AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO AR INTERIOR DURANTE A PANDEMIA DE COVID-19 EM SALAS DE AULA NATURALMENTE VENTILADAS

Paula Brumer Franceschini (1); Iara Nogueira Liguori (2); Leticia de Oliveira Neves (3)
(1) Doutoranda no PPGATC/ UNICAMP, p229312@dac.unicamp.br
(2) Mestra em Arquitetura, Tecnologia e Cidade, iara.liguori@gmail.com
(3) Professora Doutora do Departamento de Arquitetura e Construção da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, leticia@fec.unicamp.br, Rua Saturnino de Brito, 224 – Cidade Universitária Zeferino Vaz, 13083-889, Campinas/ SP, Tel.: (19) 3521-2384

RESUMO
As condições internas de salas de aula são fatores importantes para a saúde e o conforto dos ocupantes e no processo de aprendizagem dos alunos. Para a obtenção de uma boa qualidade do ar interior (QAI), é necessário o uso de um sistema de ventilação apropriado, com taxas de renovação do ar adequadas. Em 2020, esta questão tornou-se especialmente relevante devido à pandemia de COVID-19, visto que estratégias adequadas de ventilação em ambientes com alta taxa de ocupação, como salas de aula, podem contribuir na redução do potencial de transmissão de doenças respiratórias. O objetivo deste estudo é avaliar a taxa de renovação do ar e a concentração de CO_2 em salas de aula de edificações escolares, a fim de identificar cenários que contribuam para a redução do risco de disseminação do vírus SARS-CoV-2. Primeiro, variáveis climáticas foram monitoradas em uma sala de aula em dois períodos: antes e durante a pandemia de COVID-19. Um modelo foi calibrado com base nos dados coletados *in loco*, por meio do *software* EnergyPlus, versão 9.3. Na sequência, cenários variando o número de ocupantes e a taxa de renovação do ar do ambiente foram simulados, a fim de avaliar o impacto destas variáveis na concentração de CO_2 nos ambientes. Os resultados mostraram uma diferença de aproximadamente 42% entre o pior e o melhor cenários, sendo que a redução no número de ocupantes associada a taxas de renovação do ar superiores a 6,5 hr^{-1} mostraram-se estratégias efetivas para a redução da concentração de CO_2 no ambiente interno. No entanto, vale reforçar que as estratégias adotadas devem ser analisadas para cada situação, assim como os riscos e benefícios para os ocupantes da sala de aula.

Palavras-chave: qualidade do ar interior (QAI), ventilação natural, edificação escolar, COVID-19.

ABSTRACT
Classrooms' indoor conditions are important factors for the occupants' health and comfort, also contributing to the students' learning process. In order to obtain good indoor air quality (IAQ), the use of an appropriate ventilation system is necessary, with adequate air change rates. In 2020, this issue became especially relevant due to the COVID-19 pandemic, since adequate ventilation strategies in environments with a high occupancy rate such as classrooms can contribute to reducing the transmission potential of respiratory diseases. This study aims to evaluate the air change rates and the CO_2 concentration in classrooms of school buildings, in order to identify scenarios that contribute to reducing the risk of spreading the SARS-CoV-2 virus. First, climatic variables were monitored in a classroom in two periods: before and during the COVID-19 pandemic. A simulation model was calibrated based on the data collected *in loco*, using the EnergyPlus software, version 9.3. Subsequently, scenarios varying the number of occupants and the environment's air change rate were simulated, in order to assess the impact of these variables on the environment's CO_2 concentration. The results showed a difference of approximately 42% between the best and the worst scenarios. The reduction in the number of occupants associated to a ventilation rate over 6,5 hr^{-1} were effective strategies to reduce the CO_2 concentration. However, it is important to emphasize that the adopted strategies must be analyzed for each situation specifically, as well as the risks and benefits for the classroom occupants.

Keywords: indoor air quality (IAQ), natural ventilation, school building, COVID-19.

1. INTRODUÇÃO

As escolas são os locais onde as crianças passam a maior parte do tempo durante a infância (DENG; ZOU; LAU, 2021; KATAFYGIOTOU; SERGHIDES, 2014; STAZI; NASPI; D'ORAZIO, 2017), o que reforça a importância da qualidade da arquitetura escolar, em amplo aspecto. As crianças são mais vulneráveis e sensitivas a influências do ambiente do que os adultos, pois (i) elas respiram mais rápido, uma vez que têm a taxa metabólica mais elevada, inalando mais ar (e mais poluentes) em relação ao peso do corpo, (ii) os seus órgãos estão ainda em desenvolvimento e (iii) elas têm uma expectativa de vida maior e, portanto, têm mais tempo para manifestar qualquer doença associada (DENG; ZOU; LAU, 2021; WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2018). Adicionalmente, as condições de temperatura, umidade e qualidade do ar em salas de aula são fatores importantes no processo de aprendizagem dos alunos (DUTTON; SHAO, 2010; KATAFYGIOTOU; SERGHIDES, 2014). Uma pesquisa conduzida na Dinamarca (OLESEN, 2015) mostrou que a falta de qualidade ambiental em escolas reflete em custos adicionais com professores e com cuidados médicos, devido ao absenteísmo por doenças, além de gerar impactos socioeconômicos. Nesse contexto, é importante melhorar a qualidade do ar interior (QAI) de salas de aula de edificações escolares para que as crianças tenham um desenvolvimento saudável e um melhor desempenho escolar.

