

CONTRIBUIÇÕES PARA A QUALIDADE DO AR INTERIOR EM SALAS DE AULA PÓS PANDEMIA DE COVID-19

CONTRIBUTIONS TO INDOOR AIR QUALITY IN CLASSROOMS POST-COVID-19 PANDEMIC

 Saulo Vieira de Oliveira Silva ¹

 Érica Coelho Pagel ²

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil. saulovieira@ifes.edu.br

² Universidade de Vila Velha, Vila Velha, ES, Brasil, erica.pagel@uvv.br

Resumo

No final de 2019 surgiu uma nova doença provocada pelo SARS-CoV-2 e, em seguida, foi declarada pandemia pela Organização Mundial de Saúde. Tal fato, implicou em inúmeras restrições, dentre elas, o fechamento de escolas em diversos países. Com o retorno gradual das atividades de ensino, os estabelecimentos se viram obrigados a adotarem protocolos de prevenção. O objetivo deste trabalho foi levantar, na literatura científica, as formas de contaminação de pessoa para pessoa em ambientes interiores, com foco em salas de aula, bem como identificar as diferentes estratégias propostas para redução do risco de infecção dos usuários, sobretudo no que se refere à ventilação e ações para a mitigação da transmissão do vírus em escolas. A metodologia adotada foi a Revisão Sistemática da Literatura (RSL), que partiu de uma seleção de artigos junto aos portais PubMed e Portal de Periódicos da CAPES, resultando na análise de 52 documentos. Como resultados, identificou-se que as partículas aéreas emitidas por indivíduos infectados possuem grande variação de tamanho e alcance, o que diversifica a possibilidade de contágio. Os trabalhos indicaram a necessidade do incremento da ventilação natural por meio da abertura constante de janelas e portas; do aumento das taxas de renovação do ar interno, sem recirculação; do uso de filtros de alta eficiência para eliminação das partículas contaminadas e da necessidade de preocupações que visem ambientes escolares saudáveis, tanto durante situações pandêmicas quanto não pandêmicas. A pandemia reforçou a importância da temática da qualidade do ar de interiores nos estudos de arquitetura e construção.

Palavras-chave: covid-19, escolas, qualidade do ar interior, sistemas de ventilação.

Abstract

At the end of 2019, a new disease caused by SARS-CoV-2 emerged, and the World Health Organization later announced the outbreak as a pandemic. So, the COVID-19 pandemic has resulted in social restrictions, with school closures taken by governments worldwide. During the gradual return of teaching activities, schools adopted prevention protocols. Thus, this study aimed to carry out a systematic literature review, in the scientific literature, on articles that deal with infectious disease transmission, focusing on classrooms and how different intervention strategies influence infection risk, including ventilation solutions to mitigate contamination in schools. The methodology adopted was the Systematic Literature Review. A selection of articles was performed on PubMed and CAPES Journal Portal databases, resulting in the inclusion and analysis of 52 papers. As a result, we observed that the particles have a wide variation in size and range, which diversifies how contagion occurs. The analyzed works point out the increase of natural ventilation through the continuous opening of windows and doors, the increase of ventilation rates without recirculation and the use of high-efficiency particulate air filters to eliminate contaminated particles and the need for concerns aimed at healthy school environments, both during the pandemic and non-pandemic situations. Indoor Air Quality gained relevance due to the COVID-19 pandemic, highlighting the need for adequate strategies for Architecture and the built environment.

Keywords: covid-19, schools, indoor air quality, ventilation systems.

Contribuição dos autores:

SVOS: conceituação, curadoria dos dados, análise formal, investigação, metodologia, administração de projeto, visualização, escrita - rascunho original, escrita - revisão e edição. **ECP:** conceituação, curadoria dos dados, análise formal, metodologia, administração de projeto, supervisão, validação, visualização, escrita - revisão e edição.

Fomento: Não houve fomento

Declaração de conflito: nada foi declarado.

Editora Responsável:

Michele Marta Rossi 

How to cite this article:

SILVA, Saulo V. de O.; PAGEL, Érica C. Contribuições para a qualidade do ar interior em salas de aula pós pandemia de COVID-19. **PARC Pesq. em Arquit. e Constr.**, Campinas, SP, v. 14, p. e023006, 2023. DOI: <https://doi.org/10.20396/parc.v14i00.8670256>

Submitted 24.06.2022 – Approved 05.01.2023 – Published 03.02.2023

e023006-1 | **PARC Pesq. em Arquit. e Constr.**, Campinas, SP, v. 14, p. e023006, 2023, ISSN 1980-6809



Introdução

A Qualidade do Ar de Interiores (QAI) nos espaços escolares já vem sendo estudada há décadas devido aos seus impactos a saúde humana. A presença de contaminantes aéreos no ambiente de ensino está associada a sintomas psicofisiológicos em professores (MUSCATIELLO *et al.*, 2014), queda do desempenho e aprendizado (SATISH *et al.*, 2012; GABRIEL *et al.*, 2021), redução do poder de atenção e concentração (BOGDANOVICA; ZEMITIS; BOGDANOVICS, 2020; COLEY; GREEVES; SAXBY, 2007) e aumento do absenteísmo estudantil (SHENDELL *et al.*, 2004). Estratégias como mitigação de fontes de poluentes e adoção de sistemas de ventilação que garantam as trocas de ar recomendadas, vem se mostrando eficientes na melhoria da qualidade do ar dentro das edificações. Entretanto, atualmente, essa questão apresenta cada vez mais desafios. Desde dezembro de 2019, a humanidade enfrenta a pandemia de COVID-19 (WHO, 2021). Padrões de uso e ocupação no ambiente escolar e novas recomendações em relação aos sistemas de ventilação nas salas de aula foram colocados em pauta (AAP, 2021).

No final de 2019, na província de Wuhan, na China, houve a transmissão de uma nova doença, a Doença do Coronavírus 2019, conhecida como COVID-19 (WHO, 2021), cujos sintomas mais comuns são: febre, tosse, fadiga e falta de ar; com a possibilidade de outros menos frequentes, entre eles: dor, náusea e vômito. Essa doença é causada pelo vírus SARS-CoV-2 (Síndrome Respiratória Aguda Grave Coronavírus 2), e se espalhou por diversos países. A transmissão se dá de pessoa para pessoa, seja pelo contato direto com secreções ou gotículas expelidas; pelo toque nos olhos, boca ou nariz após o contato com superfícies contaminadas ou, ainda, por meio de partículas contaminadas em suspensão (AAP, 2021; CDC, 2021). A Organização Mundial de Saúde (OMS) somente declarou pandemia em 12 de março de 2020 (CIOTTI *et al.*, 2020), apesar de haver comunicado a emergência de saúde pública de importância internacional em 30 de janeiro de 2020 (OPAS, 2020).

Mesmo com uma taxa de letalidade de 2,2% para o SARS-CoV-2, contra 9,6% do SARS-CoV e 34,4% para MERS-CoV (VELAVAN; MEYER, 2020), o número de óbitos em decorrência da COVID-19 em todo o mundo, de dezembro de 2019 até 24 de novembro de 2022, chegou a 6.604.704 pessoas. Somente no Brasil, são 689.155 mortes neste mesmo período (WHO, 2022).

Num esforço para conter a propagação da doença, em várias nações, houve isolamento social, fechamento de fronteiras, de locais públicos e de trabalho (SCHUCHMANN *et al.*, 2020) e, sobretudo, de escolas. Salas de aula foram consideradas ambientes propícios à disseminação do vírus devido a possibilidade de não utilização de suas aberturas para ventilação, de ineficiência dos sistemas de renovação de ar, de alta densidade populacional e de permanência prolongada de professores e alunos (LOVEC; PREMROV; LESKOBAR, 2021; KAPOOR *et al.*, 2021).

No Brasil, em março de 2020, instituições de ensino suspenderam as aulas e, posteriormente, deram continuidade por meio do ensino remoto até, pelo menos, maio de 2021. No mundo, considerando o ensino básico, o Brasil foi um dos países que parou por mais tempo (INEP, 2021). A partir desta data, gradativamente, os estados retornaram com ensino híbrido e, em seguida, presencial (UNESCO, 2021; BUENO; SOUTO; MATTA, 2021).

Sendo assim, protocolos de retorno às aulas foram adotados em todo o país, dentre eles, a assepsia das mãos, o uso de máscaras, o distanciamento social e a adoção da ventilação natural nas salas de aula, por meio de portas e janelas abertas (INEP, 2022).

Apesar da qualidade do ar ser um assunto estudado há décadas, foi diante da pandemia de COVID-19 que protocolos e medidas preventivas, principalmente relativas à eficiência dos sistemas de ventilação nos ambientes, foram priorizados. Entretanto, dada a recente preocupação pelo assunto, as investigações se concentram isoladamente em entender a doença, suas formas de contágio e a efetividade dos métodos aplicados em relação as legislações já existentes. Desta forma, há uma lacuna de trabalhos que visam debater e agrupar, em um só documento, essas principais ações e métodos indicados pela literatura, de forma a viabilizar um conjunto de soluções eficazes capazes de manter a salubridade do ar interno em salas de aula.

Sendo assim, de forma a reforçar o fato de que a melhoria dos sistemas de ventilação nas escolas traz benefícios à prevenção da disseminação de doenças transmitidas pelo ar, e com o intuito de colaborar com os avanços das pesquisas em entender melhor as estratégias visando um ambiente escolar saudável diante da COVID-19, o objetivo deste trabalho foi identificar quais medidas são pertinentes à manutenção da qualidade do ar em salas de aula, passíveis de serem aplicadas em situações pandêmicas e não pandêmicas. A metodologia adotada foi a revisão sistemática da literatura em publicações que tratam da qualidade do ar e sua relação com a transmissão aérea do SARS-CoV-2 em salas de aula.

O presente artigo pretende, ainda, servir de base na discussão e auxílio a projetistas e gestores escolares nas tomadas de decisões eficientes em relação à melhoria da qualidade do ar em edificações escolares e, conseqüentemente, na diminuição da contaminação por via aérea.

Fundamentação

Dados do INEP (2019) informam que as médias de horas-aula diárias, no Brasil, são de 6,1 horas na Educação Infantil, de 4,6 horas no Ensino Fundamental e 5,2 horas no Ensino Médio o que enfatiza a necessidade de estudos que garantam um ambiente de ensino saudável. O risco de infecção por COVID-19 pode ser influenciado por diferentes fatores, sendo que, em uma sala de aula, devido às suas características de permanência e ocupação, este risco é diretamente proporcional à duração da exposição no ambiente, à taxa de ventilação e à densidade ocupacional interna (XU *et al.*, 2021a).

A prática de deixar as janelas e portas abertas no retorno as aulas é uma ação que não só colabora com a melhoria da qualidade do ar, mas também com os princípios de uma arquitetura bioclimática adaptada aos trópicos e diminuição dos gastos energéticos. Todavia, sabe-se que, em muitas edificações escolares, o uso eficiente da ventilação natural pode ser comprometido tanto no que diz respeito às áreas de aberturas adotadas quanto ao comportamento dos ocupantes na utilização das esquadrias (SILVA *et al.*, 2022).

Adicionalmente, os equipamentos de ventilação mecânicos (aquecimento, ventilação e ar-condicionado – AVAC), quando meramente fazem o ar recircular pelo edifício com objetivo de manter o condicionamento térmico adequado, dado o objetivo de buscar maior eficiência energética (MITCHELL; BRAUN, 2018), podem reduzir a eficiência da renovação de ar, o que é crítico em termos de contaminação aérea.

Como as atividades escolares possuem duração de horas, o uso de espaços mal ventilados se torna uma importante preocupação em relação à transmissão indireta do vírus (BIRMILI *et al.*, 2021; DI GILIO *et al.*, 2021; CHEN, 2021b). Nesse sentido, pesquisas têm se apoiado no monitoramento do dióxido de carbono – CO₂, em ambientes internos, como uma das formas de sinalização de um baixo índice de renovação de ar e, potencialmente, o alcance de altos níveis de outros poluentes. A tabela apresenta os

requisitos para concentrações de CO₂ em salas de aula, em diferentes países (MEISS et al., 2021b).

Tabela 1 – Limites para concentração de CO₂ em salas de aula

| Local | Norma | Concentração de CO ₂ (ppm) |
|----------------|---|---------------------------------------|
| Europa | EN 16798-1:2019 (CEN, 2019) | 950 |
| Portugal | RECS (2013) (PORTUGAL, 2013) | 1250 |
| Reino Unido | Building Bulletin 101 (2018) (UK, 2018) | 1500 |
| Estados Unidos | ASHRAE 62.1 : 2019 (ANSI-ASHRAE, 2019) | 1100 |
| China | GB/T17226-2017 (GAQS, 2017) | 1000 |
| Brasil | ANVISA RE 09 : 2003 (ANVISA, 2003) | 1000 |

Fonte: os autores.

