

Condições de conforto térmico e QAI em salas de aula naturalmente ventiladas durante a pandemia de Covid-19

Thermal comfort and IAQ conditions of naturally ventilated classrooms during the Covid-19 pandemic

Paula Brumer Franceschini 

Iara Nogueira Liguori 

Leticia de Oliveira Neves 

Resumo

Para a obtenção de boas condições de conforto térmico e qualidade do ar interior (QAI) em salas de aula naturalmente ventiladas, devem-se garantir taxas de renovação do ar adequadas. Em 2020, esta questão tornou-se especialmente relevante devido à pandemia de Covid-19, já que pode contribuir para a redução do potencial de transmissão de doenças respiratórias. O objetivo deste estudo é avaliar as condições de conforto térmico e QAI de uma sala de aula naturalmente ventilada a fim de identificar cenários que contribuam, simultaneamente, para a redução do risco de disseminação do vírus SARS-CoV-2 e para a manutenção do conforto térmico dos usuários. Variáveis climáticas foram monitoradas em uma sala de aula antes e durante a pandemia de Covid-19 e um modelo de simulação foi calibrado. Cenários variando o número de ocupantes e a taxa de renovação do ar foram simulados a fim de avaliar o impacto dessas variáveis na concentração de CO₂, na probabilidade de infecção e na temperatura operativa interna. O melhor cenário apresentou uma redução de 42% na concentração de CO₂ e 33% na probabilidade de infecção e um aumento de 60% nas horas ocupadas em conforto, se comparado ao pior cenário. No entanto, as estratégias adotadas devem ser analisadas para cada situação, assim como os riscos e os benefícios para os ocupantes da sala de aula.

Palavras-chave: Qualidade do Ar Interior (QAI). Conforto térmico. Ventilação natural. Edificação escolar.

Abstract

In order to achieve good thermal comfort and indoor air quality (IAQ) conditions in naturally ventilated classrooms, adequate air change rates must be ensured. In 2020, this issue became especially relevant due to the Covid-19 pandemic, since it may contribute to minimize the transmission potential of respiratory diseases. This study aims to evaluate the thermal comfort and IAQ conditions of a naturally ventilated classroom, in order to identify scenarios that contribute, simultaneously, to the reduction of the risk of dissemination of the SARS-CoV-2 virus and to the maintenance of thermal comfort for users. Environmental variables were monitored in a classroom before and during the Covid-19 pandemic and a simulation model was calibrated. Scenarios varying the number of occupants and the air change rate were simulated in order to assess the impact of these variables on the CO₂ concentration, on the infection probability and on the indoor operative temperature. The best scenario showed a reduction of 42% in the concentration of CO₂ and 33% in the infection probability and an increase of 60% in comfort hours, compared to the worst scenario. However, the strategies adopted must be analysed for each situation, as well as the risks and benefits for classroom occupants.

Keywords: Indoor air quality (IAQ). Thermal comfort. Natural ventilation. School building. Covid-19.

¹Paula Brumer Franceschini
¹Universidade Estadual de Campinas
Campinas - SP - Brasil

²Iara Nogueira Liguori
²Universidade de São Paulo
São Paulo - SP - Brasil

³Leticia de Oliveira Neves
³Universidade Estadual de Campinas
Campinas - SP - Brasil

Recebido em 14/12/21
Aceito em 25/02/22

Introdução

As escolas são os locais em que as crianças passam a maior parte do tempo durante a infância (DENG; ZOU; LAU, 2021; KATAFYGIOTOU; SERGHIDES, 2014; STAZI *et al.*, 2017), o que reforça a importância da qualidade da arquitetura escolar, em amplo aspecto. As crianças são mais vulneráveis e sensíveis a influências do ambiente do que os adultos, pois:

- (a) 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;
- (b) os seus órgãos estão ainda em desenvolvimento; e
- (c) elas têm uma expectativa de vida maior e, portanto, têm mais tempo para manifestar qualquer doença associada (DENG; ZOU; LAU, 2021; WORLD..., 2018).

Além de influenciar a saúde e o bem-estar dos usuários, 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 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 (OLESEN, 2015). Nesse contexto, é importante melhorar as condições de conforto térmico e 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 boas condições de conforto térmico e 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 (CO₂), pois, como os usuários exalam CO₂ ao respirar, a sua alta concentração pode indicar que a renovação do ar está inadequada (UMWELTBUNDESAMT, 2021). Esse é um ponto crítico para as edificações escolares, devido ao elevado índice de ocupação dos ambientes (HOU; KATAL; WANG, 2021) e, em especial, para os ambientes naturalmente ventilados – estratégia adotada em grande parte das escolas localizadas em climas tropical ou subtropical (WORLD..., 2015).

Em salas de aula naturalmente ventiladas, os níveis de ventilação recomendados frequentemente deixam de ser atendidos (DENG; ZOU; LAU, 2021; DUTTON; SHAO, 2010), uma vez que a ventilação natural depende das condições externas, que variam ao longo do tempo (VAN DIJKEN, 2020). Exemplo disso são os resultados obtidos por meio de medições contínuas das taxas de CO₂ em mais de 1.000 salas de aula na Dinamarca, na Suécia e na Noruega, que mostraram que apenas 44% das salas apresentavam níveis aceitáveis de concentração de CO₂ (de 385 a 1.000 ppm), sendo os piores resultados obtidos nos ambientes naturalmente ventilados (OLESEN, 2015).

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). O ambiente construído serve como potencial vetor de transmissão de doenças como a Covid-19, principalmente em ambientes fechados e com pouca ventilação, alta taxa de ocupação e grande período de exposição, como as escolas (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 três a quatro vezes maior em ambientes internos do que em ambientes externos (DIETZ *et al.*, 2020; QIAN *et al.*, 2021), sendo a transmissão pelo ar a principal forma de contágio (HOU; KATAL; WANG, 2021).

Mesmo que muitos casos de transmissão do SARS-CoV-2 possam ser reduzidos por meio 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 para a redução do potencial de transmissão de doenças respiratórias (DIETZ *et al.*, 2020).

Com o objetivo de manter as escolas abertas de forma segura, algumas publicações recentes trazem orientações para a ventilação adequada de salas de aula (AMERICAN..., 2020a; CHARTERED..., 2020; UMWELTBUNDESAMT, 2021; VAN DIJKEN, 2020; WORLD..., 2020). A Agência Ambiental Federal da Alemanha sugere medidas relacionadas à abertura de janelas para garantir um mínimo de três trocas de ar por hora no ambiente (UMWELTBUNDESAMT, 2021). A ASHRAE, a Organização Mundial da Saúde (OMS) e a CIBSE recomendam a implementação de medidas para aumentar a ventilação natural, melhorar o sistema de filtragem do ar e purificar o ar interno (AMERICAN..., 2020a; CHARTERED..., 2020; WORLD..., 2020). A 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 a obtenção de uma boa QAI (VAN DIJKEN, 2020).

