (mais de 6 trocas).

4. RESULTADOS

As figuras 8 e 9 apresentam a velocidade média do fluxo de ar interno e as taxas de renovação de ar/hora, respectivamente, para cada caso analisado. Os casos que possuem ventilação unilateral possuem o fluxo de ar interno com velocidades muito baixas, sendo classificadas, de acordo com a escala de Cândido *et al.* (2010),

como uma ventilação imperceptível, ou seja, não proporciona nenhum conforto aos usuários. Além disso, são casos que apresentam menos de 3 renovações do ar por hora, o que seria muito baixo, estando abaixo do mínimo recomendado para ambientes salubres e que possibilitam uma boa qualidade do ar interno.

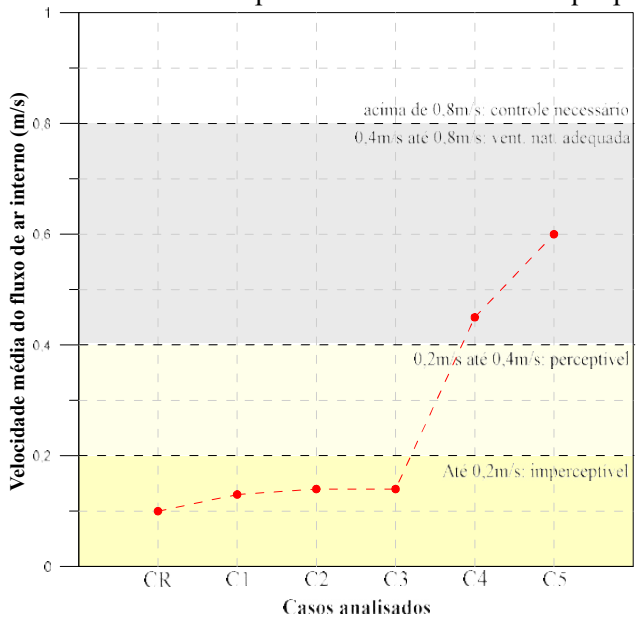

Figura 8 – Velocidade média do fluxo de ar interno para cada caso analisado

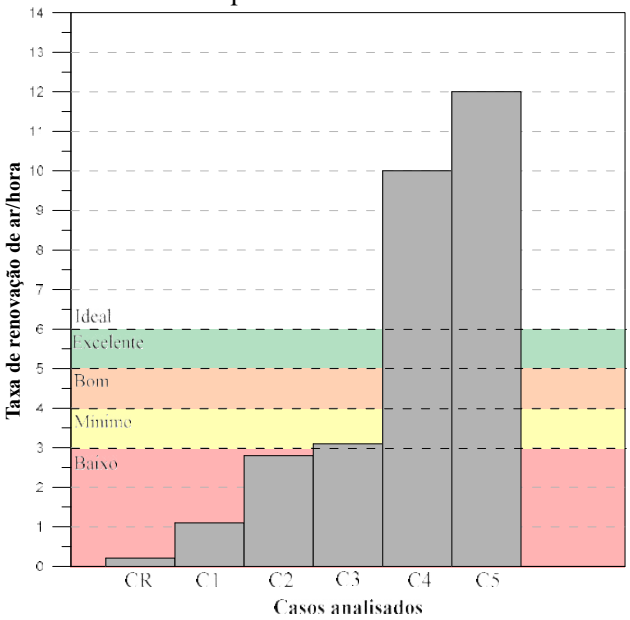

Figura 9 – Taxa de renovação de ar/hora para cada caso analisado

Quando inserimos a abertura na parede adjacente (caso 3), notamos que esses valores não tem uma melhora significativa para o conforto dos alunos, permanecendo como uma ventilação imperceptível. No entanto, para este caso já temos uma taxa de renovação de ar dentro do mínimo exigido por Allen *et al.* (2020), mas ressalta-se que está muito próximo ao limite inferior, apresentando um valor similar ao caso 2 (diferença de 0,3 renovação de ar/hora). Assim, acredita-se que esta configuração não seria uma opção adequada, considerando uma melhor qualidade do ar interno para redução de possíveis propagações virais.

Nos casos 4 e 5, cuja ventilação é cruzada, nota-se claramente uma melhora do fluxo de ar interno, tanto para o conforto dos usuários, como para a qualidade do ar interno. Tem-se valores que são classificados como uma ventilação natural adequada para proporcionar o conforto dos alunos de forma passiva pelo uso da ventilação natural, sendo possível a redução do uso de aparelhos de ar condicionado, por exemplo. Além disso, o número de renovação de ar/hora passa a ser considerado ideal, proporcionando maior qualidade do ar interno e, consequentemente, uma sala de aula mais saudável e segura para a realização de atividades presenciais.

