

Ventilação natural como instrumento na redução da propagação da Covid-19 em salas de aula

Natural ventilation as a tool for reducing the propagation of Covid-19 in classrooms

Pedro Henrique Bruder Decker 

Camila Gregório Atem 

Resumo

A pandemia de Coronavírus despertou preocupação da comunidade acadêmica com a qualidade do ar interior. A principal via de propagação da doença se dá por aerossóis, com vírus presentes em partículas que permanecem em suspensão no ar por longos períodos. Este trabalho busca compreender o papel da ventilação natural na probabilidade de contágio da doença em salas de aula. Taxas de ventilação foram calculadas por método algébrico para salas de aula em duas situações: ventilação cruzada e unilateral. Foi proposta redução da ocupação máxima das salas de aula, tanto considerando distância mínima de 2 metros entre ocupantes, quanto mantendo taxa mínima de ventilação de 27 m³/h por pessoa. A probabilidade de contágio foi calculada para as capacidades originais e reduzidas de cada sala, seguindo metodologia proposta na literatura. Cada recinto também foi classificado de acordo com seu número de trocas de ar por hora. A ventilação unilateral se mostrou insuficiente para manter taxas adequadas de ventilação em todos os casos. Para 11 das 31 salas avaliadas o distanciamento de 2 metros entre ocupantes é insuficiente para manter as taxas de ventilação adequadas.

Palavras-chave: Coronavírus. Ventilação natural. Ventilação cruzada. Ventilação unilateral. Escolas. Salas de aula.

Abstract

The Coronavirus pandemic aroused the academic community's concern about indoor air quality. The main way of spreading the disease is through aerosols, with viruses present in particles that remain suspended in the air for long periods. This study seeks to understand the role of natural ventilation in the probability of contagion of the disease in classrooms. Ventilation rates were calculated by the algebraic method for classrooms in two situations: cross ventilation and unilateral ventilation. A reduction in the maximum occupancy of classrooms was proposed, considering a minimum distance of 2 meters between occupants, and maintaining a minimum ventilation rate of 27 m³/h per person. The probability of contagion was calculated for the original and reduced capacities of each room, following the methodology proposed in the literature. Each room was also classified according to its number of air changes per hour. Single-sided ventilation was insufficient to maintain adequate ventilation rates in all cases. For 11 out of the 31 rooms evaluated, a distance of 2 meters between occupants is insufficient to maintain adequate ventilation rates.

¹Pedro Henrique Bruder Decker
¹Universidade Estadual de Londrina
Londrina - PR - Brasil

²Camila Gregório Atem
²Universidade Estadual de Londrina
Londrina - PR - Brasil

Recebido em 15/12/21
Aceito em 24/02/22

Keywords: Coronavirus. Natural ventilation. Cross ventilation. Single-sided ventilation. Schools. Classrooms.

Introdução

A Covid-19 foi reportada pela primeira vez na província de Wuhan, na China, em dezembro de 2019. De acordo com dados da Organização Mundial da Saúde (2020a), em poucos dias o vírus já havia se espalhado por diversos países do sudeste asiático. Em poucas semanas a OMS declarou pandemia.

A disseminação da doença ocorre com extrema facilidade em ambientes fechados e com concentração de pessoas. Isso levou países do mundo todo a paralisar total ou parcialmente atividades que gerassem aglomeração. Foram afetados comércios, restaurantes, academias, indústrias e principalmente as instituições de ensino.

No Brasil o fechamento desses estabelecimentos ocorreu por volta de março de 2020, com estados e municípios estabelecendo medidas regionais. De acordo com levantamento realizado pelo DataSenado, no Brasil, em 2020, dos 56 milhões de estudantes matriculados na educação básica e superior, 19,5 milhões tiveram aulas suspensas, e 32,4 milhões passaram a ter aulas remotas (CHAGAS, 2020). Em dezembro de 2021 todos os estados brasileiros já contavam com algum tipo de plano de reabertura de escolas, seja em formato híbrido ou totalmente presencial (UNESCO, 2021). Nesse contexto, ainda se discute qual a melhor maneira de se fazer a reocupação segura das salas de aula.

De acordo com a OMS (ORGANIZAÇÃO..., 2020b) o contágio da Covid-19 pode ocorrer por contato direto com as gotículas, com superfícies contaminadas ou com partículas de vírus presentes em aerossóis suspensos no ar, sendo esta última a via predominante (ZHANG *et al.*, 2020). Além disso, foi demonstrado que mesmo indivíduos assintomáticos transmitem a doença, o que dificulta sua contenção, isolando somente indivíduos contaminados (BYAMBASUREN *et al.*, 2020). Sendo assim, é importante ressaltar que manter condutas de isolamento social, como fechamento do comércio, restaurantes, academias e instituições de ensino, é eficaz para reduzir a velocidade de propagação da doença (LI *et al.*, 2020).

A relevância higiênica da ventilação já era conhecida da comunidade acadêmica antes do surgimento da pandemia, tanto que para Etheridge e Sandberg (1996), o propósito geral da ventilação em edifícios é fornecer ar fresco para a respiração, tanto por diluição quanto por retirada de contaminantes. Especificamente em relação ao vírus SARS-COV-2, Jones *et al.* (2020) indicam que a má ventilação aumenta a probabilidade de contágio. Dessa forma, o uso de estratégias de ventilação em ambientes fechados pode ser grande aliado no combate da pandemia, aumentando a renovação de ar e reduzindo o risco de contágio dos ocupantes.

A ventilação de ambientes internos pode ser simplificada dividida entre dois grandes grupos: natural e mecânica. Sistemas de condicionamento mecânicos bem projetados e executados podem garantir taxas mínimas de renovação de ar, adotando sistemas sem recirculação de ar ou com certos tipos de filtração (o que vai além da instalação de um ar-condicionado split, por exemplo). A adoção desses sistemas, porém, demanda vultosos recursos financeiros e tempo para sua execução. Enquanto isso, ambientes ventilados naturalmente, como a grande maioria das salas de aula do Brasil, tem suas taxas de ventilação variáveis conforme as condições climáticas, o que torna mais complexo avaliar a segurança de sua reocupação.

É importante ressaltar que diferentes estratégias de ventilação natural proporcionam taxas de renovação de ar muito distintas. Mecanismos como o chamado efeito chaminé, quando há troca de ar por diferença de temperatura, a ventilação cruzada, quando há aberturas em faces opostas ou adjacentes de um ambiente, fornecendo diferenças de pressão entre as faces e a ventilação unilateral, quando há aberturas em somente uma face do ambiente, resultam em diferentes fluxos de ar e consequentemente diferentes condições sanitárias (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2013).

Este artigo deu atenção a ambientes escolares, já que instituições de ensino são locais especialmente propensos à propagação de doenças contagiosas, haja vista altos índices de ocupação e baixos níveis de ventilação comumente reportados (SAMÚDIO *et al.*, 2006). Considerando a realidade da rede de ensino do país, foram avaliadas salas com ventilação natural. Outros trabalhos, mesmo antes da pandemia de Covid-19, já tinham como foco a qualidade do ar interno de ambientes escolares relacionada a possíveis riscos à saúde dos ocupantes. Viegas *et al.* (2015) e Kalimeri *et al.* (2016) realizaram medições de diversos parâmetros, dentre eles taxas de ventilação, encontrando resultados inadequados, para esse parâmetro considerado o mais importante em relação à qualidade do ar interno.

Durante a pandemia surgiram outras pesquisas relacionando taxas de ventilação de salas de aula e a saúde dos ocupantes. Park *et al.* (2021) estudaram salas de aula com ventilação cruzada e unilateral, e encontraram taxas muito superiores para situação cruzada. Os limites mínimos de ventilação recomendados por diversas normas serão discutidos mais à frente.

Enquanto isso, Aguilar *et al.* (2021) alertam para o possível impacto negativo que o aumento das trocas de ar pode ter em relação ao conforto térmico e acústico dos ocupantes. As conclusões em relação ao conforto térmico são válidas para o clima do ambiente estudado por eles, na Espanha; porém, para boa parte dos climas do Brasil, promover a ventilação natural dos ambientes pode também contribuir para o conforto térmico dos ocupantes durante significativa parte das horas do ano (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2013).

Dessa forma, este artigo visou analisar a ventilação natural de ambientes de ensino, com estudo de caso feito em salas de aula do Centro de Tecnologia e Urbanismo (CTU) da Universidade Estadual de Londrina (UEL), de forma a avaliar a segurança de reocupação desses ambientes no contexto da pandemia de Covid-19 a partir de suas taxas de ventilação. Os valores foram calculados com base em método algébrico proposto para literatura para as situações de ventilação cruzada e unilateral. A partir da análise dos resultados, buscou-se apresentar sugestões para a redução de riscos na reocupação de ambientes de ensino, e para o projeto de futuras salas de aula.

Método

A determinação precisa das taxas de ventilação de ambientes fechados depende da realização de experimentos em campo, como ensaios baseados na concentração de gases traçadores, porém esses demandam equipamentos como medidores de concentração de gases e anemômetros. Além disso, considerando o comportamento estocástico dos ventos, idealmente as medições deveriam ocorrer para diferentes condições meteorológicas. A realização desse tipo de estudo individualizado para cada uma das milhares de salas de aula do país é inviável em termos de disponibilidade de equipamentos e tempo hábil.

Adotou-se, portanto, a utilização de método simplificado para a avaliação da ventilação dos ambientes fechados, que pode ser aplicado com relativa facilidade em grande escala. Para tal, utilizou-se a metodologia proposta por Lamberts, Dutra e Pereira (2013) para a elaboração de uma planilha que possibilita a estimativa ágil das taxas de ventilação de ambientes a partir de dados de entrada de fácil obtenção.