A concentração de CO₂ tradicionalmente é considerada por muitos autores um indicador da qualidade do ar interior (ALMEIDA et al., 2017; SATISH et al., 2012). Após a pandemia de COVID-19, tem ganhado adeptos como indicadora, também, da geração e do espalhamento do ar respirado e, potencialmente, da concentração de partículas contaminadas com vírus quando há um ou mais usuários infectados (DUIILL et al., 2021).

Por isso, enfatiza-se que pesquisas recentes encontraram altas concentrações de CO₂ em salas de aula devido a, entre outros fatores principais, má utilização das esquadrias nos períodos de ocupação (MAINKA; ZAJUSK-ZUBEK, 2015; LAZOVIC et al., 2016; SCHIBUOLA; SCARPA; TAMBANI, 2016; ALMEIDA et al., 2017; STABILE et al., 2017; VICELKOVÁ et al., 2017; JAN et al., 2017; BRDARIĆ et al., 2019; MA; ZHAN; XU, 2021; BECERRA et al., 2020).

Pelo exposto, delineou-se como escopo a pesquisa por trabalhos recentes que avaliaram as condições de espalhamento do vírus no ambiente construído, as medidas gerais de proteção recomendadas e adotadas em estabelecimentos de ensino, bem como os métodos para melhoria da eficiência da ventilação e as novas taxas de renovação do ar sugeridas.

Método

A metodologia adotada foi a Revisão Sistemática da Literatura (RSL), que utiliza protocolos para identificação, seleção e avaliação crítica de trabalhos relevantes ao objeto de estudo (SOUSA; RIBEIRO, 2009; GALVÃO; RICARTE, 2019). Uma RSL apresenta de forma clara as bases de dados consultadas, as estratégias empregadas em cada base, como também o processo de pré-seleção dos trabalhos para posterior inclusão ou exclusão dos artigos e, por fim, o processo de análise de cada publicação.

Planejamento e definição do protocolo da pesquisa

Para realizar uma contextualização a respeito da COVID-19 aliada à utilização de ambientes escolares, identificou-se algumas publicações para uma análise preliminar, tais como: documentos publicados por organizações da área de saúde de relevância internacional (AAP, 2021; CDC, 2021), artigos que apresentam características do vírus causador da pandemia, de sua disseminação e do mapeamento histórico da evolução da emergência de saúde (CIOTTI et al., 2020; FOUCHER; FAURE, 2021). Além disso, identificou-se trabalhos que abordam a relevância da relação entre a pandemia de COVID-19 e os ambientes escolares (SCOTFORD, 2020) e que apresentam aspectos fundamentais a respeito do espalhamento de partículas contaminantes em ambientes interiores (BHAGAT et al., 2020). Em seguida, esses documentos foram usados como referências iniciais e serviram de base para definição de palavras-chave, objetivos e perguntas de pesquisa para orientação da RSL. O protocolo de pesquisa resumido é apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 – Protocolo de pesquisa

| Item | Conteúdo |
|-----------------------|---|
| Objetivos | Revisão e análise de publicações científicas com intuito de levantar o estado da arte a respeito da transmissão aérea do vírus SARS-CoV-2, das medidas de prevenção gerais e as relativas à ventilação em salas de aula. Reunir trabalhos que apresentem os principais resultados dos estudos no que diz respeito a soluções que visam a salubridade do ar interno em salas de aula. |
| Palavras-chave | "covid-19" AND school AND CO2 (Plataforma CAPES) ((covid-19) AND (school)) AND (CO2) (Plataforma PubMed) (("SARS-CoV-2") AND (school)) AND (ventilation) NOT patient NOT hospital (PubMed) |
| Bases de dados | CAPES, Pubmed |
| Crítérios de inclusão | Data: 2020 a 2021; Local: escolas ou ambientes de teste (padrão); Tipo de ventilação: natural ou mecânica; Método de coleta de dados: monitoramento em escolas no período de retorno às aulas pós-Covid; simulações e/ou modelagens numérico/computacionais; revisões de literatura. |
| Crítérios de exclusão | Conforme figura 2. |
| Questões de pesquisa | - Quais as características de constituição e dispersão das partículas contaminadas com o vírus SARS-CoV-2 em ambientes internos? - Que medidas de ventilação podem contribuir com a redução do risco de contaminação em escolas? - Que medidas adicionais podem ser adotadas no retorno às aulas no contexto pós-pandemia? |

Fonte: os autores.

Execução da pesquisa

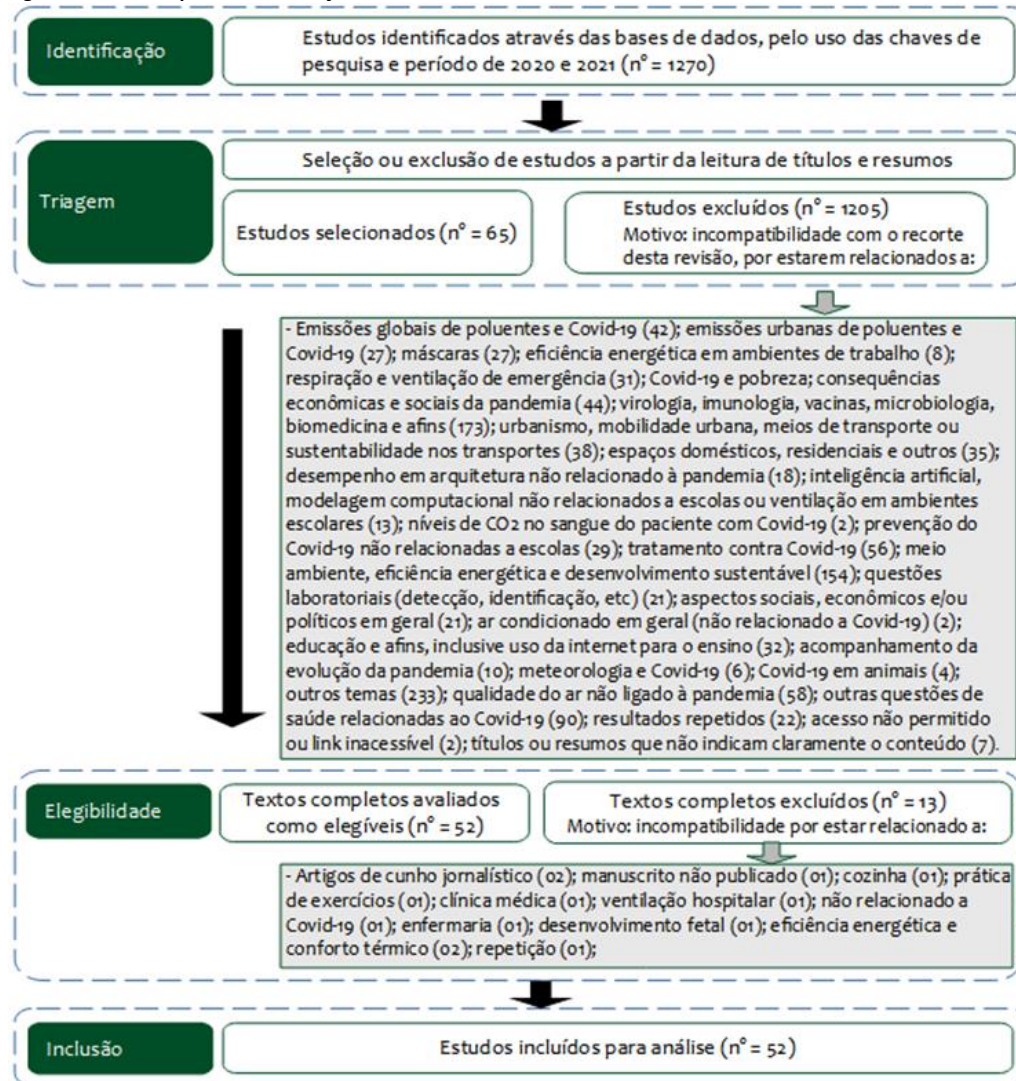
Após a definição do protocolo, deu-se uma busca abrangente por trabalhos publicados em periódicos internacionais, com foco em pesquisas que realizaram monitoramento de campo, simulação e modelagem em ambientes escolares ou em ambientes de teste, bem como revisões de literatura com abordagem alinhada aos objetivos desta pesquisa. As bases de dados pesquisadas foram o Portal de Periódicos da CAPES, com uso de acesso remoto ao conteúdo assinado por meio da Comunidade Acadêmica Federada (CAFe) e PubMed. O Portal de Periódicos da CAPES (2022) possui um dos maiores acervos científicos virtuais do Brasil e permite acesso a publicações nacionais e internacionais, sendo mais de 49 mil periódicos com texto completo. A plataforma PubMed contém uma base de dados com mais de 34 milhões de resumos e citações, muitos dos quais incluem os links para acesso a publicações completas nos campos da biomedicina e saúde presentes na base PubMed Central - PMC (2022), portanto, com grande relevância para essa RSL, cuja temática diz respeito à pandemia de COVID-19.

Recorreu-se à combinação de termos em inglês relacionados ao objetivo do trabalho: COVID-19, *school*, *ventilation*, CO₂. Todos os resultados tiveram títulos e resumos avaliados. Incluíram-se publicações que relacionam a qualidade do ar e alguns de seus aspectos - ventilação, renovação de ar, dióxido de carbono; com o risco de contaminação com o vírus SARS-CoV-2. Incluíram-se também trabalhos que abordam as características das partículas contaminantes expelidas e suas propriedades de espalhamento, deposição e permanência no ar interno em um ambiente interno. Além disso, escolheu-se artigos que discutem métodos para tornar os espaços das edificações mais seguros, com foco em ambientes escolares.

Excluíram-se trabalhos não alinhados com os objetivos deste trabalho, por se tratar de: ambientes com características diferentes dos escolares, qualidade do ar no ambiente urbano, poluição do ar em nível global, consequências econômicas, políticas e sociais da pandemia, pesquisas da área de virologia, imunologia, biomedicina, eficiência energética, vacinas, COVID-19 em animais, meio ambiente, entre outros temas.

A identificação inicial, a partir das palavras-chave, resultou em 991 trabalhos na base CAPES. Na base PubMed, foram duas pesquisas, que exibiram 102 e 177 resultados. No total, foram encontrados 1270 documentos. Após a leitura de títulos e resumos, foram removidos 1205 artigos. Em seguida, fez-se a análise dos textos completos, que resultou na exclusão de treze e na seleção final de 52 documentos (Figura 1).

Figura 1 – Fluxo do processo de seleção de documentos



Fonte: os autores, com base em Taype e Dezen-Kempter (2020).

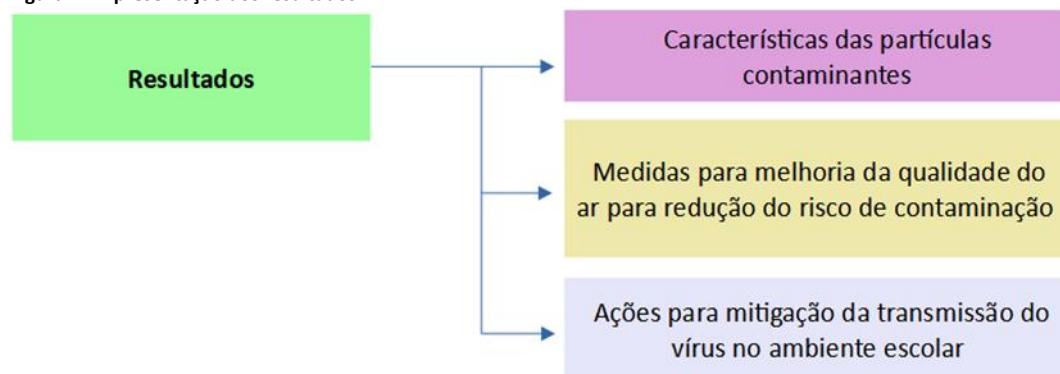
Sumarização dos dados e organização dos resultados

O processo de análise se deu por meio do estudo integral dos artigos em conjunto com a coleta de dados referentes à autoria, método utilizado e resultados. Para todos os artigos, registrou-se ainda: data, país (quando informado), informações relevantes sobre a pandemia, o vírus e sua propagação presentes na fundamentação. Assinalou-se os dados referentes à eficiência das soluções adotadas para enfrentamento da pandemia de COVID-19. Coletou-se resultados que contribuem para o objetivo dessa RSL, para que possibilite a reunião das soluções voltadas para a salubridade do ar em salas de aula. Por isso, em alguns estudos, de acordo com suas metodologias e disponibilidade da informação, registrou-se o número de ambientes, as concentrações de dióxido de carbono, as taxas de ventilação e o número de trocas de ar praticados ou sugeridos, além de recomendações adicionais para redução do risco de contaminação com o vírus SARS-CoV-2 em ambientes escolares.

Resultados e discussão

A Figura 2, a seguir, indica a divisão da apresentação dos resultados em três seções.

Figura 2 – Apresentação dos resultados



Fonte: os autores.