A emissão de recomendações projetuais apenas em função da velocidade média do fluxo de ar interno não é representativa para o conforto térmico dos usuários, sendo necessário uma visualização qualitativa da distribuição do fluxo de ar no ambiente interno. Assim, é possível determinar o *layout* interno, em função das regiões melhores atingidas pela corrente de ar ou com velocidades reduzidas do fluxo de ar e que, assim, vão interferir na sua sensação de conforto de um determinado aluno, por exemplo.

Através das imagens a seguir é possível notar claramente uma diferença na distribuição do fluxo de ar em alguns pontos do ambiente interno. O caso de referência e os casos 1 e 2 apresentam a configuração de uma ventilação unilateral, variando o tamanho da área efetiva da abertura. Nota-se claramente que nos três casos analisados o fluxo de ar na altura dos usuários (em planta) apresenta velocidades bastante reduzidas (em torno de 0,1m/s). No caso de referência, o fluxo próximo as aberturas é muito baixo, sendo praticamente imperceptível, em função da área reduzida de abertura das janelas basculantes, que possibilita uma área efetiva mínima para ventilação natural. Nos casos 1 e 2 a região próxima as aberturas apresenta um fluxo de ar significativamente acentuado, com velocidades maiores (atingindo valores máximos em torno de 0,65m/s), atribuída principalmente às flutuações da pressão do vento na abertura, em função do aumento de sua área efetiva. No entanto, percebe-se claramente que esse fluxo não penetra no ambiente interno, permanecendo ao longo do todo o ambiente uma ventilação natural insatisfatória (valores abaixo de 0,1m/s), o que impossibilita uma adequada renovação do ar no ambiente interno. Destaca-se uma semelhança da distribuição do fluxo de ar na altura dos usuários (em planta) nos casos 1 e 2, pois a configuração das janelas próximo aos usuários é semelhante, aparecendo uma variação na parte superior do espaço (em corte), cujo caso 2 apresenta um fluxo maior ao longo da altura do ambiente, em função da substituição das folhas fixas de vidro por janelas basculantes, o que aumenta a área efetiva das aberturas na região superior do espaço (Figura 10).

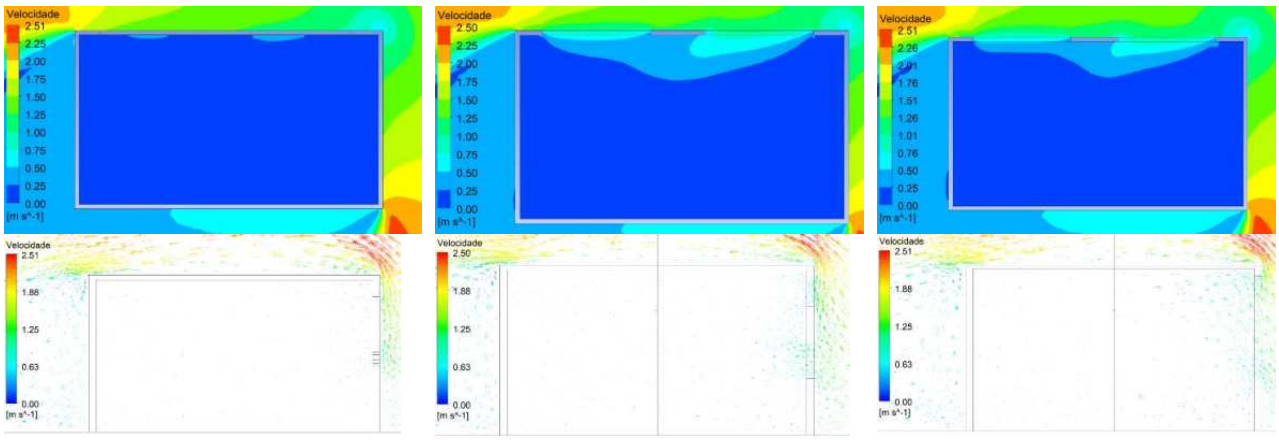

Figura 10 – Planta e corte com a distribuição do fluxo de ar nos casos de referência, um e dois

Notou-se, anteriormente, que a mudança da área efetiva das aberturas de entrada de ar não foi suficiente para melhorar a distribuição do fluxo de ar interno. A ventilação natural unilateral tem-se tornado um modo alternativo de estratégias de ventilação natural, em função da configuração dos ambientes internos que muitas vezes não possibilita a localização de janelas em paredes opostas ou adjacentes. No entanto, muitas vezes essa configuração não possibilita um diferencial de pressão significativo que potencialize a movimentação do fluxo de ar no ambiente interno. Sendo assim, foram propostas mudanças através da inclusão de novas aberturas, alterando a configuração de ventilação unilateral para ventilação cruzada.

