

VENTILAÇÃO NATURAL E QUALIDADE DO AR EM SALAS DE AULA: REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

NATURAL VENTILATION AND AIR QUALITY IN CLASSROOMS: SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW

 Saulo Vieira de Oliveira Silva ¹

 Érica Coelho Pagel ²

 Leopoldo Eurico Gonçalves Bastos ³

 Cynthia Marconsini ⁴

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil, saulomestradoarq@gmail.com

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

³ Universidade Vila Velha, Vila Velha, ES, Brasil, leopoldo.bastos@uvv.br

⁴ Universidade Vila Velha, Vila Velha, ES, Brasil, cynthia.santos@uvv.br

Contribuição dos autores:

SVOS: conceituação, curadoria dos dados, análise formal, investigação, metodologia, administração de projeto, supervisão, validação, 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. **LEGB:** conceituação, análise formal, metodologia, supervisão, validação, visualização. **CM:** conceituação, análise formal, metodologia, supervisão, validação, visualização.

Fomento: não houve fomento

Declaração de conflito: nada foi declarado.

Editora Responsável:

Letícia de Oliveira Neves 

Resumo

Utilizar espaços internos é inerente aos seres humanos que passam, em média, a maior parte do tempo nesses locais. As salas de aula são alvo de crescente preocupação científica sobretudo quando submetidas a baixas taxas de renovação de ar. O dióxido de carbono é, tradicionalmente, considerado um indicador da qualidade do ar interior (QAI). No ambiente escolar, altas concentrações desse gás estão relacionadas à diminuição da cognição e do desempenho dos estudantes. O objetivo deste estudo foi fazer uma revisão da literatura de artigos que tratam da QAI e dos níveis de CO₂ em salas de aula com ventilação natural. A metodologia adotada foi a Revisão Sistemática da Literatura (RSL). Realizou-se uma seleção de artigos junto ao Portal de Periódicos da CAPES e ScienceDirect, que resultou na inclusão e análise de 34 artigos. Como resultados, observou-se que, frequentemente, as salas de aula operam com concentrações médias de CO₂ superiores a 1000 ppm, bem como, uma significativa relação pico-média, o que indica a baixa eficiência da renovação de ar. Os trabalhos indicaram que a ação dos usuários, por meio do julgamento subjetivo e do comportamento adaptativo, influenciou o aumento dos níveis desse gás, assim como a abertura de janelas e portas nos intervalos de aula não foi suficiente para manter a qualidade recomendada. Essa temática ganhou relevância devido à pandemia do COVID-19 em 2020, em que ficou evidente a necessidade de estratégias adequadas para a dispersão dos contaminantes.

Palavras-chave: Qualidade do Ar Interior (QAI), ventilação natural, CO₂, salas de aula.

Abstract

Indoor spaces are inherent to human beings who tend to spend most of their time in these places. So, classrooms have been the target of growing scientific concern, especially when subject to low ventilation rates. Carbon dioxide is traditionally considered an indicator of indoor air quality (IAQ). Unfortunately, there is a high concentration of this gas in the classroom environment, related to decreased cognition and reduced student performance. Thus, this study aims to carry out a literature review, focusing on articles dealing with CO₂ levels and IAQ in classrooms with natural ventilation. The methodology adopted was the Systematic Literature Review. A selection of articles was performed on the Capes Journal Portal and ScienceDirect database, which resulted in the inclusion and analysis of 34 papers. As a result, we observed that classrooms often operate with average concentrations of CO₂ above 1000 ppm and a significant peak-average relationship, which indicates the low efficiency of the air renewal. The analyzed works pointed out that user's action, through subjective judgment and adaptive behaviour, influences CO₂ levels. Moreover, opening windows and doors during class breaks is not enough to maintain the recommended air quality. This theme gained relevance due to the COVID-19 pandemic in 2020, highlighting the need for adequate strategies for the dispersion of contaminants.

Keywords: Indoor Air Quality (IAQ), natural ventilation, CO₂, classrooms.

How to cite this article:

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

Introdução

O uso de espaços interiores é inerente à humanidade em função das necessidades de abrigo, conforto e conveniências para o desempenho de atividades cotidianas (GODISH,

Submitted 06.01.2021 – Approved 22.03.2022 – Published 13.06.2022

e022021-1 | **PARC Pesq. em Arquit. e Constr.**, Campinas, SP, v. 13, p. e022021, 2022, ISSN 1980-6809



2000), e cerca de 86,9% do tempo é vivido nesses ambientes (KLEPEIS *et al.*, 2001). Compartimentos internos são capazes de acumular poluentes químicos e biológicos no ar se as taxas de renovação forem baixas (EPA, 2018; GIODA; AQUINO NETO, 2003; BRICKUS; AQUINO NETO, 1999). Em ambientes não residenciais, como as escolas, as condições de ventilação dificilmente estão sob o controle dos usuários (GODISH, 2000).

A inalação é uma das principais rotas de transmissão de poluentes ao corpo humano. Pela via inalatória, os contaminantes podem agir diretamente sobre o sistema respiratório e, em longo prazo, causar prejuízos a outros sistemas do organismo (KEELER; VAIDYA, 2018). Sabe-se que a poluição do ar também pode ter efeitos danosos no sistema cardiovascular, levando, inclusive, à morte. Estudos de séries temporais revelaram associações com a mortalidade em problemas do coração devido à liberação, no sistema circulatório, de substâncias inflamatórias capazes de ocasionar eventos cardíacos (ANDERSON, 2009).

Os efeitos negativos à saúde, advindos da baixa qualidade do ar interno, dependem de uma série de fatores, como: a sensibilidade dos indivíduos, a duração da exposição, a concentração dos poluentes e, claro, o efeito específico do contaminante no organismo. A exposição a alergênicos pode causar reações imediatas e menores efeitos em longo prazo. Já no caso de contaminantes carcinogênicos, os danos podem surgir após anos de permanência em ambientes inadequados, em vez de apresentar sinais imediatos (HESS-KOSA, 2019).

A questão da qualidade do ar interior (QAI) apresenta cada vez mais desafios. Desde dezembro de 2019, a humanidade enfrenta a pandemia de COVID-19, uma infecção respiratória causada pelo vírus SARS-CoV-2 (BRASIL, 2021). Seu modo primário de transmissão é de pessoa para pessoa por meio do contato com gotículas em suspensão. A infecção também é possível pelo contato com superfícies contaminadas com a deposição de partículas e posterior toque em olhos, boca ou nariz (AAP, 2021; CDC, 2021).

A abertura de janelas e portas, ao permitir a ventilação e renovação de ar, proporciona a diluição de potenciais contaminantes e a diminuição da concentração de partículas virais (AAP, 2021; CDC, 2021). O arejamento ou a filtragem são métodos comumente usados para remover do ar partículas de 5 µm ou menores que, caso contrário, podem permanecer suspensas no ambiente por horas ou até dias (CDC, 2021).

A ventilação natural aproveita-se da passagem do vento para promover a renovação de ar, com objetivo de diluir ou remover poluentes e adequar a qualidade do ar interior (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014; SUNDELL, 2004). Este escoamento do ar é provocado pela diferença de pressão entre o interior e o exterior, que pode ser obtida em virtude da própria incidência do vento de forma direta sobre o edifício. Quando este recai diretamente sobre a fachada (barlavento) gera pressões positivas, enquanto nas paredes opostas (sotavento) pressões negativas em relação à atmosfera. Outro mecanismo impulsor é o desequilíbrio de temperatura entre o ar interno e o externo, que induz o movimento do ar, o que se denomina efeito chaminé ou impulsão térmica (AMARAL, 2008). Espaços naturalmente ventilados são os que utilizam sistemas de esquadrias e aberturas, que incluem elementos como: portas, janelas, óculos, claraboias, lanternins, torres de vento, entre outros (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014; SUNDELL, 2004).

Os ambientes escolares são objeto de crescente preocupação da comunidade científica porque, neles, os estudantes permanecem uma parcela significativa do tempo, em dias úteis. Estes locais, muitas vezes, possuem suprimento insuficiente de ar fresco além de

operarem com uma densidade ocupacional frequentemente maior, se comparada a outros tipos de edificações (SCHIBUOLA; TAMBANI, 2020; ALMEIDA *et al.*, 2017).

Estudos atuais revelam que, em escolas, diversos poluentes têm alcançado concentrações acima das permitidas pelos padrões de qualidade (DENG; LAU, 2019). Há trabalhos que apontam a influência da má qualidade do ar interior no rendimento dos alunos no que diz respeito à participação, absenteísmo e desempenho em tarefas escolares (SHENDELL *et al.*, 2004).

Esse trabalho tem como objetivo fazer uma revisão da literatura em publicações que tratam da qualidade do ar interior em salas de aula com ventilação natural, com base em pesquisas que monitoraram as concentrações de CO₂. Objetiva também verificar a adequação dos níveis encontrados a parâmetros normativos e a questões relativas ao desempenho do ambiente ou dos estudantes, e possíveis prejuízos ao processo de ensino e aprendizagem.

Fundamentação

No meio ambiente, há 300 anos, aproximadamente, a concentração de dióxido de carbono (CO₂) esteve próxima de 260 ppm. Nos últimos 100 anos, por diversos fatores, principalmente de natureza antrópica, esse patamar aumentou consideravelmente (SEINFELD; PANDIS, 2016). Atualmente, os níveis superam 400 ppm (WMO, 2016; NOWACKI; RANGEL, 2014) e, em áreas externas urbanas, podem variar entre, aproximadamente, 400 e 600 ppm (DORIZAS *et al.*, 2015; LAZOVIC *et al.*, 2015; SCHIBUOLA; TAMBANI, 2020).

Tradicionalmente, em ambientes construídos, altos níveis desse gás sinalizam baixo índice de renovação do ar interno, bem como, potencialmente, o alcance de grandes concentrações de outros poluentes. Por isso, o dióxido de carbono é considerado um indicador da qualidade do ar interior (ALMEIDA *et al.*, 2017; SATISH *et al.*, 2012).