Estudos recentes apontaram dados mais específicos sobre o risco de transmissão do vírus SARS-CoV-2 em salas de aula de escolas localizadas no Canadá (HOU; KATAL; WANG, 2021), na Itália (SCHIBUOLA; TAMBANI, 2021; ZIVELONGHI; LAI, 2021) e na Coreia do Sul (PARK *et al.*, 2021), por meio do monitoramento da concentração de CO₂ no ambiente e do cálculo ou da simulação das taxas de renovação do ar. Para estimar a taxa de contágio, utilizou-se o modelo matemático de Wells-Riley, desenvolvido para prever a transmissão de doenças respiratórias em salas de aula (RILEY; MURPHY; RILEY, 1978), adaptado ao contexto da pandemia de Covid-19.

Hou, Katal e Wang (2021) identificaram valores recomendáveis para a taxa de renovação do ar ambiente, de 3h⁻¹ a 8h⁻¹, e para a concentração de CO₂, de aproximadamente 500 ppm, para prevenir a transmissão do vírus durante um dia letivo de até 8 horas de exposição para três escolas utilizadas como estudo de caso. Park *et al.* (2021) identificaram que uma taxa de renovação de ar de 6,5h⁻¹ obtida por ventilação cruzada associada ao uso de máscaras seria medida adequada para proporcionar uma probabilidade de infecção abaixo de 1%, considerando-se um período de exposição de até 3 horas.

Os resultados de Schibuola e Tambani (2021) indicaram taxas de contágio variando entre valores abaixo de 1 (cenário com o uso de ventilação mecânica e com o uso de máscaras) a acima de 13 (cenário com ventilação natural e sem o uso de máscaras), concluindo que a ventilação mecânica e o uso de máscaras são estratégias efetivas para reduzir o risco de infecção em ambientes internos. Zivelonghi e Lai (2021) identificaram que a abertura regular das janelas poderia reduzir pela metade a taxa de contágio nas salas de aula monitoradas e, quando associada ao uso de máscaras, poderia atingir níveis seguros de taxa de contágio.

O impacto da pandemia de Covid-19 no conforto térmico de salas de aula também tem sido abordado pela literatura recente (ALONSO *et al.*, 2021; LOVEC; PREMROV; LESKOVAR, 2021; MONGE-BARRIO *et al.*, 2022). Enquanto a pandemia evidenciou a importância da QAI em salas de aula, levando a mudanças significativas nos protocolos de ventilação, o conforto térmico, antes uma prioridade, passou para segundo plano (LOVEC; PREMROV; LESKOVAR, 2021). Diversos estudos mostraram uma piora nas condições de conforto térmico de salas de aula durante a pandemia, em especial em escolas naturalmente ventiladas e em períodos de temperatura externa muito baixa ou muito alta (ALONSO *et al.*, 2021; MONGE-BARRIO *et al.*, 2022).

Alonso *et al.* (2021), em um estudo conduzido em duas salas de aula no sul da Espanha, identificaram uma redução na média da concentração de CO₂ de 1.000 ppm antes da pandemia para 600-750 ppm durante a pandemia, mas um aumento das horas de desconforto térmico, de 50-60% para 80%. Monge-Barrio *et al.* (2022), ao monitorarem salas de aula antes e durante a pandemia, também na Espanha, identificaram uma redução na concentração de CO₂ e um aumento nas horas de desconforto, em especial no inverno, o que levou a um aumento do consumo de energia para aquecimento. Por outro lado, as condições de conforto térmico não se mostraram afetadas durante a pandemia em um estudo conduzido em salas de aula na Eslovênia, que mostrou, também, uma melhora de 30% na média diária da concentração de CO₂ interno em comparação com período anterior à pandemia (LOVEC; PREMROV; LESKOVAR, 2021).

No Brasil, o Ministério da Saúde 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 as janelas para aumentar a circulação de ar no ambiente (BRASIL, 2020). No entanto, as condições climáticas e a arquitetura escolar brasileiras apresentam diferenças significativas em relação aos países mencionados nos estudos citados, sendo inadequado, portanto, importar as medidas sugeridas nos documentos internacionais já publicados (AMERICAN..., 2020a; CHARTERED..., 2020; UMWELTBUNDESAMT, 2021; VAN DIJKEN, 2020; WORLD..., 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 alguns casos, com ventilação mecânica proporcionada por ventiladores de teto ou parede. Nessas escolas, o ano de 2020 foi marcado pelo ensino a distância e por tentativas de volta às atividades em períodos de curta duração e com número reduzido de alunos.

Para que as escolas funcionem de forma mais segura, 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 e confortável aos usuários. Da mesma forma, aumentos na taxa de renovação do ar ambiente não devem acarretar uma piora nas condições de conforto térmico. Em vista disso, o objetivo deste estudo é avaliar as condições de conforto térmico e a QAI de salas de aula naturalmente

ventiladas a fim de identificar cenários que contribuam, simultaneamente, para a redução do risco de disseminação do vírus SARS-CoV-2 e para a manutenção do conforto térmico dos usuários.

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.

Monitoramento de variáveis climáticas em sala de aula

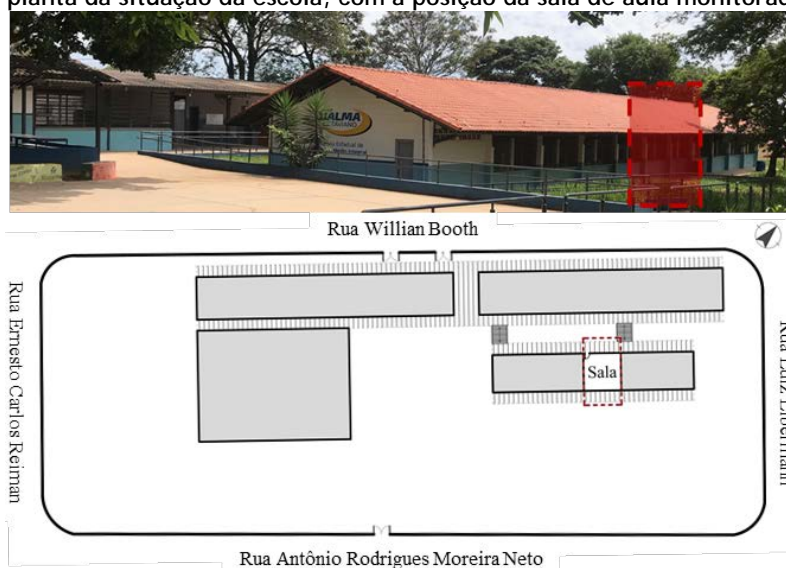
A coleta de dados foi realizada em uma escola estadual administrada pela Fundação para o Desenvolvimento da Educação, localizada em Campinas, São Paulo. A escola é de ensino médio, com alunos entre 14 e 17 anos. As salas de aula têm aproximadamente 49 m² e são distribuídas em três edificações térreas (Figura 1). A sala de aula selecionada para o estudo (Figura 2) tem a fachada com janela voltada para sudeste (ventilação unilateral, sendo o vento predominante em direção a sudeste). A obtenção de ventilação cruzada só é possível por meio da abertura da porta.

O monitoramento foi realizado em dois períodos – antes 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 as portas abertas e não utilizar o ventilador.

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 CO₂ e a operação manual de janelas e ventiladores. O sensor de CO₂ foi posicionado na parede a uma altura de 1,1 m, referente à altura da cabeça de uma pessoa sentada (INTERNATIONAL..., 1998), afastado das janelas e próximo às mesas dos alunos.

