

Avaliação de estratégias de ventilação natural para salas de aula em clima subtropical úmido

Evaluation of natural ventilation strategies in school classrooms in a humid subtropical climate

Paula Scherer 

Giane de Campos Grigoletti 

Resumo

Salas de aula são ambientes de longa permanência, nas quais o conforto térmico é fundamental para o processo de ensino e aprendizagem. No contexto imposto pela Covid-19, são exigidas maiores taxas de ventilação natural, o que pode afetar o conforto térmico. Esta pesquisa objetivou investigar 16 estratégias de ventilação natural em salas de aula do ensino fundamental quanto à eficiência energética, ao conforto térmico e à qualidade de ventilação natural, para clima subtropical úmido, representado pela cidade de Santa Maria, RS, considerando recomendações do Governo Federal e simulações computacionais com o Ansys CFX e o EnergyPlus. Foram analisadas: horas ocupadas em conforto térmico, graus-hora de desconforto, velocidade do ar interno, taxas de renovação do ar e umidade do ar. Estratégias com ventilação cruzada e chaminé-solar ou unilateral norte-sul conectada à circulação aberta atingiram os critérios para renovação do ar, porém com percentagem de horas de desconforto por frio acima de 20%. Observa-se que a suficiência da ventilação natural provoca desconforto por frio excessivo. Este trabalho contribuiu para apontar estratégias de ventilação natural mais adequadas para salas de aula situadas em clima subtropical úmido, demonstrando que estas podem contribuir para a melhoria da qualidade da ventilação natural frente a soluções convencionais.

Palavras-chave: Salas de aula. Ensino fundamental. Ventilação natural. Qualidade do ar interno.

Abstract

Classrooms are long-stay environments, in which thermal comfort is fundamental to the teaching and learning process. In the context of Covid-19, higher rates of natural ventilation are required, which can affect thermal comfort. This research aimed to investigate 16 natural ventilation strategies in elementary school classrooms regarding energy efficiency, thermal comfort and quality of natural ventilation, in a humid subtropical climate, represented by the city of Santa Maria, RS, considering recommendations from the Federal Government and computer simulations with Ansys CFX® and EnergyPlus. The following items were analysed: hours spent in thermal comfort, discomfort degree-hours, indoor air velocity, air renewal rates and air humidity. Strategies using cross ventilation and solar chimney, or north-south unilateral ventilation connected to open circulation met the criteria for air renewal, albeit with a 20% or more hours of discomfort due to cold. It was observed that sufficient natural ventilation causes discomfort due to excessive cold. The contribution of this project is to suggest more adequate natural ventilation strategies for classrooms located in humid subtropical climates, demonstrating that they can contribute to improve the quality of natural ventilation compared to conventional solutions.

Keywords: Classrooms. Primary. Natural Ventilation. Indoor Air Quality.

¹Paula Scherer

¹Universidade Federal de Santa Maria
São Paulo das Missões - RS - Brasil

²Giane de Campos Grigoletti

²Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria - RS - Brasil

Recebido em 23/03/22

Aceito em 12/06/22

Introdução

A relevância da inserção de estratégias que envolvem ventilação natural em ambientes escolares, no meio científico, vem sendo analisada por vários pesquisadores na última década, como Rackes *et al.* (2015), Maciel (2016), Ferreira (2019), Oliveira, Cunha e Leitzke (2020) e Oliveira e Carlo (2018), no Brasil, e Jindal (2018), Ferdyn-Grygierek *et al.* (2019) Hamzah *et al.* (2020) e Bayoumi (2021), em outros países, conforme a revisão sistemática em publicações a partir de 2001, com 172 artigos selecionados.

Quando se trata de salas de aula, observa-se que a qualidade do ambiente interno está vinculada ao interesse pela aprendizagem (BARRETT *et al.*, 2015). Em virtude da pandemia de Covid-19, a importância da ventilação natural se intensificou para esses ambientes, pois o aumento das renovações do ar é imprescindível para a qualidade do ar interno, não apenas para reduzir a concentração de CO₂, como, também, evitar o risco de transmissão de doenças virais em ambientes com alta ocupação (JONES *et al.* 2020; FRANCESCHINI; LIGUORI; NEVES, 2021; HOU; KATAL; WANG, 2021; DING; ZHANG; BLUYSSSEN, 2021).