A planilha desenvolvida foi aplicada a todas as salas de aula ventiladas naturalmente do CTU, com dados apresentados neste trabalho. O instrumento também foi aplicado a escolas da rede pública do município de Londrina, e a salas da Clínica Odontológica Universitária da UEL, como parte de um projeto de extensão, seguindo o objetivo de gerar dados relevantes de forma ágil, ainda que aproximados.

É importante ressaltar que o método possui limitações, por considerar uma série de aproximações durante o procedimento de cálculo como o uso de parâmetros qualitativos de rugosidade do terreno, aproximações no cálculo de coeficientes de pressão e de descarga, discutidas mais a fundo à frente. O cálculo emprega equações advindas da mecânica dos fluidos, que consideram o fluxo de vento laminar e paralelo à superfície, o que gera resultados com significativa variabilidade. Mesmo ensaios medindo a velocidade do vento nas aberturas, que já dependem de menos variáveis, ainda apresentam erros significativos; os experimentos mais adequados para medir taxas de ventilação, os únicos de acordo com Persily (2016), são aqueles baseados em gases traçadores, que demandam equipamentos de medição especializados. Entretanto, para este tipo de pesquisa, com uma quantidade grande de ambientes a analisar e necessidade de resultados rápidos, este método não se mostrou viável.

Ainda assim, a ordem de grandeza dos resultados obtidos pela aplicação de equações advindas da fluidodinâmica, com base em dados climáticos e coeficientes aproximados de rugosidade, pode fornecer informações importantes sobre a qualidade do ar em salas de aula, e foi aplicada em diversas pesquisas na literatura (JONES *et al.*, 2016; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2013; FROTA; SCHIFFER, 2001). Considerado o contexto de pandemia e retomada as aulas presenciais, na UEL, especificamente em fevereiro de 2022, e a necessidade de dados para conhecer as condições de ventilação das salas de aula, de forma a permitir a elaboração de diretrizes para ocupação mais segura dos ambientes, como a redução da ocupação máxima, mesmo considerando a incerteza do método, justifica sua aplicação.

A Figura 1 a seguir apresenta fluxograma que descreve brevemente o método deste estudo.

Caracterização do ambiente para estudo de caso

O objeto de estudo de caso foi o Centro de Tecnologia e Urbanismo da Universidade Estadual de Londrina. O edifício, situado nas coordenadas S23°19'35.9" W51°11'54.0", dentro do campus da UEL, é composto de três pavimentos, com área construída de 5.836 metros quadrados.

O partido arquitetônico do edifício é similar ao de outros da UEL, em formato H, com as salas de aula voltadas a um corredor que, segundo Kowaltowski (2011), é um dos mais comuns em ambientes escolares no país, o que justificou sua escolha.

Existem 11 salas de aula ventiladas naturalmente no térreo, além de laboratórios, banheiros e depósitos. No primeiro pavimento existem nove salas de aula ventiladas naturalmente, além de cinco salas multimeios (que possuem ar-condicionado), secretarias, laboratórios de informática, a biblioteca, banheiros e depósitos. No segundo pavimento encontram-se seis salas multimeios, secretarias, laboratórios, e salas dos docentes.

Foram avaliadas neste estudo as condições de ventilação das salas de aula, incluindo aquelas que possuem ar-condicionado, uma vez que também podem ser utilizadas com ventilação natural, bem como dos laboratórios de informática. Não foram avaliadas áreas de permanência transitória, secretarias e salas dos docentes. As Figuras 2 a 4 apresentam plantas baixas esquematizadas do CTU, apresentando nome e leiaute das salas.

Figura 1 - Fluxograma do método anvisa

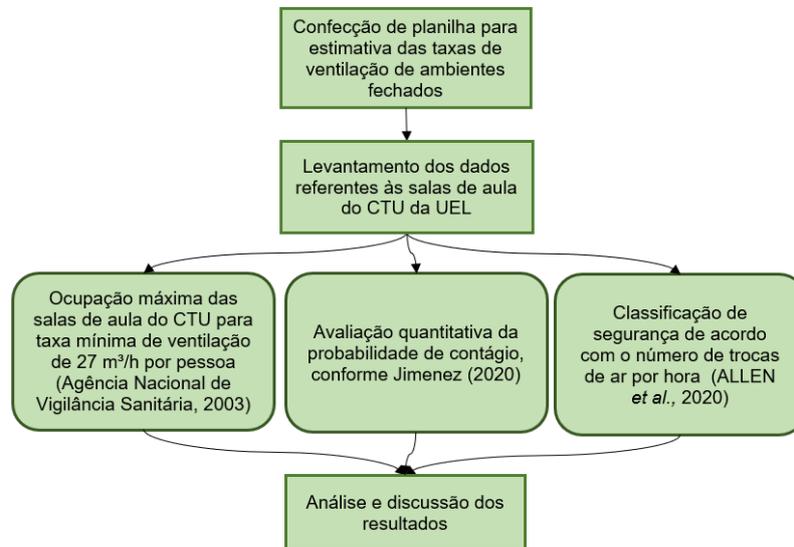


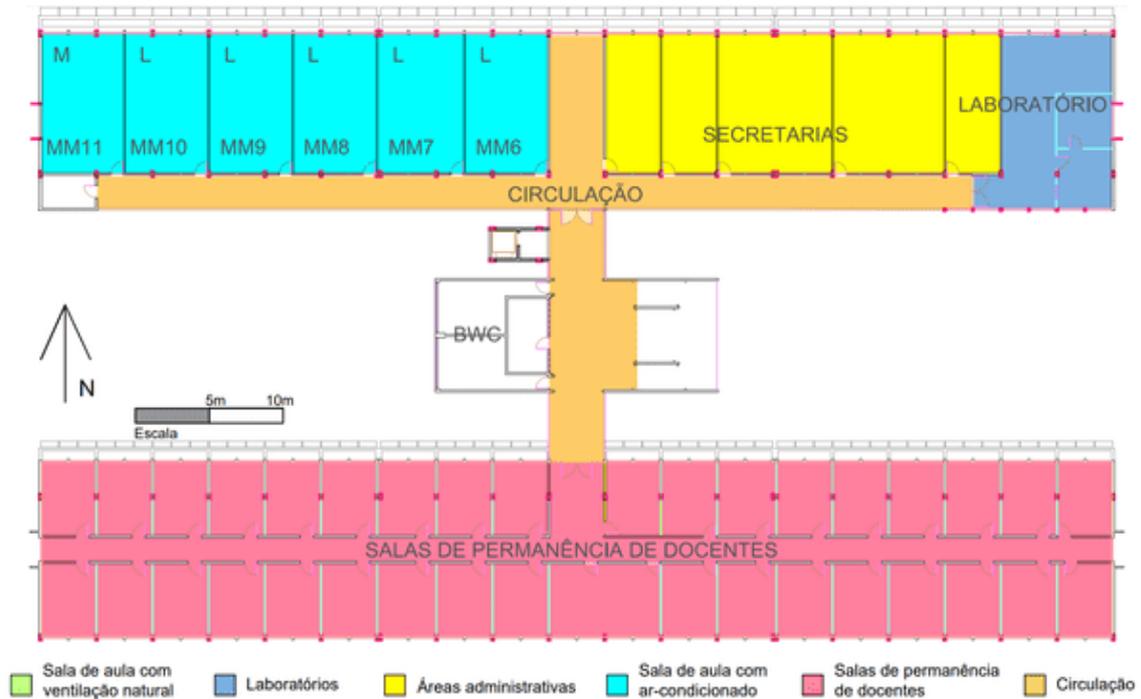
Figura 2 - Planta baixa do térreo



Figura 3 - Planta baixa do primeiro pavimento



Figura 4 - Planta baixa do segundo pavimento



Foram avaliadas as salas de aula em verde e azul claro, e os laboratórios de informática, totalizando 31 ambientes. Devido à similaridade do leiaute dos ambientes, são 13 diferentes situações para aplicação do método proposto. Os dados geométricos dos treze diferentes leiautes de sala de aula estão compilados na Tabela 1.

Dentre os ambientes analisados, o único com abertura intermediária foi o laboratório de informática, com área de 2,52 m². Todas as outras salas são ambientes de câmara única. As salas multimídias 2, 3, 4 e 5 foram construídas com menos esquadrias do que o previsto em projeto. Essas foram as salas de aula com menor

valor para área equivalente, com 0,63 m, enquanto a média para os 30 ambientes foi de 1,44 m. A ocupação máxima de cada sala antes da pandemia está apresentada na Figura 23, na seção de resultados.

As salas de aula foram projetadas para proporcionar ventilação cruzada, possuindo janelas superiores basculantes junto às paredes dos corredores, onde se localizam as portas, e esquadrias do tipo máximo-ar e basculantes nas paredes voltadas para as fachadas externas, conforme ilustra a Figura 5, registrada na sala 1014.

A Figura 6 apresenta modelo 3D de salas do primeiro pavimento do bloco norte, evidenciando a distribuição das esquadrias.

