ANÁLISE COMPARATIVA DE CONFORTO TÉRMICO E VENTILAÇÃO NATURAL ENTRE EDIFÍCIOS ESCOLARES COM E SEM A CERTIFICAÇÃO AMBIENTAL AQUA-HQE

Natália Sachie Shimasaki (1); Paula Brumer Franceschini (2); Leticia de Oliveira Neves (3)
(1) Graduanda de engenharia civil FEC/UNICAMP, n175115@dac.unicamp.br
(2) Doutoranda no PPGATC/ UNICAMP, p229312@dac.unicamp.br
(3) Professora Doutora do Departamento de Arquitetura e Construção da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, leticia@fec.unicamp.br, Rua Saturnino de Brito, 224 – Cidade Universitária Zeferino Vaz, 13083-889, Campinas/ SP, Tel.: (19) 3521-2384

RESUMO
As condições internas das salas de aula apresentam interferência direta na saúde, no conforto e no desempenho dos seus usuários. Uma das principais estratégias bioclimáticas recomendadas para climas quentes é a ventilação natural, especialmente para ambientes escolares, devido à elevada taxa de ocupação. Esta pesquisa visa comparar o desempenho da envoltória de salas de aula de edifícios escolares com e sem certificação AQUA-HQE, em termos de conforto térmico, ventilação natural e qualidade do ar interior (QAI). A partir de uma base de dados contendo informações do projeto arquitetônico de 66 escolas públicas construídas desde 2008 no estado de São Paulo, duas escolas situadas em Campinas-SP foram selecionadas para o estudo, sendo uma com e a outra sem a certificação AQUA-HQE. Variáveis ambientais internas e a operação manual de janelas e portas foram monitoradas nas salas de aula. Ao comparar as amostras da base de dados com e sem a certificação AQUA-HQE, foram evidenciadas poucas alterações no projeto arquitetônico direcionadas ao conforto térmico, à ventilação natural e à QAI, em função da certificação. Apesar disso, os resultados da pesquisa de campo mostraram que as poucas diferenças observadas no projeto contribuíram positivamente para que a escola com certificação AQUA-HQE apresentasse benefícios em relação à ventilação natural, ao conforto térmico e à QAI, se comparada à escola sem certificação.

Palavras-chave: ventilação natural, conforto térmico, edificações escolares, certificação AQUA-HQE.

ABSTRACT
The indoor conditions of classrooms interfere directly in the users' health, comfort, and performance. One of the main bioclimatic strategies recommended for hot climates is the natural ventilation, especially for school environments, due to their high occupancy rate. This research aims to compare the envelope design of classrooms in school buildings with and without AQUA-HQE (*Alta Qualidade Ambiental* – High Environmental Quality) certification, in terms of thermal comfort, natural ventilation and indoor air quality (IAQ). From a database containing architectural design information of 66 public schools built since 2008 in the state of São Paulo, two schools located in Campinas-SP were selected for this study, one with and the other without the AQUA-HQE certification. Indoor environmental variables and the manual operation of windows and doors were monitored in classrooms. When comparing the database samples of school buildings with and without AQUA-HQE certification, minor changes were observed in the architectural design, due to the certification, directed to thermal comfort, natural ventilation and IAQ. However, the field research results showed that the alterations in design from the school with AQUA-HQE certification resulted in improvements in natural ventilation, thermal comfort and IAQ, when compared to the school without certification.

Keywords: natural ventilation, thermal comfort, school buildings, AQUA-HQE certification.

3. INTRODUÇÃO

Os edifícios escolares devem assegurar condições adequadas de conforto ambiental aos usuários, em especial térmicas, acústicas e lumínicas. Condições desfavoráveis, como altas temperaturas e níveis baixos de renovação do ar, podem afetar de forma direta os aspectos psicológicos e fisiológicos dos usuários e, consequentemente, as atividades realizadas no interior das salas de aula (KOWALTOWSKI, 2011).

No Brasil, as edificações escolares apresentam falhas em diferentes aspectos, dentre eles, em questões relacionadas ao conforto ambiental. De acordo com Teles et al. (2019), os principais problemas nos edifícios escolares estão relacionados ao desconforto térmico, gerado por salas de aula com pouco aproveitamento da ventilação natural, tamanho de aberturas insuficientes, localização e orientação da implantação inadequadas, falta de dispositivos de sombreamento, entre outros fatores.

No estado de São Paulo, todos os edifícios educacionais públicos mantidos pela Fundação para o Desenvolvimento da Educação (FDE) possuem janelas operáveis, que permitem o uso da ventilação natural por meio do manuseio das esquadrias. Além disso, a maioria dos edifícios também possui ventiladores operáveis manualmente, o que configura um sistema híbrido de ventilação, também chamado de modo misto. Segundo a parte 3 da NBR 15220 (ABNT, 2005) e a INI-C (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA, 2022), a ventilação natural é uma estratégia bioclimática recomendada para obtenção de conforto térmico nas zonas bioclimáticas 3 e 4, onde grande parte dos edifícios educacionais da FDE estão implantados. Além disso, a NBR 15220 (ABNT, 2005) recomenda, para a zona bioclimática 3, sombreamento de aberturas, permitindo sol durante o inverno, vedações externas leves e refletoras, cobertura leve e isolada e, no inverno, aquecimento solar da edificação e vedações internas pesadas. Para a zona bioclimática 4, recomenda-se sombreamento de aberturas, permitindo sol durante o inverno, vedações externas pesadas, cobertura leve e isolada, resfriamento evaporativo no verão e, no inverno, aquecimento solar da edificação no inverno e vedações internas pesadas. Importante salientar que a NBR 15220 (ABNT, 2005) é direcionada a edificações habitacionais, não havendo norma brasileira que traga recomendações construtivas específicas para edificações escolares.