Conforme Hou, Katal e Wang (2021), em uma pesquisa que envolveu a medição dos níveis de CO₂ em três escolas do Canadá, a taxa de ventilação é um indicador importante na análise da propagação de Covid-19. A partir dos resultados, em salas com volumes de 165 m³ e 236 m³, os autores recomendam um nível médio de CO₂ inferior a 450 ppm, que é equivalente a mais de 10 NR/H (renovações de ar por hora).

Segundo pesquisa encaminhada por Franceschini, Liguori e Neves (2021), em escolas de Campinas, SP, concentrações elevadas de CO₂ foram verificadas por meio de simulações, demonstrando que é necessária uma ventilação acima dos níveis preconizados pela NBR 16401-3 (ABNT, 2008), ou seja, superiores a 6,50 NR/H.

Para ambientes fechados não residenciais, a Organização Pan-Americana de Saúde (ORGANIZAÇÃO..., 2021) indica uma taxa mínima de ventilação de 10 l/s/p (litros/segundo/pessoa) e a Organização Mundial da Saúde (ORGANIZAÇÃO..., 2012), para umidade relativa do ar, indica valores de 60% a 80%. Nesse contexto, destaca-se a importância da ventilação higiênica, que é permanente, para a qualidade do ar interno, uma vez que as janelas (elevadas) ficam abertas constantemente. Conforme Hou, Katal e Wang (2021), conseqüentemente, as chances de contágio por doenças transmitidas pelo ar são minimizadas.

Considerando essas recomendações, deve-se usar, em salas de aula, estratégias que proporcionem conforto térmico e taxas adequadas de renovação do ar. Para que se viabilize ambientes saudáveis, as estratégias de ventilação natural devem estar em conformidade com as orientações solares e a incidência de ventos predominantes (SILVA; NASCIMENTO; BITTENCOURT, 2015). A aplicação de estratégias adequadas de ventilação natural está diretamente associada à eficiência energética. Isso porque reduz consumo com condicionamento artificial de ar, diminuindo o gasto de energia sem comprometer o conforto térmico (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

A chaminé solar é um dispositivo que pode viabilizar aumentos nas taxas de ventilação com economia energética (SHI *et al.*, 2016). Sobre esse tema, Maciel (2016) desenvolveu simulações de ventilação natural de uma sala de aula com o *software* EnergyPlus, para Viçosa, MG, situada na ZB3 (Zona Bioclimática 3) (ABNT, 2005c). Foram avaliados diferentes dispositivos de brise-chaminé-solar em distintas orientações. As estratégias simuladas por Maciel (2016) tiveram menos de 10% de diferença de conforto térmico e o desconforto por calor foi nulo na maioria das situações. Segundo a autora, o brise-chaminé-solar, ao aumentar a taxa de ventilação do ambiente, reduziu a temperatura, havendo aumento do desconforto por frio.

Oliveira e Carlo (2018) simularam dispositivos de brise-chaminé-solar constituídos de placa absorvedora e vidro. Os modelos foram instalados em salas de aula de instituição de ensino superior, em Viçosa, MG. Neves e Roriz (2012) realizaram procedimentos estimativos do potencial de uso de chaminés solares para edificações de baixa altura, localizadas em baixa latitude. Conforme os autores, a simulação com o *software* EnergyPlus apresentou melhor concordância com os dados experimentais do que o método de aplicação de modelo matemático com equações de balanço de energia.

Ferreira (2019) também realizou simulações termoenergéticas, com o EnergyPlus, para diferentes estratégias bioclimáticas em uma edificação universitária, em Cachoeira do Sul, RS, na ZB2. Foi simulada a ventilação cruzada, além de outras técnicas, como estantes de luz, dutos subterrâneos e chaminé solar. Conforme os resultados, a diferença máxima de conforto térmico entre as estratégias foi de 11,08%.