Características das partículas contaminantes

O vírus SARS-CoV-2 é eliminado no ambiente, por pessoas infectadas, na forma de gotículas ou de partículas aerossol (BIRMILI *et al.*, 2021; XU *et al.*, 2021a). Existe diferença, de uma pessoa para outra, na quantidade de vírus eliminado, o que torna alguns indivíduos altamente infecciosos. Cerca de 10 a 20% causam 80% das infecções, enquanto 60 a 75%, aproximadamente, não infectam outros. Os indivíduos altamente infecciosos podem expelir de dezenas a milhares de partículas contaminantes por minuto (CHEN *et al.*, 2021a).

Segundo Dai e Zhao (2020), apesar da principal via de transmissão do SARS-CoV-2 ser pela proximidade com pessoas infectadas e pelo contato com superfícies, em ambientes internos, a contaminação por aerossóis não pode ser ignorada. Conforme Godwin *et al.* (2021), experimentos tanto na área de mecânica dos fluidos quanto de microbiologia forneceram evidências de que a transmissão do vírus por meio de aerossóis é possível. Além disso, resultados da pesquisa de Comber *et al.* (2020) informam que foram detectados RNA do SARS-CoV-2 em amostras de aerossol.

As informações a respeito dos tipos de partículas produzidas durante as atividades orais são importantes para avaliar a situação no ambiente escolar, onde professores e alunos desempenham uma variedade grande de atividades (BIRMILI *et al.*, 2021). O vírus SARS-CoV-2 pode ser transmitido por gotículas, que são partículas maiores, da ordem de 100 μm , e que se depositam sobre as superfícies a uma distância de até aproximadamente 1,80 m.

Meiss *et al.* (2021a) detalham que, na origem da emissão, as partículas podem variar de 0,1 μm a mais de 300 μm . A respiração elimina as menores, cuja maior parte varia de aproximadamente 0,5 μm a 10 μm . Já na fala, tosse e espirro, a maior quantidade de bioaerossóis possuem em torno de 10 μm . Porém, as gotículas e aerossóis produzidos podem possuir uma ampla gama de dimensões, desde menos de 1 μm até mais de 300 μm , podendo chegar à ordem de 1000 μm . Esse conjunto de informações é reiterado pelos trabalhos de Tang *et al.* (2021) e Jarvis (2020).

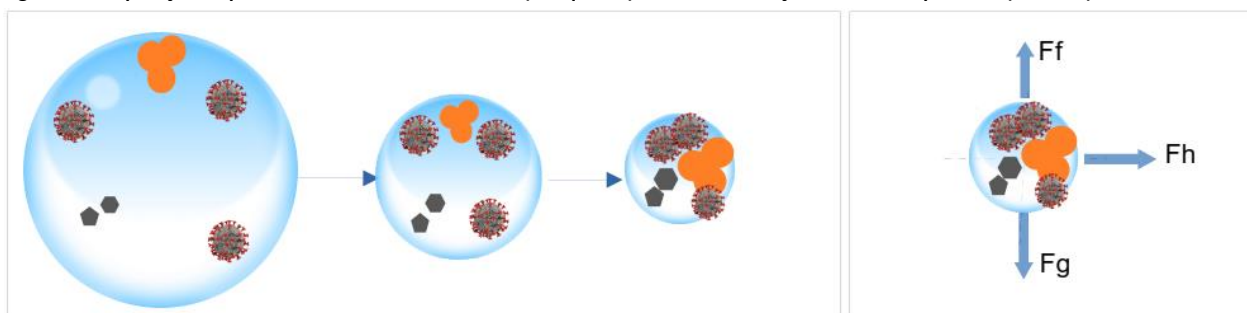
Quanto à composição das partículas, os vírus expelidos estão agregados a corpos que contêm outras substâncias, como água, sais, proteínas, entre outras secreções de origem respiratória (TANG *et al.*, 2021). Gotículas e aerossóis têm potencial, ainda, de se ligar a outras partículas presentes no ar, de forma que estes poluentes também podem ser portadores do vírus causador da COVID-19 (SHAMSI *et al.*, 2022).

Quando, ao falar, tossir ou respirar, as pessoas eliminam aerossóis menores que 5 μm , estes podem permanecer em suspensão no ar de 30 minutos por várias horas (ALLEN; IBRAHIM, 2021; CHEN, 2021b). Por esta razão, mesmo que a pessoa infectada não esteja

mais na sala de aula, permanece o risco de infecção pelo longo tempo em suspensão no ambiente em caso de renovação de ar insuficiente (BIRMILI *et al.*, 2021). O tamanho das partículas possui, portanto, grande influência em sua dispersão e permanência no ambiente interno (XU *et al.*, 2021a).

De acordo com os trabalhos mencionados, a emissão, por si só, ocorre em dimensões variadas. Além disso, após a eliminação das gotículas e aerossóis, se dá um processo de evaporação, que ocasiona a redução gradativa das partículas (Figura 3). Esse processo é influenciado pela temperatura e pela umidade do ambiente interno (MORAWSKA; CAO, 2020; TANG *et al.*, 2021; MEISS *et al.*, 2021a). Gotículas com cerca de 100 μm , demoram cerca de 1 minuto para evaporarem, enquanto os aerossóis, por serem menores, segundos ou até menos (JARVIS, 2020). Na literatura médica, a partícula que se evapora, sofre redução de diâmetro e permanece em suspensão é denominada núcleo de gotícula (JARVIS, 2020; DELIKHOON *et al.*, 2021).

Figura 3 – Evaporação de partícula contaminada com vírus (a esquerda) e sistema de forças atuantes na partícula (a direita)



Notas: Fh: força de arraste (horizontal); Ff: força de flutuação; Fg: força da gravidade. Fonte: os autores.

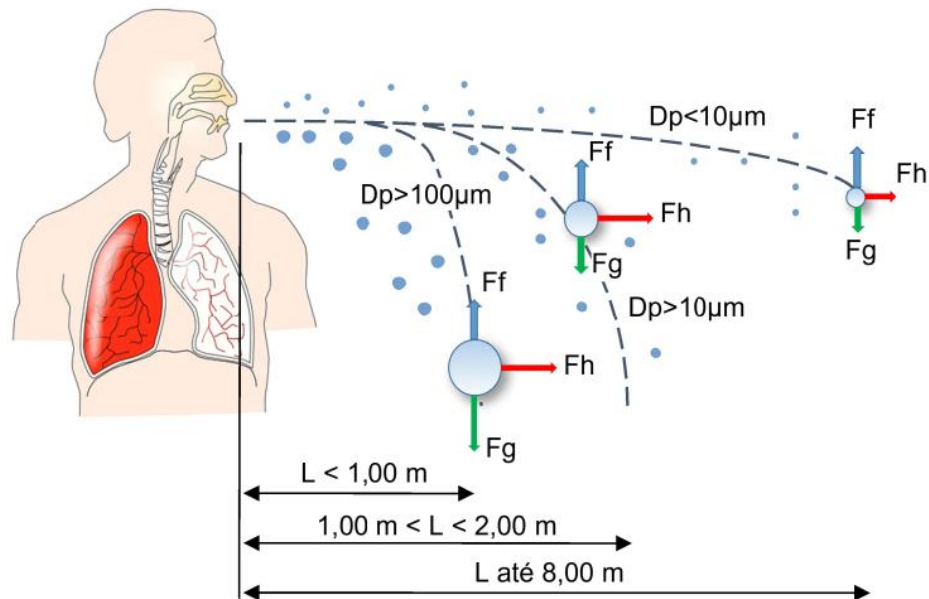
As partículas menores sofrem a ação de um sistema de forças: a gravidade, a de arraste (horizontal) e a de flutuação (para cima), que prevalece nas de menor tamanho, o que contribui para que continuem em suspensão (MEISS *et al.*, 2021a), conforme a turbulência, velocidade e direção do ar no ambiente interno (TANG *et al.*, 2021).

Godwin *et al.* (2021) pontuam que as atividades desempenhadas pelas pessoas e reações fisiológicas são capazes de emitir, gradativamente, mais gotículas no ar, segundo a ordem crescente a seguir: 1) respirar; 2) respirar intensamente; 3) falar; 4) cantar; 5) tossir e 6) espirrar, sendo que a diferença de emissão entre esses tipos de atividade é bastante significativa. A distância percorrida pelas partículas pode variar de 1,00 m (fala), 2,00 m (tosse) a 8,00 m (espirro). Por isso, os autores recomendam a manutenção da distância mínima de 2,00 m para o distanciamento social.

Devido tanto à emissão em variados tamanhos quanto ao processo de evaporação, tem-se desde gotículas com maior diâmetro aerodinâmico, que se depositam mais próximo da origem, até aerossóis com dimensão submicrônica, que permanecem em suspensão por mais tempo e que alcançam distâncias de até oito metros (Figura 4).

Há ainda na literatura uma divergência de informações quanto às dimensões e ao alcance das partículas. Delikhoon *et al.* (2021) concluem que os aerossóis em suspensão, que atingem metros de distância, são aqueles menores que 5 micrômetros, e não 10. Já as informações divulgadas por Tang *et al.*, (2021) se referem a partículas de 5 a 10 μm como capazes de se depositarem a grandes distâncias. E, ainda, os resultados de Azuma *et al.* (2020) apresentam uma variação de 1,6 μm a mais de 120 μm . A este respeito, Xu *et al.* (2021a) explicam que a existência de uma grande variação de grandeza das partículas é devida tanto aos diferentes mecanismos de formação fisiológica quanto às diversas técnicas utilizadas para sua medição.

Figura 4 – Emissão e dispersão de partículas e sistema de forças atuantes



Fonte: os autores, com base em Morawska e Cao (2020); Meiss *et al.* (2021) e Delikhoon *et al.* (2021).

Deng *et al.* (2021) concluíram que as condições de estabilidade da temperatura interna também influenciam a distribuição dos aerossóis contaminados no ambiente. A condição estável foi considerada a mais desfavorável por tornar a atmosfera ambiente estratificada. Nesta condição, pode haver confinamento dos contaminantes a uma certa altura, criando uma zona de alto risco de contaminação caracterizada pelo acúmulo de aerossóis carregados com SARS-CoV-2.

García de Abajo *et al.* (2020) exemplificaram que medidas para redução do risco de contaminação pelo vírus SARS-CoV-2 podem ser aplicadas conforme três linhas básicas de ação: a primeira, pela adoção de protocolos e medidas gerais mitigadoras adotadas pelas pessoas, o que depende da ação social e política; a segunda, pela alteração da estrutura física dos espaços ocupados, o que requer planejamento e prazo; e a terceira, pela inativação do vírus. Nesse contexto, as partículas contaminadas podem ser removidas da atmosfera do ambiente tanto pela eliminação do ar contaminado por meio da exaustão, quanto pela inativação viral (chamada decaência viral) e pela sedimentação gravitacional (PAVILONIS *et al.*, 2021). As estratégias adotadas para redução do risco de contaminação são abordadas a seguir.

Medidas para melhoria da qualidade do ar em salas de aula visando a redução do risco de contaminação

Em locais públicos, onde é possível a ocupação com maior densidade, o risco de infecção é maior devido à possível emissão e acúmulo de gotículas e de partículas aerossóis contaminadas no ar interno, como é o caso de ambientes escolares (MORAWSKA; CAO, 2020).

De fato, já é possível conhecer resultados das estratégias de prevenção da COVID-19 em ambientes educacionais. No contexto de retorno às aulas em meio à pandemia, uma pesquisa robusta feita em 169 escolas localizadas na Geórgia, Estados Unidos, por Gettings *et al.* (2021), constatou que apenas 65,1% dos estabelecimentos exigiram a utilização de máscaras faciais pelos professores e funcionários, enquanto somente 51,5% solicitaram o uso entre os estudantes. No que diz respeito à ventilação, este trabalho concluiu que a incidência de COVID-19 foi 48% menor em escolas que adotaram métodos

de filtração e diluição do ar de maneira simultânea, contra apenas 35% menor nas que empregaram apenas métodos de diluição.

Lam-Hine *et al.* (2021) relataram um caso de contaminação com SARS-CoV-2 em escola localizada na Califórnia, Estados Unidos. Segundo seu trabalho, a causa foi o não uso de máscara por um professor que recebeu teste positivo para Covid e transmitiu a doença para 12 indivíduos ao frequentarem o mesmo ambiente. Por meio de testes e sequenciamento genético, descobriu-se que se tratou da variante B.1.617.2 (Delta). Por isso, além do uso de máscaras, os autores reforçam que o risco de transmissão da doença deve ser mitigado com a implementação de múltiplas estratégias de prevenção.

O levantamento feito por Dawson *et al.* (2021), a respeito do retorno às aulas em 55 escolas no Missouri, Estados Unidos, expõe a adoção mais rigorosa das medidas de enfrentamento à pandemia, como o uso obrigatório de máscaras e de medidas de distanciamento em 100% das unidades, além da utilização de pias para lavagem de mãos, de barreiras entre professores e alunos e de modificações para aumento da ventilação em 98% delas.