No caso 3, nota-se, novamente um fluxo de ar com maiores velocidades próximo às aberturas. No entanto, novamente o fluxo de ar não penetra no espaço interno, pois, a nova abertura foi inserida em uma fachada de pressão positiva (barlavento) e não negativa (sotavento), o que não possibilita uma diferença de pressão significativa entre as aberturas e, assim, uma ventilação cruzada com significativa movimentação do fluxo de ar no ambiente interno (Figura 11).

Já nos casos 4 e 5, tem-se uma melhora significativa na distribuição do fluxo de ar no ambiente interno, pois, como esperado, ambientes com o *layout* livre a ventilação cruzada é favorecida, em função da permeabilidade do espaço totalmente integrado. No entanto, a distribuição do fluxo de ar não é simétrica, em função da incidência oblíqua dos ventos externos. Nota-se claramente que o fluxo penetra ao longo de todo o ambiente interno atingindo em alguns pontos um fluxo de ar com velocidade de 0,65 m/s e 1,0m/s no caso 4 e 5 respectivamente. No caso 4 é possível perceber algumas regiões cujo fluxo de ar apresenta velocidades baixas (em torno de 0,1m/s) em função do desvio do fluxo de ar para a região superior do espaço, devido à localização da abertura de saída. Isso ocorre em uma proporção menor no caso 5, visto que a abertura de saída do ar se localiza na mesma altura das aberturas de entrada, ocorrendo isso apenas na região de separação entre as aberturas de entrada e na face da sala que não apresenta abertura. A ventilação cruzada possibilita maiores velocidades do fluxo de ar interno, especialmente para a ventilação por ação dos ventos, devido a um maior gradiente de pressão entre as fachadas de barlavento e sotavento (Figura 9).

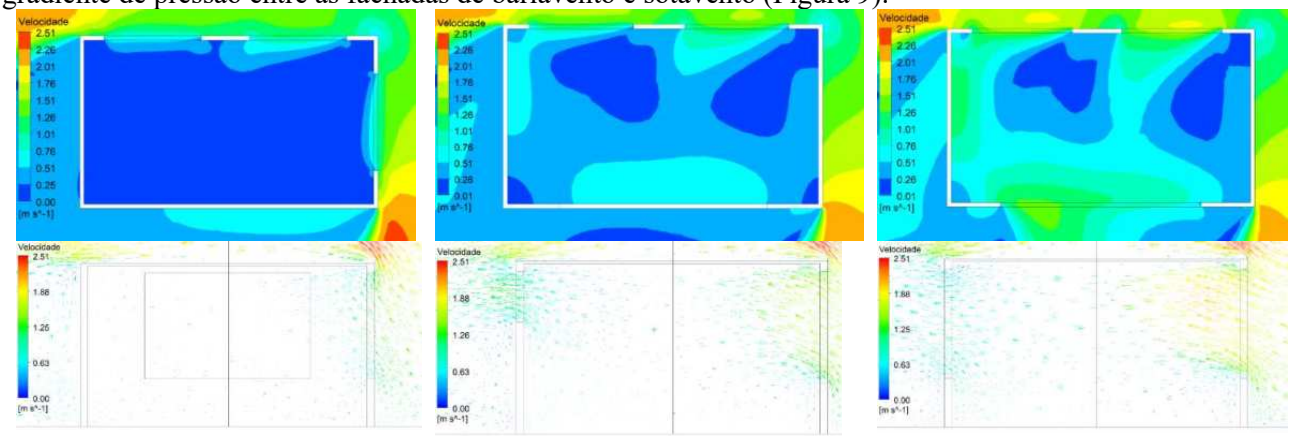

Figura 11 – Planta e corte com a distribuição do fluxo de ar nos casos três, quatro e cinco

5. CONCLUSÕES

O surgimento da pandemia da COVID-19 destaca a importância, a nível mundial, do projeto das escolas que proporcionem condições adequadas para reduzir o risco de transmissão do vírus SARS-CoV-2 em salas de aula fechadas e com alta densidade ocupacional. Dentre as estratégias recomendadas, destaca-se a melhoria da

ventilação dos ambientes, visando melhorar a qualidade do ar interno. Nesta pesquisa, o desempenho da ventilação natural de uma sala de aula existente foi analisado e, posteriormente, alterações projetuais nas esquadrias foram realizadas a fim de entender o impacto gerado na velocidade do fluxo de ar interno e nas taxas de renovação de ar/hora, por meio de simulações CFD.