A observação da concentração de CO₂ pode fornecer informações a respeito da ventilação do ambiente interno e da diluição dos poluentes presentes nesse local. Entretanto, em situações específicas, como no controle da transmissão do COVID-19, a concentração dos níveis de CO₂ deve ser tratada com reservas, pois não possibilita identificar o número de pessoas infectadas, bem como a quantidade de partículas virais presentes no ar (CDC, 2021).

Oriundo de fontes naturais e antrópicas, o CO₂ é resultante da atividade metabólica do organismo humano e, em espaços interiores, frequentemente alcança concentrações muito superiores às do ar externo (SCHIBUOLA; TAMBANI, 2020; TRAN *et al.*, 2015; FERREIRA; CARDOSO, 2013; DENG; LAU, 2019).

Em repouso, o volume respiratório é, em média, de 500 ml por pessoa, o que totaliza 7.500 ml/min por pessoa (WARD; WARD; LEACH, 2012). Nesta situação, o ser humano consome 250 ml/min de oxigênio e elimina 200 ml/min de dióxido de carbono, o que resulta em 12 l/h de CO₂ produzidos por indivíduo (STANFIELD, 2013).

Em salas de aula, boa parte da poluição do ar é causada pela ocupação (SCHIBUOLA; TAMBANI, 2020). Os seres humanos exalam o CO₂ ao respirarem e são considerados fontes de contaminantes (DILGUERIAN, 2005). A pesquisa de Kapalo *et al.* (2019) mostra que a geração de gás carbônico pelos estudantes sobe, gradativamente, conforme aumenta o grau de intensidade das atividades. Além disso, a geração também está relacionada à alimentação, ao peso, à altura e à idade das pessoas, bem como à temperatura ambiente (KORSAVI; MONTAZAMI; MUMOVIC, 2020; COLEY; BESTEINER, 2002).

Após algumas horas de utilização de salas de aula, mesmo que naturalmente ventiladas, a concentração de dióxido de carbono tende a crescer gradualmente até atingir picos que podem estar acima dos limites recomendados. Por isso, a taxa de renovação de ar, a densidade ocupacional da sala de aula e as taxas de geração de CO₂, bem como o comportamento adaptativo dos ocupantes, são fatores intimamente relacionados a QAI (KORSAVI; MONTAZAMI; MUMOVIC, 2020).

Com relação aos limites recomendados, várias nações possuem padrões de qualidade do ar definidos ou adotam referências internacionais. Para o CO₂, no Reino Unido e na Alemanha, a concentração média, em salas de aula, não pode ser superior a 1500 ppm. Na Finlândia e em Portugal, esse número se reduz para 1200 ppm e 1250 ppm, respectivamente (CHATZIDIAKOU; MUMOVIC; SUMMERFIELD, 2015; ALMEIDA *et al.*, 2017). Já na Dinamarca e na China, não deve ultrapassar 1000 ppm (GAO; WARGOCKI; WANG, 2014; MA; ZHAN; XU, 2019). A norma ASHRAE 62.1 – 2016 define que ambientes interiores podem alcançar 700 ppm acima do valor da concentração externa (ASHRAE, 2016). No Brasil, não obstante se tratar de uma norma para ambientes com ar-condicionado, a Resolução-RE 09 fixa a média de 1000 ppm para concentração interna de dióxido de carbono (BRASIL, 2003).

A melhoria da Qualidade do Ar Interior e, com isso, da saúde e do desempenho dos estudantes é a razão para preocupação com a ventilação em escolas (COLEY; BEISTEINER, 2002). Mesquita e Araújo (2006) ponderam que, pelo fato de a baixa renovação de ar nos ambientes internos tender a aumentar a concentração de CO₂ e a diminuir a de oxigênio, isso pode afetar a capacidade de concentração dos usuários, uma vez que, para o bom desempenho e trabalho do cérebro, são necessárias altas taxas de oxigênio, a fim de suprir a demanda causada pela atividade neural e pelo metabolismo.

Satish *et al.* (2012) fizeram um estudo em que avaliaram as respostas de seus participantes dentro de uma câmara ambiental com condições controladas de estanqueidade, temperatura e taxa de ventilação. Aplicou-se um teste de desempenho da tomada de decisão, desenvolvido para avaliar o funcionamento cognitivo complexo, com duração de 2,5 horas e com auxílio de um computador. No local houve variação das concentrações de CO₂ entre três patamares: 600, 1000 e 2500 ppm. Como resultado a pontuação média ficou entre 44 e 94% mais baixa quando os participantes foram submetidos à concentração média de 2500 ppm. As pontuações foram significativamente inferiores no maior nível de CO₂ para as variáveis: atividade básica, atividade aplicada, orientação, iniciativa, uso da informação, amplitude de abordagem e estratégia básica (SATISH *et al.*, 2012).

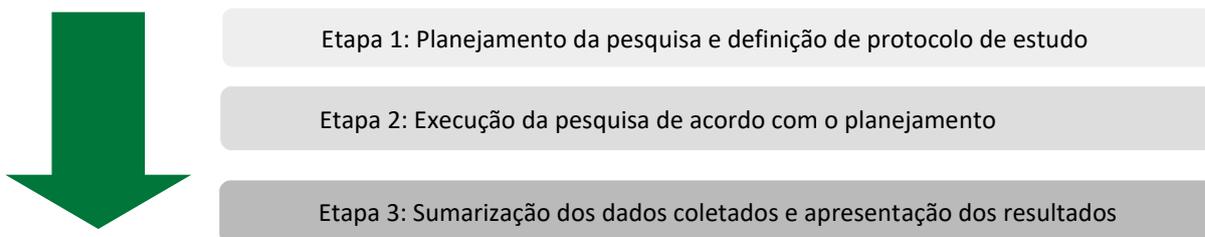
O trabalho de Coley, Greeves e Saxby (2007) concluiu que o poder de atenção e a capacidade de concentração de crianças são significativamente piorados quando são submetidas a altos níveis de CO₂ em salas de aula, o que pode trazer efeitos negativos ao processo de aprendizagem. Além disso, em pesquisa feita em Nova Iorque, Muscatiello *et al.* (2014) relacionaram significativamente as altas taxas de gás carbônico (acima de 1000 ppm) em salas de aula ao aumento de sintomas psicofisiológicos nos professores, como dor de cabeça, fadiga e dificuldade de concentração.

A pesquisa de Shendell *et al.* (2004), realizada em escolas de Washington e Idaho, nos Estados Unidos, encontrou associações entre a frequência dos alunos e a concentração de gás carbônico. Seus resultados apontam que o aumento em 1000 ppm no valor da diferença entre os níveis interno e externo correspondeu à elevação de 10 a 20% nas ausências dos estudantes.

Método

A metodologia adotada neste trabalho foi a revisão sistemática da literatura (RSL), caracterizada por se utilizar de protocolos para identificar, selecionar e avaliar criticamente trabalhos relevantes a respeito do objeto de estudo (SOUZA; RIBEIRO, 2008; GALVÃO; RICARTE, 2019). A elaboração segundo uma sistematização visa evitar vieses passíveis de ocorrer numa revisão comum (SOUZA; RIBEIRO, 2008). Esta RSL seguiu as etapas representadas na Figura 01 (abaixo) e as ações são apresentadas a seguir:

Figura 1 – Etapas da Revisão Sistemática de Literatura (RSL)



Fonte: baseado em Taype; Dezen-Kempter (2020).

Etapa 1: Planejamento da pesquisa e definição do protocolo de estudo

Com a finalidade de contextualizar como a ventilação natural tem sido adotada e avaliada em ambientes educacionais, foram identificadas pesquisas para uma análise preliminar (HESS-KOSA, 2019; SCHIBUOLA; TAMBANI, 2020; ALMEIDA *et al.*, 2017; DENG; LAU, 2019; KORSAVI; MONTAZAMI; MUMOVIC, 2020; COLEY; GREEVES; SAXBY, 2007). Tais trabalhos serviram de base para identificar palavras-chave, definir objetivos e elaborar perguntas de pesquisa que orientaram a RSL. O protocolo de pesquisa 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 do uso de ventilação natural em salas de aula e suas possíveis implicações.
Palavras-Chave	"Indoor air quality" AND school AND "natural ventilation"
Bases de Dados	CAPES, ScienceDirect
Critérios de Inclusão	Data: 2015 a 2021; Local: salas de aula; Área de pesquisa: Qualidade do Ar Interior; Tipo de ventilação: natural; Método de coleta de dados: monitoramento da qualidade do ar, feito no local; Monitoramento das concentrações de dióxido de carbono (CO ₂) em salas de aula;
Critérios de Exclusão	Conforme Figura 2
Questões de Pesquisa	Salas de aula naturalmente ventiladas, seja por janelas, seja por outros elementos, garantem por si só ambientes com qualidade do ar adequada ao ensino e à aprendizagem? Quais são os problemas em relação à ventilação natural, no que se refere ao dióxido de carbono e a outros poluentes, já abordados na literatura?

Fonte: os autores.

Etapa 2: Execução da pesquisa

A segunda etapa consistiu numa busca abrangente por trabalhos publicados em periódicos internacionais, revisados por pares, com foco em pesquisas que fizeram levantamentos de campo especificamente em salas de aula naturalmente ventiladas durante o período de ocupação. As fontes pesquisadas foram o Portal de Periódicos da CAPES, bem como a base de dados ScienceDirect, com uso de acesso remoto ao conteúdo assinado por meio da Comunidade Acadêmica Federada (CAFe). Recorreu-se à combinação de termos em inglês, com base nas principais palavras-chave recorrentes

na literatura e relacionadas ao objetivo do trabalho: *indoor air quality, school, natural ventilation*. Considerou-se um recorte de trabalhos mais recentes, de 2015 a 2021, a fim de se obter atualidade dos dados.

Excluíram-se trabalhos que apontavam para outros usos, como residencial, comercial, de serviço: casas, apartamentos, escritórios, hospitais, templos etc. Não foram selecionadas pesquisas a respeito de ambientes que utilizavam ventilação mecânica e/ou sistemas de ar-condicionado ou que sofreram a interferência de equipamentos eletromecânicos. Também não foram incluídas abordagens relacionadas exclusivamente a conforto térmico ou eficiência energética. Excluíram-se, ainda, artigos que investigaram outros parâmetros da qualidade do ar sem incluir o monitoramento do CO₂, e pesquisas relativas à modelagem, simulação numérica, computacional, protótipos, realidade virtual, BIM, entre outras situações desta natureza, dando-se preferência a estudos de monitoramento de campo para atender ao objetivo desta revisão, que é de levantar dados reais, obtidos durante a ocupação das salas de aula que utilizaram ventilação natural por janelas e portas, bem como sua relação com a ocupação e a utilização de aberturas pelos usuários.