Bayoumi (2021) estudou salas de aula de 52 m², situadas em Jidá (Arábia Saudita), usando modelos de fluidodinâmica computacional (CFD). Considerou duas orientações de ventilação e 7 configurações de aberturas, analisando distribuição dos coeficientes de pressão, sensação térmica, velocidade e renovação do

ar. O autor aponta a importância da ventilação cruzada para clima quente e úmido e que uma única solução de aberturas não pode ser aplicada a todas as fachadas.

Quanto à velocidade do ar admissível em espaços naturalmente ventilados, Morais (2013) propõe a altura da zona de respiração humana, 1,50 m, como referência para os caudais. Porém, em salas de aula de ensino fundamental, a ocupação é feita predominantemente por crianças. O período escolar de ensino fundamental, conforme Brasil (2006), se dá a partir de 6 anos, com duração de 9 anos. Através da média dos valores propostos por Dreyfuss (2005), verifica-se que a altura da zona de respiração desses alunos (sentados) é 0,95 m. Nesse contexto, a velocidade máxima admitida em salas de aula, segundo Bayoumi (2021), é de 1,20 m/s.

Observa-se que há trabalhos recentes que abordam salas de aula naturalmente ventiladas, como Ferreira (2019), que abordou salas de aula de ensino superior, bem como Oliveira, Cunha e Leitzke (2020) e Hou, Katal, Wang (2021) mediram os níveis de CO₂ em três escolas em Montreal, Canadá; e Franceschini, Liguori e Neves (2021) estudaram salas de aula de ensino médio em Campinas, SP. Entretanto, poucos se propuseram a investigar estratégias de ventilação natural em salas de aula de ensino fundamental, considerando o clima subtropical úmido, característico da Região Sul do Brasil.

Considerando essa lacuna, o objetivo desta pesquisa é analisar estratégias de ventilação natural em salas de aula do ensino fundamental quanto à eficiência energética, ao conforto térmico e à qualidade de ventilação natural.

Fundamentação teórica

Ventilação natural

A redução de ocupantes associada à taxa de ventilação adequada é recomendada para minimizar o risco de transmissão de doenças virais, como a Covid-19. Existem duas formas de ventilação: higiênica, necessária em todas as épocas do ano (permanente); e térmica, destinada à remoção do calor interno excedente, normalmente em uma situação de verão (ROSA; SEDREZ; SATTLER, 2001). A ventilação térmica apresenta-se como uma alternativa favorável para a obtenção do conforto térmico, também em dias frios. Isso porque essas janelas ficam fechadas em períodos de baixas temperaturas, conforme a percepção de conforto térmico dos usuários, mantendo-se apenas a ventilação higiênica.

Para ventilação permanente, a utilização de janelas elevadas é mais favorável. Isso porque, além de estarem situadas em alturas superiores aos órgãos externos do aparelho respiratório dos usuários, mitigando possível efeito inverso, mediante a infecção por doenças respiratórias, viabilizam, conforme Bowen (1981), distribuição favorável do vento considerando a saída do ar.

A taxa de ventilação, segundo a ABNT (2004, p. 4), é a “[...] vazão de ar exterior que circula por um ambiente através de aberturas intencionais [...]”. Considerando a ação do vento, a Opas (2021, p. 19), define a taxa de ventilação como “[...] a taxa de ventilação natural impulsionada pelo vento através de uma sala [...]”. Para locais não residenciais, assim, sua estimativa é calculada pela Equação 1 (ORGANIZAÇÃO..., 2020; ORGANIZAÇÃO..., 2021).

$$\text{Taxa de ventilação} = K \times x \times \text{velocidade do vento} \times \text{menor área de abertura} \times 1.000 \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

k = 0,05 para ventilação unilateral e 0,65 para ventilação cruzada;

x = no caso de tela mosquiteira instalada, utilizar 0,5; e

Velocidade do vento = valor na altura do edifício em um local sem obstruções (m/s).

Para ventilação unilateral, na Equação 1, a menor área de abertura é a área total útil disponível.