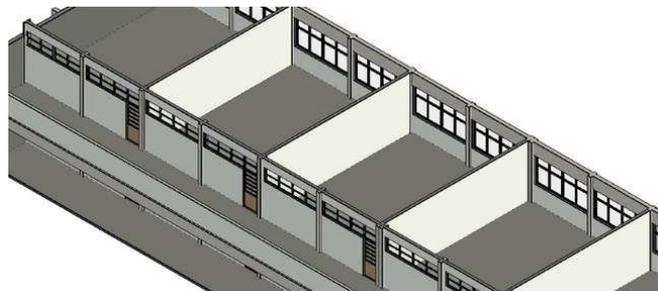
Tabela 1 - Caracterização geométrica das salas de aula

Leiaute	Salas	Pav.	Área do ambiente (m ²)	Volume do ambiente (m ³)	Área útil das entradas de ar (m ²)	Área útil das saídas de ar (m ²)	Área equivalente de abertura (m ²)	Altura da abertura de entrada (m)
A	1006	1º	85,3	276,38	3,46	4,08	2,64	1,10
B	1008	1º	70,4	228,1	2,31	2,28	1,62	1,10
C	1009A/1009B	1º	70,4	228,1	2,31	2,28	1,62	1,10
D	1021	1º	70,1	227,2	2,28	1,32	1,14	2,10
E	1022/1023	1º	70,4	228,1	2,28	1,32	1,14	2,10
F	1024	1º	72,5	234,8	2,28	1,32	1,14	2,10
G	1025/1026/1027	1º	108,4	351,2	4,28	1,98	1,80	2,10
H	MM2/MM3/MM4/MM5	2º	52,5	169,9	2,15	0,66	0,63	5,45
I	1011/1012/1013/1014/1017/1018/1019	2º	63,9	226,6	2,31	2,28	1,62	4,43
J	1015	2º	106,3	344,4	3,46	4,10	2,65	4,45
K	Lab. Inf. 1/Lab. Inf. 2	2º	56,7	183,7	3,36	1,65	1,28	3,35
L	MM6/MM7/MM8/MM9/MM10	3º	52,0	168,4	1,73	2,13	1,34	7,80
M	MM11	3º	52,5	169,9	1,73	1,68	1,21	7,80

Figura 5 - Interior da sala 1014



Figura 6 - Modelo 3D explodido das salas



O mobiliário dos 31 ambientes avaliados é na maioria típico de salas de aula, com mesas e cadeiras para os estudantes, quadro-negro, projetor e ventiladores de parede. As exceções são as salas 1025, 1026 e 1027, que contam com pranchetas de desenho, e os laboratórios de informática, que contam com 30 computadores cada um. A Figura 7 apresenta corte esquemático do edifício, com setas representando o possível movimento do ar para um vento norte.

É possível observar a existência de desnível entre o edifício e o terreno em frente à fachada norte, bem como de brises, que podem influenciar o movimento do ar. A direção do vento no bloco sul não é clara neste esquema, pois, devido à pequena distância entre os blocos, pode haver uma zona de recirculação de ar no pátio central, como indica Bittencourt e Candido (2010). Essas nuances não são consideradas no procedimento de cálculo adotado.

A Figura 8 apresenta um módulo de esquadrias máximo-ar, com as mesmas dimensões para os blocos norte e sul. Entretanto, enquanto as do bloco norte abrem aproximadamente 40° (em relação ao eixo vertical), as do bloco Sul abrem ligeiramente menos, somente 30° . A Figura 9 apresenta um módulo de esquadrias basculantes, iguais para os dois blocos, com abertura de aproximadamente 30° .

Apesar de serem janelas grandes, devido ao tipo de esquadria adotado, as áreas úteis para ventilação são relativamente baixas. As janelas máximo-ar com 40° de abertura possuem cerca de 23% de área útil para ventilação, enquanto as com abertura de 30° somente 13%. As janelas basculantes também não abrem na totalidade, o que também reduz a área útil para ventilação.

Figura 7 - Corte esquemático

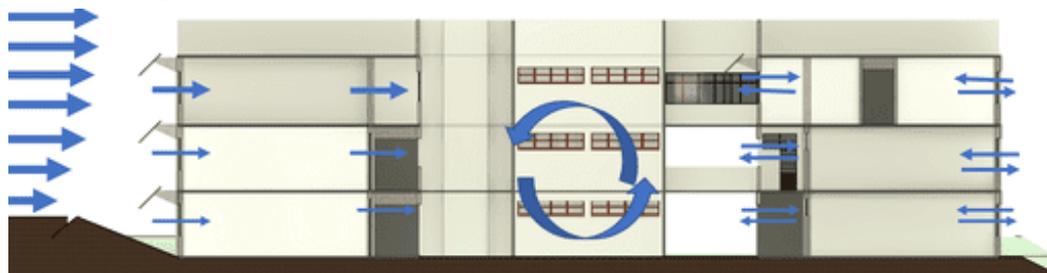


Figura 8 - Módulo de esquadria máximo-ar

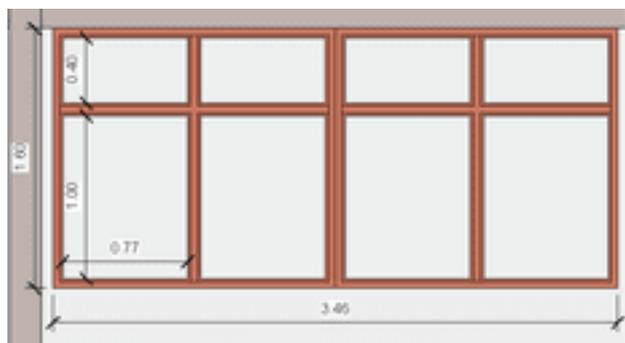
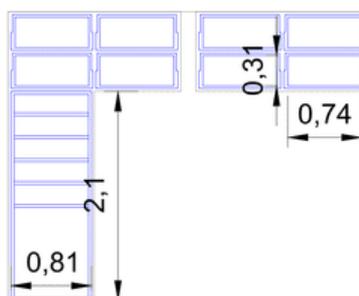


Figura 9 - Módulo de esquadria basculante



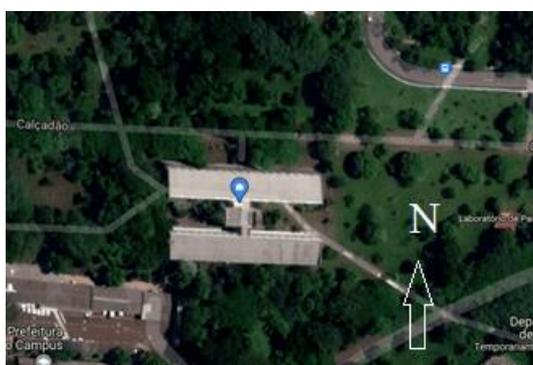
A imagem de satélite apresentada na Figura 10 permite observar obstáculos ao redor da edificação, que interferem nas condições de ventilação do edifício. Há em frente das fachadas norte, sul e oeste concentração densa de árvores de grande porte. Em frente da fachada leste há presença de árvores de pequeno porte e arbustos. A sudoeste, a menor altitude, encontra-se um estacionamento térreo.

As Figuras 11 e 12 apresentam as fachadas norte e sul da edificação, ilustrando a vegetação como obstáculo à passagem do vento.

Coleta e aplicação de dados meteorológicos

Foram utilizados dados da estação meteorológica do Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná (IDR-Paraná) ($23^{\circ}21'34.3''S$; $51^{\circ}09'53.1''W$, alt. 585 m) distando 5 quilômetros do CTU. Com base em dados coletados pela mesma estação, referentes ao período entre 1° de janeiro de 2015 e 31 de dezembro de 2020, foram elaborados os gráficos das Figuras 13 e 14, que apresentam, respectivamente, o boxplot da intensidade média horária do vento e sua frequência de ocorrência por direção.

Figura 10 - CTU e arredores



Fonte: adaptado de Google (2021).

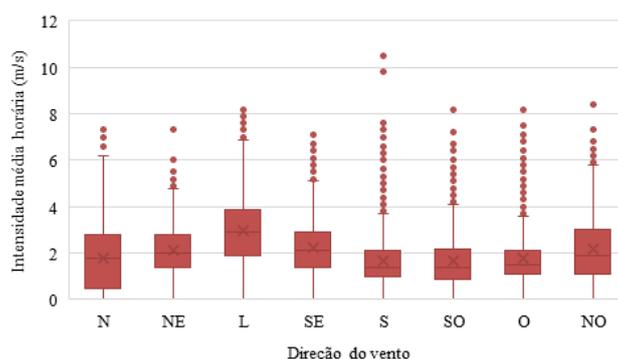
Figura 11 - Foto da fachada norte



Figura 12 - Foto da fachada sul

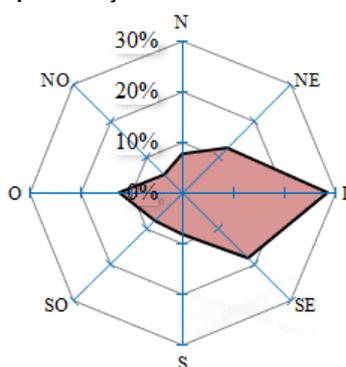


Figura 13 - Boxplot da intensidade média horária do vento por direção



Fonte: adaptado de Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná (2021).

Figura 14 - Frequência de ocorrência por direção



Fonte: adaptado de Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná (2021).

Inicialmente o fluxo de ar das salas de aula foi estimado utilizando como referência vento com intensidade de 1,0 m/s, vindo da direção predominante (leste). Foi considerada intensidade reduzida em relação ao valor médio registrado pelo IDR-Paraná (2019) para realização dos cálculos, uma vez que não seria prudente considerar a manutenção da velocidade média horária ao longo do dia, já que há grandes variações da intensidade e direção do vento ao longo do tempo, inclusive havendo períodos de calmaria (TROEN; PETERSEN, 1989). A Figura 13 demonstra esse fenômeno para o estudo de caso, apontando que há para todas as direções horas com intensidade do vento inferiores à média, inclusive chegando ao nulo.

Também foram realizadas simulações para diferentes intensidades do vento (1,5 m/s e 2,0 m/s). Os dados meteorológicos coletados entre 2015 e 2020 revelam que a intensidade horária média é igual ou superior a 0,5 m/s, 1,0 m/s, 1,5 m/s e 2,0 m/s, respectivamente, em 94,8%, 85,1%, 68,8% e 52,0% dos registros. É importante ressaltar que também há momentos de calmaria (2,4% dos registros), quando o vento não contribui para renovação de ar do ambiente. Dessa forma, mesmo que controlar a ocupação das salas de aula durante esses momentos constitua desafio à parte, é de grande importância conhecer o comportamento da ventilação dos ambientes internos durante a maior parte de sua operação.