A adoção de múltiplas abordagens pelas escolas de Nova Jersey, Estados Unidos, foi pesquisada por Volpp *et al.* (2021). Neste local, solicitou-se a realização de quarentena de duas semanas antes da volta às aulas, além da apresentação de teste RT-PCR negativo realizado entre sete e dez dias previamente ao retorno. Exigiu-se o distanciamento de 6 pés (aproximadamente 1,80 m) e limitou-se o número de alunos no local por meio do revezamento com aulas virtuais. Adotou-se, ainda, o rastreamento de contato por meio de dispositivos com tecnologia *Bluetooth*. As medidas incluíram também a filtragem do ar, campanhas informativas e suspensão de atividades de grande público, bem como a realização de atividades de refeição e esportivas ao ar livre. Testes de SARS-CoV-2 foram executados duas vezes por semana. Apenas 4% dos professores e 1% dos estudantes apresentaram testes positivos, sendo que todos foram assintomáticos. Os autores concluíram que tais medidas foram eficazes na prevenção da doença.

A partir do conhecimento dos caminhos para o contato com partículas contaminadas, quer seja através do contato direto com emissões de partículas por pessoas infectadas, com fômites ou com aerossóis, os protocolos buscaram adotar soluções que anulassem as vias de contaminação: uso de máscaras e distanciamento entre pessoas, desinfecção de superfícies e higiene das mãos, além de melhorias nos sistemas de ventilação, respectivamente, estão entre as medidas principais. Destaca-se a escassa atenção dada a soluções que fossem capazes de tornar o ar interior das salas de aula adequado permanentemente ao longo tempo.

Diversos autores defendem a adoção de múltiplas estratégias para redução de risco de contaminação dos usuários com o vírus SARS-CoV-2. Enfatiza-se a indicação de melhoria da ventilação e da renovação de ar, em ambientes internos, como medida complementar, ou seja, como parte de um conjunto de ações de enfrentamento da pandemia de COVID-19 (ASANATI; VODEN; MAJEED, 2021; VASSELA *et al.*, 2021; XU *et al.*, 2021b; GETTINGS *et al.*, 2021; DAI; ZHAO, 2020; ALLEN; IBRAHIM, 2021; GODWIN *et al.*, 2021; VOLPP *et al.*, 2021; KAPOOR *et al.*, 2021; MEISS *et al.*, 2021a; ZIVELONGHI; LAI, 2021; DAWSON *et al.*, 2021; LAM-HINE *et al.*, 2021; CHEN, 2021b, HONEIN *et al.*, 2020; entre outros).

Um exemplo da necessidade de incluir medidas de melhoria da ventilação é relatado na pesquisa de Chillon *et al.* (2021), no País Basco, a partir da caracterização da qualidade do ar interno numa sala de aula de 91,80 m² durante a aplicação de protocolo de distanciamento. Seus resultados apontam que, numa situação com todas as aberturas

fechadas, mesmo com distanciamento mínimo de 1,50 m e limitação da ocupação máxima em 15 pessoas (6,12 m²/pessoa), foi observado um rápido aumento linear das concentrações de CO₂, chegando a 1104 ppm em apenas 15 minutos. Segundo Xu *et al.* (2021a), é necessário que haja uma otimização significativa dos sistemas de ventilação tradicionais no contexto da pandemia de COVID-19.

Asanati, Voden e Majeed (2021) argumentam que a ênfase dada à melhoria da qualidade do ar deve ser a mesma despendida ao uso de máscaras e ao distanciamento pessoal. Conforme Godwin *et al.* (2021), a ventilação pode desempenhar o papel de redução da transmissão da doença em virtude da diluição e dispersão, pelo ar, das partículas contaminadas. Há risco elevado de transmissão da COVID-19 em ambientes fechados, mal ventilados, onde ocorra contato próximo e prolongado. O aumento da taxa de ventilação e da renovação do ar interno com ar externo tem o objetivo de diluir o ar contaminado no interior dos ambientes (XU *et al.*, 2021a).

Pesquisas utilizaram modelos para previsão e avaliação de riscos durante a pandemia de Covid. Segundo Rocha-Melgno *et al.* (2021), com base no modelo de Wells-Riley, o risco de transmissão de longo alcance via aerossol contaminado aumentou entre 424 e 488% quando considerados, simultaneamente, uma sala mal ventilada e usuários sem máscara. De acordo com seus resultados, o risco de contaminação reduz em 70% se for adotada a taxa de renovação de ar de 10 ACH – (do inglês *Air changes per hour*, é o número de vezes que o volume total de ar em uma sala ou espaço é completamente removido e substituído em uma hora) em situações de exposição de até 4 horas.

Dai e Zhao (2020) também estimaram a probabilidade de infecção com base na equação de Wells-Riley. Para uma situação em que há uma pessoa infectada no ambiente interno, seus resultados indicam a necessidade de uma taxa de ventilação de 300 a 1000 m³/h por pessoa infectada para 3 horas de exposição a fim de que a probabilidade de infecção esteja abaixo de 1%. Caso a permanência seja de apenas 0,25 horas (15 minutos), a ventilação necessária fica entre 30 e 90 m³/h por pessoa infectada. Estes valores se aplicam ao caso em que tanto o indivíduo contaminado quanto os demais ocupantes utilizam máscaras faciais.

Por meio de simulações computacionais, uma pesquisa feita numa construção histórica em Florença, Itália, estudou soluções de ventilação mecânica por demanda. Nesta escola, adotou-se um sistema de ventilação dotado de filtragem absoluta (HEPA, que é capaz de reter 99,9% das partículas de diâmetro 0,3 µm), sem recirculação de ar, ou seja, de modo que todo o ar ventilado tivesse origem externa. Adotou-se a taxa de troca de ar de 4 ACH, o que, na conclusão dos autores, foi capaz de manter o ambiente saudável (BALOCCO; LEONCINI, 2020).

Em sistemas de ventilação e ar-condicionado, a estratégia de insuflamento de ar fresco, também é a opção recomendada, nos trabalhos de Morawska e Cao (2020) e de Chen (2021b). Esse último propõe, inclusive, a injeção de ar renovado na parte inferior do ambiente, de maneira distribuída. Nessa configuração, a pluma térmica dos próprios indivíduos levaria o ar exalado para a parte superior do ambiente, por onde seria retirado.

Em Nova Iorque, Pavilonis *et al.* (2021) estimaram o risco de contaminação de SARS-CoV-2 entre alunos e professores para 101 salas de aula, em 19 escolas. Neste projeto, somente 37% das escolas possuíam ventilação mecânica e 82% tinham janelas ou janelas funcionais. Segundo estimativas, em salas de aula com ventilação mecânica, o risco de transmissão calculado foi significativamente menor, se comparado às que utilizavam apenas ventilação natural.

A utilização de sistemas de filtragem do ar foi a medida que se mostrou mais eficiente na redução do risco de infecção, segundo resultados de Xu *et al.* (2021b). Em sua pesquisa, que estimou o risco de infecção por COVID-19, considerando diferentes faixas de idade dos estudantes, desde crianças até adolescentes, o menor risco foi obtido com a combinação de estratégias de prevenção que envolvem a utilização de filtros MERV 13, o aumento da taxa de ventilação e o revezamento dos estudantes nas aulas presenciais (com 50% do número de alunos com participação *online*).

Allen e Ibrahim (2021) também seguem a linha do aumento da taxa de renovação do ar em busca da redução da transmissão do SARS-CoV-2. Além de criticarem as normas vigentes, que, segundo os autores, focam na diluição de bioefluentes em vez do controle de infecções, sugerem a adoção do mínimo de 6 ACH, em contraponto aos valores de aproximadamente 2,2 a 4,0 ACH, sugeridos pela norma Standard 62.1, ANSI-ASHRAE (2019). Os autores indicam também outras possibilidades, por meio da filtragem do ar, tanto pela utilização de purificadores portáteis com filtros HEPA, quanto pela instalação de filtros MERV 13 em dutos de sistemas mecânicos de ventilação. Concordam com tais medidas, Volpp *et al.* (2021), ao informar que os mesmos equipamentos de filtragem do ar foram adotados com sucesso nas escolas de Nova Jersey. Mesmo assim, os autores recomendam o uso concomitante de máscaras faciais e a adoção do distanciamento mínimo de 1,80 m. Isso porque as soluções que atuam na melhoria da ventilação e que reduzem o risco de contágio por aerossóis pouco influenciam na transmissão a curta distância (ALLEN; IBRAHIM, 2021).

Outros estudos abordaram a aplicação de purificadores de ar portáteis. Na Alemanha, Duill *et al.* (2021) testaram três modelos de purificadores em sala de aula com 61,10 m² e 186,40 m³. Dois deles foram capazes de remover 90% dos particulados em menos de 26 minutos de operação. Neste caso, o tamanho do material particulado encontrado nesta pesquisa, variou entre 0,178 e 17,78 µm. Também feita na Alemanha, outra pesquisa abordou o uso de purificadores de ar móveis (portáteis), com filtros HEPA integrados. Adotou-se 4 a 6 ACH e os resultados demonstraram, com consistência, a redução sustentável da carga de aerossol. Segundo os autores, esta tecnologia pode ser adotada como medida complementar de prevenção à propagação da COVID-19 devido à diminuição da concentração das partículas, o que reduz o risco indireto de propagação do vírus SARS-CoV-2 (OBERST; KLAR; HEINRICH, 2021).

Meiss *et al.* (2021a), após a combinação de diferentes estratégias de aberturas da edificação, concluíram que a utilização em conjunto da ventilação natural, sistemas de ar-condicionado e dispositivo com filtros HEPA foi a configuração que permitiu remover mais partículas em menor tempo. Por outro lado, muitos autores indicam minimamente a opção do uso de portas e janelas abertas como caminho em locais onde existem impedimentos para a instalação de sistemas de filtragem e renovação de ar por sistemas mecânicos, em curto prazo (ASANATI; VODEN; MAJEED, 2021).

Diversos trabalhos, em diferentes países, utilizaram medições de concentrações de dióxido de carbono como indicador da renovação de ar do ambiente, pode-se citar: na Espanha (MONGE-BARRIO *et al.*, 2022; MELGAR *et al.*, 2021; ALONSO *et al.*, 2021; VILLANUEVA *et al.*, 2021); na Suíça (VASSELA *et al.*, 2021); no Reino Unido (VOURIOT *et al.*, 2021); na Eslovênia (LOVEC; PREMROV; LESKOVAR, 2021); na Itália (DI GILIO *et al.*, 2021), entre outros. Enquanto isso, outras pesquisas também adotaram as concentrações de CO₂ como indicador da qualidade do ar, porém em estudos de simulação, como: Stabile *et al.* (2021) e Cammarata e Cammarata (2021).

Monge-Barrio *et al.* (2022) monitoraram uma escola que aplicou protocolos de melhoria da taxa de ventilação como um dos cuidados adotados para enfrentamento da

pandemia de COVID-19. Essas ações envolveram a abertura de janelas durante os períodos entre aulas e no intervalo. Em comparação ao período anterior à pandemia, observou-se que a qualidade do ar interno obteve clara melhora, no que diz respeito à média de concentração de CO₂, que reduziu aproximadamente 1400 ppm.

Um trabalho desenvolvido na Suíça, por Vassela *et al.* (2021), fez uma intervenção em salas de aula com objetivo de atingir-se a marca de 700 ppm nas concentrações de CO₂. Em ambientes naturalmente ventilados, para evitar o desconforto causado pelas condições climáticas, foi adotada abertura total de janelas e portas apenas durante os intervalos de aula, obtendo-se reduções da ordem de 1000 ppm nas concentrações. Todavia, apesar da ventilação mais eficiente, em nenhuma das salas obteve-se mediana inferior a 1000 ppm, com apenas 42% do tempo abaixo deste valor. Em outro monitoramento, feito por Schibuola e Tambani (2021), na Itália, concluiu-se que abrir portas e janelas apenas durante os intervalos não foram suficientes para manter as concentrações de dióxido de carbono baixas por longo tempo.

A estratégia de manter as aberturas constantes, ou seja, abertas não apenas nos intervalos como ao longo das lições, é recomendado por Ehrhardt *et al.* (2020). No levantamento feito em Baden-Württemberg, na Alemanha, a adoção de múltiplas medidas para minimização do contágio resultou em baixa transmissão da doença em creches e escolas.

Na Espanha, cujo protocolo de segurança contra COVID-19 define o limite de 800 ppm para concentração de CO₂, um estudo avaliou a eficácia da ventilação com base nos níveis de gás carbônico. Comparou-se dois cenários: antes e após a aplicação de protocolo de ventilação natural em resposta à pandemia. Constatou-se que as concentrações do período anterior alcançaram patamares acima de 2000 ppm enquanto, no segundo momento, foi inferior a 700 ppm. Por isso, concluiu-se que as ações foram eficientes para melhorar a qualidade do ar, porém com a desvantagem de reduzir o desempenho térmico do edifício (MELGAR *et al.*, 2021).