Observa-se que a taxa mínima de 10 l/s/p (ORGANIZAÇÃO..., 2021) é superior ao valor proposto para ambientes climatizados de uso coletivo e longa permanência conforme a Anvisa (AGÊNCIA..., 2003), que é 7,5 l/s/p. Esse, por sua vez, não considera o contexto pandêmico.

O valor NR/H equivalente a 10 l/s/p pode ser calculado conforme as Equações 2 e 3:

$$\text{Vazão numérica} \left(\frac{l}{h} \right) = n^{\circ} \text{ de pessoas} \times 3.600 \times 1.000 \quad \text{Eq. 2}$$

$$\frac{NR}{H} = \frac{\text{Vazão volumétrica} \left(\frac{l}{h} \right)}{\text{Volume do ambiente} (l)} \quad \text{Eq. 3}$$

Sabendo-se que:

1 segundo = 1 renovação = 10 l/s/p; e

1 hora = 3.600 renovações, logo 1h = 36.000 renovações = 36.000 l/h/p.

Eficiência energética

A eficiência energética representa o potencial do ambiente em viabilizar o conforto ambiental para os usuários com baixo dispêndio energético (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). A ventilação natural pode contribuir significativamente para este quesito. O consumo energético e o conforto térmico são condicionados por processos de troca de ar, que variam conforme o clima e uso da edificação (AMERICAN..., 2017c). Neste trabalho, a eficiência energética da ventilação foi avaliada segundo os GH_A (graus-hora anuais) de desconforto.

O indicador GH_A apresenta a diferença entre a temperatura horária e os limites da faixa de temperatura de conforto adotada (SORGATO, 2009), sendo um indicativo da necessidade de climatização artificial. Como exemplo de sua aplicação, cita-se Rackes *et al.* (2015), que avaliaram o potencial de um protótipo de escola rural naturalmente ventilada em diferentes ZBs brasileiras. Os autores realizaram simulações usando *software* EnergyPlus, sendo adotados os limites de conforto adaptativo da ASHRAE 55 (AMERICAN..., 2017b).

Conforto térmico

O conforto térmico corresponde à condição psicológica de satisfação com a situação térmica do ambiente (AMERICAN..., 2017b). Pode estar associado a uma zona de conforto que é a faixa de variação da temperatura operativa e umidade relativa do ar, para a qual são previstas condições de aceitabilidade térmica para valores de velocidade do ar, taxa metabólica e isolamento de vestimenta (ABNT, 2017). Quanto ao isolamento da vestimenta, a roupa viabiliza resistência à transferência de calor entre o corpo e o ambiente (RUAS, 1999). A variação do isolamento depende do tipo de vestimenta: uma camiseta sem manga de poliéster e algodão (0,13 clo) tem 6 vezes mais resistência do que um casaco de poliéster e algodão, acima do joelho, com capuz (0,79 clo) (INTERNATIONAL..., 2007). Pessoas que não estão acostumadas a ambientes climatizados artificialmente usam peças de roupas mais pesadas no inverno, o que ameniza o desconforto. Isso possibilita a ventilação higiênica, fundamental para a salubridade do ar (CARVALHO; SILVA; RAMOS, 2013).

No país, não há normas regulatórias de zona de conforto para escolas naturalmente ventiladas. Internacionalmente, a Ashrae (AMERICAN..., 2017b) relaciona as temperaturas de projeto ou faixas de temperatura aceitáveis a parâmetros climatológicos. É utilizada em espaços condicionados naturalmente com janelas operáveis, para determinar a zona de conforto.

O percentual de horas ocupadas em conforto térmico (PHOCT), estabelecido conforme os critérios da INI-C para obtenção da etiqueta nacional de conservação de energia (Ence), corresponde “[...] à razão entre as horas ocupadas que comprovadamente atendem aos requisitos de conforto térmico quando ventiladas naturalmente e o total de horas ocupadas da edificação [...]” (BRASIL, 2021, p. 13). Trata-se de uma atualização do percentual de horas ocupadas em conforto (POC), do regulamento técnico da qualidade para o nível de eficiência energética de edificações comerciais, de serviços e públicas (RTQ-C), conforme PBE Edifica (PROGRAMA..., 2017).