Em edifícios escolares, a ventilação natural geralmente é obtida por meio da abertura das janelas das salas de aula, sendo o ventilador de teto ou parede usado como ventilação mecânica auxiliar (RACKES, *et al.,* 2015). Alguns fatores podem influenciar no desempenho da ventilação natural dessas edificações, como o tipo, a posição, o tamanho e a quantidade das aberturas para o fluxo de ar em um ambiente; o perfil de ocupação e a implantação do edifício em relação à direção dos ventos dominantes (EFTEKHARL *et al*., 2001). A maior parte dos edifícios educacionais estão localizados em centros urbanos, uma vez que nestes locais há uma maior concentração da população na cidade (SANTOS, 2012), o que torna a estratégia da ventilação natural mais difícil de ser executada, devido às baixas velocidades do vento nestes locais da cidade (SIMÕES, 2016).

Desde 2008, a FDE adotou a certificação ambiental Alta Qualidade Ambiental (AQUA-HQE) para algumas de suas novas construções, visando proporcionar melhorias no desempenho das edificações, em relação a escolas não certificadas. O referencial técnico AQUA-HQE "Qualidade Ambiental de Edifícios Não Residenciais em Construção" (FUNDAÇÃO VANZOLINI, 2021) possui 14 categorias a serem analisadas para a obtenção da certificação, dentre as quais estão incluídos requisitos relacionados ao conforto higrotérmico (categoria 08) e à qualidade do ar (categoria 13), enfoques do presente estudo. Para o conforto higrotérmico, o referencial técnico considera como parâmetros base (sem pontuação) a adoção de soluções arquitetônicas satisfatórias para prover conforto, a manutenção de faixas de temperatura dentro da zona de conforto nos horários de ocupação e, no caso de edificações naturalmente ventiladas, o atendimento a um percentual de horas ocupadas em conforto mínimo de 60 a 70% (devendo-se justificar a norma de referência utilizada para o cálculo). Para a qualidade do ar, é necessário garantir vazões de ar adequadas às atividades do ambiente por meio da implementação de um ou mais sistemas específicos de ventilação (mecânica ou natural), sendo que a simples abertura das janelas pode não ser suficiente – se a ventilação natural for planejada e não for controlada, deve ser previsto um complemento de ventilação mecânica.

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é realizar uma análise crítica comparativa do desempenho da envoltória de salas de aula de edifícios escolares com e sem certificação AQUA-HQE, em termos conforto térmico, ventilação natural e qualidade do ar interior (QAI).

3. MÉTODO

Este trabalho consiste em uma pesquisa descritiva baseada em estudo de caso. Para desenvolvimento do estudo de caso, selecionou-se a cidade de Campinas-SP, localizada na zona bioclimática 3 (ABNT, 2005). As etapas de trabalho foram organizadas em levantamento de uma base de dados e análise estatística (item 3.1), pesquisa de campo (item 3.2).

3.1. Levantamento da base de dados e análise estatística

A base de dados levantada inclui edifícios escolares localizados no estado de São Paulo e projetados e construídos pela FDE a partir de 2008, ano em que a FDE adotou a certificação AQUA-HQE para algumas de suas construções. A amostra conta com 20 edifícios com certificação AQUA-HQE e 46 edifícios não certificados, sendo estes localizados nas mesmas cidades das escolas certificadas; resultando em um total de 66 edifícios escolares. Destes, 33 edifícios estão localizados na cidade de São Paulo e o restante dos edifícios estão localizados em Campinas, Bauru, Itaquaquecetuba, Ourinhos, Adamantina, São Carlos e Conchal.

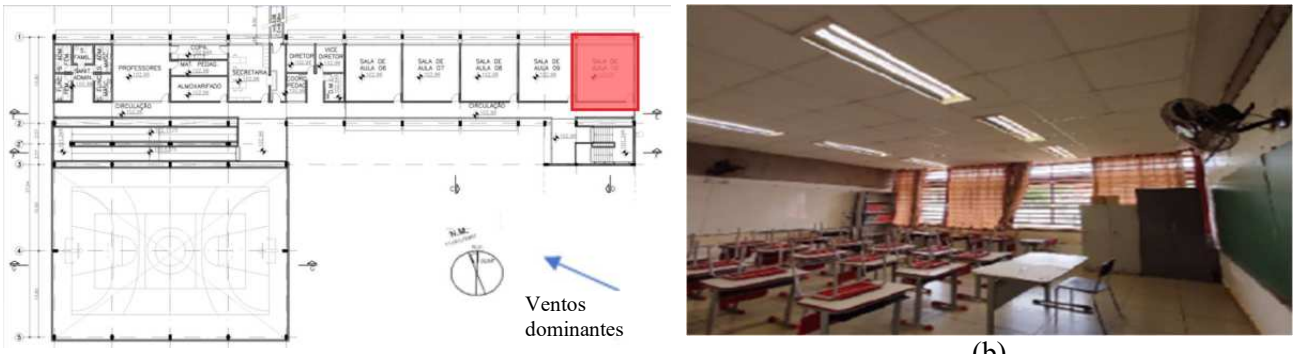
As informações incluídas na base de dados foram extraídas das pranchas do projeto arquitetônico das escolas (disponibilizadas pela FDE) e foram classificadas em variáveis contínuas (e.g., dimensões das salas de aula e das esquadrias, absortância solar, fator U e capacidade térmica dos componentes construtivos da envoltória) e variáveis categóricas (e.g., forma da planta baixa do edifício, orientação solar da sala de aula, estratégia de ventilação natural, tipos e material de dispositivos de sombreamento). Para as variáveis contínuas, foram calculados os parâmetros estatísticos de máximos, mínimos, média, mediana, desvio padrão, 1º e 3º quartis e o intervalo de confiança de 95%. Além disso, a fim de avaliar a correlação entre algumas das variáveis estudadas, foi calculado o Coeficiente de Correlação de Pearson para as variáveis contínuas que aparentavam possuir alguma correlação. Para as variáveis categóricas, foi considerada a maior frequência de ocorrência de cada variável, sendo calculadas suas respectivas proporções, que foram utilizadas no cálculo do intervalo de confiança de 95%.