A Figura 14 esclarece que mesmo a direção predominante sendo leste (29%), há registro de ventos em todas as direções. As outras direções mais frequentes são: sudeste (18%), oeste (13%) nordeste (12%). Ainda assim, inicialmente adotou-se como referência a direção predominante.

A Figura 15 apresenta simulação do caminho percorrido pelo ar no pavimento térreo do CTU para essa direção, realizada com auxílio do software Fluxovento. A simulação mostrou ângulos de incidência do vento nas aberturas maiores que os medidos diretamente em planta. A inclinação entre a fachada norte do edifício e a direção leste é de aproximadamente 87°, porém a simulação indica valores mais próximos de 45°. Como se trata de simulação simples, bidimensional, os resultados devem ser interpretados com cautela. Avaliou-se que a utilização da inclinação medida em planta somente para a direção predominante poderia subestimar o fluxo de ventilação do ambiente. Considerando essa variação, bem como a variação climática, foram simulados diferentes ângulos de incidência no modelo de cálculo (até 30°, 45°, 60°, 75° e 87°). A incidência

de 45° e intensidade de 1,0 m/s foram adotadas para análise da ocupação máxima das salas, e da probabilidade de contágio, discutidas a fundo mais à frente.

Desenvolvimento e aplicação da planilha de cálculo

Esta subseção apresenta a sequência de cálculo do modelo proposto para estimação das taxas de renovação de ar de um ambiente ventilado naturalmente, bem como o procedimento pelo qual se deu sua aplicação.

Para adoção da intensidade do vento nos cálculos, realizou-se correção de acordo com a altura da abertura de entrada dos ambientes analisados, bem como a rugosidade do terreno do campo de estudo, conforme proposto por Bittencourt e Cândido (2005), de acordo com a equação 1. Foram simuladas as intensidades de 1,0 m/s, 1,5 m/s e 2,0 m/s.

$$\frac{V}{V_M} = k \times z^a \tag{Eq. 1}$$

Onde:

V é a velocidade do vento corrigida para a altura da abertura de entrada [m/s];

V_M é a velocidade do vento na altura padrão de 10m [m/s];

z é altura da abertura de entrada [m]; e

k e a são coeficientes adimensionais de rugosidade do terreno.

A planilha desenvolvida permitiu a seleção de uma entre quatro condições de localização da edificação, de acordo com a Tabela 2.

Foi considerada condição pessimista para a última classificação de rugosidade, considerando a densa presença de árvores ao redor da edificação.

Figura 15 - Simulação do fluxo de ar no CTU para vento leste

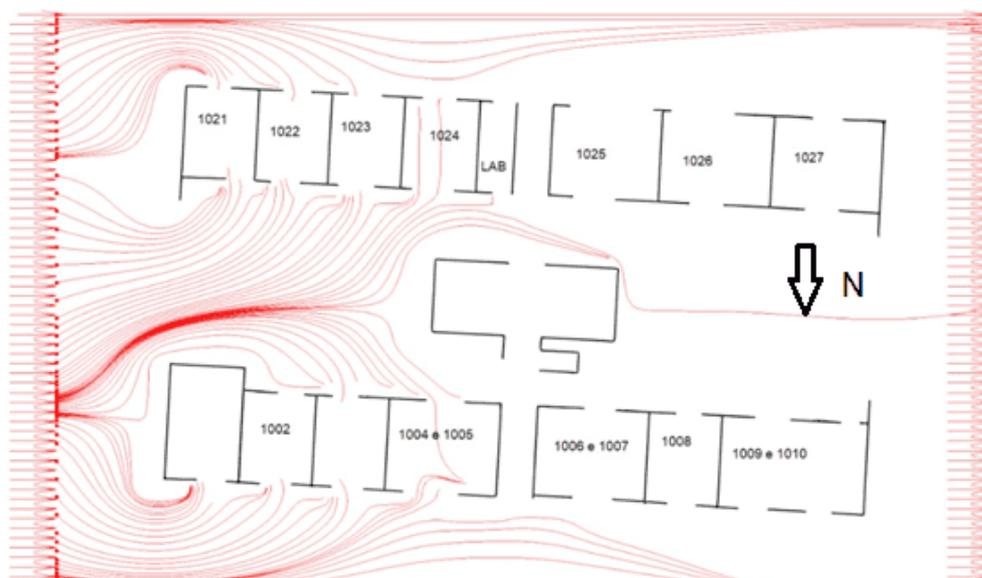


Tabela 2 - Coeficientes para correção da velocidade do vento devido à rugosidade do terreno

Localização da edificação	k	a
Campo aberto plano	0,86	0,17
Campo com algumas barreiras	0,52	0,20
Ambiente urbano	0,35	0,25
Centro da cidade	0,21	0,33

Fonte: adaptado de Lamberts, Dutra e Pereira (2013).

O mecanismo primário para a ventilação cruzada são as diferenças de pressão geradas pela ação do vento entre as fachadas onde estão localizadas as aberturas do recinto. Esse fator é considerado no roteiro de cálculo previsto por Lamberts, Dutra e Pereira (2013) a partir do coeficiente de pressão do vento (ΔC_{pl}), estimado de acordo com o ângulo de incidência do vento na abertura de entrada (θ), medido em planta, conforme a Tabela 3.

O valor de θ é zero quando o vento incide ortogonalmente à abertura de entrada, e 90° quando é paralelo. Seu valor em graus é uma das entradas necessárias para a simulação das taxas de ventilação realizada pela planilha. Foram simulados diferentes ângulos de incidência (até 30° , 45° , 60° , 75° e 87°), com o resultado proveniente da incidência de 45° adotado para as análises de ocupação máxima e probabilidade de contágio.

Para a aplicação dos coeficientes na estimação do fluxo de ar do recinto ainda é necessária correção do ΔC_{pl} em função da ocupação dos lotes vizinhos. O método algébrico propõe redução de 40% no valor caso haja edificações a cerca de “duas casas” de distância, e de 70% caso edifícios vizinhos estejam locados a “uma casa” de distância. Para o estudo de caso, novamente de forma pessimista, considerou-se distância de “uma casa”, mesmo não existindo edifícios próximos, devido à presença de vegetação densa ao redor do edifício, e ao seu formato em “H”, já que um bloco pode atuar como obstáculo para o outro.

Devido às características geométricas da edificação de estudo de caso, foi considerado que todas as salas têm as aberturas de entrada de ar sujeitas à mesma inclinação para um mesmo vento. Como o modelo de cálculo estima o ΔC_{pl} a partir dessa inclinação, todas as salas estarão sujeitas aos mesmos coeficientes de pressão.

O modelo de cálculo utiliza como parâmetros áreas úteis de entrada ($A_{\text{útil,entrada}}$ [m²]) e saída ($A_{\text{útil,saída}}$ [m²]), obtidas a partir da correção da área total das aberturas de acordo com o tipo de esquadria instalada. A planilha apresenta campos de entrada para as áreas totais das aberturas de entrada e saída, e seus respectivos tipos de esquadria, calculando seu percentual de aproveitamento de acordo com os valores sugeridos por Lamberts, Dutra e Pereira (2013).

Caso não haja aberturas em fachadas opostas, promovendo o fenômeno da ventilação cruzada, as áreas são computadas todas como áreas de entrada. Nessa situação o cálculo do fluxo de ar foi realizado conforme a Equação 2, a seguir:

$$Q = 0,025 \times \sum_{i=1}^n A_{\text{útil},i} \times V \quad \text{Eq. 2}$$

Onde Q é o fluxo de ar [m³/s].

Todas as salas de aula do CTU podem aproveitar da ventilação cruzada, mas foi simulada situação em que somente as janelas máximo-ar são abertas, situação relativamente comum durante aulas, quando as janelas basculantes do corredor são mantidas fechadas, principalmente para evitar ruídos.

Para situações em que há aberturas de entrada e saída promovendo o fenômeno da ventilação cruzada calcula-se a área efetiva para aberturas em série (A_{ef} [m²]) antes de se proceder à determinação do fluxo. Esse processo se dá de forma automática pela planilha, conforme a Equação 3 proposta por Lamberts, Dutra e Pereira (2013).

$$\frac{1}{(A_{ef})^2} = \frac{1}{(\sum_{i=1}^n A_{\text{útil,entrada},i})^2} + \frac{1}{(\sum_{i=1}^n A_{\text{útil,saída},i})^2} \quad \text{Eq. 3}$$

Onde:

c_a é o coeficiente adimensional de perda de carga por ação dos ventos; e

ΔC_p é a diferença entre os coeficientes de pressão das aberturas de entrada e saída corrigidos.

Tabela 3 - ΔC_{pl} para casas em campo aberto

Ângulo de incidência (θ)	Diferença entre os coeficientes de pressão do vento (ΔC_{pl})
$0 \leq \theta \leq 30^\circ$	1,2
$30^\circ < \theta \leq 90^\circ$	$0,1 + 0,0183*(90-\theta)$

Fonte: adaptado de Lamberts, Dutra e Pereira (2013).

Nesses casos do fluxo foi calculado de acordo com Frota e Schiffer (2001), seguindo a Equação 4.

$$Q = c_a \times A_{ef} \times V \times \sqrt{\Delta C_p} \quad \text{Eq. 4}$$

O valor de c_a foi adotado como igual a 0,6, seguindo Lamberts, Dutra e Pereira (2013) e Frota e Schiffer (2001). No estudo de Jones et al. (2016) foi utilizado coeficiente 0,62. Trata-se de coeficiente empírico, que varia de acordo com as características geométricas da abertura, e, portanto, é tratado de forma aproximada. Por fim, a taxa de ventilação do ambiente em número de trocas de ar por hora foi obtida pela divisão do fluxo de ar por seu volume, apresentados na Tabela 1.