Fluidodinâmica computacional e o programa Ansys CFX

A fluidodinâmica computacional permite predições quantitativas de fluxos de fluidos, através de códigos computacionais. Baseia-se em leis de conservação de massa, momento e energia. As predições partem de condições predefinidas do fluxo do fluido, gerando valores como velocidade e pressão para um domínio (KUNDU; COHEN; HU, 2002).

Em uma simulação de CFD, o volume de ar ao redor do edifício é dividido em uma malha com pequenos volumes, em que são realizados cálculos de conservação de massa e momento. Quanto mais fina a malha, mais precisos são os resultados e, conseqüentemente, maior o tempo e a capacidade de processamento para a simulação. Na simulação, deve-se objetivar a independência do resultado obtido em relação à densidade da malha, sendo importante proceder a um teste de refinamento da malha. A malha deve ser gerada de modo que seu refinamento não mude significativamente o resultado encontrado (EUROPEAN..., 2004). Dentre as pesquisas em que é investigado o aproveitamento da ventilação natural em salas de aula na última década, e que envolvem a simulação CFD, é possível citar as de Maciel (2016), Angelopoulos *et al.* (2017) e Bayoumi (2021). O Ansys CFX utiliza os princípios da CFD, sendo uma ferramenta aceita no meio científico para

aplicações em fenômenos que envolvem o escoamento de fluidos em edificações (BANGALEE; LIN; MIAU, 2012; HAJDUKIEWICZ; GERON; KEANE, 2013; WRIGHT; HARGREAVES, 2016).

Método

A pesquisa estruturou-se em cinco etapas. Utilizou-se como modelo uma escola padrão FNDE na cidade de Santa Maria, RS, que apresenta clima subtropical úmido, para simulações computacionais com os *softwares* Ansys CFX e o EnergyPlus. Analisaram-se horas ocupadas em conforto térmico, graus-hora de desconforto, velocidade do ar interno, taxas de renovação do ar e umidade do ar.

Caracterização climática

Santa Maria, RS, localizada na latitude de -29.720, longitude de -53.720, e altitude de 139 m, caracteriza-se por possuir uma média horária máxima de temperatura de bulbo seco, correspondente a 29,30 °C, em janeiro, e uma média horária mínima de 11,30 °C, em julho. A média horária máxima de umidade relativa do ar é de 95%, em maio, enquanto a média horária mínima equivale a 47%, em novembro (BULIGON, 2021). As médias mensais são apresentadas na Figura 1.

O clima da cidade classifica-se como subtropical úmido, tipo Cfa, com alta umidade relativa do ar e por verões quentes (TORRES; MACHADO, 2011; BULIGON, 2021). As orientações de maior frequência do vento em Santa Maria são leste e sudeste. A média máxima de velocidade do ar é 7,33 m/s e a mínima 0,05 m/s (BULIGON, 2021).

Definição do modelo de simulação

O objeto de simulação é uma escola de ensino fundamental (Figura 2), etapa escolar mais longa, com duração de 9 anos (BRASIL, 2006). A escola foi configurada segundo o modelo do FNDE (FUNDO..., 2017), órgão federal responsável pela execução de políticas educacionais do Ministério da Educação e que disponibiliza aos municípios orientações técnicas para elaboração de projetos de edificações escolares (BRASIL, 1969).

Figura 1 - Médias horárias mensais de temperatura de bulbo seco e umidade relativa do ar no município