Resultados semelhantes foram obtidos por Meiss *et al.* (2021b), que avaliaram uma creche na Espanha, por meio também de uma comparação dos períodos anterior e durante a pandemia. Seu trabalho aponta uma máxima de 4025 ppm de gás carbônico na primeira fase. Nesse período, as concentrações desse gás estiveram acima do parâmetro normativo deste país entre 81% e 93% do tempo devido à ausência de ventilação cruzada e pouca abertura de janelas. Em contrapartida, durante a pandemia, a abertura contínua de janelas e o uso de ventilação cruzada possibilitou manter a qualidade do ar em níveis adequados, indicada pela média de dióxido de carbono abaixo de 900 ppm. Por isso, os autores sugerem a predefinição de dois protocolos distintos para salas naturalmente ventiladas: um para o cotidiano e outro para situações de emergência de saúde que demandem maiores taxas de ventilação. Essas evidências indicam que a utilização correta de protocolos de ventilação é eficaz para a melhoria da qualidade do ar interior em salas de aula, representados pela significativa redução nas concentrações de CO₂. O Quadro 2 apresenta uma síntese das pesquisas que fizeram o monitoramento da qualidade do ar e incluíram o critério de ventilação e medição das concentrações de gás carbônico, em relação ao enfrentamento da COVID-19.

Quadro 2 – Pesquisas de qualidade do ar em salas de aula durante a pandemia de COVID-19

| Referência / Local | Método de pesquisa | Medidas adotadas em relação ao enfrentamento da COVID-19 | Principais resultados |
|---|---|--|---|
| Alonso <i>et al.</i> (2021) / Espanha | Monitoramento de CO2 em salas de aula | Adoção de ventilação híbrida (mecânica e natural) e de ventilação natural em tempo integral | Redução de 300 ppm para a média de CO2 quando utilizada ventilação híbrida. Redução de 400 ppm para ventilação natural. Média semanal de CO2 entre 600 e 750 ppm. |
| Di Gilio <i>et al.</i> (2021) / Itália | Monitoramento de CO2 em salas de aula | Implementação de protocolo de ventilação nas salas, no período de retorno às aulas | 91% das salas obtiveram médias inferiores a 1000 ppm de CO2. 36% dos ambientes abaixo de 700 ppm em média. |
| Zemitis, Bogdanovics e Bogdanovica (2021) / Letônia | Monitoramento de CO2 em 01 sala de aula | Não especificado | Média de 2380 ppm Máxima de 4424 ppm A má qualidade do ar foi devido a não aplicação simultânea de protocolos mais exigentes, como o aumento da ventilação, intervalos mais longos e diminuição do número de ocupantes. |
| Trilles <i>et al.</i> (2021) / Espanha | Monitoramento de CO2 12 salas de aula 02 escolas | Adoção de medidas para redução do risco de contágio, como abertura de portas e janelas | Média de 460,92 ppm Máxima média de 1127,5 ppm (escola 01) Média de 466,28 ppm Máxima média de 1530,5 ppm (escola 02) |
| Villanueva <i>et al.</i> (2021) / Espanha | Monitoramento da qualidade do ar 19 salas de aula nos níveis pré-escolar, fundamental e médio | Aumento da ventilação por meio da abertura de janelas e portas | Médias de 553 ppm, 602 ppm e 699 ppm para salas dos níveis pré-escolar, fundamental e de ensino médio, respectivamente. |
| Monge-Barrio <i>et al.</i> (2022) / Espanha | Monitoramento de uma escola | Promoção da ventilação natural | Média de 1105 ppm Máxima < 2000 ppm |
| Kulo <i>et al.</i> (2021) / Bósnia e Herzegovina | Monitoramento em 04 salas de aula 05 meses de monitoramento | Limite de 13 alunos por sala Ventilação natural frequente do ambiente | Média de 849,6 ppm Máxima média de 1401,8 ppm O último mês de monitoramento reportou concentrações maiores, que influenciaram os resultados para mais. |
| Melgar <i>et al.</i> (2021) / Espanha | Monitoramento de CO2, temperatura e umidade | Abertura contínua de janelas | < 600 ppm |
| Lovec, Premrov e Leskovar (2021) / Eslovênia | Monitoramento de dióxido de carbono, temperatura e umidade | Ventilação combinada entre natural e mecânica | Média de 847,12 ppm Máxima de 2213 ppm |
| Vassela <i>et al.</i> (2021) / Suíça | Monitoramento de CO2 100 salas de aula | Intervenção nas salas, com objetivo de atingir 700 ppm Ventilação somente durante os intervalos (entre aulas, inclusive) | Mediana 1009 ppm (mecanicamente ventiladas) Mediana de 1553 ppm (naturalmente ventiladas) |
| Meiss <i>et al.</i> , (2021a) / Espanha | Monitoramento de gás carbônico. Cinco configurações (cenários) de ventilação. | Aplicação de melhorias de ventilação, segundo cenários estudados. A: Ventilação de 10 minutos antes da ocupação, 30 minutos no intervalo e 5 minutos ao final da aula. B: Mesma configuração anterior, liberação de intervenção pelos professores. C: Porta e folhas parcialmente abertas das janelas durante toda aula. D: Escalas com 5 minutos de abertura de janelas e 25 minutos de fechamento. Abertura total de porta durante o intervalo. D': Mesmo esquema anterior, com adição de aletas para ventilação nas portas. | A: média de 628 ppm, máxima de 1255 ppm B: média de 577 ppm, máxima de 1044 ppm C: média de 638 ppm; máxima de 1011 ppm D: média de 707 ppm; máxima de 1047 ppm D': média de 668 ppm; máxima de 1200 ppm |

Fonte: os autores.

Segundo Birmili *et al.* (2021), o parâmetro de 1000 ppm de dióxido de carbono é adequado para garantir satisfatória qualidade do ar no ambiente. O CO₂ é um gás exalado pelas pessoas em conjunto às partículas infecciosas. Existe o entendimento de que a concentração de dióxido de carbono não pode ser tomada, isoladamente, como medida de risco de infecção. Entretanto, o monitoramento das concentrações deste gás pode ser uma medida adicional de controle. Por isso, recomendam-se o uso de dispositivos para sua medição contínua. Corroboram esta estratégia Cammarata e

Cammarata (2021), como também Trilles *et al.* (2021), cujas conclusões pontuaram a utilidade deste acompanhamento para a gestão escolar e a definição de estratégias adequadas para ambientes interiores de uso público.

Stabile *et al.* (2021) também reforçam a ideia do monitoramento contínuo do CO₂, porém não como um indicador de propagação aérea do vírus, mas da taxa de ventilação necessária em ambientes com grande ocupação de forma a reduzir o risco de contaminação pelo ar. Segundo os autores, este monitoramento deve se aplicar tanto a sistemas mecanicamente quanto naturalmente ventilados.

Com base neste conhecimento, gestores e professores podem se tornar aptos à definição de protocolos que considerem a prevenção em espaços fechados, especialmente na possibilidade da presença de pessoas assintomáticas, porém contaminadas com SARS-CoV-2.

Ações adicionais para mitigação da transmissão do vírus em escolas

Além do uso de máscaras, da realização de testes, da melhoria dos sistemas de renovação do ar dentre outras, a manutenção do distanciamento social se destaca como importante medida de redução da transmissão do vírus por meio de gotículas. Neste sentido, a diminuição da densidade ocupacional contribui para o cumprimento do distanciamento físico à medida que menos pessoas ocupam o mesmo espaço (XU *et al.*, 2021b).

Zivelonghi e Lai (2021) argumentam que as normas de distanciamento social precisam evoluir de forma que não apenas limitem a distância linear entre indivíduos, mas considerem também a densidade ocupacional volumétrica, medida em metros cúbicos (m³) por pessoa, sem, contudo, sugerirem valor adequado. Esta medida visa permitir a diluição correta dos aerossóis contaminados no ar interior do ambiente, em casos de epidemia ou de pandemia. Em sua pesquisa, os autores sugerem ainda a utilização de microfones e equipamentos de amplificação pelos professores porque a fala é um grande propagador de aerossóis contaminados (ZIVELONGHI; LAI, 2021).

Considerar a densidade ocupacional volumétrica, ao quantificar o volume de ar interior por ocupante (m³/pessoa), é relevante para o meio científico, pois frequentemente a literatura avalia apenas a área disponível por indivíduo (m²/pessoa). É significativa também para o planejamento de espaços coletivos, inclusive em termos de definição de normas e regulamentos para construção de escolas.

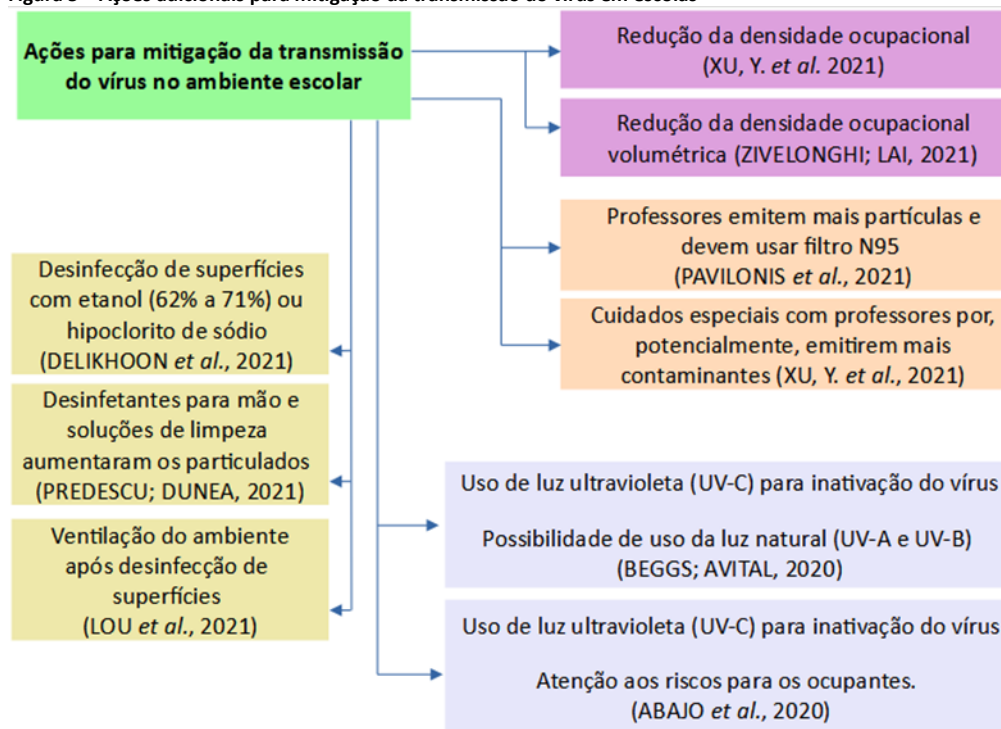
A Figura 5 resume as ações adicionais para mitigação da transmissão do vírus em escolas apresentadas nessa seção.

Xu *et al.* (2021b) também abordam a necessidade de cuidados específicos para professores nos momentos de ensino presencial, já que a taxa de ventilação pulmonar é maior em indivíduos mais velhos, se comparados às crianças mais novas. Por isso, os professores potencialmente contribuem mais com a eliminação de partículas contaminadas.

Esta ideia é reforçada por uma pesquisa realizada nos Estados Unidos por Pavilonis *et al.* (2021). Calculou-se que a taxa de geração de quanta (partículas contaminadas), por alunos de 6 a 11 anos, é de 29,6 quanta/hora, enquanto por adultos, é de 142 quanta/hora. Por este motivo, além de indicar a necessidade de uso de máscaras por todos os usuários do ambiente, sugeriu-se que os professores utilizem respiradores dotados de filtro N95, para melhor encaixe no rosto. Segundo simulações computacionais realizadas pelo estudo, essa medida permite reduzir aproximadamente

15 vezes a probabilidade média geral de transmissão da doença do professor para os alunos.

Figura 5 – Ações adicionais para mitigação da transmissão do vírus em escolas



Fonte: os autores.

No que diz respeito à inativação dos coronavírus nas superfícies, a desinfecção com uso de etanol de 62% a 71% ou de hipoclorito de sódio 0,1% é estratégia recomendada. Caso contrário, estes patógenos podem sobreviver por até nove dias (DELIKHOON et al., 2021). Todavia, Lou et al. (2021) observaram que o aumento da desinfecção dos ambientes no combate à transmissão do vírus causador da COVID-19 pode elevar a presença de subprodutos no ar. A utilização de desinfetantes clorados em ambientes internos leva à liberação de espécies reativas de cloro na atmosfera interna, o que pode ser perigoso principalmente em locais com ventilação reduzida. Os subprodutos da desinfecção podem permanecer no ar com vida útil na ordem de horas. Por isso, os autores indicam a ventilação imediata do ambiente após o tempo de desinfecção.

Conclusões semelhantes foram apresentadas no trabalho de Predescu e Dunea (2021), na Romênia, em virtude do monitoramento da concentração de particulados antes e durante a pandemia. Seus resultados indicam que o uso de desinfetantes manuais e soluções para limpeza da sala de aula foi considerado uma das causas para o grande aumento da concentração de particulados, cuja média foi de 41 µg/m³.