Determinação da ocupação máxima e avaliação da segurança

Na sequência, a taxa de ventilação por pessoa do ambiente foi obtida pela sua divisão do fluxo de ar pelo número máximo de ocupantes das salas antes da pandemia. Também se obteve, por estudos geométricos das plantas, a máxima ocupação das salas para manutenção de distanciamento de 2 metros entre os ocupantes.

Em diferentes países diversas normas recomendam taxas mínimas de ventilação para ambientes internos, como a suíça SIA382/1 (SCHEIZERISCHER..., 1992), a europeia EN 13799 (EUROPEAN..., 2004), a alemã DIN 1946-2 (DEUTSCHES..., 1994) e a estadunidense ASHRAE 62 (AMERICAN..., 2013), mencionando algumas, com estudos indicando que taxas de ventilação acima das mínimas estabelecidas pelas normas estão associadas a ambientes mais saudáveis e produtivos (CHENARI; DIAS CARRILHO; GAMEIRO DA SILVA, 2016).

Diferentes unidades são utilizadas nessas normas para determinar para taxas mínimas de ventilação. A maior parte apresenta exigências de fluxo de ar por pessoa (l/s/pessoa, m³/h/pessoa), parâmetro considerado chave para a avaliação da probabilidade do risco de transmissão de doenças respiratórias (BUONANNO; STABILE; MORAWSKA, 2020). Isso significa que um mesmo recinto pode possuir ventilação adequada ou não dependendo do seu número de ocupantes.

Chenari, Dias Carrilho e Gameiro da Silva (2016) revisaram taxas recomendadas pelas supracitadas normas. Os resultados são apresentados em faixas, já que dependem dos diferentes possíveis usos dos edifícios. Enquanto a SIA382/1 recomenda taxa variando entre 12 e 30 m³/h por pessoa, a americana ASHRAE determina valores mínimos entre 29 e 36 m³/h por pessoa e a DIN 1946-2 (DEUTSCHES..., 1994) entre 20 e 60 m³/h por pessoa. A avaliação da ocupação máxima do ambiente foi feita a partir do critério recomendado pela resolução da RE/ANVISA n. 9 (AGÊNCIA..., 2005) para ambientes climatizados, de 27 m³/h por pessoa. Trata-se de um parâmetro elaborado originalmente visando a manutenção da ventilação higiênica em ambientes climatizados artificialmente, com ordem de grandeza em consonância com normas internacionais (AGÊNCIA..., 2003). Para essa análise foi considerado o fluxo de ar obtido considerando ângulo de incidência do vento de 45° e intensidade de 1,0 m/s. Também foi avaliada a ocupação máxima para ventilação unilateral ($V_0=1,0$ m/s) e para distanciamento de 2 metros entre ocupantes.

Para avaliar os ambientes em si, sem considerar a ocupação, outra métrica que pode ser empregada é o número de trocas de ar por hora do ambiente. A classificação da segurança de ocupação dos ambientes foi realizada conforme cinco faixas propostas por Allen *et al.* (2020) para ambientes escolares no contexto da pandemia de Covid-19, avaliando a ventilação de ruim (menos que 3 trocas de ar por hora) a ideal (mais de 6 trocas de ar por hora). A classificação dos ambientes foi realizada para as diferentes intensidades e ângulos de incidência do vento analisados.

É importante ressaltar que não somente taxas de ventilação são relevantes para a qualidade interna do ar. Há diversos fatores influentes, como umidade relativa do ar, e a própria qualidade do ar externo, também por vezes inadequada em grandes centros urbanos (SAKIYAMA *et al.*, 2020). Ainda assim, fica clara a importância de conhecer as taxas de ventilação de ambientes internos sob a ótica da saúde pública.

Este estudo também aplicou os resultados obtidos das taxas de ventilação para simular a probabilidade de contágio da Covid-19 após aulas, com base na ferramenta desenvolvida por Jimenez (2020). O modelo de cálculo considera que as emissões de vírus são uniformemente distribuídas pelo volume do ambiente, e aplica o modelo Wells-Riley de infecção por aerossóis, como formulado em Miller *et al.* (2020). São vários os parâmetros envolvidos no cálculo da probabilidade. Os principais são a emissão de “quanta” (uma dose infecciosa do vírus), taxas de inalação (variam de acordo com a idade e atividade dos ocupantes), eficiência de máscaras, número de trocas de ar por hora do ambiente, taxas de decaimento e deposição do vírus, além de outros parâmetros secundários. É importante levar em consideração que a taxa de ventilação é somente um deles. Como a determinação dos outros parâmetros envolvidos no cálculo da probabilidade de contaminação foge ao escopo deste trabalho, serão considerados os valores adotados por Jimenez (2020)

para a avaliação de salas de aula. Os valores adotados consideram que todos os integrantes utilizam máscaras simples de tecido.

O parâmetro referente ao número de doses infecciosas expelidas varia entre indivíduos (se vacinado ou não, de acordo com a atividade, idade, entre outros), e é específico para cada doença, por isso os dados de probabilidade de contágio de uma doença como a Covid-19 não podem ser diretamente extrapolados para outras enfermidades. Foi adotado o valor de 25 quanta/hora, que considera a atividade de um professor falando, e foi estimado para as primeiras variantes do SARS-COV-2, ou seja, não consideram a maior transmissibilidade da variante Ômicron (JIMENEZ, 2020). Durante a execução do trabalho a vacinação ainda não era realidade no país, portanto foi considerada situação com 100% dos indivíduos suscetíveis à doença.

Para cada sala de aula foram inseridas na planilha as dimensões (área e volume) e número de trocas de ar por hora, calculados pelo método algébrico para ângulo de incidência de 45° e intensidade de 1,0 m/s. Os cálculos foram realizados considerando:

- (a) ocupação máxima original das salas de aula;
- (b) ocupação máxima proposta considerando ventilação mínima de 27 m³/h por pessoa; e
- (c) considerando distanciamento mínimo de 2 metros entre os ocupantes, parâmetro recomendado pela secretaria de saúde do governo do Paraná na resolução SESA n. 632/2020 (PARANÁ, 2020) na época do desenvolvimento do trabalho.

Mais recentemente a obrigatoriedade do distanciamento de 2 metros foi revogada, porém buscou-se avaliar a efetividade de medida. Também foi avaliada situação considerando ventilação unilateral (para V₀=1,0 m/s) e ocupação original pré-Covid.

A duração de cada aula foi adotada como 50 minutos. A ferramenta permite avaliar a probabilidade de contágio de pelo menos um indivíduo para um evento único considerando a presença de uma pessoa infectada. Essa avaliação é mais indicada para avaliar surtos conhecidos.

Para estimar o risco geral de contaminação em ambientes de ensino, é mais indicado inferir o número provável de infectados num evento (como uma aula) a partir da prevalência da Covid-19 na população. Foi aplicada prevalência de 1,32%, indicando a probabilidade de cada indivíduo estar infectado, valor estimado para o dia 9 de novembro de 2020, considerando números de todo o Brasil (GU, 2020). Ressalta-se que há grande variação da prevalência em função da região e do tempo. Também foram obtidos valores para a probabilidade de contágio após a repetição do evento por 100 vezes, o que corresponderia a cerca de um mês com cinco aulas durante os dias da semana.

Resultados

Os resultados deste trabalho foram divididos em três tópicos apresentados a seguir: taxas de ventilação, ocupação máxima e probabilidade de contágio.

Taxas de ventilação

Os gráficos das Figuras 16 a 20 apresentam os resultados de número de trocas de ar por hora para ventilação cruzada para cada um dos ângulos de incidência simulados. A Figura 21 apresenta o número de trocas de ar por hora para ventilação unilateral. As salas de aula estão divididas de acordo com o pavimento em que se encontram, separadas por espaço. As cores de fundo são referentes à classificação dos ambientes de acordo com as faixas propostas por Allen *et al.* (2020).

Os gráficos para as diferentes incidências de ventilação cruzada possuem o mesmo formato, variando o valor absoluto proporcionalmente ao coeficiente de pressão calculado para cada inclinação simulada. Isso ocorre porque o número de trocas de ar por hora é diretamente proporcional ao fluxo de ar calculado pela Equação 4, onde o único parâmetro que varia para as salas entre as diferentes inclinações é o ΔC_p . Para inclinação de 30°, ΔC_p assume valor 0,36; para 45°, 0,28; para 60°, 0,19; para 75°, 0,11 e para 87°, somente 0,05. A relação do fluxo de ar com a intensidade do vento também é diretamente proporcional.

Para a ventilação unilateral, não há influência do ângulo de incidência do vento, somente de sua intensidade, por isso os resultados são expressos em um único gráfico para todas as inclinações na Figura 21.