Uma questão chave para a obtenção de uma boa QAI em salas de aula é o uso de um sistema de ventilação apropriado, com taxas de renovação do ar adequadas (VAN DIJKEN, 2020). A avaliação da qualidade da ventilação de um ambiente pode ser monitorada pela concentração de dióxido de carbono (CO_2) pois, como os usuários exalam CO_2 ao respirar, a sua alta concentração pode indicar que a renovação do ar está inadequada (UBA, 2021). Este é um ponto crítico para as edificações escolares, devido ao elevado índice de ocupação dos ambientes (HOU; KATAL; WANG, 2021). Exemplo disso são os resultados obtidos na investigação conduzida em mais de 1.000 salas de aula na Dinamarca, Suécia e Noruega, através de medições contínuas das taxas de CO_2. Os resultados do estudo mostraram que apenas 44% das salas apresentavam níveis aceitáveis de concentração de CO_2 (de 385 a 1.000 ppm), sendo os piores resultados obtidos nos ambientes naturalmente ventilados (OLESEN, 2015), devido ao fechamento de janelas em função das baixas temperaturas externas e à ausência de um sistema de ventilação mecânico para proporcionar a renovação do ar. Em um estudo realizado em 85 salas de aula nos Estados Unidos, observou-se que 80% dos ambientes eram mal ventilados (com uma taxa de renovação de ar inferior a 6,5 L/s por pessoa) (DENG; ZOU; LAU, 2021). Os problemas mais comuns relacionados à QAI incluem manutenção e limpeza inadequadas de sistemas de ventilação, taxas de renovação do ar insuficientes aos ambientes ocupados, distribuição do ar inadequada, altos índices de compostos orgânicos voláteis, substâncias alergênicas e mofo, além de elevadas temperatura e umidade internas (PULIMENO *et al.*, 2020).

Em 2020, as questões relacionadas à QAI em salas de aula tornaram-se especialmente relevantes devido à pandemia de COVID-19 (PULIMENO *et al.*, 2020). Uma das formas de transmissão já conhecidas do vírus SARS-CoV-2 é a transmissão pelo ar, através de micro partículas de até 5 μm de diâmetro que permanecem suspensas por algumas horas e podem ser transportadas a longas distâncias (VAN DIJKEN, 2020). A transmissão e a trajetória das micro partículas infectadas são influenciadas por parâmetros como a densidade, a velocidade inicial, o tamanho da partícula e a velocidade e direção do ar (LIPINSKI *et al.*, 2020). O ambiente construído serve como potencial vetor de transmissão de doenças como a COVID-19, principalmente ambientes fechados e com pouca ventilação (BHAGAT *et al.*, 2020; DIETZ *et al.*, 2020). Evidências mostram que a taxa de contágio do SARS-CoV-2, ou seja, quantas pessoas saudáveis uma pessoa infectada contamina, é maior em ambientes fechados (a taxa variou entre 5 e 14) do que em ambientes abertos (a taxa variou entre 1,5 e 3) (DIETZ *et al.*, 2020). Mesmo que muitos casos de transmissão possam ser reduzidos através de medidas como o distanciamento social e o uso de máscaras, o ar interno necessita de soluções adequadas de ventilação para remover os contaminantes de forma segura (LIPINSKI *et al.*, 2020). Assim, estratégias adequadas de ventilação em ambientes com alta taxa de ocupação como salas de aula podem contribuir na redução do potencial de transmissão de doenças respiratórias (DIETZ *et al.*, 2020).

A pandemia de COVID-19 ocasionou o fechamento de muitas escolas, como medida preventiva para reduzir a transmissão do vírus (KAPOOR *et al.*, 2021). Entretanto, o fechamento das escolas traz diversos prejuízos a curto, médio e longo prazos em níveis individual e comunitário, como: a defasagem no aprendizado dos alunos; o aumento da desigualdade na educação; a menor probabilidade de alunos, principalmente em situação de maior vulnerabilidade, retornarem à escola; o aumento do risco de abuso, exploração e violência doméstica, devido às medidas de isolamento e à maior permanência das crianças em casa; o aumento do sedentarismo e consequente ganho de peso; o aumento de estresse e ansiedade, devido à falta de interação entre os alunos e à interrupção da rotina; além de impedir o retorno integral de muitos pais ou responsáveis aos seus trabalhos (JONES *et al.*, 2020; UNESCO, 2020). Reabrir as escolas é um desafio e, neste contexto, a

implementação de estratégias para reduzir o risco de transmissão do vírus no ambiente escolar é uma questão de importância primordial (JONES *et al.*, 2020).

Algumas publicações recentes trazem orientações para a ventilação adequada de salas de aula (JONES *et al.*, 2020; UBA, 2021; VAN DIJKEN, 2020; WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2020). Na Alemanha, a Agência Ambiental Federal (*Umweltbundesamt* - UBA) produziu uma apostila direcionada a escolas sobre a ventilação em salas de aula durante a pandemia de COVID-19, sugerindo algumas medidas a serem tomadas para garantir um mínimo de três trocas de ar por hora no ambiente, como: abrir as janelas a cada 20 minutos por 3 a 5 minutos no inverno e por 10 a 20 minutos no verão; ventilar durante todo o intervalo entre as aulas; abrir janelas em paredes opostas para obter ventilação cruzada; utilizar equipamentos auxiliares para a purificação do ar, quando a ventilação natural não for suficiente (UBA, 2021). Nos Estados Unidos, um relatório com estratégias para reduzir o risco de transmissão de doenças em salas de aula foi publicado, incluindo recomendações como: aumentar a ventilação natural; filtrar o ar interno (e.g. filtro MERV 13); utilizar equipamentos para purificar o ar (e.g. filtros HEPA); avaliar o desempenho da ventilação e filtragem do ar através de equipamentos como sensores de CO_2 e realizar a manutenção adequada dos sistemas em operação; manter a umidade relativa entre 40% e 60%; considerar o uso de técnicas avançadas de limpeza do ar com irradiação germinicida ultravioleta (UV-C) (JONES *et al.*, 2020). O guia publicado pela Federação Européia de Associações de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (REHVA) ressalta que a ventilação natural não pode ser garantida o tempo todo, pois depende da diferença de temperatura entre os ambientes interno e externo e, portanto, a ventilação mecânica pode ser necessária para uma QAI adequada (VAN DIJKEN, 2020). A Organização Mundial da Saúde (OMS) destacou algumas estratégias para proporcionar uma ventilação adequada nas salas de aula, como abrir as janelas para proporcionar a troca de ar com o exterior, garantir a renovação do ar, fazer a manutenção dos sistemas de climatização regularmente e utilizá-los no nível máximo de troca de ar com o exterior (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2020).