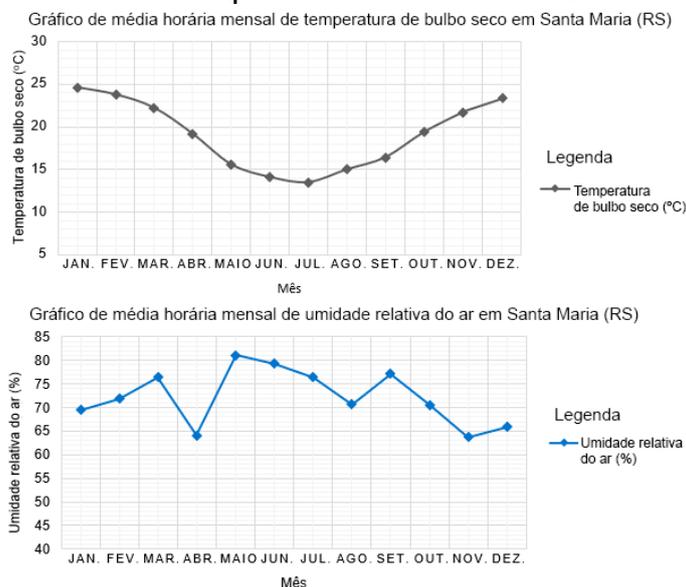
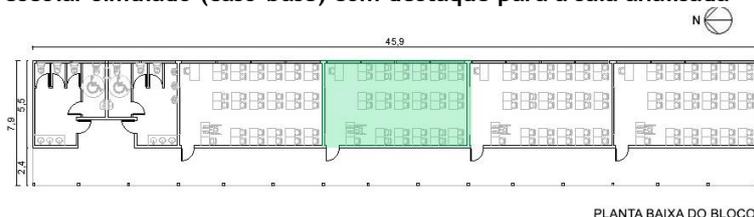


Figura 2 - Edifício escolar simulado (caso-base) com destaque para a sala analisada



Foi escolhida uma sala de aula em uma posição central ao bloco, para evitar a simulação de uma condição específica. Em edifícios escolares de salas de aula, há menores chances de essas estarem localizadas nos extremos, visto que costumam estar distribuídas de forma linear. Isso é identificado nos modelos de projetos disponibilizados pelo FNDE (FUNDO..., 2019).

O sistema construtivo do modelo possui laje de concreto e piso cerâmico, parede com blocos cerâmicos de 6 furos, cobertura com telha cerâmica e laje pré-moldada de concreto, janela de vidro comum e porta de compensado em madeira (ABNT 2005c; WEBER *et al.*, 2017), buscando atender às recomendações do FNDE (2017). As propriedades térmicas dos materiais são apresentadas nas Tabelas 1 e 2, sendo descritas: espessura (e), condutividade térmica (λ), peso específico aparente (ρ), calor específico (c), emitância térmica (ϵ), absorvância (α), transmitância (σ) e refletância (ρ).

A parede do modelo possui transmitância térmica de $1,27 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ e capacidade térmica de $195 \text{ kJ/m} \cdot ^\circ\text{C}$. A cobertura possui transmitância térmica com $1,26 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ e capacidade térmica com $150 \text{ kJ/m} \cdot ^\circ\text{C}$ (WEBER *et al.*, 2017; ABNT, 2005a, 2005c).

Para o caso-base, adotou-se ventilação unilateral térmica, com área de abertura de $10,96 \text{ m}^2$. A área de abertura de ventilação respeitou o critério de, pelo menos, $1/10$ da área do piso e o valor mínimo de abertura de iluminação de $1/5$ do piso. A sala também admitiu ocupação de $1,30 \text{ m}^2$ por aluno e pé-direito de $2,80 \text{ m}$ (FUNDO..., 2017). As esquadrias foram do tipo camarão na parte inferior e *maxim-ar* (abertura 90°) na parte superior, com peitoril de $1,00 \text{ m}$, orientadas para leste (ventos predominantes). Também foram testadas janelas ao norte, em virtude do aquecimento solar passivo, estratégia indicada para a ZB2 (ABNT, 2013).

Para o sistema superior das janelas, a porcentagem de abertura para ventilação e iluminação natural é de 80% . Para o sistema inferior, esse valor é 90% , conforme PBE Edifica (PROGRAMA..., 2012). Para as estratégias em que foi considerada a ventilação higiênica, esta foi sempre localizada nas duas primeiras janelas, junto à posição do professor, na parede com face para o meio exterior. Isso porque essas aberturas, no ambiente, possuem maior fluxo e velocidade do ar, conforme as simulações prévias desenvolvidas pelos autores no Ansys CFX, que ajudaram a definir configurações iniciais, para evitar o resfriamento excessivo.