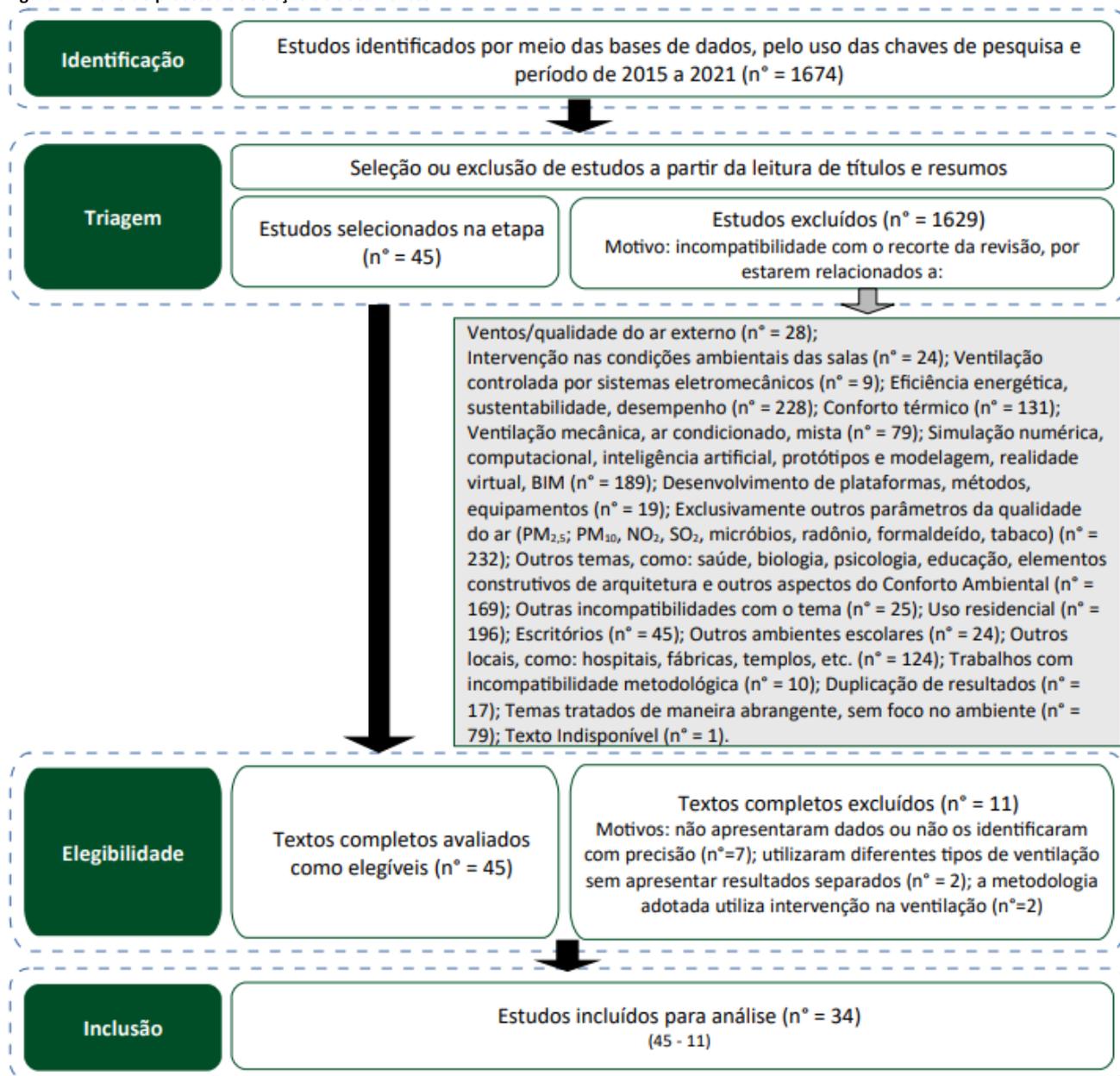
A identificação inicial, a partir das palavras-chave, resultou em 488 e 1186 trabalhos nas bases CAPES e *ScienceDirect*, respectivamente. Após a leitura dos títulos e resumos de todos, foram selecionados os trabalhos que relacionavam as concentrações de dióxido de carbono com questões de desempenho escolar e de saúde dos estudantes ou professores, incluindo o comportamento adaptativo dos usuários em salas de aula naturalmente ventiladas, principalmente no que condiz à relação com a densidade ocupacional, ao uso das esquadrias e à infiltração de poluentes externos. Sendo assim, obteve-se um total de 34 artigos, conforme representado pela Figura 02.

Etapa 3: Sumarização dos dados coletados 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, à localização, ao número de salas ou escolas e ao período de monitoramento. Além disso, de acordo com os dados disponibilizados, registraram-se a densidade ocupacional média dos ambientes, as concentrações mínima, média e máxima de dióxido de carbono, a taxa de ventilação e as conclusões a que chegaram os autores dos artigos analisados.

Nos trabalhos selecionados, os respectivos autores utilizaram referências normativas variadas. Desta forma, em cada artigo, a análise dos resultados de concentração de poluentes está relacionada aos parâmetros do local de origem da pesquisa. Para essa RSL, adotou-se a concentração média de 1000 ppm (BRASIL, 2003) como referência para análise do panorama geral dos resultados sem, entretanto, desconsiderar o parecer dos autores das pesquisas selecionadas.

Figura 2 – Fluxo do processo de seleção de documentos



Fonte: elaborado pelos autores, baseado em Taype e Dezen-Kempter (2020).

Resultados e discussão

A seguir, são apresentados os resultados da análise de pesquisas realizadas em escolas naturalmente ventiladas. As publicações compararam as concentrações medidas de dióxido de carbono com os patamares de referência de acordo com o local de origem da pesquisa. Além disso, esses artigos relacionam esses valores a fatores como a densidade de ocupação, responsável pela geração de gás carbônico nos ambientes internos, bem como aos períodos de abertura de janelas durante as aulas. Apontam, também, os efeitos aos níveis de CO₂ em virtude das aberturas nos intervalos de aula.

Alguns trabalhos analisados nesta RSL correlacionaram altos níveis de CO₂ a sentimentos de fadiga, dor de cabeça, falta de atenção (BOGDANOVICA; ZEMITIS; BOGDANOVICS, 2020), além da redução do desempenho no aprendizado (GABRIEL et al., 2021).

A pesquisa de Mainka e Zajusk-Zubek (2015) foi realizada em escolas naturalmente ventiladas da Polônia. Verificou-se que, em 91% do tempo, o ar apresentou baixa qualidade, correspondendo à classificação IDA4, atribuída quando a diferença de concentração de CO₂ entre o interior e o exterior é maior que 1000 ppm, de acordo com a norma PN-EN 13779/2008 (CEN, 2008), que é o parâmetro polonês. Relatou-se que essa situação foi frequente durante o monitoramento, o que indica baixa eficiência de ventilação. Sugere-se a aplicação de um indicador integrado para classificar os locais com base na QAI para estimar o impacto nas atividades dos alunos e auxiliar ações de gestão.

Lazovic *et al.* (2016) encontraram níveis superiores a 1000 ppm regularmente durante os períodos de aula, na Sérvia, com média de 1396 ppm no inverno e 1009 ppm na primavera. As máximas chegaram a, aproximadamente, 3700 ppm. Os autores relacionaram os altos valores às baixas taxas de ventilação, que foram inferiores a 7 L/p x pessoa, valor recomendado pelas normas de seu país. Almeida *et al.* (2017) monitoraram, em diversas salas em Portugal, médias superiores a 1000 ppm e máximas que ultrapassaram a marca de 3000 ppm em oito escolas, com episódios ainda acima de 4000 ppm em outras quatro.