A fim de comparar os parâmetros relacionados ao projeto da envoltória em termos de possuir ou não a certificação AQUA-HQE, foram calculados os parâmetros estatísticos de média e desvio padrão para as variáveis contínuas e a maior frequência e proporção para as variáveis categóricas (BUSSAB; MORENTTIN, 2017), para os grupos de escolas com e sem certificação.

3.2. Pesquisa de campo

Como critérios para seleção do recorte de estudo a ser realizado na pesquisa de campo, adotaram-se: (i) a escolha de dois edifícios escolares para análise comparativa, sendo que um deles deveria ser certificado AQUA-HQE e o outro não e (ii) que ambas as escolas fossem localizadas na cidade de Campinas-SP, localizada na zona bioclimática 3 (ABNT, 2005) e caracterizada pelo clima subtropical úmido, de acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger (de modo a viabilizar a ida a campo).

Da amostra incluída na base de dados, apenas cinco escolas estão localizadas em Campinas e somente uma delas possui certificação AQUA-HQE. Em vista disso, selecionou-se para o estudo a Escola Estadual Adriana Cardoso com certificação AQUA-HQE (escola 1, Figura 1). A sala de aula monitorada (Figura 1(b)) possui área de 49 m², janelas basculantes com esquadrias de aço, porta e esquadrias de madeira e paredes de alvenaria de blocos de concreto. Nesta sala são ministradas aulas para o 5º ano, compreendendo 28 alunos de 9 a 11 anos.



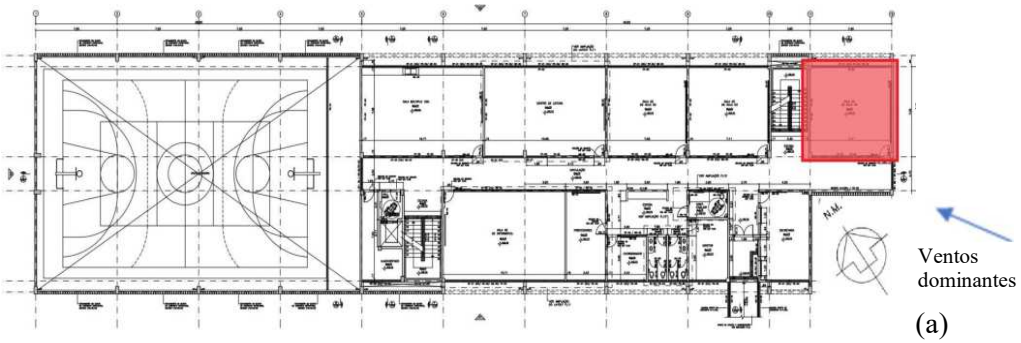
(a) (b)

Figura 1 - Escola 1: (a) Planta com a sala de aula monitorada em destaque (FDE, 2017); (b) Sala de aula.

Dentre as outras quatro escolas sem certificação AQUA-HQE localizadas em Campinas presentes na base de dados, a seleção da escola para a condução do presente estudo se deu com base na análise da edificação que possuía características de projeto mais próximas às da escola 1, sendo elas: mesma orientação solar do eixo longitudinal (N-S); mesmo número de pavimentos (3); mesma forma de planta (retangular); mesma altura do piso ao piso nas salas de aula; mesmo componente construtivo e acabamento para paredes externas e internas (mesmos valores de transmitância, capacidade térmica e absortância solar); mesmo tipo de vidro e

mesmo fator de abertura na janela do corredor. Vale ressaltar, no entanto, duas importantes diferenças entre as escolas selecionadas: a escola com certificação AQUA-HQE possui ventilação cruzada (fileira única de salas de aula com corredor de circulação lateral) e proteção solar externa e a escola sem certificação AQUA-HQE possui ventilação unilateral (fileira dupla de salas de aula com corredor central) e não possui proteção solar externa. Além disso, a escola com certificação AQUA-HQE possui esquadrias maiores na fachada principal da sala de aula, com maior fator de abertura para ventilação.

Sendo assim, a Escola Estadual Cláudia Francisco da Silva (escola 2, Figura 2), sem certificação AQUA-HQE, foi selecionada para o estudo. A sala de aula monitorada na escola 2 (Figura 2(b)) possui área de 49 m², janelas basculantes com esquadrias de aço, porta e esquadrias de madeira e paredes de alvenaria de blocos de concreto. Nesta sala são ministradas aulas para o 8º ano no período da manhã, compreendendo 32 alunos de 12 a 14 anos; e do 6º ano no período vespertino, compreendendo 24 alunos de 10 a 12 anos.



(a)



(b)

Figura 2 - Escola 2: (a) Planta com a sala de aula monitorada em destaque (FDE, 2017); (b) Sala de aula.