Figura 16 - Número de trocas de ar por hora para ventos incidentes até 30°

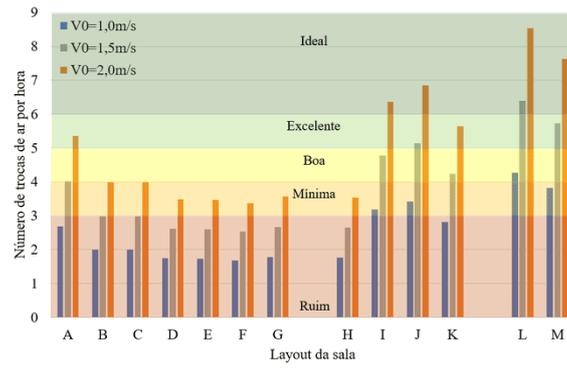


Figura 17 - Número de trocas de ar por hora para vento incidente a 45°

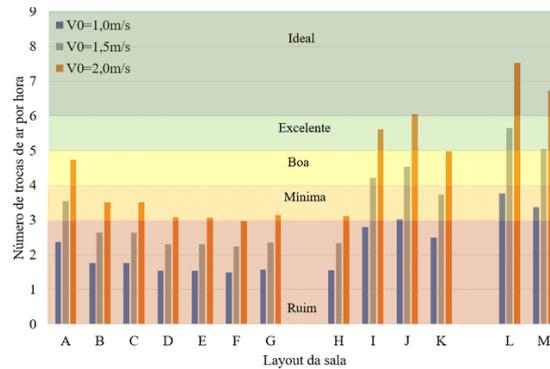


Figura 18 - Trocas de ar por hora para vento incidente a 60°

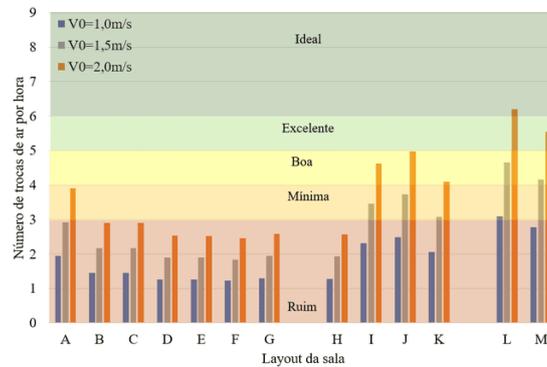


Figura 19 - Trocas de ar por hora para vento incidente a 75°

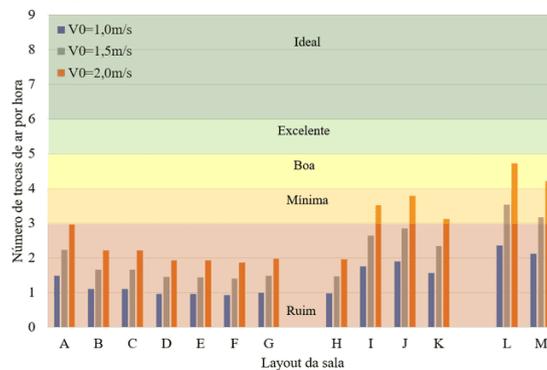


Figura 20 - Trocas de ar por hora para vento incidente a 87°

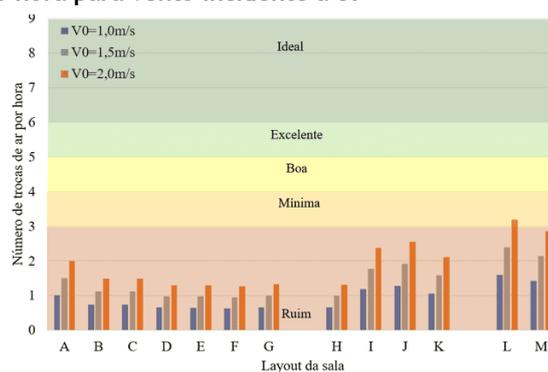
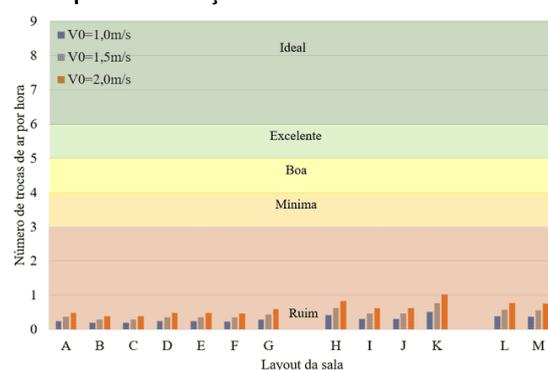


Figura 21 - Trocas de ar por hora para ventilação unilateral



Somente para a ventilação cruzada, considerando o ângulo de incidência mais otimista, até 30°, e a intensidade de 2,0 m/s, algumas salas de aula do primeiro e segundo pavimento atingiram a classificação “ideal”, como ilustra a Figura 15. Para a intensidade de 1,0 m/s, somente para as incidências de até 30° e 45° algumas salas do segundo pavimento apresentaram classificação de segurança “mínima”, e em um caso “boa”, em todas as outras salas e ângulos de incidência a classificação é “ruim”. Considerando essa intensidade, nenhum ambiente teve classificação “excelente” ou “ideal”.

Já para ventilação unilateral, mesmo no cenário mais otimista de intensidade do vento, 2,0 m/s, todas as salas de aula têm sua ventilação classificada como “ruim”, como ilustra a Figura 21. A magnitude do número de trocas de ar por hora é bastante inferior quando em comparação com a ventilação cruzada. Para salas de aula localizadas no segundo pavimento, a diferença chega a ser de 9,8 vezes, quando comparado com o fluxo proporcionado por ventilação cruzada para inclinação de 45°. Mesmo considerando a incidência mais pessimista (87°), a ventilação cruzada proporciona maiores taxas de ventilação do que a unilateral.

A análise das Figuras 16 a 21 ainda revela que salas do térreo possuem os piores índices de segurança, enquanto as do segundo pavimento possuem taxas de renovação de ar superiores. Isso se dá devido à diferença da altura das aberturas. Quanto mais alta a sala, maior a velocidade do vento, gerando assim maiores taxas de ventilação.

Ocupação máxima

Como exemplo de redução da ocupação das salas proposta por este trabalho, a Figura 22 apresenta a distribuição das cadeiras das salas 1022 e 1023, com dimensões idênticas. A sala 1023 (esquerda) está com a distribuição usual das carteiras, de antes da pandemia, a sala 1022 (direita) respeita distanciamento de 2 metros entre os ocupantes.

A Figura 23 a seguir apresenta a ocupação máxima registrada para cada sala de aula avaliada. São apresentadas as ocupações máximas pré-Covid, para distanciamento de 2 metros entre os ocupantes e para manutenção de taxa de ventilação de 27 m³/h/pessoa (para ventilação cruzada: $\theta=45^\circ$ e $V_0=1,0$ m/s; e unilateral: $V_0=1,0$ m/s).

Figura 22 - Ocupação das salas com e sem distanciamento de 2 metros

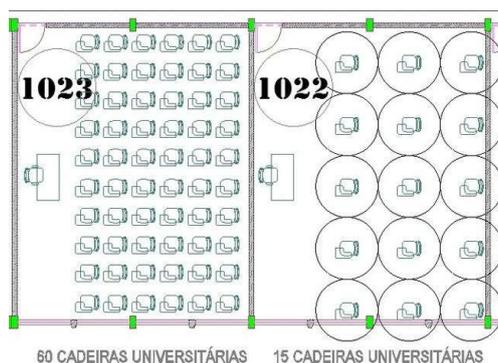
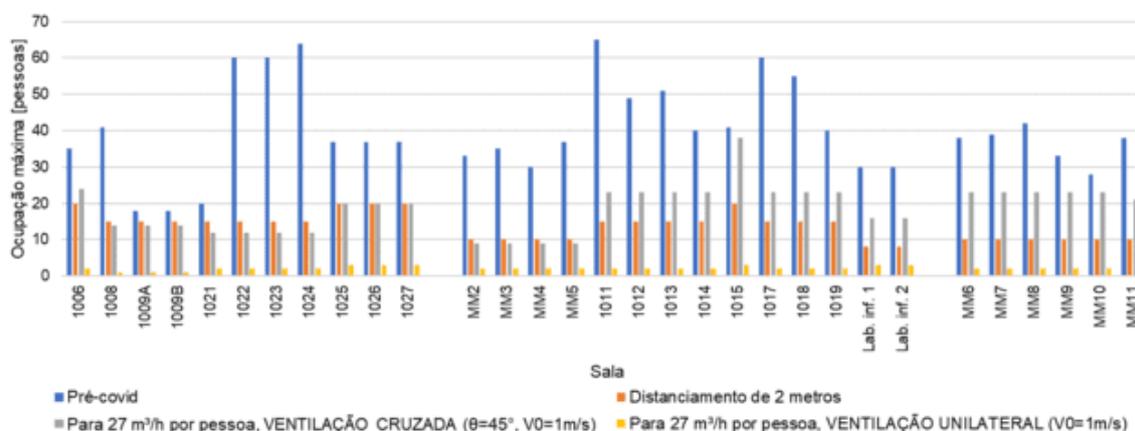


Figura 23 - Ocupação máxima das salas de aula do CTU



A ocupação máxima original de cada sala varia não somente em função de suas dimensões, mas também de sua utilização. Algumas salas grandes comportam poucos alunos, por possuírem pranchetas para desenho que ocupam bastante espaço. Outras salas, ainda que menores, por possuírem carteiras pequenas com pouco distanciamento, comportavam mais alunos.

A Figura 23 deixa claro que a ventilação unilateral é ineficaz para promover taxas adequadas de ventilação em salas de aula. A ocupação máxima considerando taxa mínima de ventilação de 27 m³/h por pessoa não ultrapassa três em nenhuma situação. Já considerando a ventilação cruzada, a ocupação cresce para valores mais viáveis de serem implementados. A sala 1006 do térreo, por exemplo, comportaria vinte e quatro pessoas mantendo taxa adequada de ventilação. Nesse caso as salas que comportariam menos ocupantes (9) seriam as multimeios 2, 3, 4 e 5, que apesar de localizadas no primeiro pavimento, possuem as menores áreas equivalentes de abertura.