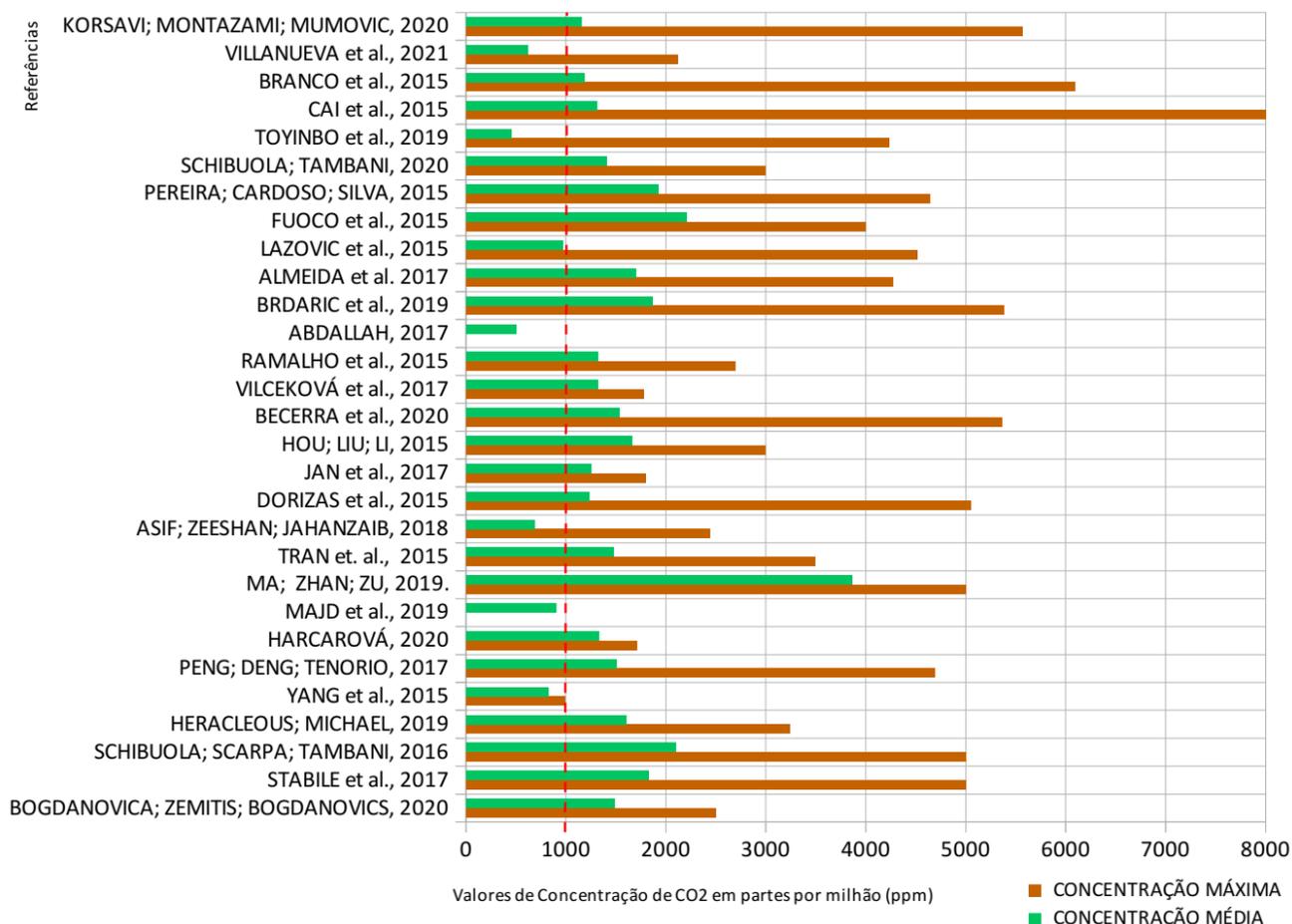
Resultados semelhantes foram encontrados em pesquisas anteriores, como a de Mumovic *et al.* (2009), na Inglaterra, onde o monitoramento de 14 salas apontou que 12 obtiveram médias superiores a 1000 ppm (as outras duas, acima de 930 ppm), com máximas superiores a 2500 ppm (em 12 salas) e duas delas alcançaram 4016 ppm e 5567 ppm. O excesso de dióxido de carbono tem sido frequente em salas de aula naturalmente ventiladas, e esses resultados estão em consonância com os achados de Fisk (2017) e de Stabile *et al.* (2017).

O levantamento de Ferreira e Cardoso (2013), realizado em Portugal, revelou concentrações de poluentes acima das recomendações nacionais em 84% das escolas analisadas. Para o dióxido de carbono, obtiveram médias significativamente mais altas nas estações outono e inverno, em comparação com a primavera e o verão. Isso se deve ao fato de que, no outono e no inverno, os ambientes eram mantidos fechados por muito tempo para evitar perda de calor, uma vez que os edifícios eram antigos e não climatizados, em sua maioria. Em todas as estações, as médias, nos ambientes internos, foram bastante superiores aos valores externos. Algumas salas de aula chegaram a conter níveis três vezes acima do recomendado. As autoras concluíram que entre todos os poluentes (ozônio, material particulado, monóxido de carbono, formaldeído, dióxido de enxofre e dióxido de nitrogênio), o CO₂ foi o parâmetro que apresentou resultados significativos para a saúde dos estudantes.

Diversos trabalhos, em diferentes países, relataram concentrações de dióxido de carbono acima dos parâmetros de qualidade, como: na Espanha (BECERRA *et al.*, 2020); na Eslováquia (VILCEKOVÁ *et al.*, 2017); na França (RAMALHO *et al.*, 2015); na Índia (JAN *et al.*, 2017); na Croácia (BRDARIĆ *et al.*, 2019); entre outros destacados na Figura 3.

A pesquisa de Schibuola, Scarpa e Tambani (2016), feita em escolas da Itália, apontou concentrações superiores a 1500 ppm em 78,9% do tempo, na primeira semana de medições, e em 76% do tempo, na segunda. As salas de aula pesquisadas possuíam densidade ocupacional elevada, em média de 1,95 m²/p. Numa delas, onde foi verificada a prática de abrir janelas somente durante os intervalos, obteve-se concentração média de 2566 ppm de gás carbônico e máxima acima de 5000 ppm. Em contrapartida, outro ambiente, em que se utilizaram aberturas em períodos curtos e frequentes ao longo do dia, apresentou média próxima de 1500 ppm, sendo que, na metade do tempo, foi inferior a esse patamar.

Figura 3 – Concentrações médias e máximas de CO₂ em salas de aula naturalmente ventiladas durante períodos de ocupação (ensino)



Fonte: os autores.

O estudo de Korsavi, Montazami e Mumovic (2020), feito no Reino Unido, apresentou médias diárias de CO₂ superiores a 1000 ppm em 55% dos ambientes e excederam 1500 ppm em 10% dos casos. Este trabalho focou na abertura de janelas como principal comportamento adaptativo no intuito de prover adequada ventilação e considerou que 44% das salas apresentavam alto potencial para esta boa prática, pois permitiam a renovação de ar e a diminuição da concentração de gás carbônico. No entanto, percebeu-se que a utilização das janelas pelos professores foi influenciada, principalmente, pelo desejo de se evitar o desconforto térmico e não pela percepção de uma piora na qualidade do ar (KORSAVI; MONTAZAMI; MUMOVIC, 2020).

Durante intervalos curtos (20 min), devido à abertura das esquadrias, houve diminuição de 8 ppm/min e, em intervalos maiores (50 min), conseguiu-se um decréscimo de 9 ppm/min. Apesar desses efeitos, sugere-se que esse procedimento seja insuficiente para reduzir a concentração de CO₂ a ponto de atender aos limites normativos até o fim das atividades do dia. Os autores observaram, também, que a densidade ocupacional, medida em m²/p, acarretou alterações nos níveis de dióxido de carbono uma vez que maiores ocupações potencialmente influenciaram no aumento das médias desse gás (KORSAVI; MONTAZAMI; MUMOVIC, 2020).

Esses dados são condizentes com as descobertas de Heracleous e Michael (2019) no Chipre. Segundo os autores, o comportamento de abrir e fechar as janelas foi influenciado pela preocupação com o conforto térmico, e não com as questões de salubridade. Dado importante, visto que a preocupação com o conforto térmico é preponderante e pode afetar a ventilação higiênica, que independe das condições

climáticas e deve ser permanente. Percebeu-se que, em períodos de menor densidade ocupacional, as concentrações ficaram abaixo dos parâmetros normativos, ao passo que, nos momentos de ocupação máxima, os níveis ultrapassaram 1000 ppm em poucos minutos. Neste estudo, intervalos de 20 minutos foram eficazes para reduzir a quantidade de gás carbônico a valores abaixo dos de referência.

Esses exemplos são reforçados pela pesquisa de Peng, Deng e Tenorio (2017) no norte da China. Constatou-se um rápido aumento dos níveis de CO₂ no início do dia letivo, após a chegada dos alunos, bem como a redução durante os intervalos, chegando a concentrações de 500 a 700 ppm. Registrou-se máxima de 4692 ppm, atribuída à ação de manter as janelas fechadas durante as aulas. Já no trabalho de Bogdanovica, Zemitis e Bogdanovics (2020), os resultados mostraram que intervalos curtos (10 min) não foram suficientes para ventilar adequadamente a sala de aula.

Tran *et al.* (2015) monitoraram duas salas de aula na França: uma, localizada em zona industrial, e outra, em região urbanizada. Em seu trabalho, relacionaram-se os altos níveis médios de gás carbônico (1475 ppm; 1485 ppm) às baixas taxas de ventilação (médias de 10,08 m³/h x pessoa e 7,92 m³/h x pessoa) durante os horários de aula e obtiveram-se valores abaixo do parâmetro da norma ASHRAE 62.1 (ASHRAE, 2016), que é de 18 m³/h x pessoa. Durante os intervalos, as trocas de ar aumentaram, mesmo com as salas fechadas, pois as salas eram frequentemente (e aleatoriamente) abertas. Mesmo nesses momentos de abertura ao longo das pausas, as atividades eram retomadas no período vespertino sob concentrações ainda acima do parâmetro de 1000 ppm.

Uma pesquisa desenvolvida em Shenyang, na China, apontou taxas de ventilação muito baixas (médias de 1,291, 1,741 e 1,925 L/p x pessoa) durante o período ocupado (de 32 a 38 alunos e de 1,45 a 1,65 m²/p) e, ao mesmo tempo, altas concentrações de CO₂ em três salas, chegando a máximas de 5000, 4982 e 3736 ppm (MA; ZHAN; XU, 2019). Em 99% do tempo, a taxa de ventilação foi insuficiente (abaixo do valor de referência da China, que é de 5,56 L/p x pessoa). Neste trabalho, os três ambientes superaram a marca de 1080 ppm em 93,94%, 99,05% e 100% dos valores registrados, bem como o nível de 2500 ppm em 50%, 48% e 60% das vezes. Os valores significativamente altos das concentrações de gás carbônico foram relacionados à baixa ventilação e à alta quantidade de alunos em sala de aula, bem como à diminuição dos níveis do gás foi associada ao tempo de abertura das janelas (MA; ZHAN; XU, 2019).

A associação entre a quantidade de pessoas e as altas concentrações de CO₂ também foi verificada no trabalho de Stabile *et al.* (2017), na Itália, onde registraram-se médias de 1503 a 3130 ppm e máximas acima de 5000 ppm. Nesse local, a densidade ocupacional média foi de 2,58 m²/p. Outra pesquisa, realizada em Pequim, China, além de reforçar a relação significativa entre a quantidade de dióxido de carbono e a utilização das esquadrias, revelou que níveis desse gás, acima de 1080 ppm (ASHRAE, 2016), ocorreram quando as salas alcançavam a lotação de 25 e 30 alunos e taxas de ventilação menores que 1 L/p x pessoa (HOU; LIU; LI, 2015).

O oposto foi constatado por Yang *et al.* (2015), em Seul (Coreia), onde a baixa ocupação, de 3,02 m²/p, e a manutenção de janelas continuamente abertas, durante o horário escolar, foi suficiente para manter a concentração abaixo de 1000 ppm, num levantamento que envolveu 116 escolas. O mesmo ocorreu na pesquisa de Toyinbo *et al.* (2019), ao revelar que a ventilação cruzada constante resultou em baixa concentração média de CO₂.