Os resultados demonstram que a sala de aula analisada na sua situação atual (caso de referência) está com uma ventilação inadequada, tanto para proporcionar o conforto térmico dos usuários quanto para manter uma boa qualidade do ar interno. Isso se mantém para os casos 1 e 2, que embora aumentamos a área efetiva das aberturas, a configuração da ventilação unilateral mantém o fluxo de ar interno com velocidades reduzidas. Alcançamos uma melhora significativa, tanto para o conforto dos usuários quanto para a qualidade de ar das salas de aula, mantendo-a mais salubre, quando possibilitamos a ventilação cruzada, que além de aumentar a velocidade do fluxo de ar interno, permite uma maior renovação do ar/hora. Por fim, ressalta-se a importância de complementar as análises da qualidade do ar interior das salas de aula considerando os aspectos de partículas suspensas e aerossois, possibilitando diversas interfaces desta pesquisa com outras realizadas futuramente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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**, 32, 103311 (2020). Disponível em: <https://aip.scitation.org/doi/full/10.1063/5.0029118>. Acesso em: 30 mai 2021.

ALLARD, F. **Natural ventilation in buildings: a design handbook**. London: James & James, 1998.

ALLEN, J.; SPENGLER, J.; JONES, E.; CEDENO-LAURENT, J. 5-step guide to checking ventilation rates in classrooms. **Harvard Healthy Buildings Program**, 2020.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE handbook 55: fundamentals**. Atlanta: ASHRAE, 2005.

ASHRAE. Guia para reabertura de escolas e universidades**. Brasília Student Branch**. 2020. Disponível em: <https://conforlab.com.br/wp-content/uploads/2020/10/Guia-ASHRAE-2020.pdf> Acesso em: 28 mar 2021.

BITTENCOURT, L. S.; CÂNDIDO, C. **Introdução a ventilação natural**. Maceió: EDUFAL, 2010.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Orientações para retomada segura das atividades presenciais nas escolas de educação básica no Contexto da Pandemia da COVID-19.** 2020. Disponível em: <https://antigo.saude.gov.br/images/pdf/2020/September/18/doc-orientador-para-retomada-segura-das-escolas-no-contexto-da-covid-19.pdf>. Acesso em: 22 mai 2021.

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

CANADIAN COMMITTEE ON INDOOR AIR QUALITY (CCIAQ). **Addressing COVID-19 in buildings. Module 15**. 2020. Disponível em: <https://iaqresource.ca/wp-content/uploads/2020/09/CCIAQB-Module15-Eng.pdf>. Acesso em: 19 jun 2021.

CÂNDIDO, C. M. **Ventilação natural e códigos de obras: uma análise das tipologias de aberturas nos edifícios de escritório em Maceió/AL**. 2006. 194 f. Dissertação (Mestrado em Dinâmicas do Espaço Habitado) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2006.

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.

CEN (European Committee for Standardization), EN 15251 2007, **Criteria for the Indoor Environment Including Thermal, Indoor Air Quality, Light and Noise.** European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.

CHO, H.; CABRERA, D.; SARDY, S.; KILCHHERR, R.; YILMAZ, S.; PATEL, M.K. Evaluation of performance of energy efficient hybrid ventilation system and analysis of occupants' behavior to control windows. **Building and Environment.** 2021. Disponível em <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132320308015> Acesso em: 06 mai 2021.

COST. Cost Action 14: Recommendations on the use of CFD in predicting pedestrian wind environment. **Bruxelas:** COST, 2004.

DENG, S.; ZOU, B.; LAU, J. The adverse associations of classrooms' indoor air quality and thermal comfort conditions on students' illness related absenteeism between heating and non-heating seasons—A pilot study. **International journal of environmental research and public health**, 2021, 18.4: 1500.

EUROPEAN CENTRE FOR DISEASE PREVENTION AND CONTROL (ECDC). **Heating, ventilation and air-conditioning systems in the context of COVID-19.** 2020. Disponível em: <https://www.ecdc.europa.eu/en/publications-data/heating-ventilation-air-conditioning-systems-covid-19>. Acesso em: 26 mar 2021.