Comparando a ocupação máxima gerada pelo distanciamento de 2 metros com a obtida para manutenção de taxa de 27 m³/h por pessoa para ventilação cruzada, o fator limitante é a ventilação para sete das onze salas do pavimento térreo. Para as salas do primeiro pavimento, o fator limitante é a ventilação somente nas salas multimeios 2 a 5; nas demais, o distanciamento de 2 metros restringe mais a lotação. Já para o segundo pavimento o fator limitante é o distanciamento em todas as salas.

Dessa forma, verifica-se que para 11 das 31 salas de aula avaliadas, o fator limitante é a ventilação (quando abertas todas as aberturas incluindo janelas e portas), enquanto para as demais o fator limitante é a manutenção do distanciamento social de 2 metros entre os ocupantes.

Ressalta-se que todas as salas verificadas possuem grandes áreas de esquadria, e mesmo assim a ventilação é o parâmetro mais restritivo em alguns casos; sendo assim, verifica-se a importância de serem estudadas as condições de ventilação de cada ambiente de forma individual.

Probabilidade de contágio

A Figura 24 compara a probabilidade de contágio de pelo menos um indivíduo após 100 aulas de 50 minutos para as salas de aula do CTU com ocupação original pré-Covid entre situação com ventilação cruzada e com ventilação unilateral. Os resultados foram obtidos a partir da aplicação do método proposto por Jimenez (2020). O único parâmetro que foi variado entre as análises foi a taxa de ventilação.

A sala com maior probabilidade de contágio após 100 eventos considerando ventilação cruzada foi a 1024, com aproximadamente 27%. O mesmo ambiente com ventilação unilateral teve probabilidade de quase 34%. A sala com menor risco para ambas as situações foi a 1009A, com aproximadamente 8% para ventilação cruzada e 11% para unilateral. A pior situação considerando ventilação unilateral foi registrada na sala de aula 1011, próxima aos 35%. Em todas as salas a ventilação cruzada proporciona menor risco de contágio.

A Figura 25 demonstra a redução do risco de contágio proporcionada pela limitação do número de ocupantes das salas. A cor laranja representa a ocupação pré-Covid, a cor verde a ocupação para distanciamento de 2 metros entre ocupantes, e azul considerando taxa de ventilação mínima de 27 m/h por pessoa para ventilação cruzada. As barras representam a ocupação para cada situação, e as linhas de cores correspondentes representam a probabilidade de contágio.

Figura 24 - Probabilidade de contágio para ventilação cruzada e unilateral e ocupação original

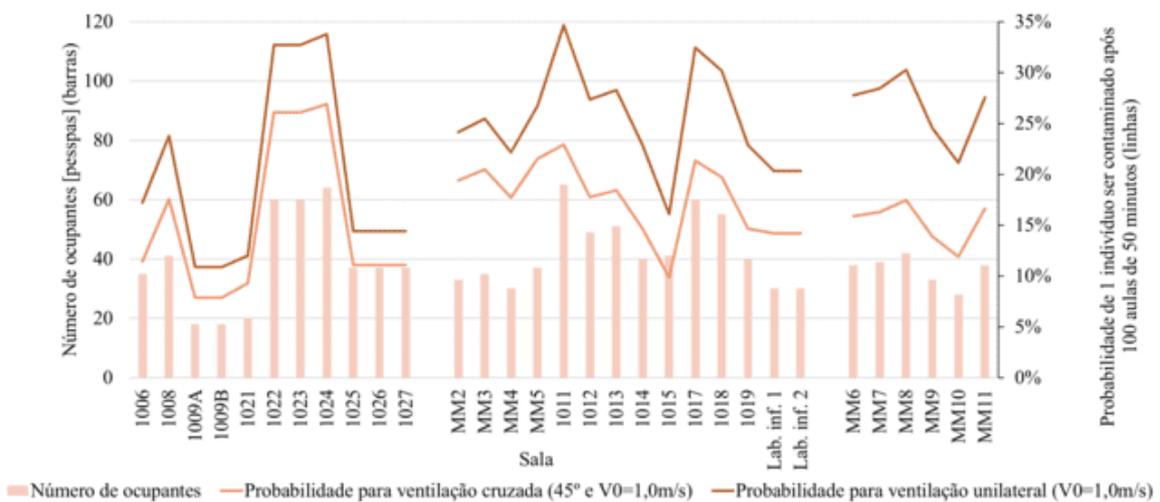
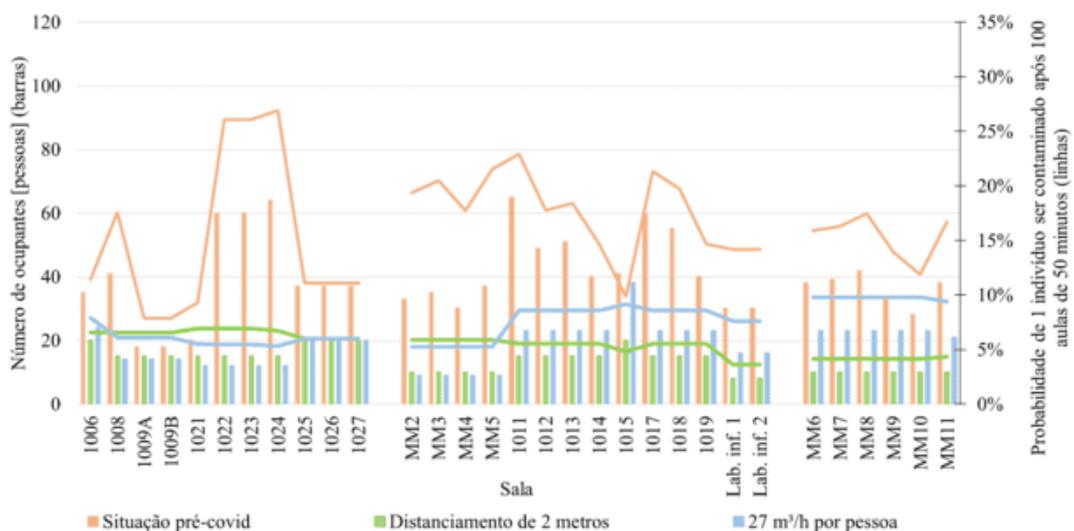


Figura 25 - Probabilidade de contágio com medidas de restrição da ocupação máxima, considerando ventilação cruzada



Após a redução do número de ocupantes, utilizando os valores encontrados anteriormente, a probabilidade de contágio foi reduzida entre 1,29 e 4,85 vezes. A maior diferença ocorre para as salas 1022 a 1024, localizadas no térreo. Isso ocorre devido a sua alta ocupação original, mais de 60 pessoas, por possuir carteiras pequenas.

A Figura 26 apresenta a variação da probabilidade de contágio, novamente de um indivíduo após 100 eventos, de acordo com o número de ocupantes. Os resultados são referentes à sala 1012, com ventilação cruzada ($V_0=1,0\text{m/s}$; $\theta=45^\circ$; 2,8 trocas de ar por hora).

O gráfico da Figura 26 evidencia o aumento da probabilidade de contágio com a ocupação. Apesar de em primeiro momento os valores para ocupação original não parecerem tão alarmantes, esses resultados implicam risco de morte até 52 vezes superiores em relação a acidentes de trânsito no trajeto até o evento (para a sala 1024), informação também obtida pela aplicação da planilha de Jimenez (2020). Para essa mesma sala com ocupação reduzida pela ventilação, esse risco de morte seria reduzido para 9 vezes superior em relação aos acidentes.

Conclusões

A partir dos dados obtidos para o fluxo de ar nas salas de aula do Centro de Tecnologia e Urbanismo da Universidade Estadual de Londrina, conclui-se que é necessário limitar a ocupação máxima dos ambientes para reduzir as chances de contaminação por Covid-19 em cenário de volta às aulas anterior à imunização em massa da população.

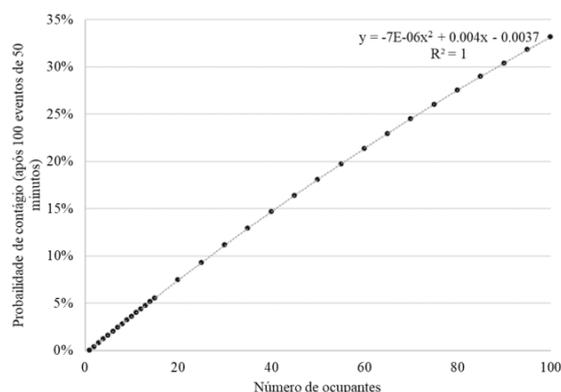
A sistematização através de uma planilha do modelo de cálculo algébrico é proposta como forma de avaliação simples e rápida das condições de ventilação do ambiente. É preciso ressaltar que o resultado para o fluxo de ar obtido possui baixa precisão inerente à metodologia, que aplica fórmulas com coeficientes aproximados. Dessa forma, deve-se ter cuidado com a tomada de decisões baseadas somente nesses dados. Recomenda-se adotar parâmetros de rugosidade superestimados, bem como reduzir intensidade média do vento, em prol da segurança.

As taxas de ventilação podem ser fator limitante para determinar a ocupação máxima de salas de aula. Verificou-se que manter distanciamento de 2 metros entre os ocupantes das salas de aula não foi suficiente para manter as taxas de ventilação acima do parâmetro adotado de 27 m³/h por pessoa para algumas salas de aula, principalmente do pavimento térreo, mesmo que o edifício em questão possua janelas amplas. A ausência de valores mínimos de taxas de ventilação em normas nacionais é um importante ponto levantado.

Somente a situação considerando ventilação cruzada gerou ocupações razoáveis das salas de aula. As projeções de fluxo de ar para a ventilação unilateral são muito inferiores, com resultado até 10 vezes menor para algumas salas. Fica claro que salas de aula ventiladas naturalmente de forma unilateral não são seguras em relação à propagação da Covid-19, nem atendem às taxas mínimas de ventilação recomendadas pela literatura.