Fuoco *et al.* (2015), em seu estudo desenvolvido em Cassino, Itália, concluíram que o mecanismo de ventilação não foi eficiente. Neste caso, mesmo que o arejamento tenha

ocorrido em longos períodos, foi insuficiente para manter a boa qualidade do ar ao longo do dia. Em certos momentos, constatou-se que o dióxido de carbono atingiu altos níveis enquanto as janelas foram mantidas fechadas. Na primavera, quando as esquadrias permaneceram abertas por mais tempo, houve diminuição de CO₂ (908 ppm, contra 2206 ppm no inverno, em média), porém, com a desvantagem do aumento da concentração de material particulado nos ambientes internos.

Diversos trabalhos apontaram que a poluição do ar exterior, no que se refere, principalmente, ao monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrogênio (NO₂) e material particulado, presentes no entorno urbano, foi responsável pelo aumento das concentrações de contaminantes em salas de aula durante o uso da ventilação natural; dentre eles, os realizados em: Baltimore, Estados Unidos (MAJD *et al.*, 2019); Índia (JAN *et al.*, 2017); entre outros destacados a seguir.

Stabile *et al.* (2017) constataram que a qualidade do ar interior foi agravada pelo aumento de partículas ultrafinas (MP 1, com $\varnothing < 1,0 \mu\text{m}$) após longas aberturas de janelas. O mesmo resultado foi observado nas pesquisas de Ahmed, Kumar e Mottet (2021) ao detectarem altos níveis de particulados finos (MP 2,5, com $\varnothing < 2,5 \mu\text{m}$) devido ao uso prolongado da ventilação natural em áreas de alta poluição (local não relatado). Peng, Deng e Tenorio (2017), na China, apontaram que o ar externo poluído influenciou negativamente a qualidade do ar interno das salas, em virtude da entrada pelas aberturas e infiltrações, o que, em conjunto com as repetidas re-suspensões causadas pelas atividades de alunos e professores, elevou o número de particulados a valores acima dos padrões da OMS (WHO, 2005) e padrões nacionais chineses. Toyinbo *et al.* (2019) revelaram que, apesar da concentração média de 452,8 ppm de CO₂ obtida em virtude da ventilação constante, o uso de geradores à gasolina, em locais próximos às salas de aula, elevou os níveis de monóxido de carbono no ar interno, que chegou ao máximo de 23 ppm em um dos ambientes.

Becerra *et al.* (2020), em seu trabalho efetuado em Sevilha, Espanha, relataram maiores níveis de particulados nas salas de aula de uma escola localizada próximo de grande avenida, apesar de terem ficado abaixo das diretrizes de qualidade. Constatou-se que os picos de concentração estiveram relacionados, também, às atividades internas, à re-suspensão de poeira e ao uso do giz no quadro-negro. Mesmo com níveis baixos de CO₂ (média de 353,09 ppm e máxima de 571,23 ppm) devido à ventilação natural adequada, Chithra e Shiva Nagendra (2012) também identificaram, em Chennai, Índia, a associação entre as atividades internas e a movimentação dos alunos como causadores das altas médias de material particulado grosso (MP 10 – diâmetro menor que 10 μm). Os valores chegaram a 266 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ no inverno e a 249 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ no verão, em períodos ocupados, contra os respectivos 104 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e 73 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ em períodos desocupados. O trabalho de Jan *et al.* (2017) reforça estes resultados ao revelar que as concentrações de particulados chegaram a ser dez vezes maiores que os parâmetros da OMS (WHO, 2005). Isso se deu tanto pelo uso de giz nas salas de aula e pela re-suspensão causada pelas atividades internas, quanto pelas contribuições da poluição veicular, das atividades de construção e da queima de biomassa no entorno do local.

Já no estudo de Dorizas *et al.* (2015), embora seu objeto de estudo tenha apresentado taxas de ventilação em geral satisfatórias, mediram-se altos níveis de particulados nos períodos de aula, que, neste caso, foram relacionados a fontes internas.

Em escolas predominantemente urbanas, Ferreira e Cardoso (2013) detectaram associação estatisticamente significativa entre altos níveis de gás carbônico e a falta de concentração dos estudantes, assim como conclusões obtidas em outros trabalhos de Coley, Greeves e Saxby (2007) e de Muscatiello *et al.* (2014). Identificou-se que, apesar

de ocorrer, durante as aulas, a abertura de janelas, não foi possível abri-las em alguns momentos devido a ruídos, chuva ou outras situações. Por fim, estas pesquisas ressaltam a importância de sistemas de renovação de ar eficazes e a alteração de comportamentos concernentes ao uso das esquadrias (FERREIRA; CARDOSO, 2013). Interferências do entorno urbano e do meio ambiente, na forma de barulho e de condições climáticas (temperatura, chuva), também foram motivo para a não abertura das janelas, conforme aponta o estudo de Brdarić *et al.* (2019). Ao que parece, estes fatores possuem maior influência na utilização das esquadrias do que a percepção da qualidade do ar.

Num estudo em escolas perto de Veneza, na Itália, foram encontrados valores extremamente elevados na concentração de CO₂, cuja causa foi relacionada à abertura insuficiente das janelas (DE GIULI; DA POS; DE CARLI, 2012). Entre as instituições pesquisadas, observou-se bastante diversidade na utilização das esquadrias. Os autores pontuam que 15 salas de aula se enquadraram na categoria IV da norma EN15251 (CEN, 2007), com valores maiores que 800 ppm de diferença em relação à concentração externa de dióxido de carbono. Dentre as demais, nove salas ficaram na categoria III (diferença <800 ppm), duas na categoria II (diferença < 500 ppm) e dois ambientes na categoria I, com diferença <350 ppm (DE GIULI; DA POS; DE CARLI, 2012). Nesse levantamento, apesar dos valores acima dos parâmetros de qualidade na maioria das salas, uma porcentagem considerável dos usuários não reclamou da qualidade do ar interno. Em uma das escolas, 24% das respostas revelaram que os professores abriam as esquadrias durante os intervalos, o que resultou em concentrações menores de dióxido de carbono. O trabalho concluiu que os estudantes aceitaram mais passivamente o controle da sala de aula, que ficou sob a responsabilidade dos professores e, para evitar um julgamento subjetivo e aumentar a eficiência, sugeriu-se um sistema de gestão predial para garantir boa qualidade ambiental interna (DE GIULI; DA POS; DE CARLI, 2012).

O trabalho de Ma, Zhan e Xu (2019) revelou, por meio de questionários aplicados, que o ar foi considerado fresco (renovado) numa significativa maioria dos votos (68,4%, 71,9% e 69,4%), apesar das altas concentrações de gás carbônico e das baixas taxas de ventilação. Em virtude da discordância entre a medição e as respostas, os autores sugerem a adaptabilidade dos usuários ao ar ambiente. Por isso, o fato da maioria julgá-lo satisfatório diminuiu a possibilidade de utilização das esquadrias. As autoras concluíram que o controle do ambiente não deve ser baseado no julgamento subjetivo dos usuários.

Essas conclusões parecem reforçar os resultados da pesquisa de Heracleous e Michael (2019), no Chipre, por meio da qual concluiu-se que os alunos não foram capazes de perceber a má qualidade ambiental interna, exceto pelo quesito conforto térmico, apesar dos altos níveis de CO₂ registrados. Esta particularidade foi apontada também por Korsavi, Montazami e Mumovic (2020).

Outra pesquisa apresenta resultados que reforçam essas evidências: o levantamento feito em Beja, Portugal, com monitoramento de parâmetros físicos e uso de questionários (PEREIRA *et al.*, 2014). Nele, constatou-se que, mesmo com concentrações inadequadas de gás carbônico (média de 1446,5 ppm e máxima de 7645 ppm), os estudantes não conseguiram perceber a má qualidade do ar e se adaptaram à exposição do ambiente (PEREIRA *et al.*, 2014). Já o questionário aplicado por Pereira, Cardoso e Silva (2015), mesmo com níveis inadequados de CO₂ (média de 1927 ppm e máxima de 4640 ppm), revelou que não houve um consenso entre os estudantes: 37,5% dos usuários entendeu que a qualidade do ar era ruim ou indefinida, 20,83% que estava boa com aspectos negativos e, por fim, 41,67% a considerou boa ou ótima.

Percebe-se, então, que diversos trabalhos expõem certa incerteza do julgamento subjetivo da qualidade do ar interno, pois apesar de não estar de acordo com os parâmetros de referência, os usuários: não chegam a um consenso sobre ela (PEREIRA; CARDOSO; SILVA, 2015); não reclamaram (DE GIULI; DA PÓS; DE CARLI, 2012), não a julgaram insatisfatória (MA; ZHAN; XU, 2019); não a perceberam (HERACLEOUS; MICHAEL, 2019; KORSAVI; MONTAZAMI; MUMOVIC, 2020; PEREIRA *et al.*, 2014), por motivo de adaptação ou por outro motivo.

Outro fato identificado ainda por Heracleous e Michael (2019) foi que, após o horário das aulas, os ambientes que permaneceram vazios e fechados demoraram de 9 a 12 horas para obter redução significativa na concentração de CO₂. De forma semelhante, um trabalho produzido na Itália também identificou que, em salas de aula fechadas após a ocupação, os níveis desse gás permaneceram altos por horas e, até a manhã seguinte, ainda com 800 ppm (SCHIBUOLA; SCARPA; TAMBANI, 2016). Isso sugere a importância da adoção da ventilação noturna como boa prática em salas de aula, de maneira a obter-se o reequilíbrio entre as concentrações interna e externa de dióxido de carbono.

De acordo com o exposto, no Apêndice A, apresentam-se os principais dados coletados.

Conclusão

Segundo resultados, é possível afirmar que os estudantes podem estar submetidos a suprimentos insuficientes de ar fresco em salas de aula. Além de indicar a presença de poluentes que podem contaminar os usuários via inalação, com decorrentes danos à saúde, altas concentrações de dióxido de carbono por si só estão relacionadas a dificuldades de concentração e prejuízos ao desempenho. A qualidade do ar interior em salas de aula pode afetar os resultados do processo de aprendizagem e deve ser tratada com prioridade na gestão de espaços escolares.