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 acerca de 10 km de distância da escola monitorada. Os dados foram convertidos para o formato EnergyPlus Weather File (epw) por meio 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.

Figura 1 - Foto e planta da situação da escola, com a posição da sala de aula monitorada



Fonte: Liguori (2020).

Figura 2 - Foto e planta baixa da sala de aula

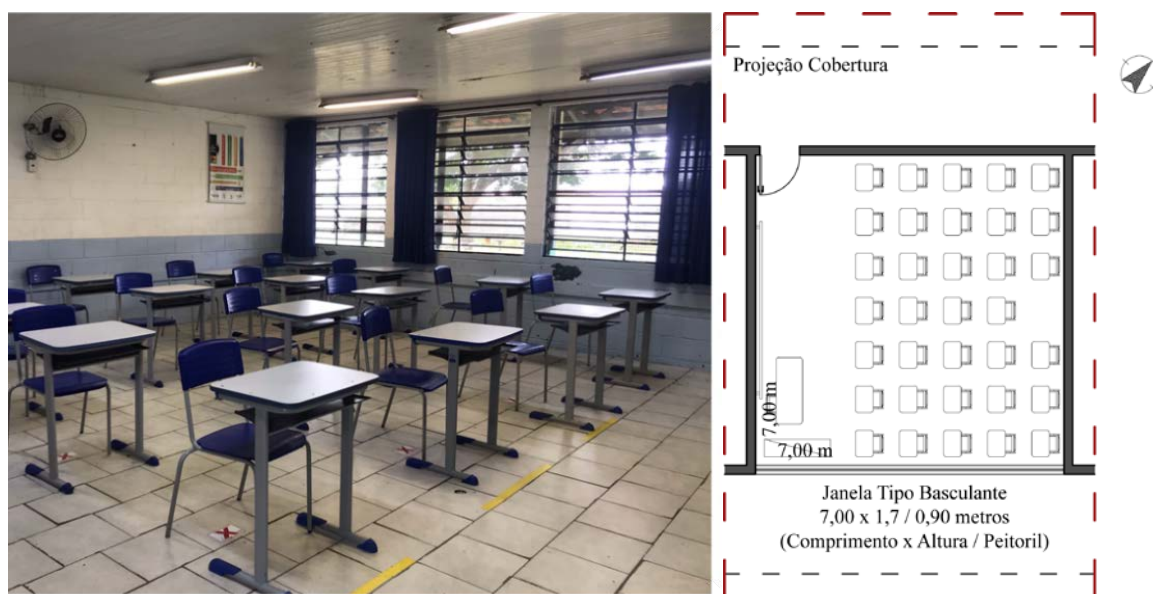


Tabela 1 - Coleta de dados antes e durante a pandemia

| Coleta | Período | Número de ocupantes | Período de ocupação |
|---|--------------------|---------------------|--|
| Antes da pandemia (5 dias, sendo 5 ocupados) | 11/03 a 15/03/2019 | 40 | 7h30min às 12h30min e 13h30min às 16h30min |
| Durante a pandemia (7 dias, sendo 4 ocupados) | 24/02 a 03/03/2021 | 20 | 8h às 11h30min |

Tabela 2 - Especificações técnicas dos equipamentos utilizados para o monitoramento

| Equipamento | Alcance | Precisão | Período |
|--|--|--|----------------------------|
| Datalogger temperatura/umidade, marca Testo, modelo 174H | -20 °C a 70 °C 0% a 100% | ± 0,5 °C ± 3% | Antes da pandemia |
| Datalogger temperatura/temperatura, marca Testo, modelo 175-T2 | -35 °C a 55 °C | ± 0,5 °C | Antes e durante a pandemia |
| Sonda de esfera quente, marca Testo, modelos 0635 1549, 0635 1049 e 0613 1712 | -25 °C a 80 °C | ± 0,2 °C | 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 °C ± 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 °C a 50 °C 0% a 100% 0 a 5.000 ppm | ± 0,5 °C ± 2% ± (100 ppm + 3% do vm) | Durante a pandemia |

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 dessas variáveis na concentração de CO₂ e na temperatura operativa interna dos ambientes.

Elaboração 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 Kusuda e Achenbach 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 4). Para o cálculo de ventilação natural, coeficientes de pressão para uma edificação de formato retangular e sem obstruções no entorno imediato foram considerados (SWAMI; CHANDRA, 1988), o que pode ser encarado como uma simplificação adotada neste estudo.

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), levantadas com base na leitura do projeto e na 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.

Figura 3 - Geometria da sala de aula

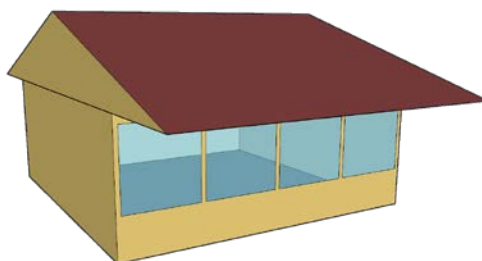


Figura 4 - Planta do entorno imediato da escola

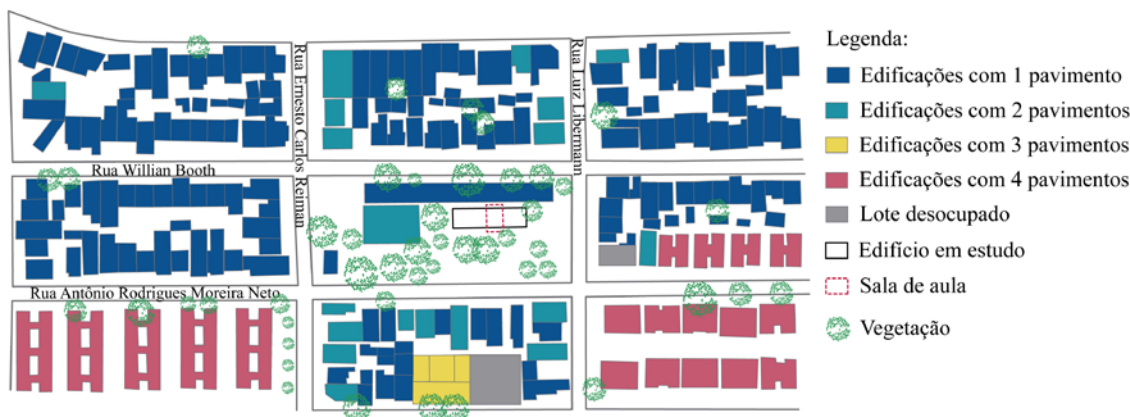


Tabela 3 - Propriedades térmicas dos componentes construtivos

| Componente | Descrição | Transmitância térmica – U (W/m ² . K) | Capacidade térmica – C (kJ/m ² . K) | Absortância solar da sup. externa – α | Fator solar – FS |
|----------------|---|--|--|---------------------------------------|------------------|
| Parede externa | Bloco de concreto 190x190x390 mm pintado | 2,5 | 240 | 0,36 | - |
| Janela | Vidro incolor 3 mm | 5,7 | - | - | 0,87 |
| Laje | Laje de concreto 150 mm | 2,7 | 243 | - | - |
| Piso | Argamassa de assentamento + piso cerâmico | | | | |
| Forro | Forro de PVC | 1,8 | 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 – 300 W 1 projetor – 260 W | 560 W |
| Iluminação | 6 luminárias, 2 lâmpadas fluorescentes cada – 40 W (unid.) | 480 W |

Calibração do modelo

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. Nesse 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:

- os ventiladores, a iluminação e o projetor ligados durante os períodos de aula (das 7h30min às 12h30min e das 13h30min às 16h30min);
- a ocupação em período integral com 40 pessoas (Tabela 1); e
- as janelas e a porta da sala abertas durante os períodos de aula.