A pesquisa de campo consistiu no monitoramento de variáveis ambientais internas (temperatura do ar, temperatura de globo, umidade relativa do ar e concentração de CO_2) e da operação manual de janelas e portas, em uma sala de aula de cada escola, pelo período de uma semana (de 15 a 21 de fevereiro de 2022). As medições foram realizadas simultaneamente nas duas salas de aula selecionadas, para que não houvesse interferências nos resultados referentes às condições climáticas externas. As diferenças microclimáticas em função do entorno imediato não foram, no entanto, consideradas neste estudo. Todos os equipamentos de medição utilizados foram configurados para obter o registro dos dados a cada 15 minutos, durante o período de sete dias corridos, e foram instalados em locais em que não houvesse interferências nas aulas. O cálculo da temperatura radiante média (FERNANDES; KRUGER, 2019) e da temperatura operativa interna (ASHRAE, 2020) foram realizados a partir dos dados coletados de temperatura do globo e temperatura do ar. No cálculo da temperatura radiante média também se levou em consideração o diâmetro e a emissividade do globo. Para o cálculo da temperatura operativa interna, considerou-se uma velocidade do ar dentro da sala de aula menor de 0,2 m/s quando os ventiladores se encontravam desligados e entre 0,6 e 1,0 m/s quando os ventiladores estavam ligados. Adicionalmente, foram realizadas medições pontuais da concentração de CO_2 em três pontos externos às escolas, onde não houvesse interferência de construções próximas. A temperatura do ar externo foi disponibilizada pelo Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura (CEPAGRI) da UNICAMP, situado a uma distância de 5 km da escola 1 e 23 km da escola 2.

Os dados obtidos em cada escola durante a pesquisa de campo foram analisados e comparados entre si, a fim de identificar potenciais benefícios trazidos pela escola com certificação AQUA-HQE. Para a análise de conforto térmico, considerou-se um intervalo de conforto de 21,7 ºC a 28,7 ºC para a temperatura operativa interna, para 80% de aceitabilidade, calculado conforme o modelo adaptativo da ASHRAE 55 (ASHRAE, 2020).

Os valores de concentração de CO_2 monitorados foram usados para cálculo das taxas de renovação de ar horárias das salas de aula, por meio do procedimento de cálculo da CIBSE AM-10 (2005), em que a concentração de CO_2 é dada pela Equação 1, abaixo. A Equação 2, denominada de concentração em regime estacionário, assume que C(0) (concentração de CO_2 no momento zero) é igual à concentração de CO_2 do ambiente externo (Cext). O cálculo considerou o volume da sala de aula de 142 m³ e o nível padrão de concentração de CO_2 externo de 400 ppm. O cálculo da taxa de emissão de CO_2 dos ocupantes (qCO_2) foi realizado de acordo com Persily e Jonge (2017), considerando-se 50% dos estudantes de cada gênero, atividade física de 1,2 met e uma professora na faixa etária de 50 a 60 anos. É importante destacar que, por ser uma abordagem teórica, os resultados do cálculo podem gerar *outliers* em ambos os extremos (valores muito altos ou muito baixos).

$$C(t) = C_{ext} + \frac{q_{CO_2}.10^6}{Q} - \left(C_{ext} - C_{(0)} + \frac{q_{CO_2}.10^6}{Q}\right).exp\ exp\ \left(-\frac{Qt}{V}\right) \quad \text{Equação 1}$$

$$C_{ss} = C_{ext} + \frac{q_{CO_2}.10^6}{Q} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:
C(t) é a concentração no momento t [ppmv];
t é o tempo [s];
C_{ext} é a concentração do ar externo adentrando no espaço [ppmv];
qCO_2 é a taxa de emissão de CO_2 volumétrica dos ocupantes do ambiente [m^3/s];
Q é o volume de ar adentrando o espaço [m^3/s];
C(0) é a concentração de CO_2 no momento 0 [ppmv];
V é o volume do espaço [m^3];
C_{ss} é a concentração de CO_2 em regime estacionário [ppmv], i.e., a concentração de CO_2 interna.

4. RESULTADOS

4.1. Base de dados e análise estatística

A partir da análise estatística das variáveis categóricas do projeto da envoltória das escolas contidas na base de dados (Tabela 1), observa-se que a orientação solar da edificação, a estratégia de ventilação natural adotada nas salas de aula e o tipo do dispositivo de sombreamento mais recorrentes não diferem entre os grupos com e sem certificação AQUA-HQE. Faz-se destaque à diferença no material do dispositivo de sombreamento, que pode ser em função de outros parâmetros exigidos pela certificação, não relacionados diretamente às categorias relativas ao conforto térmico e à ventilação natural.

Tabela 1 – Análise comparativa das variáveis categóricas entre as escolas com e sem a certificação AQUA-HQE. Fonte: os autores.

Variáveis	Com certificação AQUA-HQE		Sem certificação AQUA-HQE	
	Maior frequência	Proporção	Maior frequência	Proporção
Orientação solar do edifício	Norte - Sul	0,40	Norte - Sul	0,33
Posição das salas de aula no corpo do edifício	Último andar	0,35	Andar do meio	0,48
Estratégia de ventilação natural das salas de aula	Ventilação unilateral com corredor central	0,70	Ventilação unilateral com corredor central	0,89
Tipo do dispositivo de sombreamento das salas de aula	Tela perfurada	0,50	Tela perfurada	0,33
Material do dispositivo de sombreamento das salas de aula	Aço	0,75	Concreto	0,37

A Tabela 2 apresenta a análise estatística comparativa das variáveis contínuas do projeto da envoltória das escolas contidas na base de dados, dividida entre as escolas com e sem certificação. Faz-se destaque às principais diferenças entre as escolas com e sem certificação AQUA-HQE: (i) a média do percentual de perfuração dos dispositivos de sombreamento das escolas com certificação é 8,9% maior do que a média das escolas sem certificação, o que pode favorecer o conforto térmico nos ambientes internos em função de maior sombreamento; (ii) o valor médio da porcentagem da esquadria da janela que é operável é 4,9% maior para as escolas com certificação e o fator de abertura da janela no corredor das escolas com certificação é 2,6% maior do que o valor médio das escolas sem certificação, o que pode refletir em um melhor funcionamento da ventilação natural, por meio das janelas do corredor; e (iii) as escolas com certificação AQUA-HQE possuem fator U menor e capacidade térmica maior para a cobertura, o que aumenta seu isolamento térmico, contribuindo para reduzir a transferência de calor para os ambientes internos.