Em âmbito nacional, o Ministério da Saúde brasileiro publicou algumas orientações para a retomada das atividades escolares presenciais, porém a única recomendação em relação à ventilação das salas de aula é a de abrir as portas e janelas para aumentar a circulação de ar no ambiente (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2020). No entanto, no Brasil, as condições climáticas e a arquitetura escolar apresentam diferenças significativas em relação aos países mencionados nos estudos acima citados, sendo inadequado, portanto, importar as medidas sugeridas nos documentos internacionais já publicados (JONES et al., 2020; UBA, 2021; VAN DIJKEN, 2020; WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2020). As salas de aula de escolas públicas brasileiras e, em especial, das escolas públicas do estado de São Paulo, mantidas pela Fundação para o Desenvolvimento da Educação (FDE), funcionam, em sua maioria, com aberturas para ventilação natural e, em certos casos, com ventilação mecânica proporcionada por ventiladores de teto ou parede. Nessas escolas, o ano de 2020 foi marcado pelo ensino à distância e tentativas de volta às atividades em períodos de curta duração e com número reduzido de alunos. O planejamento de reabertura de escolas deve propor medidas seguras e consistentes, a fim de proteger estudantes, funcionários, professores e suas famílias. Para isso, a QAI em salas de aula precisa ser avaliada de forma a auxiliar na definição de estratégias que resultem em taxas de ventilação adequadas e, por consequência, que proporcionem um ambiente mais saudável aos usuários.

2. OBJETIVO

O objetivo deste estudo é avaliar a taxa de renovação do ar e a concentração de CO_2 em salas de aula de edificações escolares, a fim de identificar cenários que contribuam para a redução do risco de disseminação do vírus SARS-CoV-2.

3. MÉTODO

O método adotado contemplou o monitoramento *in loco* de variáveis climáticas de uma sala de aula e simulações computacionais. As etapas de trabalho são detalhadas a seguir.

3.1 Monitoramento de variáveis climáticas em sala de aula

A coleta de dados foi realizada em uma escola estadual administrada pela Fundação para o Desenvolvimento da Educação (FDE) localizada em Campinas, São Paulo. A escola é de Ensino Médio, com alunos com idades entre 14 e 18 anos. As salas de aula têm aproximadamente 49 m² e são distribuídas em três edificações térreas (Figura 1). A sala de aula selecionada para o estudo (Figura 2) tem a fachada com janela voltada para Sudeste (ventilação unilateral). A obtenção de ventilação cruzada só é possível por meio da abertura da porta.

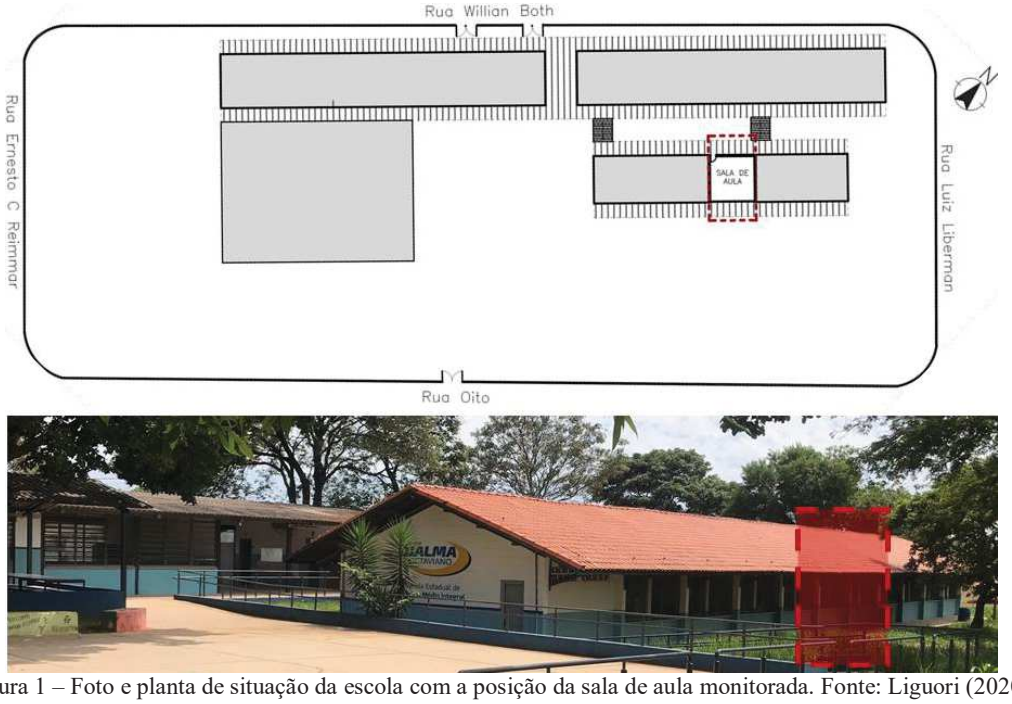

Figura 1 – Foto e planta de situação da escola com a posição da sala de aula monitorada. Fonte: Liguori (2020).

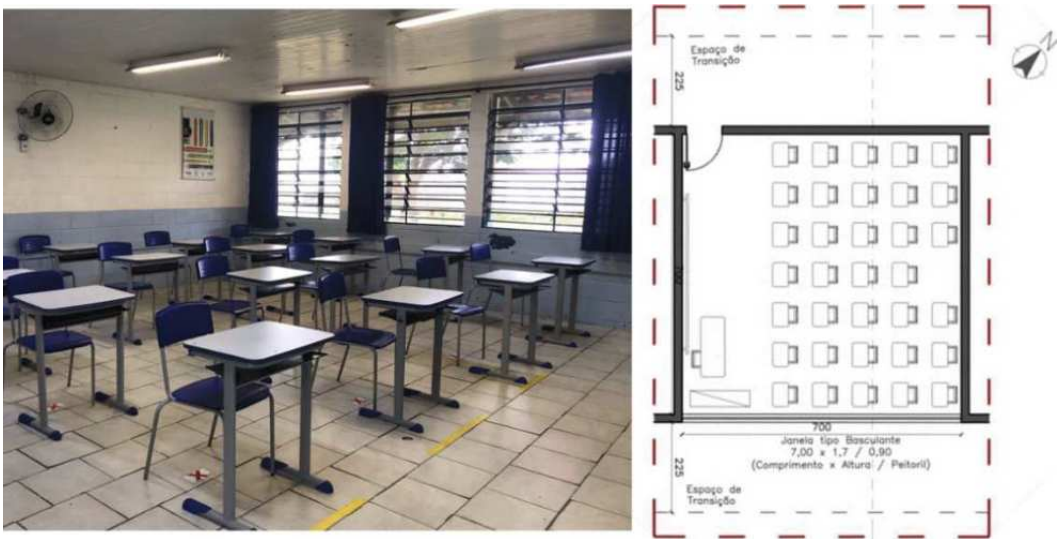

Figura 2 – Foto e planta baixa da sala de aula. Fonte: Os autores.