A partir dos trabalhos analisados, observou-se que, frequentemente, as concentrações de CO₂ têm atingido médias superiores a 1000 ppm e máximas múltiplas vezes maiores. Encontraram-se evidências de que, mesmo em salas de aula naturalmente ventiladas, a concentração interna desse gás pode apresentar forte aumento, o que se deve principalmente às baixas taxas de ventilação e à baixa eficiência da renovação de ar.

Além disso, contribuiu para níveis altos de dióxido de carbono, a maior densidade ocupacional praticada em salas de aula, havendo relação significativa entre a quantidade de alunos e, por conseguinte, a maior geração de CO₂.

Quando ocorreu o uso contínuo de janelas abertas foi, frequentemente, capaz de manter os níveis de gás carbônico abaixo dos parâmetros de qualidade. Entretanto, por uma questão comportamental referente a não abertura, o potencial de ventilação nem sempre foi aproveitado. Apesar dos níveis de CO₂ relacionarem-se significativamente à renovação do ar, às áreas de abertura e à quantidade de pessoas, o comportamento adaptativo, traduzido nos hábitos de utilização das esquadrias, também impacta na concentração e na qualidade do ar das salas de aula. O controle do uso das janelas exercido pelos professores foi influenciado por fatores de outra ordem, como o desejo de conforto térmico ou necessidade de evitar ruído ou chuva.

Na maioria dos casos, a abertura de esquadrias durante os intervalos representou melhoria nas concentrações de CO₂. Porém, isso se mostrou ineficiente devido à irregularidade da ocorrência ou ao fato de que, por vezes, as pausas não foram suficientemente longas para obter reduções a níveis aceitáveis de maneira duradoura.

As pesquisas evidenciaram que o julgamento subjetivo é insuficiente para detecção da má qualidade do ar interior devido à adaptabilidade ao ambiente. Por isso, depender do

arbítrio dos usuários para a ação de abertura de janelas torna difícil o gerenciamento da QAI com eficiência devido à imprecisão. Infere-se que estratégias arquitetônicas adequadas à garantia da eficácia das trocas de ar nesses ambientes são de suma importância. Sugere-se a adoção de equipamentos de auxílio ao monitoramento da qualidade do ar em tempo real, de maneira que forneçam dados exatos e auxiliem o professor na utilização adequada das esquadrias. Outra possibilidade é a utilização de sistemas de controle computadorizados e esquadrias equipadas com acionamento automático, devido à complexidade da consideração simultânea de diferentes fatores como a manutenção do conforto térmico, a proteção contra níveis elevados de ruído provindos de outros ambientes ou mesmo de outros parâmetros da qualidade do ar para além do CO₂. Tais sugestões devem ser temas de investigações futuras.

Baseado nas evidências encontradas, entende-se que não se trata de apenas flexibilizar a utilização de janelas aos alunos, mas sim de haver mecanismos de mensuração da qualidade do ar e de auxílio no controle da frequência de aberturas.

Outro fato notável foi a contribuição do ar externo para a poluição interior das salas de aula, principalmente em áreas urbanas. A permanência da abertura das janelas, em alguns casos, aumentou os contaminantes provindos do ar externo poluído, apesar da redução dos níveis de dióxido de carbono. Entre os poluentes, são relatados a infiltração dos particulados finos e ultrafinos, monóxido de carbono e dióxido de nitrogênio.

Desta forma, é possível que a adoção do CO₂ como indicador de qualidade do ar possua limitações, pois há casos em que o incremento da ventilação natural permite a diluição de poluentes, ao passo que facilita a entrada de poluentes de fontes externas, bem como limita a detecção de contaminantes de origem interna.

Em função da pandemia de COVID-19, o tema da qualidade do ar interno ganhou importância em função do papel da ventilação natural na redução da concentração de contaminantes, principalmente em ambientes escolares, onde há grande densidade ocupacional.

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), pela concessão de afastamento ao servidor Saulo Vieira de Oliveira Silva. À professora Heloisa Machado Tozzi, pela colaboração na revisão de Língua Portuguesa. À professora Valéria S. Alves Fadini, pela colaboração na revisão do *abstract*.

Referências

- AAP. AMERICAN ACADEMY OF PEDIATRICS. **COVID-19 Guidance for Safe Schools and Promotion of In-Person Learning**. 25 Mar. 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: 28 jun. 2021.
- ABDALLAH, Amr Sayed Hassan. Thermal Monitoring and Evaluation of Indoor CO₂ Concentration in Classrooms of Two Primary Governmental Schools in New Assiut City, Egypt. **Procedia Engineering**, v. 205, p. 1093-1099, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.176>.
- AHMED, Tariq; KUMAR, Prashant; MOTTET, Laetitia. Natural ventilation in warm climates: The challenges of thermal comfort, heatwave resilience and indoor air quality. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 138, Mar. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110669>.

ALMEIDA, Ricardo M. S. F.; PINTO, Manuel; PINHO, Paulo G.; LEMOS, Luís T. Natural ventilation and indoor air quality in educational buildings: experimental assessment and improvement strategies. **Energy Efficiency**, v. 10, p. 839-854, Oct. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12053-016-9485-0>.

AMARAL, Manuel António Pinto da Silva. **Sistemas de Ventilação Natural e Mistos em Edifícios de Habitação**. 2008. 355 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2008. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/11015/2/Texto%20integral.pdf>. Acesso em: 14 set. 2021.

ANDERSON, H. R. Air pollution and mortality: A history. **Atmospheric Environment**, v. 43, n. 1, p. 142-152, Jan. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.026>.

ASHRAE. AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ANSI/ASHRAE Standard 62.1 – 2016: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality**. 2016. 60 p. Disponível em: <https://www.ashrae.org/technical-resources/standards-and-guidelines/read-only-versions-of-ashrae-standards>. Acesso em: 10 out. 2020.

ASIF, Ayesha; ZEESHAN, Muhammad; JAHANZAIB, Muhammad. Indoor temperature, relative humidity and CO₂ levels assessment in academic buildings with different heating, ventilation and air-conditioning systems. **Building and Environment**, v.133, p.83-90, Apr. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.01.042>.

BECERRA, Jose A.; LIZANA, Jesus; GIL, Maite; BARRIOS-PADURA, Angela; BLONDEAU, Patrice; CHACARTEHUI, Ricardo. 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>.

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, 6099, Nov. 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13226099>.

BRANCO, P. T. B. S.; ALVIM-FERRAZ, M. C. M.; MARTINS, F. G.; SOUSA, S. I. V. Children exposure to indoor air in urban nurseries - part I: CO₂ and comfort assessment. **Environmental Research**, v. 140, p. 1-9, July 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envres.2015.03.007>.

BRASIL. Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). **Resolução-RE nº09, de 16 de janeiro de 2003**. Brasília, 2003. Determina a publicação de Orientação Técnica elaborada por Grupo Técnico Assessor, sobre Padrões Referenciais de Qualidade do Ar Interior, em ambientes climatizados artificialmente de uso público e coletivo. Disponível em: https://www.saude.mg.gov.br/images/documentos/RES_RE_09.pdf. Acesso em: 12 fev. 2020.

BRASIL. Ministério da Saúde. **O que é a Covid-19?** Saiba quais são as características gerais da doença causada pelo novo coronavírus, a Covid-19. Brasília: Ministério da Saúde, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/saude/pt-br/coronavirus/o-que-e-o-coronavirus>. Acesso em: 10 ago. 2021.

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

BRICKUS, Leila S. R.; AQUINO NETO, Francisco R. A qualidade do ar de interiores e a química. **Química Nova**, v.22, n.1, p.65-74, fev. 1999. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40421999000100013>.

CAI, Wei; YOSHINO, Hiroshi; ZHU, Shengwei; NAOIKIKAGI, Yanagi; HASEGAWA, Kenichi. Investigation of Microclimate and Air Pollution in the Classrooms of a Primary School in Wuhan. **Procedia Engineering**, v. 121, p. 415-422, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.1087>.

CDC. CENTER FOR DISEASE CONTROL AND PREVENTION. **Ventilation in Buildings**. 02 jun. 2021. Atlanta: CDC, 2021. Disponível em: <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/community/ventilation.html>. Acesso em: 28 jun. 2021.

CEN. COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **EN 15251**: Indoor environmental parameters for assessment of energy performance of buildings, addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. Bruxelles: CEN, 2007.

CEN. COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. POLISH-EUROPEAN STANDARD. **PN-EN 13779: Ventilation for Non-residential Buildings**. Performance Requirements for Ventilation and Room conditioning Systems. Warsaw: CEN, 2008.

CHATZIDIAKOU, Lia; MUMOVIC, Dejan; SUMMERFIELD, Alex. Is CO₂ a good proxy for indoor air quality in classrooms? Part I: The interrelationships between thermal conditions, CO₂ levels, ventilation rates and selected indoor pollutants. **Building Services Engineering Research & Technology**, v. 36, n. 2, p.129-161, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1177/0143624414566244>.

CHITHRA, V. S.; SHIVA NAGENDRA, S. M. Indoor air quality in naturally ventilated school building located close to an urban roadway in Chennai, India. **Building and Environment**, v. 54, p. 159-167, Aug. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.01.016>.

COLEY, David A.; BEISTEINER, Alexander. Carbon Dioxide Levels and Ventilation Rates in Schools. **International Journal of Ventilation**, v. 1, n. 1, p. 45-52, Mar. 2002. DOI: <https://doi.org/10.1080/14733315.2002.11683621>.

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, Mar. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1080/14733315.2007.11683770>.

DE GIULI, Valeria; DA POS, Osvaldo; DE CARLI, Michele. Indoor environmental quality and pupil perception in Italian primary schools. **Building and Environment**, v. 56, p.335-345, Oct. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.03.024>.

DENG, Shihan; LAU, Josephine. Seasonal variations of indoor air quality and thermal conditions and their correlations in 220 classrooms in the Midwestern United States. **Building and Environment**, 157, 79–88, June 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.04.038>.

DILGUERIAN, Mirian G. **Síndrome do edifício doente**: responsabilidade civil da municipalidade diante do Estatuto da Cidade. São Paulo: Editora Letras Jurídicas, 2005. 272 p.