A desinfecção de mãos e a limpeza de superfícies foram alguns dos múltiplos métodos de redução do risco de contaminação amplamente adotados em espaços escolares. Os resultados dessas pesquisas, ao revelarem que os produtos utilizados para higiene e limpeza causaram a redução da qualidade do ar interior devido a emissão de particulados e compostos orgânicos voláteis, podem contribuir para a revisão de protocolos de ventilação em situações pandêmicas e não pandêmicas.

Outra solução é abordada por Beggs e Avital (2020), que investigaram a desinfecção do ar com uso de radiação ultravioleta. O tipo de raio ultravioleta com maior eficácia antimicrobiana é o UV-C, com comprimentos de onda próximos a 254 nm. Segundo os

pesquisadores, os vírus ligados a aerossóis parecem mais vulneráveis à ação dos raios ultravioletas, exceto para o caso dos coronavírus e, em particular o SARS-CoV-2, que não sofrem desinfecção mais facilitada do que quando se apresentam em superfícies ou em líquidos. Entretanto, ao se compararem diferentes tipos de coronavírus, os autores concluíram que estes apresentam resistências diferentes ao ultravioleta, sendo que o vírus causador da COVID-19 é menos resistente que o SARS-CoV e o MERS-CoV aos raios UV-C.

Além disso, concluiu-se que o SARS-CoV-2 foi também suscetível a danos, mesmo que em menor grau, ao UV-A e UV-B, o que indica a vulnerabilidade deste vírus à luz do sol. O uso da Radiação Germicida Ultravioleta em ambientes internos pode ser uma opção para combater a transmissão de COVID-19 por meio de aerossóis em edifícios, sendo uma alternativa para ambientes em que seja impraticável a melhoria da ventilação (BEGGS; AVITAL, 2020). Em contrapartida, García de Abajo *et al.* (2020) lembram dos riscos para a saúde humana da aplicação de UV-C no ambiente, por ser cancerígeno e poder causar danos aos olhos, recomendando a utilização dessa tecnologia dentro de dutos de ventilação.

Diante dos trabalhos analisados, percebe-se que houve um esforço para adaptações de curto prazo para atender às urgências surgidas em virtude dessa pandemia, bem como o entendimento de que o enfrentamento deve abranger ações simultâneas e de grande importância para manutenção de um ambiente interno saudável.

Conclusão

Num mundo globalizado, com suas características de transporte, de interações e de trabalho, novas pandemias causadas por contaminantes microbiológicos podem se tornar recorrentes, especialmente se o meio de propagação for pelo ar, como acontece com a COVID-19. A diminuição do risco de contaminação, seja por contato, em curta distância ou por partículas em suspensão está ligada ao objetivo principal de redução do número de casos. O fechamento das escolas devido a pandemia do SARS-CoV-2 resultou em impactos negativos tanto para educação como para toda a sociedade. A manutenção de um ambiente escolar saudável é essencial diante de possíveis futuras emergências de saúde.

O conhecimento das formas de propagação do vírus, no ambiente, é fundamental para definição dos protocolos para redução do risco de contaminação. Nesse sentido, observou-se que a adoção de estratégias diversificadas foi essencial para a proteção adequada diante das diferentes possibilidades de contágio.

Esse trabalho evidenciou que ações como o uso de máscaras, manutenção do distanciamento social, realização de testes, aumento da taxa de ventilação e renovação do ar, uso de sistemas de filtragem, entre outras, foram amplamente investigadas como eficazes no enfrentamento a COVID-19, principalmente quando aplicadas de forma simultânea. É importante enfatizar que uma parcela dessas medidas pode compor regulamentações circunstanciais, entretanto, muitas delas podem estar presentes no dia a dia da sala de aula, bem como na concepção projetual dos espaços escolares.

Destaca-se a estratégia da ventilação natural, sobretudo quando de forma cruzada. Conseguiu-se a redução do risco de contaminação devido a medidas de renovação com ar fresco, do exterior para o interior, por meio do aumento do tempo de abertura de janelas e portas. Condutas simples como fazer uso das aberturas entre o período das aulas e intervalos, mostraram-se com impactos significativos na remoção de partículas em suspensão.

A eficácia da taxa de renovação do ar utilizada em salas de aula foi verificada, com o uso principalmente do monitoramento do gás carbônico no ambiente. Este é um hábito ainda pouco explorado nas salas de aula brasileiras por ser associado erroneamente apenas ao controle de ambientes climatizados. Os trabalhos mostraram que o controle do dióxido de carbono é uma estratégia bem aceita na comunidade científica, para ambientes com diferentes tipos de sistemas de ventilação, servindo de alerta para tomada de medidas de melhoria da qualidade do ar no ambiente.

Não houve um consenso entre os autores da taxa de renovação do ar adequada para salas de aula, mas os resultados evidenciaram uma forte ligação entre o valor a ser adotado proporcional ao tempo de permanência no espaço. Muitos trabalhos afirmaram que a taxa mínima recomendada de aproximadamente 4 ACH foi capaz de manter um ambiente saudável, enquanto outros autores recomendaram o aumento da diretriz mínima para 6 ACH. Houve, ainda, trabalhos que comprovaram que uma taxa de renovação do ar de 10 ACH foi capaz de reduzir em até 70% a exposição ao SARS-CoV-2 no ambiente educacional. Tais resultados reforçam a necessidade de revisão das referidas legislações sobre o assunto, em favor da garantia de espaços permanentemente mais saudáveis.

Destacam-se, ainda, que a utilização de soluções para inativação do vírus, como uso de radiação ultravioleta (UV-C) e de produtos de limpeza, demandam protocolos cuidadosos de forma a não apresentarem riscos adicionais à saúde dos usuários para além dos já proporcionados pela contaminação com o vírus causador da COVID-19.

Concomitantemente, é certo que se deve adotar múltiplos e simultâneos métodos visando prevenir o espriamento do vírus pelo ar. Ações de distanciamento social tiveram impactos positivos, porém quando associadas à permanência em lugares cujas aberturas seguiram fechadas não foram suficientes na prevenção da COVID-19. Da mesma forma, ambientes com uma boa ventilação e renovação do ar não foram capazes de prevenir o contágio por gotículas lançadas a curta distância como pela fala ou tosse.

Um conjunto de medidas, portanto, é necessário para evitar a transmissão aérea do vírus: o aumento da taxa de ventilação; a purificação, renovação e/ou filtragem do ar, evitando-se tanto a recirculação como o fluxo de ar de uma pessoa para outra; além do uso de máscaras, distanciamento social e redução do número de pessoas no espaço - o que diminui a possibilidade de emissão, para o ar interno, de partículas contaminadas pelo vírus, sejam gotículas ou aerossóis.

Tais premissas podem servir de pauta tanto para protocolos de uso e ocupação de salas de aula, evitando a superlotação e aumentando a metragem quadrada, como a metragem cúbica por aluno, como também por meio de diretrizes projetuais voltadas a concepção da edificação escolar.

Enfatiza-se também a necessidade de se incluir uma gestão escolar que incorpore a mudança de comportamentos no ambiente educacional. Alguns autores sugerem a realização de tarefas coletivas ao ar livre, como as recreativas e de refeições. Tais práticas podem ser estendidas para diversas atividades, inclusive as pedagógicas, explorando as áreas abertas da escola, também como ferramentas no processo de ensino-aprendizagem, tanto em situações pandêmicas como em não pandêmicas.

A pandemia de COVID-19 reforçou que a prevenção do contágio de doenças virais transmitidas é um aspecto a se considerar não só nas soluções de curto prazo, mas também nas de concepção projetual e de manutenção de salas de aula.

Agradecimentos

Ao Grupo de Pesquisa Arquitetura e Estudos Ambientais (CNPQ) e ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Cidade da Universidade Vila Velha (UVV), pelo suporte à pesquisa. Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo (IFES), pelo apoio.

Referências

- AAP. AMERICAN ACADEMY OF PEDIATRICS. **COVID-19 Guidance for Safe Schools**. 2021. Disponível em: <https://services.aap.org/en/pages/2019-novel-coronavirus-Covid-19-infections/clinical-guidance/Covid-19-planning-considerations-return-to-in-person-education-in-schools/>. Acesso em: 20 nov. 2022.
- ALLEN, Joseph G.; IBRAHIM, Andrew M. Indoor Air Changes and Potential Implications for SARS-Cov-2 Transmission. **JAMA**, v. 325, n. 20, p. 2112-2113, May 2021. DOI: <https://doi.org/10.1001/jama.2021.5053>.
- ALMEIDA, Ricardo M. S. F.; PINTO, M.; PINHO, P.; LEMOS, L. T. Natural ventilation and indoor air quality in educational buildings: experimental assessment and improvement strategies. **Energy Efficiency**, v. 10, p. 839-854, October 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12053-016-9485-0>.
- ALONSO, Alicia; LLANOS, J.; ESCANDÓN, R.; SENDRA, J. J. 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. 5, p. 2699, Marc. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13052699>.
- ANSI-ASHRAE. AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Standard 62.1 - 2019: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality**. Atlanta: ANSI-ASHRAE, 2019.
- ANVISA. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. **Resolução-RE nº09**, de 16 de janeiro de 2003. Brasília: ANVISA, 2003. Disponível em: https://www.saude.mg.gov.br/images/documentos/RES_RE_09.pdf. Acesso em: 12 fev. 2020.
- ASANATI, Kaveh; VODEN, Louise; MAJEED, Azeem. Healthier schools during the COVID-19 pandemic: ventilation, testing and vaccination. **Journal of the Royal Society of Medicine**, v. 114, n. 4, Feb. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1177/0141076821992449>.
- AZUMA, Kenichi.; UNAGI, U.; KAGI, N.; KIM, H.; OGATA, M.; HAYASHI, M. Environmental factors involved in SARS-CoV-2 transmission: effect and role of indoor environmental quality in the strategy for COVID-19 infection control. **Environmental Health and Preventive Medicine**, v. 25, n. 66, Nov. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12199-020-00904-2>.
- BALOCCO, Carla; LEONCINI, Lorenzo. Energy Cost for Effective Ventilation and Air Quality for Health Buildings: Plant Proposals for a Historic Building School Reopening in the Covid-19 Era. **Sustainability**, v. 12, n. 20, Oct. 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12208737>.
- BECERRA, Jose A.; LIZANA, J.; GIL, M.; BARRIOS-PADURA, A.; BLONDEAU, P.; CHACARTEGUI, R. Identification of potential indoor air pollutants in schools. **Journal of Cleaner Production**, v. 242, Jan. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118420>.
- BEGGS, Clive B.; AVITAL, Eldad J. Upper-room ultraviolet air disinfection might help to reduce COVID-19 transmission in buildings: a feasibility study. **PeerJ**, v. 8: e10196, 13 Oct. 2020. DOI: <https://doi.org/10.7717/peerj.10196>.
- BHAGAT, Rajesh K.; WYKES, M. S.; DALZIEL, S. B.; LINDEN, P. F. Effects of ventilation on the indoor spread of COVID-19. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 903, F1, Sept. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1017/jfm.2020.720>.
- BIRMILI, Wolfram *et al.* Lüftungskonzepte in Schulen zur Prävention einer Übertragung hochinfektiöser Viren (SARSCoV-2) über Aerosole in der Raumluft. **Bundesgesundheitsbl**, v. 64, p. 1570-1580, Nov. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00103-021-03452-4>.

BOGDANOVICA, Snezana; ZEMITIS, Jurgis; BOGDANOVICS, Raimonds. The Effect of CO₂ Concentration on Children's Well-Being during the Process of Learning. **Energies**, v. 13, n. 22, Nov. 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13226099>.

BRDARIĆ, D.; CAPAK, K.; GVOZDIĆ, V.; BARIŠIN, A.; JELINIĆ, J. J.; EGOROV, A.; ŠAPINA, M.; KALAMBURA, S.; KRAMARIĆ, K. Indoor carbon dioxide concentrations in Croatian elementary school classrooms during the heating season. **Arh Hig Rada Toksikol**, v. 70, n. 4, p. 296-302, Dec. 2019. DOI: <https://doi.org/10.2478/aiht-2019-70-3343>.

BUENO, F. T. C.; SOUTO, E. P.; MATTA, G. C. Notas sobre a trajetória da Covid-19 no Brasil. In: MATTA, G.C.; REGO, S.; SOUTO, E. P.; SEGATA, J. (ed.). **Os impactos sociais da Covid-19 no Brasil: populações vulnerabilizadas e respostas à pandemia** [online]. Rio de Janeiro: Observatório Covid 19; FIOCRUZ, 2021. p. 27-39. DOI: <https://doi.org/10.7476/9786557080320.0002>.

CAMMARATA, Alessandro; CAMMARATA, Giuliano. Dynamic assessment of the risk of airborne viral infection. **Indoor Air**, v. 31, n. 6, p. 1759-1775, July 2021. DOI: <https://doi.org/10.1111/ina.12862>.