O monitoramento foi realizado em dois períodos – antes (LIGUORI, 2020) e durante a pandemia de COVID-19 (Tabela 1). No período durante a pandemia observaram-se mudanças no número de ocupantes e no período de ocupação devido às restrições impostas pelo Plano São Paulo (SÃO PAULO, 2021), elaborado para a pandemia de COVID-19, fase amarela. Adicionalmente, algumas estratégias foram recomendadas às escolas nesse período, como manter sempre as janelas e portas abertas e não utilizar o ventilador.

Tabela 1 – Coleta de dados antes e durante a pandemia.

Coleta	Datas	Número de ocupantes	Período de ocupação
Antes da pandemia (5 dias, sendo 5 ocupados)	11/03 a 15/03/2019	40	07:30 h às 12:30 h e 13:30 h às 16:30 h
Durante a pandemia (7 dias, sendo 4 ocupados)	24/02 a 03/03/2021	20	08:00 h às 11:30h

As variáveis climáticas monitoradas incluíram: temperatura do ar (T_a), temperatura de globo (T_g) e umidade relativa (UR). Os equipamentos utilizados para a medição são apresentados na Tabela 2. O *datalogger* de temperatura do ar e de globo foi posicionado a uma altura de 1,5 m e a uma distância mínima de 40 cm da parede interna, em um tripé, para não atrapalhar o andamento da aula. Os dados foram registrados a cada 10 minutos. No período durante a pandemia foram monitoradas também a concentração de CO_2 e a operação manual de janelas e ventiladores. O sensor de CO_2 foi posicionado na parede a uma altura de 1,1 m, referente à altura da cabeça de uma pessoa sentada (ISO 7726, 1998) afastado das janelas e próximo às mesas dos alunos.

Tabela 2 – Especificações técnicas dos equipamentos utilizados para o monitoramento.

Equipamento	Alcance	Precisão	Período
Datalogger temperatura/ umidade, marca Testo, modelo 174H	-20 ºC a 70 ºC 0 a 100%	± 0,5 ºC ± 3%	Antes da pandemia
Datalogger temperatura/ temperatura, marca Testo, modelo 175-T2	-35 ºC a 55 ºC	± 0,5 ºC	Antes e durante a pandemia
Sonda de esfera quente, marca Testo, modelos 0635 1549, 0635 1049 e 0613 1712	-25 ºC a 80 ºC	± 0,2 ºC	Antes e durante a pandemia
Datalogger Hobo de State/ Pulse/ Event/ Runtime, marca ONSET (para o monitoramento da operação das janelas)	Frequência máxima 1 Hz	± 1 min	Durante a pandemia
Datalogger de temperatura e umidade, iButton Hygrochron (para o monitoramento da operação dos ventiladores e das variáveis externas)	-20 °C a 85 °C 0 a 100%	± 0,5 ºC ± 0,6%	Durante a pandemia
Datalogger wi-fi com display e sensores integrados de temperatura e umidade, CO2 e pressão atmosférica, marca Testo, modelo 160 IAQ	0 ºC a 50 ºC 0 a 100% 0 a 5000 ppm	± 0,5 ºC ± 2% ± (100 ppm + 3 % do vm)	Durante a pandemia

As variáveis climáticas externas (temperatura do ar, umidade relativa, velocidade e direção do vento e índice de precipitação) de ambos os períodos (antes e durante a pandemia) foram disponibilizadas pelo Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura (CEPAGRI) da UNICAMP, cuja estação meteorológica está localizada a cerca de 10 km de distância da escola monitorada. Os dados foram convertidos para o formato EnergyPlus Weather File (epw) através do Weather Converter versão 8.1.0.005, um programa auxiliar do *software* EnergyPlus. No período antes da pandemia, as temperaturas de bulbo seco média, média máxima e média mínima registradas foram, respectivamente, 23,7 °C, 30,4 °C e 19,9 °C. No período durante a pandemia foram de 23,2 °C, 30 °C e 18,7 °C, respectivamente.

3.2 Simulações computacionais

Um modelo de simulação da sala de aula monitorada foi calibrado com base nos dados coletados *in loco,* por meio do *software* EnergyPlus, versão 9.3. Na sequência, o modelo foi utilizado para a simulação de cenários variando o número de ocupantes e a taxa de ventilação do ambiente, a fim de avaliar o impacto destas variáveis na concentração de CO_2 nos ambientes.

3.2.1 Calibração do modelo

A sala de aula foi modelada como uma única zona térmica. As paredes laterais foram consideradas adiabáticas, pois são comuns a outras salas de aula da escola de condições térmicas similares, não incluídas no modelo (Figura 3). O modelo de temperaturas do solo não perturbadas KusudaAchenbach foi utilizado para simular as trocas de calor pelo solo (ELI *et al.*, 2019). A sala de aula foi modelada sem obstruções no entorno imediato, tendo em vista que as edificações presentes no entorno da escola são de baixa altura e não bloqueiam a radiação solar incidente na edificação em estudo.

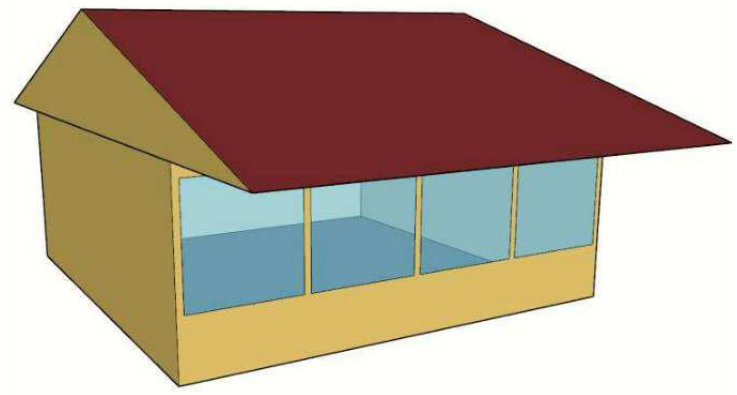

Figura 3 – Geometria da sala de aula.