DORIZAS, P. V.; ASSIMAKOPOULOS, M.-N.; HELMIS, C.; SANTAMOURIS, M. An integrated evaluation study of the ventilation rate, the exposure and the indoor air quality in naturally ventilated classrooms in the Mediterranean region during spring. **Science of the Total Environment**, v. 502, p.557-570, Jan. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.09.060>.

DUARTE, Rogério; GOMES, Maria da Glória; RODRIGUES, António Moret. Classroom ventilation with manual opening of windows: Findings from a two-year-long experimental study of a Portuguese secondary school. **Building and Environment**, v. 124, p. 118-129, Nov. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.07.041>.

EPA. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USA). **Why Indoor Air Quality is Important to Schools**. Washington, DC: EPA, 2018. Disponível em: <https://www.epa.gov/iaq-schools/why-indoor-air-quality-important-schools>. Acesso em: 20 jun. 2020.

FERREIRA, Ana; CARDOSO, Massano. Qualidade do ar e saúde em escolas localizadas em freguesias predominantemente urbanas, rurais e medianamente urbanas. **Hygeia - Revista Brasileira de Geografia Médica e da Saúde**, v.9, n.17, p.95-115, dez. 2013. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/hygeia/article/view/22503>. Acesso em: 16 nov. 2020.

FISK, W. J. The ventilation problem in schools: literature review. **Indoor Air**, v. 27, n. 6, p. 1039-1051, Nov. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1111/ina.12403>.

FUOCO, Fernanda Carmen; STABILE, Luca; BUONANNO, Giorgio; TRASSIERA, Concepcion Vargas; MASSIMO, Angelamaria; RUSSI, Aldo; MAZAHARI, Mandana; MORAWSKA, Lidia; ANDRADE, Alexandro. Indoor air quality in naturally ventilated italian classrooms. **Atmosphere**, v. 6, n. 11, p. 1652-1675, Nov. 2015. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos6111652>.

GABRIEL, Marta Fonseca; PACIÊNCIA, Inês; FELGUEIRAS, Fátima; RUFO, João Cavaleiro; MENDES, Francisca Castro; FARRAIA, Mariana; MOURÃO, Zenaida; MOREIRA, André; FERNANDES, Eduardo de Oliveira. Environmental quality in primary schools and related health effects in children. An overview of assessments conducted in the Northern Portugal. **Energy & Buildings**, v. 250, 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, Sept. 2019. DOI: <https://doi.org/10.21728/logeion.2019v6n1.p57-73>.

GAO, Jie; WARGOCKI, Pawel; WANG, Yi. Ventilation system type, classroom environmental quality and pupils' perceptions and symptoms. **Building and Environment**, v. 75, p.46-57, May 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.01.015>.

GIODA, Adriana; AQUINO NETO, Francisco R. de. Poluição química relacionada ao ar de interiores no Brasil. **Química Nova**, v. 26, n. 03, p. 359-365, maio 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422003000300013>.

GODISH, Thad. **Indoor environmental quality**. Boca Raton: CRC Press; Taylor & Francis, 2000.

HARCAROVÁ, K. Indoor air quality in classrooms of a newly built school. **Materials Science and Engineering**, v. 867, 2020. DOI: [10.1088/1757-899X/867/1/012008](https://doi.org/10.1088/1757-899X/867/1/012008).

HERACLEOUS, C.; MICHAEL, A. Experimental assessment of the impact of natural ventilation on indoor air quality and thermal comfort conditions of educational buildings in the Eastern Mediterranean region during the heating period. **Journal of Building Engineering**, v. 26, Nov. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100917>

HESS-KOSA, Kathleen. **Indoor air quality: the latest sampling and analytical methods**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press; Taylor & Francis, 2019.

HOU, Yuefei; LIU, Junjie; LI, Jiayu. investigation of indoor air quality in primary school classrooms. **Procedia Engineering**, v. 121, p. 830-837, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.09.037>.

JAN, Rohi; ROY, Ritwika; YADAV, Suman; SATSANGI, Gursumeeran. 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>.

KALIMERI, Krystallia K.; SARAGA, Dikaia E.; LAZARIDIS, Vasileios D.; LEGKAS, Nikolaos A.; MISSIA, Dafni A.; TOLIS, Evangelos I.; BARTIZS, John G. 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, Nov. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apr.2016.07.002>.

KAPALO, Peter; MEČIAROVÁ, Ludmila; VILČEKOVÁ, Silvia; BURDOVÁ, Eva Krídlová; DOMNITA, Florin; BACOTIU, Ciprian; PÉTERFI, Kinga-Eva. Investigation of CO₂ production depending on physical activity of students. **International Journal of Environmental Health Research**, v. 29, n. 1, p. 31-44, Aug. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/09603123.2018.1506570>.

KEELER, Marian; VAIDYA, Prasad. **Fundamentos de Projeto de Edificações Sustentáveis**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2018. 388p.

KLEPEIS, Neil E.; NELSON, William C., OTT, Wayne, R.; ROBINSON, John P.; TSANG, Andy M.; SWITZER, Paul. **The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): A resource for assessing exposure to environmental pollutants**, article. Denton: UNT Digital Library, 2001. Disponível em: <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc719357/> . Acesso em: 06 out. 2020.

KORSAVI, Sepideh S.; MONTAZAMI, Azadeh; MUMOVIC, Dejan. Indoor air quality (IAQ) in naturally-ventilated primary schools in the UK: Occupant-related factors. **Building and Environment**, v. 180, Aug. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106992>.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. 3. ed. Rio de Janeiro: Eletrobrás/PROCEL: Ministério de Minas e Energia, 2014. 366 p.

LAZOVIC, Ivan, JOVAŠEVIĆ-STOJANOVIĆ, Milena; ŽIVKOVIĆ, Marija; TASIĆ, Viša; STEVANOVIĆ, Žarko. PM and CO₂ variability and relationship in the different school environments. **Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly**, v. 21, n. 1-2, p. 179-187, 2015. DOI: <https://doi.org/10.2298/CICEQ140212020L>.

LAZOVIC, Ivan M.; STEVANOVI, Žarko M.; JOVAŠEVI-STOJANOVI, Milena V.; ŽIVKOVI, Marija M.; BANJAC, Miloš 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, p.297-307, 2016. DOI: <https://doi.org/10.2298/TSCI150831173L>. Issue suppl. n. 1.

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, 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>.

MAJD, Ehsan; MCCORMACK, Meredith; DAVIS, Meghan; CURRIERO, Frank; BERMAN, Jesse; CONNOLLY, Faith; LEAF, Philip; RULE, Ana; GREEN, Timothy; CLEMONS-ERBY, Dorothy; GUMMERSON, Christine; KOEHLER, Kirsten. Indoor air quality in inner-city schools and its associations with building characteristics and environmental factors. **Environmental Research**, v.170, p. 83-91, Mar. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.12.012>.

MESQUITA, Mayra S; ARAÚJO, Flora M. Diagnóstico da qualidade do ar interno das edificações do campus da Unifor. **Revista Tecnologia**, Fortaleza, v. 27, n. 2, p.163-170, 2006. Disponível em: <https://periodicos.unifor.br/tec/article/view/78>. Acesso em: 11 jan. 2020.

MUMOVIC, D. PALMER, J.; DAVIES, M.; ORME, M.; RIDLEY, I.; ORESZCZYN, T.; JUDD, C.; CRITCHLOW, R.; MEDINA, H. A.; PILMOOR, G.; PEARSON, C.; WAY, P. Winter indoor air quality, thermal comfort and acoustic performance of newly built secondary schools in England. **Building and Environment**, v. 44, n. 7, p. 1466-1477, July 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.06.014>.

MUSCATIELLO, N.; MCCARTHY, A.; KIELB, C.; HSU, W.-H.; LIN, 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>.

NOWACKI, Carolina de C. B.; RANGEL, Morgana B. A. **Química ambiental: conceitos, processos e estudo dos impactos ao meio ambiente**. São Paulo: Érica, 2014.

PENG, Zhen; DENG, Du; TENORIO, Rosangela. Investigation of Indoor Air Quality and the Identification of Influential Factors at Primary Schools in the North of China. **Sustainability**, v. 9, n. 7, p. 1180, July 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/su9071180>.

PEREIRA, L. Dias; CARDOSO, Edna; SILVA, M. Gameiro da. Indoor air quality audit and evaluation on thermal comfort in a school in Portugal. **Indoor and Built Environment**, v. 24, n. 2, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1177/1420326X13508966>.

PEREIRA, Luísa Dias; RAIMONDO, Daniela; CORGNATI, Stefano Paolo; SILVA, Manuel Gameiro da. Assessment of indoor air quality and thermal comfort in Portuguese secondary classrooms: Methodology and results. **Building and Environment**, v. 81, p. 69-80, Nov. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.06.008>.

RAMALHO, Olivier; WYART, Guillaume; MANDIN, Corinne; BLONDEAU, Patrice; CABANES, Pierre-André; LECLERC, Nathalie; MULLOT, Jean-Ulrich; BOULANGER, Guillaume; REDAELLI, Matteo. Association of carbon dioxide with indoor air pollutants and exceedance of health guideline values. **Building and Environment**, v. 93, p. 1, p. 115 - 124, Nov. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.03.018>.

RAZALI, Nikmatun Yusro Yang; LATIF, Mohd Talib; DOMINICK, Doreena; MOHAMAD, Noorlin; SULAIMAN, Fazrul Razman; SRITHAWIRAT, Thunwadee. Concentration of particulate matter, CO and CO₂ in selected schools in Malaysia. **Building and Environment**, v. 97, p. 108-116, May 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.01.015>.

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, Dec. 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. Indoor environmental quality classification of school environment by monitoring PM and CO₂ concentration levels. **Atmospheric Pollution Research**, v.11, n. 2; p. 332-342, Feb. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2019.11.006>.

SEINFELD, John H.; PANDIS, Spyros N. **Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change**. 3. ed. New Jersey: John Wiley, 2016. 1152 p.