Para o período durante a pandemia, a simulação considerou:

- os ventiladores desligados durante todo o tempo e a iluminação e o projetor ligados durante os períodos de aula (das 8h às 11h30min);
- a ocupação apenas no período da manhã com 20 pessoas (Tabela 1); e
- as janelas e a porta da sala abertas durante o dia todo (das 8h às 17h).

Para as duas simulações, o MAE foi calculado novamente para observar a diferença geral, sendo utilizados o erro médio normalizado (Normalised Mean Bias Error – NMBE) e o coeficiente de variação da raiz quadrada do erro médio (Coefficient of Variation of Root Mean Square Error – CV(RMSE)) para avaliar a precisão do modelo de calibração. Em ambos os modelos, o MAE ficou abaixo de 1 °C e o NMBE e o CV(RMSE) ficaram abaixo dos valores de referência estabelecidos na ASHRAE *Guideline* 14 (AMERICAN...; AMERICAN..., 2002), que são de 10% e 30%, respectivamente (Tabela 6).

Cenários simulados

Dois parâmetros variáveis foram definidos para a 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 foi 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) para 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 CO₂

e da temperatura operativa no ambiente interno. Para a simulação dos cenários, foi utilizado o modelo calibrado com o período de ocupação de aula integral, das 7h30min às 12h30min e das 13h30min às 16h30min.

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 das salas de aula para cada fase da pandemia: 35% na fase laranja (TO35), 70% na fase amarela (TO70) e 100% na fase verde (TO100), 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 a vazão mínima de ar exterior para promover a renovação do ar interior e manter a concentração de poluentes do ar em níveis aceitáveis. Apesar de a norma tratar de instalações de ar-condicionado, o uso dos valores propostos foi julgado adequado para o intuito deste estudo, uma vez que inexistem dados normativos brasileiros de taxa de renovação do ar para ambientes naturalmente ventilados.

A norma propõe três níveis de vazão eficaz de ar exterior: mínimo (N1), intermediário (N2) e superior (N3), em que existem evidências de redução de reclamações e manifestações alérgicas. Para a área útil ocupada pelas pessoas (A_z), foi considerada a área da sala de aula de 49 m² em todos os cenários. Os valores de vazão foram introduzidos nas simulações por meio do grupo Zone Airflow do EnergyPlus.

O arquivo climático da cidade de Campinas no formato Typical Meteorological Year (TMY) anos 2003-2017 (LABORATÓRIO..., 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.

Análise de resultados

Os resultados das simulações foram analisados em termos de concentração de CO₂ (ppm), número de renovações do ar por hora (h⁻¹) e temperatura operativa interna (°C) do modelo de referência (calibração) e dos cenários propostos.

Uma avaliação do risco de disseminação do vírus SARS-CoV-2 foi realizada para cada cenário proposto, considerando a presença de uma pessoa infectada na sala de aula e o período final do dia letivo, ou seja, a pior situação, uma vez que a probabilidade de infecção aumenta ao longo do período de exposição. A probabilidade de infecção foi estimada utilizando a ferramenta *on-line* Covid-19 Aerosol Transmission Estimator, versão 3.5.8, de 10 de novembro de 2021 (JIMENEZ; PENG, 2021). Essa ferramenta é atualizada constantemente, uma vez que novas informações sobre a Covid-19 são descobertas a cada dia, e estima apenas a transmissão do vírus pelo ar com base no modelo de Wells-Riley, calibrado para o contexto da pandemia de Covid-19.

Tabela 6 - Precisão da calibração

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

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

| Variáveis | Cenários | | | | | | | | |
|------------------------------|------------|------------|-------------|------------|------------|-------------|------------|------------|-------------|
| | N1 TO35 | N1 TO70 | N1 TO100 | N2 TO35 | N2 TO70 | N2 TO100 | N3 TO35 | N3 TO70 | N3 TO100 |
| F_p (L/s.pessoa)* | 5 (N1) | | | 6,3 (N2) | | | 7,5 (N3) | | |
| TO (%)** | 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.m ²)* | 0,6 (N1) | | | 0,8 (N2) | | | 0,9 (N3) | | |
| V_{ef} (L/s) | 109,4 | 184,4 | 254,4 | 140 | 234,5 | 322,7 | 164,1 | 276,6 | 381,6 |

Nota: F_p = vazão por pessoa; TO = taxa de ocupação; P_z = número máximo de pessoas na zona; F_a = vazão por área útil ocupada; e V_{ef} = vazão eficaz de ar exterior.

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

**valores propostos no Plano São Paulo (SÃO PAULO, 2021).

Como dado de entrada para a fração da população imune, foram consideradas a cobertura vacinal da população com faixa etária de 15 a 17 anos, de 28,8% no dia 29 de novembro de 2021 (PREFEITURA..., 2021), e a eficácia da vacina Pfizer (vacina oferecida à população dessa faixa etária), de 95% na prevenção de infecções, resultando no valor de 27,4%. Para a taxa de emissão quanta, que varia conforme a atividade, foi utilizado o valor de 9,4 quanta/h (pessoa sentada e falando) (JIMENEZ; PENG, 2021). Ainda, para cada cenário, o número de pessoas variou de acordo com a ocupação proposta, e a temperatura operativa interna e a taxa de renovação do ar variaram de acordo com os resultados das simulações. Foi também estimada a probabilidade de infecção para cada cenário variando a filtragem da máscara: sem máscara (0%), com máscara de pano (30%) e com máscara N95/PFF2 (90%) (JIMENEZ; PENG, 2021).

Os valores de temperatura operativa interna obtidos nas simulações e de temperatura do ar externa obtidos do arquivo climático foram utilizados para analisar o conforto térmico dos ocupantes com base no modelo adaptativo da ASHRAE 55 (AMERICAN..., 2020b), considerando os limites de aceitabilidade de 80%, por meio do cálculo do percentual de horas ocupadas em conforto térmico (PHOCT). Os resultados dessa análise foram comparados com a probabilidade de infecção a fim de identificar o cenário que contribuiu simultaneamente para a redução do risco de disseminação do vírus SARS-CoV-2 e para o conforto térmico dos usuários, proporcionando condições internas mais satisfatórias.

Resultados e discussão

Os resultados da concentração de CO₂ no ambiente estão apresentados para um dia letivo representativo. A simulação representativa das condições de medição antes da pandemia resultou em alta concentração de CO₂, atingindo valores muito próximos do máximo de 1.000 ppm recomendado pela Anvisa (2003) nos períodos de ocupação (Figura 5). No período durante a pandemia, com a redução do número de ocupantes em 45%, a concentração de CO₂ reduziu cerca de 30% em relação ao período anterior, atingindo picos de aproximadamente 700 ppm durante o período de ocupação (Figura 5).