FEDERATION OF EUROPEAN HEATING, VENTILATION AND AIR CONDITIONING ASSOCIATIONS (REHVA). **How to operate and use building services in order to prevent the spread of the coronavirus disease (COVID-19) virus (SARS-CoV-2) in workplaces.** 2020. Disponível em: <https://www.rehva.eu/fileadmin/user_upload/REHVA_COVID9_guidance_document_ver2_20200403_1.pdf>. Acesso em: 11 jun 2021.

FERREIRA, C. D. A. **Eficácia das técnicas de climatização natural em um prédio de salas de aula: estudo de caso campus UFSM–CS**. 2019. Dissertação (Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

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

GRATIA E.; BRUYERE I.; DE HERDE A. **How to use natural ventilation to cool narrow office buildings. Building and Environment.** 2004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132304000757>. Acesso em: 26 mar 2021.

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.

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

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (**INMET**). Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/>. Acesso em: dez. 2018.

ISO, ISO 7730, Moderate Thermal Environment—**Determination of the PMV and PPD Indices and Specification of the Conditions for Thermal Comfort.** International Organization for Standardization, 2005.

KOPPEN, W. **Climatologia: com um estúdio de los climas de la tierra**. México: Fondo de Cultura Economia, 1948.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. São Paulo: PW, 2014.

LI, Y.; LEUNG, G. M.; TANG, J. W.; YANG, X.; CHAO, C. Y.; LIN, J. Z.; LU, J. W.; NIELSEN, P. V.; NIU, J.; QIAN, H.; SLEIGH, A. C.; SU, H. J.; SUNDELL, J.; WONG, T.W.; YUEN, P. L. Role of ventilation in airborne transmission of infectious agents in the built environment - a multidisciplinary systematic review. **Indoor Air**. 2007 Feb;17(1):2-18. DOI: <10.1111/j.1600-0668.2006.00445.x>.

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

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Orientações para retomada segura das atividades nas escolas de educação básica no contexto da pandemia da covid-19**. Brasília, 2020.

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>.

NICO-RODRIGUES, E. A. **Influência da janela no desempenho térmico de ambientes ventilados naturalmente.** PhD Thesis. Tese (Doutorado em arquitetura e urbanismo). Universidade del Bío-Bio. Bío-Bio: Chile, 2015.

PROJETANDO EDIFICAÇÕES ENERGETICAMENTE EFICIENTES **- PROJETEEE**. Disponível em: <http://projeteee.mma.gov.br/>. Acesso em: dez. 2018 e mar. 2023.

PULIMENO, M.; PISCITELLI, P.; COLAZZO, S.; COLAO, A.; MIANI, A. Indoor air quality at school and students' performance: Recommendations of the UNESCO Chair on Health Education and Sustainable Development & the Italian Society of Environmental Medicine (SIMA). **Health Promotion Perspectives,** 2020, 10.3: 169.

QIAN, H.; LI, Y. G.; SETO, W. H.; CHING, P.; CHING, W. H.; SUN, H. Q. Natural ventilation for reducing airborne infection in hospitals. **Building and Environment**, v. 45, n. 3, p. 559-565, 2010.

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.

SOFTWARE **ANSYS® WORKBENCH** Academic Research Mechanical, Release 15.0.

SOFTWARE **AutoCAD®.** Autodesk®, 2018.

SOFTWARE **EPVIEW 1.4** (2012). Elaborado por: RORIZ, M.

SOHRABI, C.; ALSAFI, Z.; O'NEILL, N.; KHAN, M.; KERWAN, A.; AL-JABIR, A.; IOSIFIDIS, C.; AGHA, R. (2020). World Health Organization declares global emergency: A review of the 2019 novel coronavirus (COVID-19). **International journal of surgery**, v. 76, p. 71-76, 2020.

TOLEDO, E. **Ventilação natural das habitações**. Maceió: Ed. Edufal, 1999.

UMWELTBUNDESAMT (UBA) –. **Richtig Lüften in Schulen**. Disponível em: <https://www.umweltbundesamt.de/richtig-lueften-in-schulen#konnen-mobile-luftreiniger-in-klassenraumen-helfen>. Acesso em: 18 de mar. de 2021.

VAN DIJKEN, F. **Guidance for Schools.** REHVA Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations. 2020.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Considerations for school-related public health measures in the context of COVID-19**. Annex to Considerations in adjusting public health and social measures in the context of COVID-19. Setembro, 2020. Disponível em: <https://www.who.int/publications-detail/risk->. 2020b.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Coronavirus disease (COVID-19)**. (2020). Disponível em: <https://www.who.int/health-topics/coronavirus#tab=tab_1>. 2020a.

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>.