Tabela 2 – Análise comparativa das variáveis contínuas entre as escolas com e sem a certificação AQUA-HQE. Fonte: os autores.

Componente construtivo	Variáveis	Com certificação AQUA-HQE		Sem certificação AQUA-HQE	
		Média	Desv. Padrão	Média	Desv. Padrão
Informações gerais do edifício	Área construída (m²)	3449,4	517,4	3410,1	686,2
	Ângulo de azimute (º)	70,3	45,8	68,9	46,1
	Nº de andares	3,1	0,9	3,5	0,8
	Proporção da planta (comprimento x largura)	0,5	0,2	0,4	0,2
	Nº de salas de aula	12,8	4,4	13,5	3,0
Salas de aula	Altura do piso ao teto (m)	2,8	0,1	3,0	0,1
	Altura do piso ao piso (m)	3,2	0,0	3,3	0,1
Parede externa	Absortância solar	0,5	0,2	0,5	0,2
	Fator U (W/m².K)	2,8	0,1	2,8	0,1
	Capacidade térmica (kJ/m².K)	189,2	20,5	193,8	17,5
Parede interna	Absortância solar	0,2	0,1	0,2	0,1
	Fator U (W/m².K)	2,9	0,1	2,9	0,0
	Capacidade térmica (kJ/m².K)	168,1	5,0	166,7	3,5
Cobertura	Absortância solar	0,3	0,0	0,2	0,0
	Fator U (W/m².K)	0,9	0,3	1,5	0,4
	Capacidade térmica (kJ/m².K)	182,9	78,5	144,1	8,0
Janela da sala de aula	Fator U de envidraçamento (W/m².K)	5,7	0,0	5,7	0,0
	Vidro - fator solar	0,8	0,1	0,9	0,0
Corredor	Peitoril da janela (m)	2,2	0,1	2,3	0,3
	Altura da esquadria da janela (m)	0,8	0,1	0,6	0,3
	% da esquadria da janela operável	64,4	26,8	59,5	26,5
	Fator de abertura da janela (m²)	190,9	0,3	185,9	0,3
	Percentual de área envidraçada na fachada (PAF) (%)	24,2	4,5	20,2	9,5
Fachada	Peitoril da janela (m)	0,9	0,1	1,0	0,1
	Altura da esquadria da janela (m)	2,1	0,1	2,0	0,3
	% da esquadria da janela operável	60,0	17,1	63,4	12,0
	Fator de abertura da janela (m²)	2,1	0,7	2,2	0,3
	PAF (%)	70,5	2,3	65,1	9,7
Dispositivos de sombreamento	Perfuração (%)	23,7	15,3	14,8	18,9
	Distância entre esquadria e dispositivo de sombreamento (m)	1,3	0,5	1,3	0,6
	Ângulo vertical de sombreamento (º)	14,3	22,8	13,7	19,7
	Ângulo horizontal de sombreamento (º)	0,0	0,0	0,0	0,0

Na análise da Correlação de Pearson, tanto para as escolas certificadas, quanto para as escolas não certificadas, observou-se uma correlação negativa entre as variáveis peitoril da janela e altura da esquadria, para as janelas tanto do corredor quanto da fachada, ou seja, quanto menor o peitoril, maior a altura da esquadria, o que reflete diretamente em um aumento do percentual de área envidraçada na fachada (PAF). As correlações entre o PAF e a perfuração do elemento de sombreamento e entre o PAF e o ângulo vertical de sombreamento do elemento de sombreamento estão próximas de zero para ambos os casos, ou seja, não existe associação entre essas variáveis, o que mostra a falta de adequação do elemento de sombreamento ao tamanho da janela na fachada, sendo preponderante o uso de elementos customizados, independente da situação de projeto. Isso mostra que não houve uma revisão do pensamento projetual nesses quesitos, em função da exigência de certificação.

4.2. Pesquisa de Campo

Comparando-se a temperatura operativa interna entre as duas salas de aula selecionadas para a pesquisa de campo (Figura 3), pode-se notar que a escola 2 (sem certificação AQUA-HQE) apresenta maior amplitude térmica do que a escola 1 na maior parte do tempo. Além disso, durante todo o período de medições, a escola 2 permaneceu com a temperatura operativa interna acima da zona de conforto por um período maior que a escola 1 (com certificação AQUA-HQE). Esta apresentou, portanto, melhor resposta térmica, por manter a temperatura com menores variações e inferiores à temperatura externa. Ainda assim, as duas escolas apresentaram um percentual de horas ocupadas em conforto semelhante: 73,4% na escola 1 e 74,5% na escola 2 – ambas acima dos 70% proposto como parâmetro base no referencial teórico da certificação AQUA-HQE.