Para os casos de ventilação cruzada, as janelas da parede oposta possuíram peitoril de $2,05 \text{ m}$ e altura de $0,50 \text{ m}$, tipo *maxim-ar*, na parede voltada para a circulação. Segundo Givoni (1976) e Bowen (1981), janelas mais amplas para a entrada de ar em relação às de saída possibilitam a distribuição uniforme da velocidade do vento, pois diminuem o fluxo de ar no ambiente. Ademais, conforme Sobin (1981), formatos horizontais viabilizam maior rendimento médio nos diferentes ângulos de incidência do vento.

Também foram utilizadas chaminés solares nos casos simulados, sendo a conexão entre o duto e as salas de aula de $0,36 \text{ m}^2$. A janela de conexão (J4) é do tipo pivotante horizontal (abertura de 90°), com altura de $0,50 \text{ m}$, largura de $0,80 \text{ m}$ e peitoril de $2,05 \text{ m}$. A representação das janelas dos modelos é mostrada na Figura 3. A porta foi mantida fechada em todas as simulações, condição que garante a privacidade das salas de aula.

Além da configuração-base, foram testadas mais 15 configurações (Quadro 1), para a sala analisada. As plantas baixas foram apresentadas a uma altura de $1,5 \text{ m}$. Para os casos com lanternim, foram realizadas duas plantas baixas, para identificar a presença das janelas J3.

A ocupação da sala de aula correspondeu a 37 pessoas (36 alunos e 1 professor), para dias letivos, de segunda a sexta. O período de aula foi de 24 de fevereiro até 14 de dezembro, sendo o mês de julho de férias. O horário de ocupação foi definido das 07h45min às 11h45min, no turno da manhã, e das 13h às 17h, no turno da tarde, considerando uma carga horária mínima de 800h exigida para o ensino fundamental (BRASIL, 1996).

Critérios de avaliação

Foi adotado o PHOCT, conforme a INI-C (BRASIL, 2021), que preconiza que, em áreas de longa permanência não condicionadas, deve haver a comprovação de temperaturas dentro da zona de conforto durante um percentual das horas ocupadas. Foram assumidos limites de aceitabilidade de 80% da ASHRAE 55/2017, que se destinam a aplicações típicas (AMERICAN..., 2017b).

Para a velocidade máxima admitida, adotou-se $1,20 \text{ m/s}$, conforme Bayoumi (2021). Quanto à taxa de ventilação e NR/H, foram adotadas a recomendação da Opas (ORGANIZAÇÃO..., 2021) para ambientes fechados não residenciais, ou seja, 10 l/s/p , equivalente a $10,16 \text{ NR/H}$, conforme as Equações 2 e 3. Para a avaliação da umidade relativa do ar, foi utilizado como critério o intervalo de 60% a 80% , (ORGANIZAÇÃO..., 2012).

Tabela 1 - Propriedades dos materiais opacos

Nome	e cm	λ W/m°C	ρ kg/m ³	c kJ/kgK	ϵ [W/mK]	α
Piso cerâmico	0,750	1,05	2.000	0,920	0,90	0,20
Argamassa	2,00	1,15	2.000	1,00	0,90	0,70
Concreto	9,85	1,75	2.200	1,00	0,90	0,80
Argamassa (2x)	2,50	1,15	2.000	1,00	0,90	0,20
Cerâmica (2x)	1,34	0,900	1.600	0,920	0,90	0,70
Câmara de ar	6,32	0,361	-	-	-	-
Cerâmica	1,00	1,05	2.000	0,920	0,90	0,20
Câmara de ar	25,00	1,190	-	-	-	-
Concreto	4,00	1,75	2.200	1,00	0,90	0,20
EPS+Concreto	7,00	0,223	2.000	1,00	0,90	0,20
Argamassa	1,00	1,15	2.000	1,00	0,90	0,20
Compensado	3,50	0,15	550	2,30	0,90	0,70