SHENDELL, D. G.; PRILL, R.; KISK, W. J.; APTE, M. G.; BLAKE, D.; FALKNER, D. Associations between classroom CO₂ concentrations and student attendance in Washington and Idaho. **Indoor Air**, v. 14, n. 5, p. 333-341, Oct. 2004. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00251.x>.

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, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0066-782X2009000300013>.

STABILE, Luca; DELL'ISOLA, Marco; RUSI, ALDO; MASSIM, O, Angelamaria; BUONANNO, Giorgio. 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>.

STANFIELD, Cindy L. **Fisiologia humana**. 5 ed. São Paulo: Pearson Educational do Brasil, 2013. 924 p.

SUNDELL, J. On the history of indoor air quality and health. **Indoor Air**, v. 14, n. 57, p. 51-58, Aug. 2004. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00273.x>.

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>.

TOYINBO, Oluyemi; PHIPATANAKUL, Wanda; SHAUGHNESSY, Richard; HAVERINEN-SHAUGHNESSY, Ulla. Building and indoor environmental quality assessment of Nigerian primary schools: A pilot study. **Indoor Air**, v. 29, n. 3. p. 510-520, May 2019. DOI: <https://doi.org/10.1111/ina.12547>.

TRAN, Dinh T.; ALLEMAN, Laurent Y.; CODDEVILLE, Patrice; GALLOO, Jean-Claude. Indoor particle dynamics in schools: determination of air exchange rate, size-resolved particle deposition rate and penetration factor in real-life conditions. **Indoor and Built Environment**, v. 26, n. 10, p. 1335-1350, Oct. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1177/1420326X15610798>.

VILCEKOVÁ, Silvia; KAPALO, Peter; MERČIAROVÁ, Ľudmila; BURDOVÁ; IMRECZEOVÁ, Veronika. 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, Alberto; CABAÑAS, Beatriz; MARTÍN, Pilar; SALGADO, Sagrario; GABRIEL, Marta Fonseca. 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, p. 111092, June 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111092>.

WARD, Jeremy P. T.; WARD, Jane; LEACH, Richard M. *Fisiologia básica do sistema respiratório*. 3. ed. Barueri: Manole, 2012.

WHO. WORLD HEALTH ORGANIZATION. **WHO Air quality guidelines: Global update 2005**. Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. Copenhagen: World Health Organization, 2005. 496 p. Disponível em: https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0005/78638/E90038.pdf. Acesso em: 20 jan. 2021.

WMO. WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Greenhouse Gas Bulletin: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Base on Global Observations throught 2015**. n. 12, Oct. 2016. Disponível em: http://library.wmo.int/opac/doc_num.php?explnum_id=3084. Acesso em: 28 mar. 2017.

YANG, Jinho; NAM, Insick; YUN, Hyunjun; KIM, Jinman; OH, Hyeon-Ju; LEE, Dohee; JEON, Si-Moon; YOO, Seung-Ho; SOHN, Jong-Ryeul. Characteristics of indoor air quality at urban elementary schools in Seoul, Korea: Assessment of effect of surrounding environments. *Atmospheric Pollution Research*, v. 6, n. 6, p. 1113-1122, Nov. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apr.2015.06.009>.

APÊNDICE A – Principais dados coletados nos artigos selecionados para esta RSL

Quadro A – Concentrações de dióxido de carbono e taxas de ventilação em salas de aula naturalmente ventiladas durante períodos de ocupação

Local	Período/ n° escolas, n° salas de aula.	Densidade ocupacional (média)	Concentração de CO ₂ (ppm)			Taxa de Ventilação média l/s/p	Referências
			Mín	Média	Máx		
Itália	03 escolas 06 salas	2,49 m ² /p 8,81 m ³ /p	500 (prim.) 572 (inv.)	908±330 (primavera) 2206±696 (inverno)	1600 (primavera) 5500 (inverno)	–	FUOCO <i>et al.</i> , 2015
Reino Unido	Estações quente e fria. 15 e 14 salas respectivamente.	2,12 m ² /p 6,23 m ³ /p	475 555	1087 (quente) 1224 (fria) 1155 (total)	3360 2269	–	KORSAVI; MONTAZAMI; MUMOVIC, 2020
Itália	Estações quente e fria. 05 salas.	2,49 m ² /p 7,85 m ³ /p	-	1832 (1503-3130)	>5000	–	STABILE <i>et al.</i> , 2017
Itália	03 salas	1,95 m ² /p 7,13 m ³ /p	-	2100	>5000	–	SCHIBUOLA; SCARPA; TAMBANI, 2016
Chipre	04 salas	2,33 m ² /p 7,47 m ³ /p	377	877-1604	3239	–	HERACLEOUS; MICHAEL, 2019
Coreia	116 escolas	3,02 m ² /p -	678	827	988	–	YANG <i>et al.</i> , 2015
China	04 escolas	1,73 m ² /p 6,03 m ³ /p	476	1507,25	4692	–	PENG; DENG; TENORIO, 2017
Eslováquia	02 salas	–	705	1326,5	1709	–	HARCAROVÁ, 2020
Estados Unidos	16 escolas	–	–	898	–	–	MAJD <i>et al.</i> , 2019
Grécia	03 escolas 09 salas	2,95 m ² /p 8,79 m ³ /p (medianas)	–	–	–	1,05 l/s/p	KALIMERI <i>et al.</i> , 2016
China	01 escola. 03 salas de aula	1,52 m ² /p 4,85 m ³ /p	374	1510-3863 (médias diárias)	5000	1,652 l/s/p	MA; ZHAN; XU, 2019.
França	02 semanas em 02 escolas 02 salas	2,27 m ² /p 8,37 m ³ /p	410	1480	3490	2,5 l/s/p	TRAN <i>et al.</i> , 2015
Paquistão	04 salas de aula Mar. a jun. de 2017	–	400	688,43 ^a	2444	–	ASIF; ZEESHAN; JAHANZAIB, 2018
Grécia	Primavera 09 escolas	2,41 m ² /p 7,48 m ³ /p	538	1228	5049	7,51 l/s/p	DORIZAS <i>et al.</i> , 2015

China	02 escolas	-	400 465	1285-1659 (janelas fechadas) 756 (janelas abertas)	3000 1153	1 l/s/p 7,54 l/s/p	HOU; LIU; LI, 2015
Espanha	18 salas	2,59 m ² /p (infantil) 2,11 m ² /p (adolescentes)	-	1530	3284 (infantil) 5366 (adolesc.)	-	BECERRA <i>et al.</i> , 2020
Eslováquia	-	5,57 m ² /p (inverno) 6,38 m ² /p (verão)	-	1315,88 (inverno) 1094,62 (verão)	1780 (inverno) 1500 (verão)	-	VILCEKOVÁ <i>et al.</i> , 2017
França	896 salas	-	404 (ver.) 465 (inv.)	1044 (verão) 1320 (inverno)	1252 (verão) 2690 (inverno)	-	RAMALHO <i>et al.</i> , 2015
Portugal	Primavera, Outono. 08 escolas	2,0 m ² /p 6,0 m ³ /p	-	1701,63	4270	-	ALMEIDA <i>et al.</i> , 2017
Polônia	04 escolas Inverno	10,16 m ³ /p	-	>1000ppm a mais que o ar externo	-	-	MAINKA; ZAJUZ-ZUBEK, 2015
Sérvia	02 escolas (A e B)	2,46 m ² /p	-	1396,44 (inverno) 1009,21 (primav.)	3700	-	LAZOVIC <i>et al.</i> , 2016
Índia	4 salas 2 escolas	0,90 m ² /p 4,54 m ³ /p	-	1249,11	± 1800	-	JAN <i>et al.</i> , 2017
Egito	13 salas 2 escolas	-	-	497	-	-	ABDALLAH, 2017
Croácia	60 salas 20 escolas	-	500,56	1870,56	5384	-	BRDARIĆ <i>et al.</i> , 2019
Malásia	3 salas	-	439	502	684	-	RAZALI <i>et al.</i> , 2015
Portugal	-	-	390 (prim.) 374 (inv.)	1927 (inverno)	2250 (primavera) 4640 (inverno)	-	PEREIRA; CARDOSO; SILVA, 2015
Itália	4 salas	2,07 m ² /p 6,32 m ³ /p	-	1406,25	± 3000	-	SCHIBUOLA; TAMBANI, 2020
Letônia	1 sala	1,57 m ² /p 4,78 m ³ /p	-	1485,08	± 2500	-	BOGDANOVICA; ZEMITIS; BOGDANOVICS, 2020
Nigéria	15 salas 5 escolas	-	309	452,8	4229	-	TOYINBO <i>et al.</i> , 2019
China	4 salas	-	500	1306,25	11231	-	CAI <i>et al.</i> , 2015
Portugal	71 salas 20 escolas	-	-	> 1000	-	-	GABRIEL <i>et al.</i> , 2021
Portugal	4 salas 1 escola	2,08 m ² /p 6,23 m ³ /p	-	-	-	6 – 8 l/s	DUARTE; GOMES; RODRIGUES, 2017
Portugal	10 salas	1,91 m ² /p	531	1183,5	6096	-	BRANCO <i>et al.</i> , 2015
Espanha	19 salas	2,15 m ² /p	379	618	2117	-	VILLANUEVA <i>et al.</i> , 2021

Observações: a – Os valores deste campo se referem a períodos ocupados e desocupados. Fonte: adaptado pelos autores, baseado nos dados disponibilizados pelas referências citadas no quadro. Fonte: os autores.

1 Saulo Vieira de Oliveira Silva

Arquiteto e Urbanista. Mestrando em Arquitetura e Cidade. Professor da Coordenadoria de Edificações do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo (IFES). Endereço postal: Avenida Vitória, 1729, Jucutuquara, Vitória, ES – Brasil. CEP 29040-780

2 Érica Coelho Pagel

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

3 Leopoldo Eurico Gonçalves Bastos

Engenheiro Industrial Mecânico. Pós-Doutor em Sistemas Complexos. Professor do Programa em 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

4 Cynthia Marconsini

Arquiteta e Urbanista. Doutora pelo Proarq UFRJ. Professora do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Cidade da Universidade Vila Velha (UVV). Endereço postal: Avenida Comissário José Dantas de Melo, 21 – Boa Vista II, Vila Velha, ES – Brasil. CEP 29102-920