Com relação aos cenários propostos, aqueles com vazão eficaz de ar exterior de acordo com o nível mínimo (N1) proposto pela NBR 16401-3 (ABNT, 2008) apresentaram concentração de CO₂ acima do nível recomendado de até 1.000 ppm (AGÊNCIA..., 2003). Ainda, a maioria dos cenários apresentou uma concentração de CO₂ elevada durante o período de ocupação, acima de 850 ppm, o que demonstra a necessidade de uma ventilação acima dos níveis indicados na NBR 16401-3 (ABNT, 2008) para manter níveis recomendáveis para o contexto da pandemia (HOU; KATAL; WANG, 2021) (Figura 6).

A mudança nos valores de vazão eficaz teve maior impacto nos resultados de concentração de CO₂ no ambiente do que na variação no número de ocupantes, sendo os resultados dos cenários do nível mínimo (N1) aproximadamente 13% superiores aos resultados dos cenários do nível intermediário (N2) e aproximadamente 20% superiores aos resultados dos cenários do nível superior (N3). O cenário N3 TO35 apresentou a maior redução da concentração de CO₂ em comparação com os outros cenários com a mesma taxa de ocupação: em relação ao cenário N1 TO35, a redução foi de aproximadamente 35% (350 ppm) e, em relação ao cenário N2 TO35, a redução foi de 25% (220 ppm).

Figura 5 - Concentração de CO₂ durante um dia letivo representativo dos períodos de medição

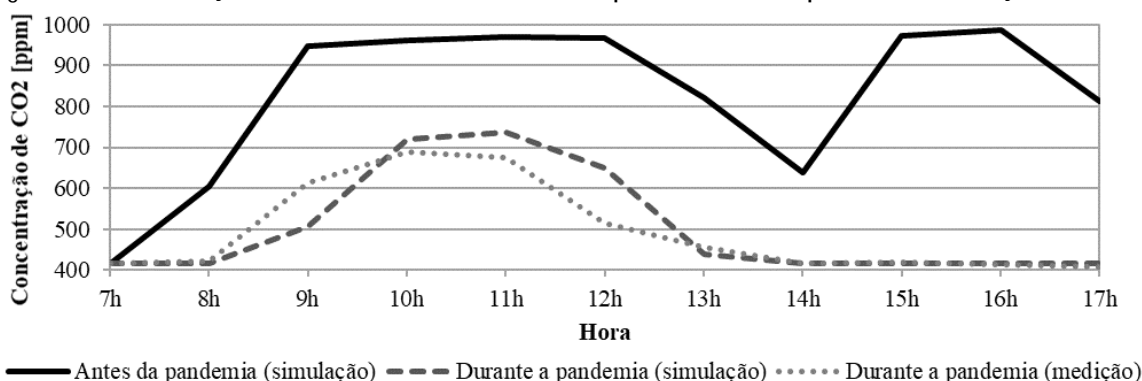
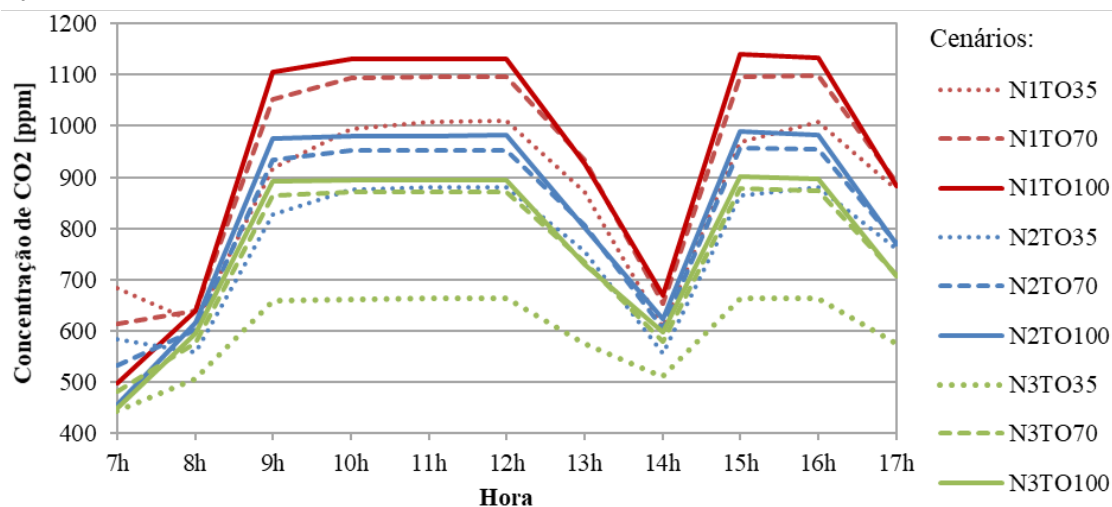


Figura 6 - Predição da concentração de CO₂ durante um dia letivo representativo nos cenários propostos

A alteração na taxa de ocupação provocou uma diferença mais significativa entre os cenários com 35% e 70% de ocupação, principalmente para o nível superior (N3) de vazão eficaz, nos quais a redução do número de ocupantes resultou em mais de 25% de redução da concentração de CO₂ (210 ppm). A diferença na concentração de CO₂ foi menor entre os cenários com 70% e 100% de ocupação – os quais possuem uma taxa de variação de ocupação menor do que os cenários anteriores, de aproximadamente 3% (entre 25 ppm e 35 ppm).

Como nas simulações dos cenários hipotéticos considerou-se uma taxa fixa de renovação do ar (vazão eficaz) para cada cenário, a variação entre valores máximos e mínimos dentro de cada cenário foi pequena (Tabela 8). Maior fluutuabilidade nos resultados ao longo do dia podem ser observados nas simulações representativas do monitoramento antes e durante a pandemia, o que reflete melhor a realidade (Tabela 8). Adicionalmente, a redução no número de ocupantes no período durante a pandemia resultou em valores de temperatura interna menores, diminuindo a diferença entre as temperaturas externa e interna e, conseqüentemente, a taxa de renovação de ar por efeito chaminé e a média da taxa de renovação de ar (dado de saída da simulação), quando comparada ao resultado do período anterior à pandemia (Tabela 8).

Comparando os resultados de média máxima e mínima das condições de medição antes e durante a pandemia com os cenários propostos (Figuras 5 e 6 e Tabela 8), é possível observar que a sala analisada apresentou resultados equivalentes aos níveis intermediário (N2) ou superior (N3) 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 desses cenários. Os resultados do período anterior à pandemia se aproximaram aos do cenário N2 TO100, que tem aproximadamente a mesma ocupação do ambiente real. Já os resultados do período durante a pandemia apresentaram menor concentração de CO₂, próxima de 700 ppm, aproximando-se dos resultados do cenário N3 TO35, com número semelhante de ocupantes.

Os resultados demonstram que a sala de aula analisada está com valores médios de ventilação adequados, de acordo com os padrões propostos pela 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 CO₂ 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 pela NBR 16401-3 (ABNT, 2008), de forma a auxiliar na obtenção de uma melhor qualidade do ar interior na sala de aula.