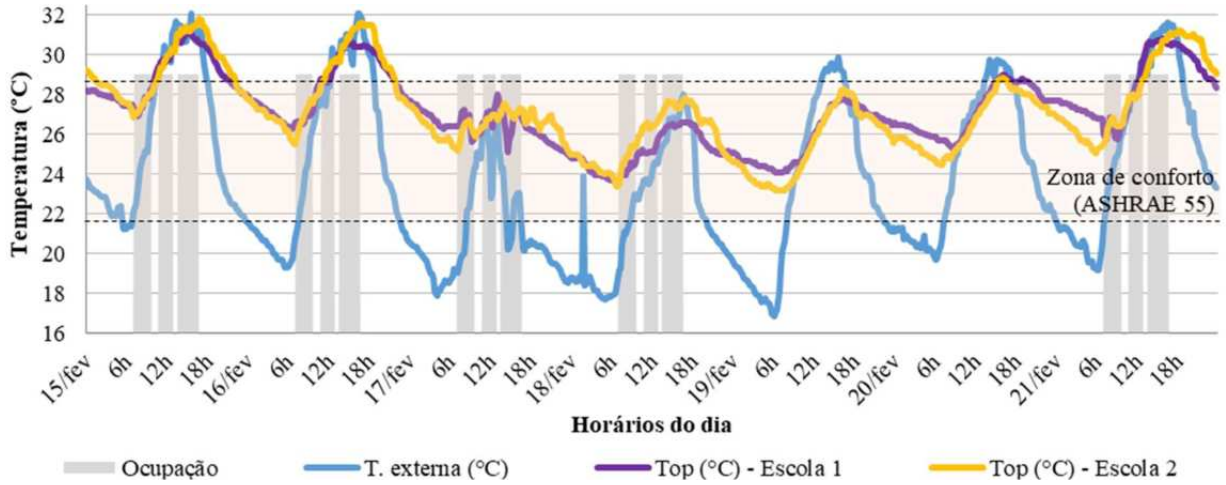


Figura 3 – Temperatura externa e temperatura operativa interna. Fonte: os autores.

Pelos resultados do monitoramento das portas e janelas (Figura 4) é possível notar que ambas permaneceram a maior parte do tempo abertas enquanto havia ocupação, tanto na escola 1 como na escola 2, contribuindo positivamente para a ventilação natural, principalmente na escola 1 (com certificação), que possui ventilação cruzada e corredor com fachada livre.

Os resultados da concentração de CO_2 são apresentados para os horários de ocupação de dois dias do monitoramento (Figura 5). É possível notar que na maior parte do tempo a concentração de CO_2 da escola com certificação AQUA-HQE (escola 1) encontra-se mais baixa que a da escola não certificada (escola 2), mesmo no período da tarde, em que há menos ocupantes na escola sem certificação. Da mesma forma, a taxa de renovação de ar horária da escola 1 encontra-se mais alta, na maior parte do tempo (Figura 6). Estes resultados podem ser decorrentes da estratégia de ventilação natural utilizada em cada escola, uma vez que a ventilação cruzada, utilizada pela escola 1, é considerada a mais adequada. Soma-se a isso as diferenças entre os ocupantes das duas salas de aula, uma vez que a escola 2 possui ocupantes mais velhos e que, consequentemente, geram maiores taxas de CO_2. Também é importante destacar as diferenças entre o PAF e a área de abertura operável das janelas de cada escola. O PAF da fachada da sala de aula da escola certificada é de 73% e a área de abertura operável é de 71%, resultando em uma área de abertura efetiva para ventilação de 51%. Na escola sem certificação, o PAF é de 69% e a área de abertura operável é de 64%, resultando em uma área de abertura efetiva de 44%. Sendo assim, é possível concluir que a escola não certificada possui a taxa de ventilação reduzida, refletindo em maiores concentrações internas de CO_2 e pior qualidade do ar interior, como pode ser observado nas Figuras 5 e 6.

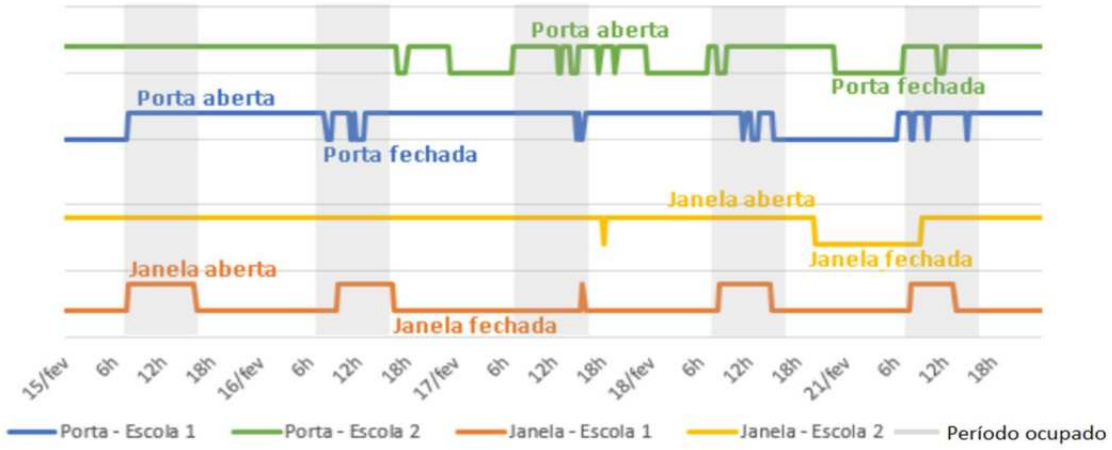


Figura 4 - Operação das portas e janelas. Fonte: os autores.