Sempre que possível devem ser mantidas abertas todas as portas e esquadrias do ambiente, de forma a maximizar as áreas de abertura para a ventilação. Janelas basculantes e do tipo máximo-ar devem ser abertas em sua inclinação máxima. Recomenda-se fortemente a retirada de cortinas de qualquer tipo que possam obstruir a passagem do ar, bem como outros eventuais obstáculos, como telas de projetor e armários.

Figura 26 - Probabilidade de contágio para a sala 1012



A tipologia das esquadrias também exerce grande influência sobre os resultados. As salas de aula do CTU possuem janelas de grandes dimensões, porém possuem baixos ângulos de abertura. As janelas máximo-ar abrem somente entre 30° e 40°, enquanto as basculantes abrem todas somente cerca de 30°. Essa inclinação baixa reduz muito a área útil das aberturas. Uma medida relativamente simples para melhorar as condições de ventilação em novos edifícios é utilizar esquadrias com melhor aproveitamento, ou reformar as atuais para que possam operar em maiores ângulos de abertura.

A comparação dos resultados obtidos para a probabilidade de contágio considerando a ocupação original do ambiente e a proposta por este estudo indica que há redução significativa do risco de contaminação após ser adotada restrição. Mesmo empregando ventilação cruzada, salas de aula originalmente com capacidade para 61 ocupantes chegaram a ter ocupação reduzida para 12 pessoas. Também é importante ressaltar que os resultados de probabilidade de contágio obtidos não consideram a maior transmissibilidade registrada pela variante Ômicron.

Sendo assim, os resultados desta pesquisa evidenciam que a ventilação natural é um parâmetro ainda por ser estudado mais a fundo, tanto em termos de medições específicas, quantificando e sistematizando os dados, como em termos de normatização voltada para espaços escolares, que carece de maior evolução no Brasil. No decorrer do processo de desenvolvimento percebeu-se que essas variáveis são fundamentais para que os projetos de escola levem em consideração efetivamente a ventilação e todo o seu potencial em reduzir a transmissão de doenças transmitidas pelo ar.

Referências

- AGUILAR, A. J. *et al.* Monitoring and assessment of indoor environmental conditions after the implementation of COVID-19-based ventilation strategies in an educational building in southern Spain. *Sensors*, v. 21, n. 21, 2021.
- ALLEN, J. *et al.* **5-step guide to checking ventilation rates in classrooms**. Boston: Harvard T.H. Chan School of Public Health, 2020. 46 slides, color.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Standard 62.1**: ventilation for acceptable indoor air quality. Atlanta, 2013.
- AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. **Resolução RE/ANVISA nº 09 de 16 de janeiro de 2003**. Ministério da Saúde, 2003. Disponível em: <https://tinyurl.com/yxlngzxa>. Acesso em: 18 nov. 2020.
- BITTENCOURT, L.; CÂNDIDO, C. **Introdução à ventilação natural**. 2. ed. Maceió: EDUFAL, 2005.
- BITTENCOURT, L.; CÂNDIDO, C. **Ventilação natural em edificações**. Rio de Janeiro: Procel Edifica, 2010.
- BYAMBASUREN, O. *et al.* Estimating the extent of asymptomatic COVID-19 and its potential for community transmission: Systematic review and meta-analysis. *Journal of the Association of Medical Microbiology and Infectious Disease Canada*, v. 5, n. 4, p. 223–234, 2020.
- BUONANNO, G.; STABILE, L.; MORAWSKA, L. Estimation of airborne viral emission: quanta emission rate of SARS-CoV-2 for infection risk assessment. *Environment International*, v. 141, p. 105794, ago. 2020.
- CHAGAS, E. **DataSenado**: quase 20 milhões de alunos deixaram de ter aulas durante pandemia. quase 20 milhões de alunos deixaram de ter aulas durante pandemia. 2020. Disponível em: <https://bit.ly/3i8ECbE>. Acesso em: 01 jun. 2021.
- CHENARI, B.; DIAS CARRILHO, J.; GAMEIRO DA SILVA, M. Towards sustainable, energy-efficient and healthy ventilation strategies in buildings: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 59, p. 1426–1447, 2016.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 1946-2**: part 2: heating, ventilation and air conditioning. Berlin, 1994.
- ETHERIDGE, D. W.; SANDBERG, M. **Building ventilation**: theory and measurement. Chichester: John Wiley & Sons, 1996.
- EUROPEAN STANDART. **EN 13799**: Ventilation for non-residential buildings. Bruxelas, 2004.
- FROTA, A.; SCHIFFER, S. **Manual de conforto térmico**: arquitetura, urbanismo. 5. ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001.

- GOOGLE. **Google Maps**. Disponível em: <https://www.google.com.br/maps/@-23.3267842,-51.1978939,363m/data=!3m1!1e3>. Acesso em: 29 nov. 2021.
- GU, Y. **COVID-19 Projections**. 2020. Disponível em: <https://covid19-projections.com/brazil>. Acesso em: 11 dez. 2020.
- INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO RURAL DO PARANÁ. **Re: Fw: Solicitação de acesso a dados meteorológicos para estudo científico relacionado à COVID-19**. Destinatário: Pedro Henrique Bruder Decker. Londrina, 28 jan. 2021. 3 mensagens eletrônicas.
- INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO RURAL DO PARANÁ. **Normais climatológicas de Londrina no período de 1976 a 2019**. Londrina: IDR-Paraná, 2019.
- JIMENEZ, J. **COVID-19 aerosol transmission estimator**. 27 out. 2020. Disponível em: <https://tinyurl.com/covid-estimator>. Versão 3.4.19. Acesso em: 18 nov. 2020.
- JONES, B. M. *et al.* A review of ventilation opening area terminology. **Energy and Buildings**, v. 118, p. 249-258, abr. 2016.
- JONES, N. R. *et al.* Two metres or one: what is the evidence for physical distancing in COVID-19? **The BMJ**, v. 3223, n. 370, p. 1-6, ago. 2020.
- KALIMERI, K. K. *et al.* Indoor air quality investigation of the school environment and estimated health risks: Two-season measurements in primary schools in Kozani, Greece. **Atmospheric Pollution Research**, v. 7, n. 6, p. 1128-1142, jul. 2016.
- KOWALTOWSKI, D. **Arquitetura escolar: o projeto do ambiente de ensino**. São Paulo: Oficina de textos, 2011.
- LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. **Eficiência energética na arquitetura**. 3. ed. Rio de Janeiro: ELETROBRAS, 2013.
- LI, Y. *et al.* The temporal association of introducing and lifting non-pharmaceutical interventions with the time-varying reproduction number (R) of SARS-CoV-2: a modelling study across 131 countries. **The Lancet Infectious Diseases**, n. 2, p. 193-202, out. 2020.
- MILLER, S. L. *et al.* Transmission of SARS-CoV-2 by inhalation of respiratory aerosol in the Skagit Valley Chorale superspreading event. **Indoor Air**, v. 31, n. 2, p. 314-323, out. 2020.
- ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **Transmission of SARS-CoV-2 – implications for infection prevention precautions: scientific brief**. Jul. 2020b. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/modes-of-transmission-of-virus-causing-covid-19-implications-for-ipc-precaution-recommendations>. Acesso em: 15 out. 2020.
- ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **Timeline of WHO's response to COVID-19**. 2020a. Disponível em: <https://www.who.int/news/item/29-06-2020-covid-timeline>. Acesso em: 14 out. 2020.
- PARANÁ. **Resolução SESA Nº 632/2020**, que dispõe obre medidas complementares de controle sanitário a serem adotadas para o enfrentamento da COVID-19. Curitiba, 5 maio 2020.
- 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, may 2021.
- PERSILY, A. K. Field measurement of ventilation rates. **Indoor Air**, v. 26, n. 1, p. 97-111, 2016.
- SAKIYAMA, N. R. M. *et al.* Perspectives of naturally ventilated buildings: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 130, n. 109933, set. 2020.
- SAMÚDIO, M. J. *et al.* A Detailed indoor air study in a school of Porto. In: INTERNATIONAL CONFERENCE AND EXHIBITION ON HEALTHY BUILDINGS, 8., Lisboa, 2006. **Proceedings [...]**. Lisboa: International Society of Indoor Air Quality and Climate, 2006.
- SCHWEIZERISCHER INGENIEUR- UND ARCHITEKTENVEREIN. **SIA382/1: technical requirements for ventilation systems**. Zurich, 1992.
- TROEN, L.; PETERSEN, L. **European wind atlas**. Roskilde: Risø National Laboratory, 1989.
- UNESCO. **Situação da educação no Brasil (por região/estado)**. 2021. Disponível em: <https://pt.unesco.org/fieldoffice/brasil/covid-19-education-Brazil>. Acesso em: 13 dez. 2021.
- VIEGAS, J. C. *et al.* Numerical evaluation of ventilation performance in children day care centres. **Building Simulation**, v. 8, n. 2, p. 189-209, 2015.

ZHANG, R. *et al.* Identifying airborne transmission as the dominant route for the spread of COVID-19. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 117, n. 41, p. 25942–25943, 2020.

Pedro Henrique Bruder Decker

Departamento de Construção Civil | Universidade Estadual de Londrina | Rua Goiás, 1121, apartamento 5, Centro | Londrina - PR - Brasil
| CEP 86010-465 | Tel.: (43) 99610-9260 | E-mail: pedroh.b.decker2@uel.com.br

Camila Gregório Atem

Departamento de Construção Civil | Universidade Estadual de Londrina | Rodovia Celso Garcia Cid, PR-445, Km 380, Campus Universitário
| Londrina - PR - Brasil | CEP 86057-970 | Tel.: (43) 3371-4649 | E-mail: camila.atem@uel.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.