O cálculo da probabilidade de infecção mostra que as taxas de renovação de ar e a ocupação influenciam nos resultados quando os usuários estão sem máscara (6,2% de variação entre o melhor e o pior cenários) ou usando máscara de pano (2,28% de variação entre o melhor e o pior cenários) (Tabela 9). A probabilidade de infecção varia pouco entre os cenários com o uso da máscara N95/PPF2, ficando sempre abaixo de 1% – valor considerado satisfatório por estudos anteriores (PARK *et al.*, 2021). Entretanto, considerando-se as observações realizadas *in loco*, sabe-se que a situação mais comum na sala de aula monitorada é o uso da máscara de pano. Neste caso, apenas o cenário N3 TO35 apresenta, ao final do período letivo, probabilidade de infecção próxima ao recomendável pela literatura.

Ainda considerando apenas o uso da máscara de pano, embora no início do período letivo todos os cenários apresentem probabilidade de infecção e concentração de CO₂ abaixo de 1% e de 700 ppm, respectivamente, ao longo do dia, a diferença entre os resultados dos cenários torna-se maior, evidenciando, em especial, o cenário N3 TO35 pelos baixos valores e, em oposição, os cenários N1 TO70 e N1 TO100 pelos valores acima de 1.000 ppm (Figura 7).

Em relação ao conforto térmico, os cenários com maiores concentrações de CO₂ (cenários N1 TO70 e N1 TO100) apresentam também maiores valores de temperatura operativa interna e, conseqüentemente, menos tempo em conforto térmico (PHOCT = 25%) (Figura 8). A mesma relação pode ser observada para o cenário com menor concentração de CO₂ (N3 TO35), que, apesar de cumprir os valores recomendados de concentração de CO₂ (1.000 ppm, segundo a Anvisa (AGÊNCIA..., 2003)) e, na maior parte do tempo, de probabilidade de infecção (abaixo de 1%, de acordo com Park *et al.* (2021)), ainda assim apresenta condições inadequadas de conforto térmico na maior parte do tempo (PHOCT = 40%, considerando-se apenas a semana representativa). Ainda, as concentrações de CO₂ menores em cada cenário (Figura 8) acontecem no início das aulas, às 8h e às 14h, e vão aumentando ao longo do período de ocupação, conforme mostra a Figura 8.

Na Figura 9, pode-se observar que a taxa de renovação de ar altera pouco os resultados de temperatura operativa interna, havendo uma redução de 1%, em média, do N1 para o N2 e do N2 para o N3. A taxa de ocupação, por sua vez, provocou alterações mais significativas nos resultados de temperatura operativa interna apenas se comparados os cenários de 35% de ocupação com os demais, sendo o cenário N3 TO35 o que apresenta os melhores resultados.

Tabela 8 - Predição da renovação de ar por hora no período de ocupação (h⁻¹)

| | N1 TO35 | N1 TO70 | N1 TO100 | N2 TO35 | N2 TO70 | N2 TO100 | N3 TO35 | N3 TO70 | N3 TO100 | Antes da pandemia | Durante a pandemia |
|---------------|---------|---------|----------|---------|---------|----------|---------|---------|----------|-------------------|--------------------|
| Média | 2,76 | 4,64 | 6,40 | 3,52 | 5,89 | 8,10 | 6,60 | 6,94 | 9,57 | 7,07 | 5,15 |
| Desvio padrão | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 1,21 | 1,27 |
| Média máxima | 2,78 | 4,68 | 6,46 | 3,55 | 5,94 | 8,17 | 6,65 | 6,99 | 9,65 | 8,12 | 6,96 |
| Média mínima | 2,74 | 4,61 | 6,35 | 3,50 | 5,85 | 8,05 | 6,57 | 6,89 | 9,50 | 5,26 | 3,70 |

Tabela 9 - Predição da probabilidade de infecção para cada cenário proposto ao final do dia letivo (maior período de exposição), considerando diferentes filtragens de máscaras

| | N1 TO35 | N1 TO70 | N1 TO100 | N2 TO35 | N2 TO70 | N2 TO100 | N3 TO35 | N3 TO70 | N3 TO100 |
|-----------------------|---------|---------|----------|---------|---------|----------|---------|---------|----------|
| Sem máscara (0%) | 6,23% | 8,40% | 9,43% | 5,27% | 6,98% | 8,18% | 3,23% | 5,29% | 5,86% |
| Máscara de pano (30%) | 2,26% | 3,06% | 3,43% | 1,90% | 2,52% | 2,97% | 1,15% | 1,90% | 2,10% |
| N95/PPF2 (90%) | 0,07% | 0,09% | 0,10% | 0,06% | 0,07% | 0,09% | 0,03% | 0,05% | 0,06% |

Figura 7 - Relação entre a probabilidade de infecção (máscara de pano) e a concentração de CO₂ nos cenários propostos

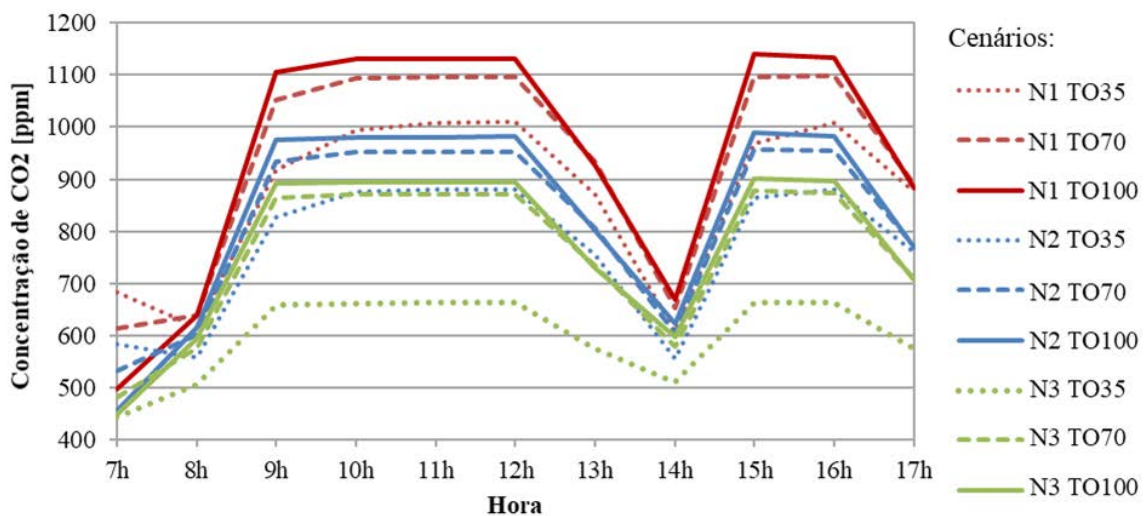


Figura 8 - Relação entre concentração de CO₂ e temperatura operativa interna para os cenários propostos (semana representativa - 24/02 a 03/03)