As propriedades térmicas dos materiais que compõem a edificação (Tabela 3), as características das esquadrias (Tabela 4) e as cargas internas de ocupação, equipamentos e iluminação (Tabela 5), levantados com base na leitura do projeto e observação *in loco,* foram inseridas como dados de entrada. A ventilação natural foi modelada com o modelo AirFlow Network, utilizando como coeficiente de descarga o valor de 0,6 (FLOURENTZOU; VAN DER MAAS; ROULET, 1998) e as características das esquadrias apresentadas na Tabela 4. Os coeficientes de pressão foram calculados pelo programa.

Tabela 3 – Propriedades térmicas dos componentes construtivos.

Componente	Descrição	Transmitância térmica - U (W/m². K)	Capacidade térmica – C (kJ/m². K)	Absortância solar da sup. externa - α	Fator solar - FS
Parede externa	Bloco de concreto 190x190x390 pintado	2,5	240	0,36	-
Janela	Vidro incolor 3 mm	5,7	-	-	0,87
Laje	Laje de concreto 150 mm	2,7	243,2	-	-
Piso	Argamassa de assentamento + piso cerâmico				
Forro	Forro de PVC	1,75	21	0,65	-
Cobertura	Telha cerâmica				

Tabela 4 – Características das esquadrias.

Item	Descrição	Área efetiva de abertura para ventilação
Porta	Porta de giro – 90 cm x 210 cm	1
Janela	Janela com 12 folhas pivotantes e 6 fixas – 170 cm x 170 cm / peitoril 90 cm (4 unidades)	0,2

Tabela 5 – Cargas internas.

Item	Descrição	Carga total
Ocupação	Taxa metabólica de uma pessoa sentada	108 W/pessoa
Equipamentos	2 ventiladores – 150 W (unid.) 1 projetor – 260 W	560 W
Iluminação	6 luminárias, 2 lâmpadas fluorescentes cada – 40 W (unid.)	480 W

O arquivo climático desenvolvido com base nos dados monitorados pela estação meteorológica do CEPAGRI/ UNICAMP durante o período da coleta de dados na escola foi utilizado para a calibração do modelo de simulação. Os dados coletados no período noturno (i.e. sem influência da radiação solar e das cargas térmicas internas) foram utilizados na calibração, de forma a minimizar as incertezas. Neste período, as condições internas são influenciadas prioritariamente pelas alterações advindas da temperatura externa, da transferência de calor por condução através da parede e da janela e da infiltração (NEVES *et al.*, 2020). O erro médio absoluto (*Mean Absolute Error* – MAE) foi utilizado para avaliar a precisão do modelo de calibração, de forma a selecionar o modelo com valores de temperatura operativa interna mais próximos dos dados medidos.

Com o modelo físico da envoltória calibrado, as condições internas durante o dia foram calibradas inserindo o padrão de ocupação a partir dos dados coletados e observados nos dois períodos de medição. Para o período antes da pandemia, a simulação considerou: (i) os ventiladores, a iluminação e o projetor ligados durante os períodos de aula (das 07:30 h às 12:30 h e das 13:30 h às 16:30 h), (ii) a ocupação em período integral (das 07:30 h às 12:30 h e das 13:30 h às 16:30 h) com 40 pessoas (Tabela 1) e (iii) as janelas e a porta da sala abertas durante os períodos de aula. Para o período da pandemia, a simulação considerou: (i) os ventiladores desligados durante todo o tempo e a iluminação e o projetor ligados durante os períodos de aula (das 8:30 h às 11:30 h), (ii) a ocupação apenas no período da manhã (das 8:30 h às 11:30 h) com 20 pessoas (Tabela 1) e (iii) as janelas e a porta da sala abertas durante o dia todo (das 8 h às 17 h). Para as duas simulações, o MAE foi calculado novamente para observar a diferença geral e o erro médio normalizado (*Normalised Mean Bias Error* – NMBE) e o coeficiente de variação da raiz quadrada do erro médio (*Coefficient Variation of Root Mean Square Error* – CV RMSE) foram utilizados para avaliar a precisão do modelo de calibração. Em ambos os modelos, o MAE ficou abaixo de 1 ºC e o NMBE e o CV RMSE ficaram abaixo dos valores padrões estabelecidos na ASHRAE guideline 14 (ASHRAE, 2002), que são de 10% e 30%, respectivamente (Tabela 6).

Tabela 6 – Precisão da calibração.

Simulação	MAE (ºC)	NMBE (%)	CV RMSE (%)
Antes da pandemia	0,35	1,25	7,30
Durante a pandemia	0,85	-3,42	6,42

3.2.2 Cenários analisados

Dois parâmetros variáveis foram definidos para elaboração dos cenários de simulação: a taxa de ocupação (número de ocupantes da sala de aula), tendo em vista que uma das estratégias utilizadas pelas escolas durante a pandemia tem sido a redução do número de alunos em sala de aula; e a taxa de renovação do ar ambiente (número de renovações de ar por hora), tendo em vista analisar a necessidade de modificação do projeto de ventilação natural da sala de aula. Ambos os parâmetros têm por objetivo avaliar o impacto nos

resultados da concentração de CO_2 no ambiente interno. Para a simulação dos cenários, foi utilizado o modelo calibrado para o período durante a pandemia, porém com o período de ocupação de aula integral, das 07:30 h às 12:30 h e das 13:30 h às 16:30 h.

Os cenários propostos para variação na taxa de ocupação (Tabela 7) foram definidos com base no Plano São Paulo (SÃO PAULO, 2021), que estabelece um percentual de ocupação para cada fase: 35% na fase laranja, 70% na fase amarela e 100% na fase verde, sendo a fase verde representativa da ocupação do ambiente antes da pandemia. A ocupação máxima (100%) considerou a turma completa de 45 alunos.