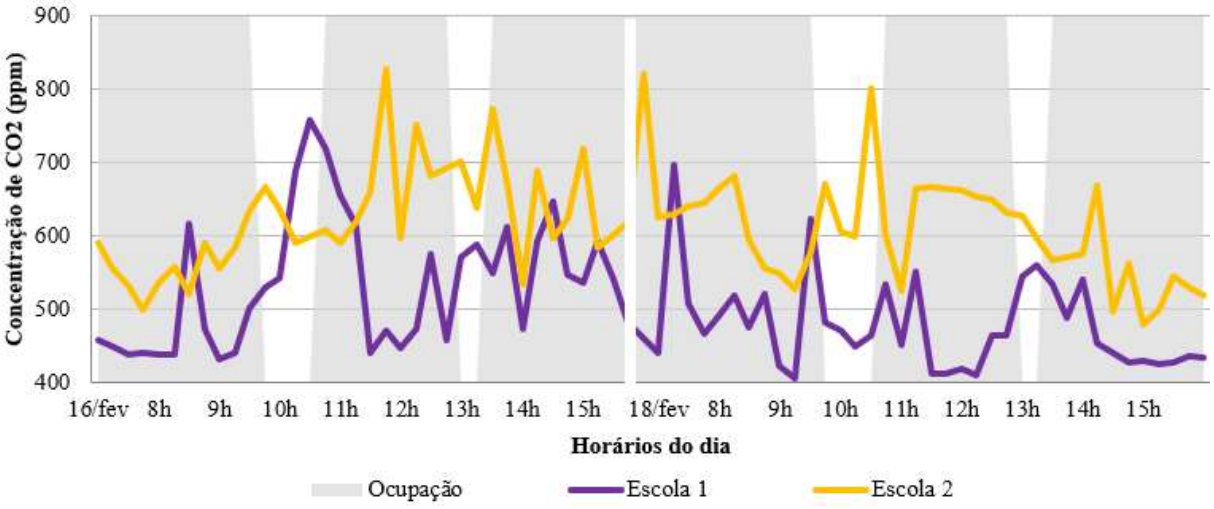


Figura 5 - Concentração de CO_2. Fonte: os autores.

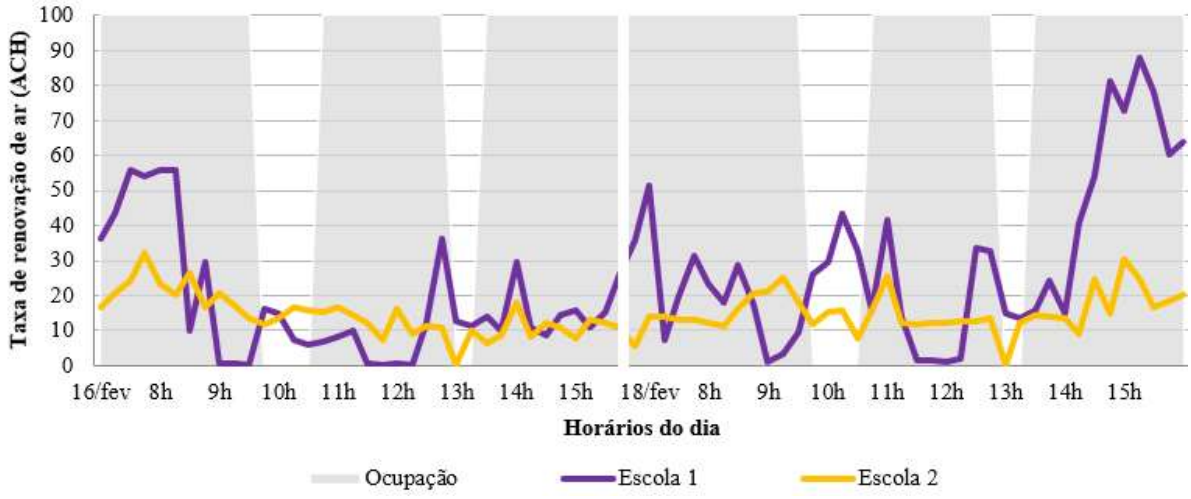


Figura 6 - Taxa de renovação de ar horária. Fonte: os autores.

4.3. Resumo comparativo

A Tabela 3 apresenta uma comparação entre as principais características do projeto da envoltória das duas escolas, a fim de analisar possíveis benefícios trazidos pela escola com certificação ambiental AQUA-HQE. Com relação ao projeto arquitetônico, a escola 1 possui dispositivo de sombreamento e percentual de abertura na fachada (PAF) da sala de aula cerca de 5,5% maior do que a escola 2, contribuindo para melhores

condições de conforto térmico. Além disso, a escola 1 possui materiais da cobertura com maior isolamento térmico, de modo a contribuir na redução do fluxo de calor pela cobertura. No período da manhã a escola 1 possui menos ocupantes que a escola 2; sendo o contrário do período da tarde, em que a escola 2 possui menos ocupantes que a escola 1. Com relação aos dados monitorados, a sala de aula da escola 1 apresentou níveis mais baixos de concentração de CO_2 e umidade relativa do ar, menor variação de temperatura do ar interno e menores valores de temperatura radiante média, se comparados aos dados da escola 2. É importante ressaltar, no entanto, que ambas as escolas apresentaram valores bastante abaixo aos estabelecidos pela resolução nº 9/2003 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) que permite concentração máxima de CO_2 no ambiente de 1000 ppm, para ambientes climatizados artificialmente (não há valores estabelecidos para ambientes naturalmente ventilados).

Tabela 3 - Tabela comparativa entre as escolas. Fonte: os autores.