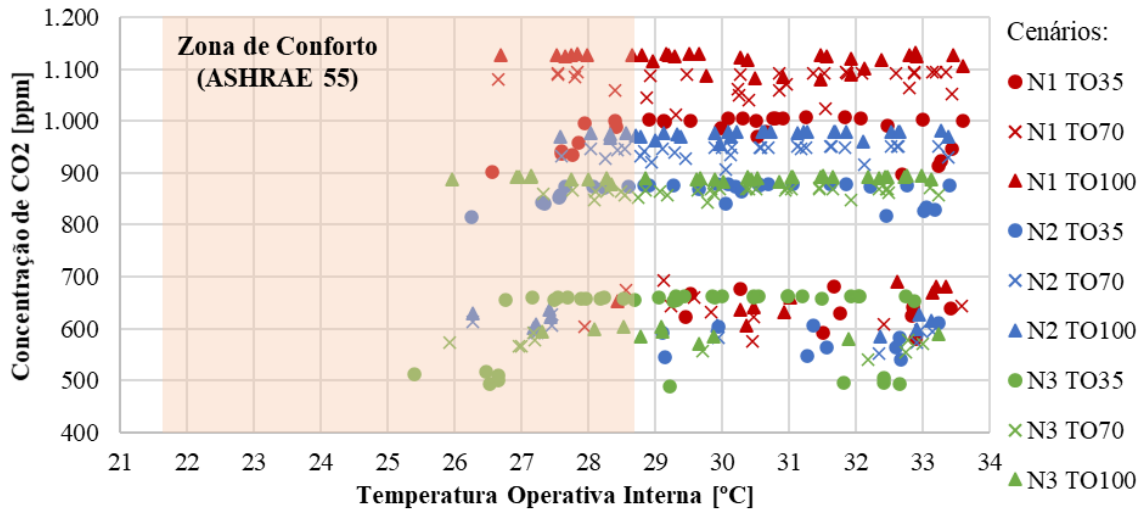
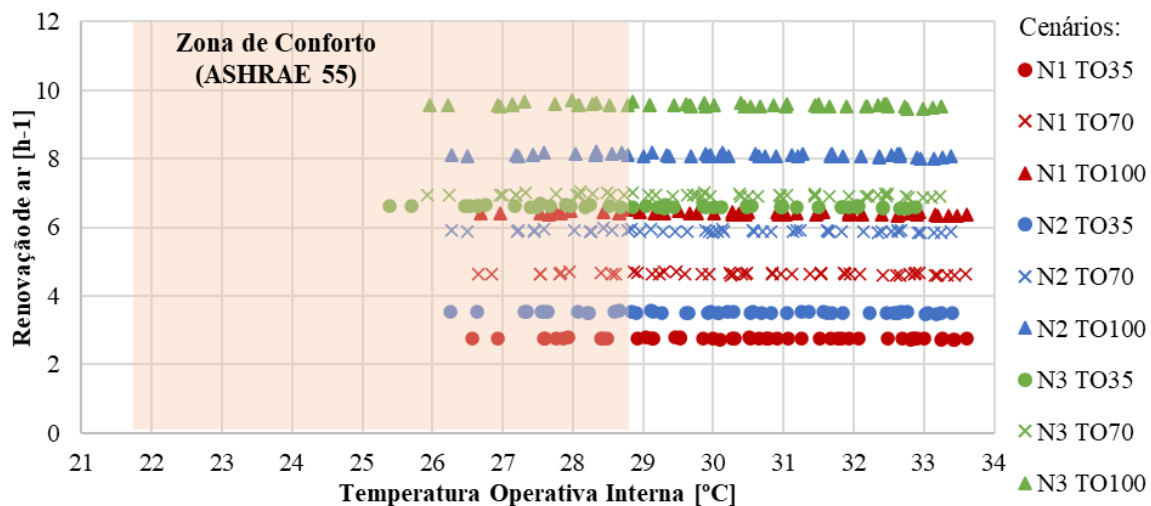


Figura 9 - Relação entre taxa de renovação de ar e temperatura operativa interna para os cenários propostos (semana representativa)



Conclusão

A pandemia de Covid-19 suscitou uma discussão mundial sobre as condições adequadas de QAI para o funcionamento 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 até o momento incluíram a redução do número de ocupantes, a redução do período letivo em sala de aula e estratégias para o aumento da renovação do ar ambiente, como manter sempre as portas e as janelas das salas de aula abertas.

Neste estudo, um modelo de simulação calibrado foi utilizado para simular nove cenários alterando as taxas de ar externo e de ocupação de uma sala de aula, a fim de verificar os impactos na QAI, em termos de concentração de CO₂ e probabilidade de infecção; e no conforto térmico, em termos de temperatura operativa interna. 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 unilateral) representativas das escolas públicas do estado de São Paulo.

Dentre os cenários analisados, o cenário N3 TO35 apresentou os menores valores de taxa de concentração de CO₂, probabilidade de infecção e horas de desconforto térmico. Se comparado ao pior cenário (cenário N1 TO100), o cenário N3 TO35 apresentou redução de aproximadamente 42% na concentração de CO₂ ambiente e de 33% na probabilidade de infecção e um aumento no PHOCT de 60%, considerando o período analisado.

Conclui-se que a redução no número de ocupantes associada a uma taxa adequada de renovação do ar são estratégias efetivas para a redução da concentração de CO₂ no ambiente interno e, conseqüentemente, para a redução do risco de transmissão de doenças respiratórias como a Covid-19.

Adicionalmente, os resultados das simulações dos cenários hipotéticos mostraram que as medidas implementadas durante a pandemia (abertura das janelas e das portas e redução do número de usuários) poderiam auxiliar na redução da concentração de CO₂ e da probabilidade de infecção, além de melhorar o conforto térmico da sala de aula analisada. A diferença desses resultados com os obtidos nos estudos conduzidos na Espanha (ALONSO *et al.*, 2021; MONGE-BARRIO *et al.*, 2022) indica, também, a necessidade de investigação desses parâmetros para cada clima e contexto específicos.

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 CO₂ e à probabilidade de infecção para o ambiente estudado, o que indica a provável necessidade de adoção de medidas mais eficazes de renovação do ar ambiente para possibilitar a manutenção de maior número de alunos em sala de aula, caso a máscara de pano seja adotada. Neste caso, as concentrações de CO₂ elevadas e a probabilidade de infecção maior do que 1% demonstram que, para manter uma QAI satisfatória, se faz 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, considerando, portanto, apenas um clima, um projeto escolar com características arquitetônicas específicas e um cenário de taxa de infecção (uma pessoa infectada dentro da sala de aula em questão). 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 advindas de mudanças nas taxas de renovação 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. Sugere-se, também, a análise de outros aspectos relacionados à QAI, como a presença de materiais particulados e de compostos orgânicos voláteis, além da investigação de estratégias que, associadas à ventilação natural, poderiam melhorar a QAI, como o uso de filtros e purificadores de ar.