Os cenários propostos para variação na taxa de renovação do ar ambiente seguiram os níveis de ventilação recomendados pela NBR 16401-3 (ABNT, 2008) para salas de aula (Tabela 7), que estabelece taxas de renovação de ar para a obtenção de QAI adequada em ambientes fechados. A norma propõe três níveis de vazão eficaz para a ventilação: mínimo (nível 1), intermediário (nível 2) e superior (nível 3), no qual existem evidências de redução de reclamações e manifestações alérgicas. A vazão foi introduzida na simulação através do grupo *Zone Airflow* do EnergyPlus.

Tabela 7 – Cenários propostos, variando a taxa de ocupação e a vazão eficaz de ar exterior (V_{ef})

Variáveis	**Cenário 1**	**Cenário 2**	**Cenário 3**	**Cenário 4**	**Cenário 5**	**Cenário 6**	**Cenário 7**	**Cenário 8**	**Cenário 9**
F_p (L/s.pessoa)*	5 (nível 1)			6,3 (nível 2)			7,5 (nível 3)		
Taxa de ocupação (%)**	35	70	100	35	70	100	35	70	100
P_z (pessoas)	16	31	45	16	31	45	16	31	45
F_a (L/s.m²)*	0,6 (nível 1)			0,8 (nível 2)			0,9 (nível 3)		
A_z (m²)	49								
V_{ef} (L/s)	109,4	184,4	254,4	140	234,5	322,7	164,1	276,6	381,6

*** Valores para salas de aula de acordo com a NBR 16401-3 (ABNT, 2008)**

**** Valores propostos no Plano SP** (SÃO PAULO, 2021)

O arquivo climático da cidade de Campinas no formato Typical Meteorological Year (TMY) anos 2003-2017 (LABEEE, 2018) foi utilizado para simular tanto os cenários propostos como o modelo calibrado com a ocupação de antes e durante a pandemia de COVID-19, de forma a gerar dados anuais de concentração de CO_2 e de número de renovações do ar por hora do modelo de referência (calibração) e compará-los com os cenários propostos.

4. RESULTADOS

Os resultados da concentração de CO_2 no ambiente estão apresentados para o período de um dia letivo representativo (Figuras 4 e 5). A simulação representativa das condições de medição antes da pandemia (Figura 4) resultou em alta concentração de CO_2, atingindo valores muito próximos do máximo recomendado pela ANVISA (1000 ppm) nos períodos de ocupação. No período durante a pandemia (Figura 4), com a redução do número de ocupantes em 45%, a concentração de CO_2 reduziu cerca de 30% em relação ao período anterior, atingindo picos de aproximadamente 700 ppm durante o período de ocupação.

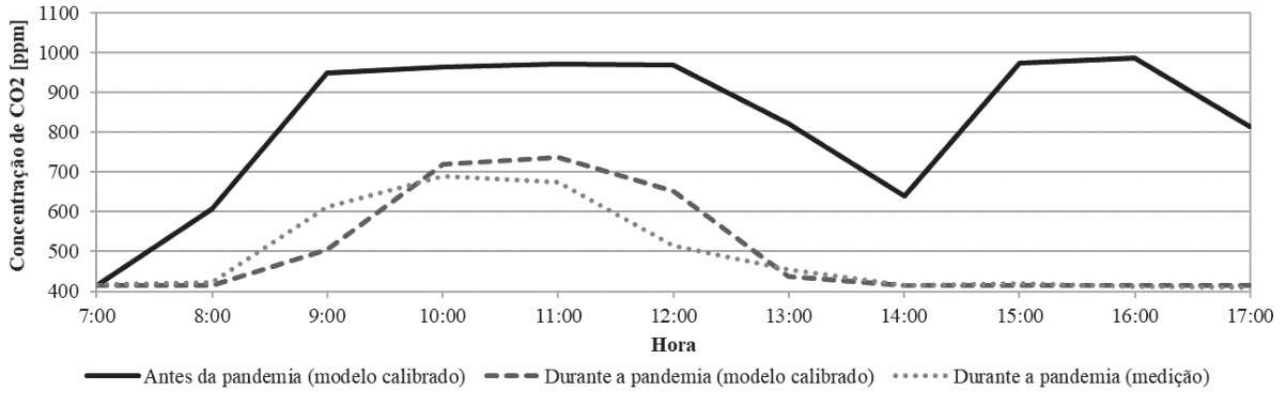

Figura 4 – Concentração de CO_2 durante um dia letivo representativo nos períodos de medição.

Com relação aos cenários propostos (Figura 5), aqueles com vazão eficaz para a ventilação de acordo com o nível mínimo (nível 1) proposto na NBR 16401-3 (ABNT, 2008) – cenários 1, 2 e 3 – apresentaram concentração de CO_2 acima do nível recomendado de até 1000 ppm (ANVISA, 2003). Ainda, a maioria dos cenários apresentou uma concentração de CO_2 elevada durante o período de ocupação, acima de 850 ppm, o

que demonstra a necessidade de uma ventilação acima dos níveis indicados na NBR16401-3 (ABNT, 2008) para manter uma QAI satisfatória.

A mudança nos valores de vazão eficaz para ventilação teve maior impacto nos resultados de concentração de CO_2 no ambiente do que a variação no número de ocupantes, sendo os resultados dos cenários do nível 1 (cenários 1, 2 e 3) aproximadamente 13% superiores aos resultados dos cenários do nível 2 (cenários 4, 5 e 6) e aproximadamente 20% superiores aos resultados dos cenários do nível 3 (cenários 7, 8 e 9). O cenário 7, com 35% de ocupação e nível 3 de vazão eficaz, apresentou a maior redução da concentração de CO_2 em comparação aos outros cenários com a mesma taxa de ocupação: em relação ao cenário 1 (nível 1), a redução foi de aproximadamente 35% (350 ppm) e, em relação ao cenário 4 (nível 2), a redução foi de 25% (220 ppm).