Características	Escola 1	Escola 2
Estratégia de ventilação natural adotada	Ventilação cruzada com corredor com fachada livre	Ventilação unilateral com corredor central
Média temperatura do ar interior (°C)	27,8	27,6
Média da temperatura radiante média interna (°C)	26,8	27,4
Média da temperatura operativa interna (°C)	27,3	27,5
Média da umidade relativa interna (%)	59,0	65,3
Média da concentração de CO_2 interna (ppm)	498,7	615,7
Dispositivo de sombreamento	Dispositivo de sombreamento horizontal de concreto	Não possui
Fator U cobertura (W/m²K)	1,1	1,7
Capacidade térmica da cobertura (kJ/m²K)	164,2	140,7
PAF fachada sala de aula (%)	73	69
% da esquadria da janela operável da fachada	71	64

5. CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi realizar uma análise crítica do projeto da envoltória de salas de aula de edifícios escolares construídos pela FDE do estado de São Paulo em termos de conforto térmico e ventilação natural, sendo escolhidos como estudos de caso um edifício com certificação AQUA-HQE e outro sem, ambos localizados na cidade de Campinas-SP (zona bioclimática brasileira 3).

Com relação à base de dados analisada, nota-se que a orientação solar do eixo longitudinal da edificação é predominantemente Norte-Sul e predomina o uso de elementos de proteção solar nas fachadas das salas de aula, o que podem ser consideradas estratégias adequadas às características climáticas. A absortância solar das paredes externas (predominantemente em tons médios e escuros) e a estratégia de ventilação natural mais frequente (ventilação unilateral e corredor central), no entanto, são consideradas inadequadas. As escolas com certificação AQUA-HQE possuem porcentagem de perfuração dos dispositivos de sombreamento, porcentagem da esquadria da janela operável e fator de abertura das janelas do corredor em média superiores aos valores encontrados nas escolas sem certificação. Possuem também valores de transmitância térmica da cobertura inferiores e de capacidade térmica superiores, sendo esses fatores considerados favoráveis para prover melhores condições conforto térmico e ventilação natural às salas de aula.

Com relação ao monitoramento de campo de duas salas de aula, observa-se que a escola certificada apresentou melhores resultados, em função principalmente do uso da estratégia de ventilação natural cruzada e do uso de proteção solar externa, que favorecem o melhor comportamento térmico e a ventilação adequada do ambiente.

Ao comparar-se os resultados obtidos da análise da base de dados e da pesquisa de campo, nota-se que, apesar de a base de dados mostrar poucas diferenças de projeto arquitetônico entre escolas com e sem certificação AQUA-HQE, as diferenças entre as escolas escolhidas na pesquisa de campo mostraram os benefícios da escola certificada, em termos de conforto térmico e ventilação natural.

Vale ressaltar, contudo, que este estudo considera o monitoramento por um curto período de tempo e em somente duas escolas, não sendo possível, portanto, fazer generalizações quanto aos benefícios da certificação AQUA-HQE. Ademais, é válido destacar que seria interessante a realização do monitoramento das salas de aula em outro período do ano, de preferência no inverno, em que a ventilação natural pode ser prejudicada em função de as janelas permanecerem fechadas por mais tempo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANVISA - Agência Nacional de Vigilância Sanitária. (2003). **Resolução nº 9:** Padrões Referenciais de Qualidade do Ar Interior em Ambientes Climatizados Artificialmente de Uso Público e Coletivo.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3**: Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.

ANSI/ASHRAE. **ASHRAE Guideline 55-2020 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. Atlanta, 2020.

CIBSE - Chartered Institution of Building Services Engineers. **Applications Manual AM10**, Natural Ventilation in Nondomestic Buildings, March 2005.

BUSSAB, WO; MORETTIN, PA**. Estatística básica**. São Paulo, SP: Saraiva, 2017. 9ª ed. ISBN: 9788547220228.

EFTEKHARL, M. M., MARJANOVIC, L. D., PINNOCK, D. J. Air flow distribution in and around a single-sided naturally ventilated room. **Building and Environment**, London, v. 38, p. 389-397, 2001.

FERNANDES, L. C.; KRUGER, E. L. Temperatura Radiante média obtida via termômetro de globo: análise crítica de dados de um estudo de campo. Revista de Arquitetura IMED, v. 8, n. 1, 2019.

FUNDAÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO DA EDUCAÇÃO – FDE. **Projetos escolares** (disponibilizados para pesquisa). Abril, 2017.

FUNDAÇÃO VANZOLINI. Referencial de Avaliação da Qualidade Ambiental de Edifícios Não Residenciais em Construção - AQUA-HQE-HQE. 2021. Disponível em: https://vanzolini.org.br/wp-content/uploads/2022/01/RT_AQUA-HQE-HQE-Edificios_nao-residenciais-2021.pdf. Acesso em: 28 de maio de 2022.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas**. 2022

KOWALTOWSKI, D. C. C. K. C. K. **Arquitetura Escolar - o Projeto do Ambiente de Ensino.** 1. ed. São Paulo/SP: Oficina de Textos, 2011.

PERSILY, A.; DE JONGE, L. Carbon dioxide generation rates for building occupants. **Indoor Air**, *[S. l.]*, v. 27, n. 5, p. 868–879, 2017. DOI: 10.1111/ina.12383.

RACKES, A. *et al.,* **Avaliação do potencial de conforto térmico em escolas naturalmente ventiladas.** Florianópolis: XIII Encontro Nacional e IX Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído, 2015. 10 p.

SANTOS, A. C. A. O. **Estudo de localização de escolas públicas em áreas urbanas.** Dissertação (Mestrado em Transportes) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Brasília, p.103. 2012.

SIMÕES, G. N. **Análise de desempenho de um sistema de ventilação natural de uma creche**. 2016. 57 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente, Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2016.

TELES, C. *et al*., Avaliação da eficiência energética e conforto térmico de projetos educacionais padronizados do FNDE. In: , 2019, João Pessoa, PB. **XV Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído (ENCAC) e XI Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído (ELACAC)**. João Pessoa, PB: [s. n.], 2019. p. 1-10.

AGRADECIMENTOS

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