Referências

- ALONSO, A. *et al.* Effects of the Covid-19 Pandemic on indoor air quality and thermal comfort of primary schools in winter in a mediterranean climate. **Sustainability**, v. 13, n. 2699, p. 1-17, mar. 2021.
- AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE; AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Guideline 14**: measurement of energy and demand savings Ashrae. Georgia, 2002. Technical report.
- AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. **Resolução RE n.º 09**, de 16 de janeiro de 2003. Padrões referenciais de qualidade do ar interior em ambientes climatizados artificialmente de uso público e coletivo. Brasília, 20 jan. 2003.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Guidance for the re-opening of schools**. Georgia, 2020a. Disponível em: <https://www.ashrae.org/file-library/technical-resources/covid-19/guidance-for-the-re-opening-of-schools.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2022.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Standard 55**: thermal environmental conditions for human occupancy. Georgia, 2020b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16401-3**: instalações de ar-condicionado: sistemas centrais e unitários: parte 3: qualidade do ar interior. Rio de Janeiro, 2008.
- BHAGAT, R. K. *et al.* Effects of ventilation on the indoor spread of Covid-19. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 903, n. F1, p. 1-18, set. 2020.
- BRASIL. Ministério da Saúde. **Orientações para retomada segura das atividades nas escolas de educação básica no contexto da pandemia da Covid-19**. Brasília, 2020.
- CHARTERED INSTITUTION OF BUILDING SERVICES ENGINEERS. **Covid-19 ventilation guidance**. United Kingdom, 2020.

- 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.
- DIETZ, L. *et al.* Novel Coronavirus (Covid-19) Pandemic: built environment considerations to reduce transmission. **Applied and Environmental Science**, v. 5, n. 2, p. 1-13, 2020.
- DUTTON, S.; SHAO, L. Window opening behavior in naturally ventilated schools. In: NATIONAL CONFERENCE OF IBPSA, 4., New York, 2010. **Proceedings [...]** New York, 2010.
- ELI, L. G. *et al.* **Manual de simulação computacional de edifícios com o uso do objeto Ground Domain no programa EnergyPlus**. Florianópolis: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, 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.
- 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**. 2021. Disponível em: <http://medrxiv.org/content/early/2021/02/03/2021.01.29.21250791.abstract>. Acesso em: 12 fev. 2022.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 7726**: ergonomics of the thermal environment: instruments for measuring physical quantities. Geneva, 1998.
- JIMENEZ, J. L.; PENG, Z. **Covid-19 aerosol transmission estimator**. 2021. Disponível em: <https://tinyurl.com/covid-estimator>. Acesso em: 12 fev. 2022.
- KATAFYGIOTOU, M. C.; SERGHIDES, D. K. Analysis of structural elements and energy consumption of school building stock in Cyprus: energy simulations and upgrade scenarios of a typical school. **Energy and Buildings**, v. 72, p. 8-16, 2014.
- LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÃO. **Arquivos climáticos**. Florianópolis: LABEEE, 2018. Disponível em: <http://labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/inmet2016>. Acesso em: 12 fev. 2022.
- LIGUORI, I. N. **Conforto térmico em salas de aula: a contribuição de espaços de transição**. Campinas, 2020. Dissertação (Mestrado em Arquitetura, Tecnologia e Cidade) – 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, nov. 2020.
- LOVEC, V.; PREMROV, M.; LESKOVAR, V. Ž. Practical impact of the covid-19 pandemic on indoor air quality and thermal comfort in kindergartens: a case study of Slovenia. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 18, n. 18, 2021.
- MONGE-BARRIO, A. *et al.* Encouraging natural ventilation to improve indoor environmental conditions at schools: case studies in the north of Spain before and during Covid. **Energy and Buildings**, v. 254, p. 111567, jan. 2022.
- NEVES, L. O. *et al.* “Mind reading” building operation behaviour. **Energy for Sustainable Development**, v. 56, p. 1-18, 2020.
- OLESEN, B. Indoor environment in schools. In: SEMINÁRIO DE QUALIDADE DO AR INTERNO, 4., Recife, 2015. **Anais [...]** Recife, 2015. Apresentação oral.
- PARK, S. *et al.* Natural ventilation strategy and related issues to prevent coronavirus disease 2019 (Covid-19) airborne transmission in a school building. **Science of the Total Environment**, v. 789, p. 1-9, 2021.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE CAMPINAS. **Boletim Imunização Covid**. ed. 36. Campinas: PMC, 2021.
- 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.
- QIAN, H. *et al.* Indoor transmission of SARS-CoV-2. **Indoor Air**, v. 31, n. 3, p. 639-645, 2021.
- RILEY, C. E.; MURPHY, G.; RILEY, R. L. Airborne spread of measles in a suburban elementary school. **American Journal of Epidemiology**, v. 107, n. 5, p. 421-432, 1978.
- SÃO PAULO. Estado. **Plano São Paulo Volta às Aulas 2021**. São Paulo, 2021.

SCHIBUOLA, L.; TAMBANI, C. High energy efficiency ventilation to limit Covid-19 contagion in school. **Energy & Buildings**, v. 240, p. 110882, jun. 2021.

STAZI, F. *et al.* Indoor air quality and thermal comfort optimization in classrooms developing an automatic system for windows opening and closing. **Energy and Buildings**, v. 139, p. 732-746, 2017.

SWAMI, M. V.; CHANDRA, S. Correlations for pressure distribution on buildings and calculation of natural ventilation airflow. **ASHRAE Transactions**, v. 94, n. 1, p. 243-266, 1988.

UMWELTBUNDESAMT. **Richtig Lüften in Schulen**. Dessau-Roßlau: UBA, 22 Dez. 2021. Disponível em: <https://www.umweltbundesamt.de/richtig-lueften-in-schulen#konnen-mobile-luftreiniger-in-klasse-raumen-helfen>. Acesso em: 18 mar. 2021.

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

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **School environment: policies and current status**. Geneva, 2015. Disponível em: <http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/air-quality/publications/2015/the-school-environment-policies-and-current-status>. Acesso em: 12 fev. 2022.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Air pollution and child health: prescribing clean air**. Geneva, 2018.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Considerations for school-related public health measures in the context of Covid-19**. Geneva, 2020. Disponível em: <https://www.who.int/publications-detail/risk->. Acesso em: 12 fev. 2022.

ZIVELONGHI, A.; LAI, M. Mitigating aerosol infection risk in school buildings: the role of natural ventilation, volume, occupancy and CO2 monitoring. **Building and Environment**, v. 204, p. 108139, out. 2021.

Agradecimentos

Agradecemos o apoio dos responsáveis da EEMMI Prof. Djalma Octaviano, da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) (processo n.º 2019/13474-7) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) (código de financiamento 001, 05-P-04795-2019) para a realização desta pesquisa.

Paula Brumer Franceschini

Departamento de Arquitetura e Construção | Universidade Estadual de Campinas | Rua Saturnino de Brito, 224, Cidade Universitária Zeferino Vaz | Campinas - SP - Brasil | CEP 13083-889 | Tel.: (19) 3521-2306 | E-mail: p229312@dac.unicamp.br

Iara Nogueira Liguori

Departamento de Tecnologia da Arquitetura | Universidade de São Paulo | Rua do Lago, 876, Butantã | São Paulo - SP - Brasil | CEP 05508-080 | Tel.: (11) 3091-8231 | E-mail: iara.liguori@usp.br

Leticia de Oliveira Neves

Departamento de Arquitetura e Construção | Universidade Estadual de Campinas | Tel.: (19) 3521-2384 | E-mail: leticia@fec.unicamp.br

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro
Porto Alegre - RS - Brasil
CEP 90035-190
Telefone: +55 (51) 3308-4084
www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido
www.scielo.br/ac
E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.