Em relação à alteração na taxa de ocupação, houve uma diferença mais significativa entre os cenários com 35% e 70% de ocupação, principalmente para o nível 3 de vazão eficaz, nos quais a redução do número de ocupantes resultou em mais de 25% de redução da concentração de CO_2 (210 ppm). A diferença na concentração de CO_2 foi menor entre os cenários com 70% (cenários 2, 5 e 8) e 100% de ocupação (cenários 3, 6 e 9): aproximadamente 3% (entre 25 e 35 ppm).

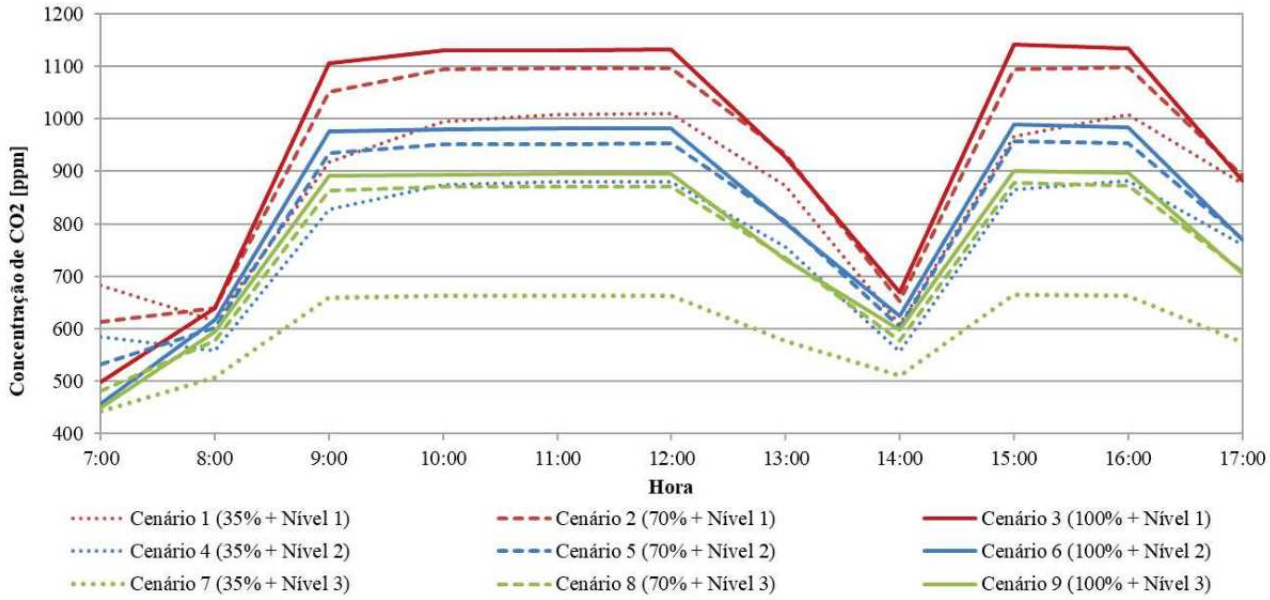

Figura 5 – Concentração de CO_2 durante um dia letivo representativo nos cenários propostos.

Como nas simulações as janelas ficaram abertas durante todo o período de ocupação e durante o intervalo de almoço, o número de renovações de ar por hora foi constante ao longo do dia letivo (Tabela 8). Comparando os resultados das condições de medição antes e durante a pandemia com os cenários propostos (Figuras 4 e 5 e Tabela 8), é possível observar que a sala analisada apresentou resultados equivalentes aos níveis 2 ou 3 na NBR 16401-3 (ABNT, 2008), já que o número de renovações de ar durante os períodos de medição, antes e durante a pandemia, se manteve próximo aos valores dos cenários de níveis intermediário (nível 2) e superior (nível 3), Os resultados do período anterior à pandemia se aproximaram aos do cenário 6 (nível 2), que tem aproximadamente a mesma ocupação do ambiente real. Já os resultados do período durante a pandemia tiveram menor concentração de CO_2, próxima de 700 ppm, se aproximando dos resultados do cenário 7 (nível 3), com número semelhante de ocupantes, porém com um período de ocupação menor no ambiente real.

Estes resultados demonstram que a sala de aula analisada está com uma ventilação adequada de acordo com os padrões propostos na NBR 16401-3 (ABNT, 2008) para ambos os casos analisados, antes e durante a pandemia. No entanto, tanto o cenário antes da pandemia como todos os cenários hipotéticos com 70% e 100% de ocupação resultaram em taxas de concentração de CO_2 elevadas durante o período de ocupação da sala, o que indicaria a necessidade de aumento do valor de vazão de ar por pessoa, em relação ao indicado na NBR 16401-3 (ABNT, 2008), de forma a auxiliar na obtenção de uma melhor qualidade do ar interior na sala de aula.

Tabela 8 – Média da renovação de ar por hora no período de ocupação (hr^{-1})

Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6	Cenário 7	Cenário 8	Cenário 9	Antes da pandemia	Durante a pandemia
2,73	4,62	6,37	3,49	5,86	8,07	6,57	6,90	9,53	7,71	6,69

5. CONCLUSÕES

A pandemia de COVID-19 suscitou uma discussão mundial sobre as condições adequadas para a reabertura de escolas, de forma a minimizar o risco de transmissão do vírus SARS-CoV-2 em ambientes fechados e com altas taxas de ocupação. As principais estratégias adotadas incluem a redução do número de ocupantes, a redução do período letivo em sala de aula e estratégias para melhoria da ventilação ambiente, como manter sempre as portas e janelas das salas de aula abertas.

Neste estudo, um modelo de simulação calibrado foi utilizado para simular nove cenários alterando a taxa de ventilação e a taxa de ocupação de uma sala de aula, a fim de verificar o impacto nos resultados da concentração de CO_2 no ambiente interno. Como objeto de estudo, foi selecionada uma sala de aula de uma escola da FDE com dimensões, projeto de esquadrias e estratégia de ventilação (ventilação natural) representativas das escolas públicas do estado de São Paulo.