CAPES. PORTAL DE PERIÓDICOS DA CAPES. **Quem somos**. Periódicos. Brasília: CAPES, 2022. Disponível em: <https://www-periodicos-capes-gov-br.ez1.periodicos.capes.gov.br/index.php/sobre/quem-somos.html>. Acesso em 23 nov. 2022.

CDC. CENTER FOR DISEASE CONTROL AND PREVENTION. **Ventilation in Buildings**. Atlanta: CDC, 02 jun. 2021. Disponível em: <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/community/ventilation.html>. Acesso em: 20 jan. 2022.

CEN. COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **EN 16798-1**: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. Bruxelles: CEN, 2019.

CHEN, P. Z.; BOBROVITZ, N.; PREMJI, Z.; KOOPMANS, M.; FISMAN, D; N.; GU, F. X. Heterogeneity in transmissibility and shedding SARS-CoV-2 via droplets and aerosols. **eLife**, v. 10 p. e65774, Apr. 2021a. DOI: <https://doi.org/10.7554/eLife.65774>.

CHEN, Qingyan. Can we migrate COVID-19 spreading risk? **Frontiers of environmental Science & Engineering**, 2021, v. 15, n. 35, 2021b. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11783-020-1328-8>.

CHILLON, Sergio A.; MILLAN, M.; ARAMENDIA, I.; FERNANDEZ-GAMIZ, U.; ZULUETA, E.; MENDEZA-SAGASTIZABAL, X. Natural Ventilation Characterization in a Classroom under Different Scenarios. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 18, n. 10, May 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph18105425>.

CIOTTI, M.; CICOZZI, M.; TERRINONI, A.; JIANG, W.; WANG, C.; BERNARDINI, S. The COVID-19 pandemic. **Critical Reviews in Clinical Laboratory Sciences**, v. 57, n. 6, Special issue: COVID-10 Pandemic and Critical Role of the Clinical Laboratory, p. 365-388, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408363.2020.1783198>.

COLEY, David A.; GREEVES, R.; SAXBY, Brian K. The Effect of Low Ventilation Rates on the Cognitive Function of a Primary School Class. **International Journal of Ventilation**, v. 6, n. 2, p. 107-112, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1080/14733315.2007.11683770>.

COMBER, L.; MURCHU, E. O.; DRUMMOND, L.; CARTY, P. G.; WALSHI, K. A.; DE GASCUN, C. F.; CONNOLLY, M. A.; SMITH, S. M.; O'NEILL M. Airborne transmission of SARS-CoV-2 via aerosols. **Reviews in Medical Virology**, v. 31, n. 3, Oct. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/rmv.2184>.

DAI, Hui; ZHAO, Bin. Association of the infection probability of COVID-19 with ventilation rates in confined spaces. **Build Simulation**, v. 13, p. 1321-1327, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12273-020-0703-5>.

DAWSON, P. (org.). Pilot Investigation of SARS-CoV-2 Secondary Transmission in Kindergarten Through Grade 12 Schools Implementing Mitigation Strategies – St. Louis County and City of Springfield, Missouri, December 2020. **Morbidity and Mortality Weekly Report**, v. 70, n. 12, p. 449-455, 26 Mar. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.15585/mmwr.mm7012e4>.

DELIKHOON, M.; GUZMAN, M. I.; NABIZABEDEL, R.; BAGHANI, A. N. Modes of Transmission of Severe Acute Respiratory Syndrome-Coronavirus-2 (SARS-CoV-2) and Factors Influencing on the Airborne Transmission: A Review. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 18, n. 2, Jan. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph18020395>.

DENG, Xi.; GONG, G.; HE, X.; SHI, X.; MO, L. Control of exhaled SARS-CoV-2-laden aerosols in the interpersonal breathing microenvironment in a ventilated room with limited space air stability. **Journal of Environment Sciences**, v. 108, p. 175-18, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.01.025>.

DI GILIO, A.; PALMISANI, J.; PILIMENO, M.; CERINO, F.; CACACE, M.; MIANI, A.; DE GENNERO, G. CO₂ concentration monitoring inside educational buildings as a strategic tool to reduce the risk of Sars-CoV-2 airborne transmission. **Environmental Research**, v. 202, Nov. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111560>.

DUILL, Finn F.; SCHULZ, F.; JAIN, A.; KRIEGER, L.; VAN WACHEM, B.; BEYRAU, F. The Impact of Large Mobile Air Purifiers on Aerosol Concentration in Classrooms and the Reduction of Airborne Transmission of SARS-CoV-2. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 18, v. 21, Nov. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph182111523>.

EHRHARDT, j.; EKINCI, A.; KREHL, H.; MEINCKE, M.; FINCI, I.; KLEIN, J.; GEISEL, B.; WAGNER-WIEMIMG, C.; EEICHNER, M.; BROCKMANN, S. Transmission of SARS-CoV-2 in children aged 0 to 19 years in childcare facilities and schools after their reopening in May 2020, Baden-Württemberg, Germany. **Euro Surveill**, v. 25, n. 36, Set. 2020. DOI: <https://doi.org/10.2807/1560-7917.ES.2020.25.36.2001587>.

FOUCHER, Gérard; FAURE, Sébastien. What is Covid-19? **Actualité Pharmaceutiques**, v. 60, n. 602, p. 59-61, Jan. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actpha.2020.11.015>.

GABRIEL, Marta; PACIÊNCIA, I.; FELGUEIRAS, F.; RUFO, J. C.; MENDES, F. C.; FARRAIA, M.; MOURÃO, Z.; MOREIRA, A.; FERNANDES, E. O. Environmental quality in primary schools and related health effects in children. An overview of assessments conducted in the Northern Portugal. **Energy & Buildings**, v. 250, 111305, Nov. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111305>.

GALVÃO, Maria C. B.; RICARTE, Ivan L. M. Revisão Sistemática da Literatura: Conceituação, Produção e Publicação. **LOGEION Filosofia da Informação**, v. 6, n. 1, p. 57-73, 2019. DOI: <https://doi.org/10.21728/logcion.2019v6n1.p57-73>.

GAQS. GENERAL ADMINISTRATION OF QUALITY SUPERVISION. Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. **GB/T 17226-2017**: Hygienic requirements of classroom ventilation in middle and elementary school. Beijing: Standards Press of China, 2017.

GARCÍA DE ABAJO, F.; JAVIER HERNÁNDEZ, R.; KAMINER, I.; MEYERHANS, A.; ROSELL-LLOMPART, J.; SANCHEZ-ELSNER, T. Back to Normal: An old Physics Rout to Reduce SARS-CoV-2 Transmission in Indoor Spaces. **ACS Nano**, v. 14, n. 7, p. 7704-7713, June. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c04596>.

GETTINGS, J. (org.). Mask Use and Ventilation Improvements to Reduce COVID-19 Incidence in Elementary Schools – Georgia, November 16-December 11, 2020. **Morbidity and Mortality Weekly Report**, v. 70, n. 21, p. 779-784, May 2021. DOI: <https://doi.org/10.15585/mmwr.mm7021e1>.

GODWIN, L.; HAYWARD, T.; KRISHAN, P.; NOLAN, G.; NUNDY, M.; OSTRISHKO, K. et al. Which factors influence the extent of indoor transmission of SARS-Cov-2? A rapid evidence review. **Journal of Global Health**, v. 11, 10002, 2021. DOI: <https://doi.org/10.7189/jogh.11.10002>.

HONEIN, Margaret A. (org.). Summary of Guidance for Public Health Strategies to Address High Levels of Community Transmission of SARS-CoV-2 and Related Deaths, December 2020. **Morbidity and Mortality Weekly Report (MMWR)**, v. 69, n. 49, p. 1860-1867, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.15585/mmwr.mm6949e2>.

INEP. INSTITUTO NACIONAL DE ESTUDOS E PESQUISAS EDUCACIONAIS ANÍSIO TEIXEIRA. **Resposta Educacional à Pandemia de Covid-19 no Brasil**. Censo escolar 2020. Brasília: INEP, 2021. Disponível em:

https://download.inep.gov.br/censo_escolar/resultados/2021/apresentacao_pesquisa_covid19_censo_escolar_2021.pdf. Acesso em: 20 out. 2022.

INEP. INSTITUTO NACIONAL DE ESTUDOS E PESQUISAS EDUCACIONAIS ANÍSIO TEIXEIRA. **Média de Horas-aula diária**. Brasília: INEP, 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/inep/pt-br/aceso-a-informacao/dados-abertos/indicadores-educacionais/media-de-horas-aula-diaria>.

INEP. INSTITUTO NACIONAL DE ESTUDOS E PESQUISAS EDUCACIONAIS ANÍSIO TEIXEIRA. **Pesquisa Resposta Educacional à Pandemia de Covid-19 no Brasil em 2021**. Brasília: INEP, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/inep/pt-br/assuntos/noticias/censo-escolar/pesquisa-revela-resposta-educacional-a-pandemia-em-2021>.

JAN, Rohi, ROY, R.; YADAV, S.; SATSANGI, G. Exposure assessment of children to particulate matter and gaseous species in school environments of Pune, India. **Building and Environment**, v. 111, p. 207-217, Jan. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.008>.

JARVIS, Michael C. Aerosol Transmission of SARS-CoV-2: Physical Principles and Implications. **Frontiers in Public Health**, v. 8, 590041, Nov. 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.590041>.

KAPOOR, Nishant Raj; KUMAR, A.; MEENA, C.C.S.; KUMAR, A.; ALAM, T.; BALAM, N. B.; GHOSH, A. A Systematic Review on Indoor Environmental Quality in Naturally Ventilated School Classrooms: A Way Forward. **Advances in Civil Engineering**, v. 2021, p. 1-19, Feb. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/8851685>.

KULO, Aida; KARIĆ, S.; ĆETKOVIĆ, A.; BLEKIĆ, A.; KUSTURICA, J.; SPAHIĆŠ, N.; ŠLIJVO, A.; ŠEČIĆ, D. School Children Exposure to low Indoor Air Quality in classrooms during Covid-19 Pandemic: results of a pilot study. **Psychiatria Danubina**, v. 33, suppl. 3, p. 318-330, May 2021. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34010257/>.

LAM-HINE, Tracy; LAM-HINE, T.; MCCURDY, S. A.; SANTORA, L.; DUNCAN, L.; CORBERT-DETIG, R.; KAPUSINSKY, B.; WILLIS, M. Outbreak Associated with SARS-CoV-2 B.1.617.2 (Delta) Variant in an Elementary School – Marin County, California, May-June 2021. **Morbidity and Mortality Weekly Report**, v. 70, n. 35, p. 1214-1219, Sept. 2021. DOI: <https://doi.org/10.15585/mmwr.mm7035e2>.

LAZOVIC, Ivan M.; STEVANOVIĆ, Z. M.; JOVAŠEVIĆ-STOJANOVIĆ, M. V.; ŽIVKOVIĆ, M. M.; BANJAC, M. J. Impact of CO₂ concentration on Indoor Air Quality and correlation with relative humidity and indoor air temperature in school buildings in Serbia. **Thermal Science**, v. 20, Supl. n. 1, p.297-307, 2016. DOI: <https://doi.org/10.2298/TSCI150831173L>.

LOU, Jinxiu; WANG, W.; LU, H.; WANG, L.; ZHU, L. Increase disinfection byproducts in the air resulting from intensified disinfection during the COVID-19 pandemic. **Journal of Hazardous Materials**, v. 418, 126249, Sept. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126249>.

LOVEC, Vesna; PREMROV, Miroslav; LESKOVAR, Vesna Z. 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, Sept. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph18189712>.

MA, Fusheng; ZHAN, Changhong; XU, Xiaoyang. Investigation and Evaluation of Winter Indoor Air Quality of Primary Schools in Severe Cold Weather Areas of China. **Energies**, v. 12, n. 9, p. 1602, Apr. 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12091602>.

MAINKA, Anna; ZAJUSZ-ZUBEK, Elwira. Indoor Air Quality in Urban and Rural Preschools in Upper Silesia, Poland: particulate matter and carbon dioxide. **International journal of environmental research and public health**, v. 12, n. 7, p.7697-7711, July 2015. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph120707697>.

MEISS, Alberto; JIMENO-MERINO, H.; POZA-CASADO, I.; LLORENTE-ÀLVAREZ, A.; PADILLA-MARCOS, M. Indoor Air Quality in Naturally Ventilated Classrooms. Lessons Learned from a Case Study in a COVID-19 Scenario. **Sustainability**, v. 13, n. 15, p. 8446, July 2021b. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13158446>.

MEISS, Alberto; POZA-CASADO, I.; LLORENTE-ÀLVAREZ, A.; JIMENO-MERINO, H.; PADILLA-MARCOS, M. A. Implementation of a Ventilation Protocol for SARS-CoV-2 in Higher Educational Centre. **Energies**, v. 14, n. 19, p. 6172, Sept. 2021a. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14196172>.

MELGAR, Sérgio G.; SÁNCHEZ CORDERO, A.; VIDERAS RODRÍGUEZ, M.; ANDÚJAR MÁRQUEZ, J. Influence on indoor comfort due to the application of Covid-19 natural ventilation protocols for schools at subtropical climate during winter season. **E3S Web of Conferences**, v. 293, p. 01031, July 2021. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202129301031>.