Dentre os cenários analisados, o cenário 7, com taxa de ocupação de 35% e nível superior (nível 3) de vazão eficaz de ventilação, apresentou a menor taxa de concentração de CO_2. Se comparado ao pior cenário (cenário 1), o cenário 7 apresentou uma redução de aproximadamente 42% na concentração de CO_2 no ambiente. Conclui-se, com base nos resultados obtidos neste estudo, que a redução no número de ocupantes e uma taxa de ventilação adequada são estratégias efetivas para a redução da concentração de CO_2 no ambiente interno e, consequentemente, para a redução do risco de transmissão de doenças respiratórias, como a COVID-19. Entretanto, as medidas adotadas pelas escolas devem ser analisadas de forma a equilibrar potenciais benefícios e riscos aos ocupantes. A redução de 100% para 70% da ocupação, proposta na fase amarela do Plano São Paulo (SÃO PAULO, 2021), por exemplo, não trouxe grandes benefícios em relação à concentração de CO_2 para o ambiente estudado, o que indica que pode ser necessário adotar medidas mais eficazes de ventilação para que seja possível manter um maior número de alunos em sala de aula. As concentrações de CO_2 elevadas, resultantes das simulações dos cenários, demonstram que, para manter uma QAI satisfatória, faz-se necessária uma ventilação acima dos níveis indicados na NBR 16401-3 (ABNT, 2008), em especial com relação à taxa de vazão indicada por pessoa.

É importante ressaltar, no entanto, que a generalização deste estudo é limitada, visto que se trata de apenas um estudo de caso e que o Brasil possui diversos climas e escolas com diferentes características. O estudo aqui apresentado, contudo, pode ser utilizado como base metodológica para replicação a outras situações. Sugere-se, nesse sentido, a análise de possíveis implicações no projeto arquitetônico de salas de aula advindos de mudanças nas taxas de vazão de ar por pessoa e por área do ambiente, como dimensionamento e posicionamento de esquadrias para ventilação natural, dimensionamento das salas de aula (área de piso e pé-direito), entre outros fatores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. **NBR 16401-3 - Instalações de ar-condicionado — Sistemas centrais e unitários - Parte 3: Qualidade do ar interior.** Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008.

ANVISA. **Resolução - RE nº 9: Qualidade do ar interior em ambientes climatizados artificialmente de uso público e coletivo**. 2003.

ASHRAE. **Guideline 14: Measurement of Energy and Demand SavingsAshrae**. Technical report ISSN 1049-894X. ASHRAE Standards Committee, 2002.

BHAGAT, R. K. *et al.* Effects of ventilation on the indoor spread of COVID-19. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 903, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1017/jfm.2020.720

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**, v. 18, n. 4, p. 1-10, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.3390/ijerph18041500

DIETZ, L. *et al.* 2019 Novel Coronavirus (COVID-19) Pandemic: Built Environment Considerations To Reduce Transmission. **Applied and Environmental Science**, v. 5, n. 2, p. 1–13, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1128/mSystems.00245-20

DUTTON, S.; SHAO, L. Window Opening Behavior in Naturally Ventilated Schools. **Fourth National Conference of IBPSA-USA, SimBuild 2010,** New York City, Agosto 11-13, p. 260–268, 2010. Disponível em: http://www.ibpsa.us/sites/default/files/publications/SB10-DOC-TS05B-02-Dutton.pdf

ELI, L. G. *et al.* **Manual de simulação computacional de edifícios com o uso do objeto Ground Domain no programa EnergyPlus**. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LABEE), Florianópolis, 2019.

FLOURENTZOU, F.; VAN DER MAAS, J.; ROULET, C. A. Natural ventilation for passive cooling: measurement of discharge coefficients. **Energy and Buildings**, v. 27, n. 3, p. 283–292, 1998. Disponível em: https://doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00043-1

HOU, D.; KATAL, A.; WANG, L. Bayesian Calibration of Using CO2 Sensors to Assess Ventilation Conditions and Associated COVID-19 Airborne Aerosol Transmission Risk in Schools. **medRxiv**, 2021. Disponível em: http://medrxiv.org/content/early/2021/02/03/2021.01.29.21250791.abstract

INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 7726 Ergonomics of the thermal environment — Instruments for measuring physical quantities**. ISO Standard, 1998.

JONES, E. *et al.* **Healthy schools: risk reduction strategies for reopening schools.** Harvard TH Chan School of Public Health Healthy Buildings program. Junho, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.13140/RG.2.2.22333.49127.

KAPOOR, N. R. *et al.* A Systematic Review on Indoor Environmental Quality in Naturally Ventilated School Classrooms: A Way Forward. **Advances in Civil Engineering**, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1155/2021/8851685

KATAFYGIOTOU, M. C.; SERGHIDES, D. K. Thermal comfort of a typical secondary school building in Cyprus. **Sustainable Cities and Society**, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.scs.2014.03.004

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÃO (LABEEE). **Laboratório de Eficiência Energética em Edificações.** Arquivos climáticos INMET 2016. Disponível em: http://labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/inmet2016.

LIGUORI, I. N. **Conforto térmico em salas de aula: a contribuição de espaços de transição**. Dissertação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2020.

LIPINSKI, T. *et al.* Review of ventilation strategies to reduce the risk of disease transmission in high occupancy buildings. **International Journal of Thermofluids**, v. 7–8, p. 100045, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ijft.2020.100045

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

NEVES, L. O. *et al.* "Mind reading" building operation behaviour. **Energy for Sustainable Development**, v. 56, p. 1–18, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.esd.2020.02.003

OLESEN, B. **Indoor environment in schools.** Apresentação oral, 4º Seminário de Qualidade do Ar Interno (QAI), Recife-PE, 2015.

PULIMENO, M. *et al.* 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**, v. 10, n. 3, p. 169–174, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.34172/hpp.2020.29

SÃO PAULO. **Plano São Paulo - Volta às aulas 2021**. São Paulo, 2021.

STAZI, F.; NASPI, F.; D'ORAZIO, M. Modelling window status in school classrooms. Results from a case study in Italy. **Building and Environment**, v. 111, p. 24–32, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.10.013

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.

UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION (UNESCO). **Marco de ação e recomendações para a reabertura de escolas.** Abril, 2020.

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

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Air pollution and child health: prescribing clean air.** World Health Organization. 2018.

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-.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) (processo nº 2019/13474-7) para a realização desta pesquisa.