MITCHELL, John W.; BRAUN, James E. **Princípios de Aquecimento, Ventilação e Condicionamento de Ar em Edificações**. Rio de Janeiro: LTC, 2018. 572 p.

MONGE-BARRIO, Aurora; BES-RASTROLLO, M.; DORREGARAY-OYAREGUI, S.; GONZÁLEZ-MARTÍNEZ, P.; MARTIN-CALVO, N.; LÓPEZ-HERNÁNDEZ, D.; ARRIAZU-RAMOS, A.; SÁNCHEZ-OSTIZ, A. Encouraging natural ventilation to improve indoor environmental conditions at schools. Case studies in the north of Spain before and during COVID. **Energy & Buildings**, v. 254, p. 111567, Jan. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111567>.

MORAWSKA, Lidia; CAO, Junji. Airborne transmission of SARS-CoV-2: The world should face the reality. **Environment International**, v. 139, 10730, June 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105730>.

MUSCATELLO, N.; MACCARTHY, A.; KIELB, C.; HSU, W. H.; HWANG, S. A.; LIN, H. S. Classroom conditions and CO2 concentrations and teacher health symptom reporting in 10 New York State Schools. **Indoor Air**, v. 25, n. 2, p. 157-167, June 2014. DOI: <https://doi.org/10.1111/ina.12136>.

OBERST, M.; KLAR, T.; HEINRICH, A. Der Effekt von mobilen Luftfiltersystemen auf die Aerosolbelastung in Großraumszenarien vor dem Hintergrund des Infektionsrisikos der COVID-19-Erkrankung. Kann die Präsenzlehre wieder aufgenommen werden? **Zentralblatt für Arbeitsmedizin, Arbeitsschutz und Ergonomie**, v. 71, p. 20-212, May 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40664-021-00435-9>.

OPAS. ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DA SAÚDE. **OMS declara emergência de saúde pública de importância internacional por surto de novo coronavírus**. Washington: OPAS, 2020. Disponível em: <https://www.paho.org/pt/news/30-1-2020-who-declares-public-health-emergency-novel-coronavirus>. Acesso em: 20 out. 2021.

PAVILONIS, Brian; IERARDI, A. M.; LEVINE, L.; MIRER, F.; KELVIN, E. A. Estimating aerosol transmission risk of SARS-CoV-2 in New York City public schools during reopening. **Environmental Research**, v. 195, 110805, Apr. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.110805>.

PMC. PUBMED CENTRAL. **About PMC**. Bethesda: PMC, 2022. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/about/intro/>. Acesso em: 23 nov. 2022.

PORTUGAL. Portaria n.º 349-D/2013. 2 de dezembro de 2013: aprova o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS). **Diário da República**, 1.ª série, n.º 233, Lisboa, 2013.

PREDESCU, Laurentiu; DUNEA, Daniel. Performance Evaluation of Particulate Matter and Indoor Microclimate Monitors in University Classrooms under COVID-19 Restrictions. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 18, n. 14, 7363, July 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph18147363>.

ROCHA-MELOGNO, Lucas; CRANK, K.; BERGIN, M. H.; GRAY, G. C.; BIBBY, K.; DESHUSSES, M. A. Quantitative risk assessment of COVID-19 aerosol transmission indoors: a mechanistic stochastic web application. **Environmental Technology**, Nov. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/09593330.2021.1998228>.

SATISH, U.; MENDELL, M. J.; SHEKHAR, K.; HOTCHI, T.; SULLIVAN, D.; STREUFERT, S.; FISK, W. J. Is CO2 an indoor pollutant? Direct effects of low-to-moderate CO2 concentrations on human decision-making performance. **Environmental health perspectives**, v.120, n.12, p. 1671-1677, Nov. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1289/ehp.1104789>.

SCHIBUOLA, Luigi; SCARPA, Massimiliano; TAMBANI, Chiara. Natural ventilation level assessment in a school building by CO₂ concentration measures. **Energy Procedia**, v.101, p. 257-264, Nov. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.033>.

SCHIBUOLA, Luigi; TAMBANI, Chiara. High energy efficiency to limit COVID-19 contagion in school environments. **Energy and Buildings**, v. 240, 110882, June 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110882>.

SCHUCHMANN, Alexandra Z.; SCHNORREBERGER, B. L.; CHIQUETTI, M. E.; GAIKI, R. S.; RAIMANN, B. W.; MAEYAMA, M. A. Isolamento social vertical X Isolamento social horizontal: os dilemas sanitários e sociais no enfrentamento da pandemia de COVID-19. **Brazilian Journal of Health Review**, v. 3, n. 2, p. 3556-3576, mar./abr. 2020. DOI: <https://doi.org/10.34119/bjhrv3n2-185>.

SCOTFORD, Eloise. Rethinking Clean Air: Air Quality Law and COVID-19. **Journal of Environmental Law**, v. 32, n. 3, p. 349-353, Nov. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1093/jel/eqaa027>.

SHAMSI, Salman; ZAMAN, K.; USMAN, B.; NASSANI, A. A.; HAFFAR, M.; ABRO, M. M. Q. Do environmental pollutants carrier to COVID-19 pandemic? A cross-sectional analysis. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, p. 17530-17543. Oct. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17004-5>.

SHENDELL, D. G.; PRILL, R.; FISK, W. J.; APTE, M. G.; BLAKE, D.; FALULKNER, D. Associations between classroom CO₂ concentrations and student attendance in Washington and Idaho. **Indoor Air**, v. 14, n. 5, p. 333-3341, May 2004. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00251.x>.

SILVA, S. V. O.; PAGEL, E. C.; BASTOS, L. E. G.; MARCONSINI, C. Ventilação natural e qualidade do ar em salas de aula: revisão sistemática da literatura. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 13, p. e022021, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.20396/parc.v13i00.8666284>.

SOUSA, Marcos R.; RIBEIRO, Antonio L. P. Revisão Sistemática e Meta-análise de Estudos de Diagnóstico e Prognóstico: um Tutorial. **Arquivos Brasileiros de Cardiologia**, v. 92, n. 3, p. 241-251, mar. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0066-782X2009000300013>.

STABILE, L.; PACITO, A.; MIKSZEWSKI, A.; MORAWSKA, L.; BUONANNO, G. Ventilation procedures to minimize the airborne transmission of viruses in classrooms. **Building and Environment**, v. 202, 108042, Sept. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108042>.

STABILE, Luca; DELL'ISOLA, M.; RUSSI, A.; MASSIMO, A.; BUONANNO, G. The effect of natural ventilation strategy on indoor air quality in schools. **Science of the Total Environment**, v. 595, p. 894-902, Oct. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.048>.

TANG, J. W.; BAHNFLETH, W. P.; BLUYSSSEN, P. M.; TELLER, R.; WARGOCKI, P.; DANCER, S. J. Dismantling myths on the airborne transmission of severe acute respiratory syndrome coronavirus-2 (SARS-CoV-2). **The Journal of Hospital Infection**, v. 110, p. 89-96, Jan. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2020.12.022>.

TAYPE, L. E.; DEZEN-KEMPTER, E. Contribuição de BIM para a segurança laboral na construção civil: uma revisão sistemática de literatura. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 11, p. e020002, mar. 2020. DOI: <https://doi.org/10.20396/parc.v11i0.8653811>.

TRILLES, Sergio; JUAN, P.; CHAUDHURI, S.; FORTEA, A. B. V. Data on CO₂, temperature and air humidity records in Spanish classrooms during the reopening of schools in the COVID-19 pandemic. **Data in Brief**, v. 39, 107489, Dec. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.107489>.

UK. UNITED KINGDOM GOVERNMENT. **Building Bulletin 101 - 2018**. Guidelines on ventilation, thermal comfort and indoor air quality in schools. London: UK, 2018.

UNESCO. UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION. **Situação da educação no Brasil (por região/estado – nov. 2021)**. Brasília: UNESCO, 2021. Disponível em: <https://pt.unesco.org/fieldoffice/brasil/covid-19-education-Brasil#:~:text=2021,->

[%C3%A7o%20de%202020,brasileiros%20at%C3%A9%20maio%20de%202021.](#)
Acesso em: 20 dez. 2021.

VASSELLA, Claudia C.; KOCH, J.; HENZI, A.; JORDAN, A.; WAEBER, R.; IANNACCONE, R.; CHARRIÈRE, R. From spontaneous to strategic natural window ventilation: Improving indoor air quality in Swiss schools. **International Journal of Hygiene and Environmental Health**, v. 234, 113746, May 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2021.113746>.

VELAVAN; Thirumalaisamy P.; MEYER, Christian G. The COVID-19 epidemic. **Tropical Medicine & International Health**, v. 25, n. 3, p. 278-280, Feb. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1111/tmi.13383>.

VILCEKOVÁ, Silvia; KAPALO, P.; MEČIAROVÁ, L.; BURDOVÁ, E. K.; IMMRECZEOVÁ, V. Investigation of Indoor Environmental Quality in Classroom – Case Study. **Procedia Engineering**, v. 190, p. 496 - 503, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.369>.

VILLANUEVA, Florentina; NOTARIO, A.; CABÑAS, B.; MARTÍN, P.; SALGADO, S.; GABRIEL, M. F. Assessment of CO₂ and aerosol (PM_{2,5}, PM₁₀, UFP) concentrations during the reopening of schools in the COVID-19 pandemic: The case of a metropolitan area in Central-Southern Spain. **Environmental Research**, v. 197, 111092, June 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111092>.

VOLPP, Kevin G.; KRAUT, B. H.; GHOSH, S.; NEATHERLIN, J. Minimal SARS-CoV-2 Transmission After Implementation of a Comprehensive Mitigation Strategy at a School – New Jersey, August 20–November 27, 2020. **Morbidity and Mortality Weekly Report**, v. 70, n. 11, p. 377-381, Mar. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.15585/mmwr.mm7011a2>.

VOURIOT, Carollanne V. M.; BURRIDGE, H. C.; NOAKES, C. J.; LINDEN, P. F. Seasonal variation in airborne infection risk in schools due to changes in ventilation inferred from monitored carbon dioxide. **Indoor Air**, v. 31, n. 4, p. 1154-1163, Marc. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1111/ina.12818>.

WHO. WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Naming the coronavirus disease (COVID-19) and the virus that causes it**. Copenhagen: World Health Organization, 2021. Disponível em: [https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/technical-guidance/naming-the-coronavirus-disease-\(Covid-2019\)-and-the-virus-that-causes-it#:~:text=Official%20names%20have%20been%20announced,%2DCoV%2D2](https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/technical-guidance/naming-the-coronavirus-disease-(Covid-2019)-and-the-virus-that-causes-it#:~:text=Official%20names%20have%20been%20announced,%2DCoV%2D2). Acesso em: 20 fev. 2021.

WHO. WORLD HEALTH ORGANIZATION. **WHO Coronavirus (COVID-19) Dashboard**. 2022. Copenhagen: World Health Organization, 2022. Disponível em: <https://Covid19.who.int/>. Acesso em: 20 dez, 2022.

XU, Chunwen; LIU, W.; LUO, X.; HUANG, X.; NIELSEN, P. V. Prediction and control of aerosol transmission of SARS-CoV-2 in ventilated context: from source to receptor. **Sustainable Cities and Society**, v. 76, 103416, Jan. 2021a DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103416>.

XU, Yifang; CAI, J.; LI, S.; HE, Q.; ZHU, S. Airborne infection risks of SARS-CoV-2 in U.S. schools and impacts of different intervention strategies. **Sustainable Cities and Society**, v. 74, 103188, Nov. 2021b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103188>.

ZEMITIS, Jurgis; BOGDANOVICS, Raimonds; BOGDANOVICA, Snezana. The Study of CO₂ Concentration in a classroom during the Covid-19 safety measures. **E3S Web of Conferences**, v. 246, 01004, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202124601004>.

ZIVELONGHI, Alessandro; LAI, Massimo. Mitigating aerosol infection risk in school buildings: the role of natural ventilation, volume, occupancy and CO₂ monitoring. **Building and Environment**, v. 204, 108139, Oct. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108139>.

1 Saulo Vieira de Oliveira Silva

Arquiteto e Urbanista. Mestre em Arquitetura e Cidade pela Universidade Vila Velha. Professor da Coordenadoria de Edificações do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo. Endereço postal: Avenida

SILVA, Saulo V. de O.; PAGEL, Érica C.

Contribuições para a qualidade do ar interior em salas de aula pós pandemia de COVID-19

Vitória, 1729, Jucutuquara, Vitória, ES – Brasil. CEP 29040-780

2 Érica Coelho Pagel

Arquiteta e Urbanista. Doutora em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal do Espírito. Professora do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Cidade da Universidade Vila Velha. Endereço postal: Avenida Comissário José Dantas de Melo, 21 – Boa Vista II, Vila Velha, ES – Brasil. CEP 29102-920