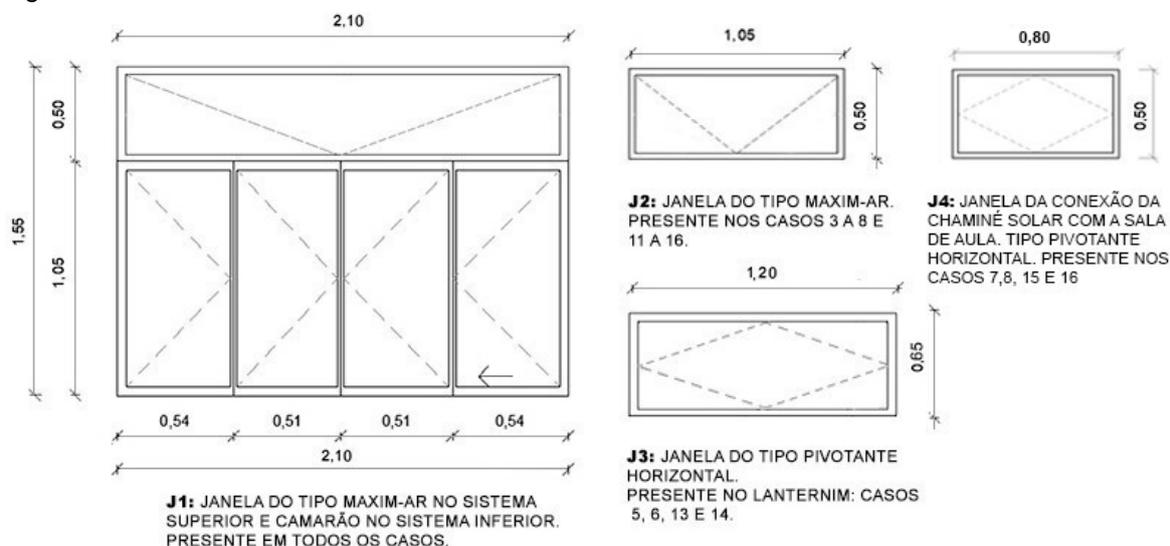
Fonte: Weber *et al.* (2017) e ABNT (2005b, 2005c).

Tabela 2 - Propriedades do material translúcido

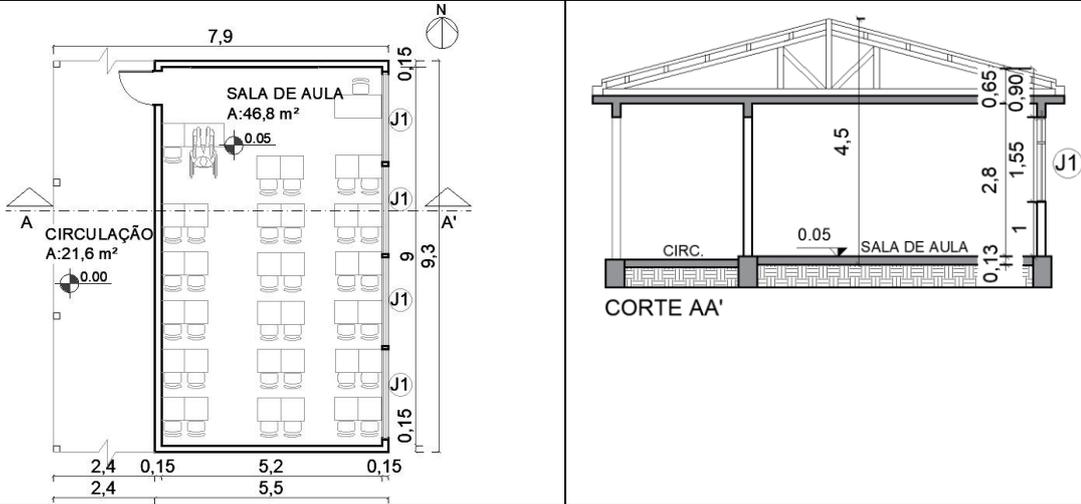
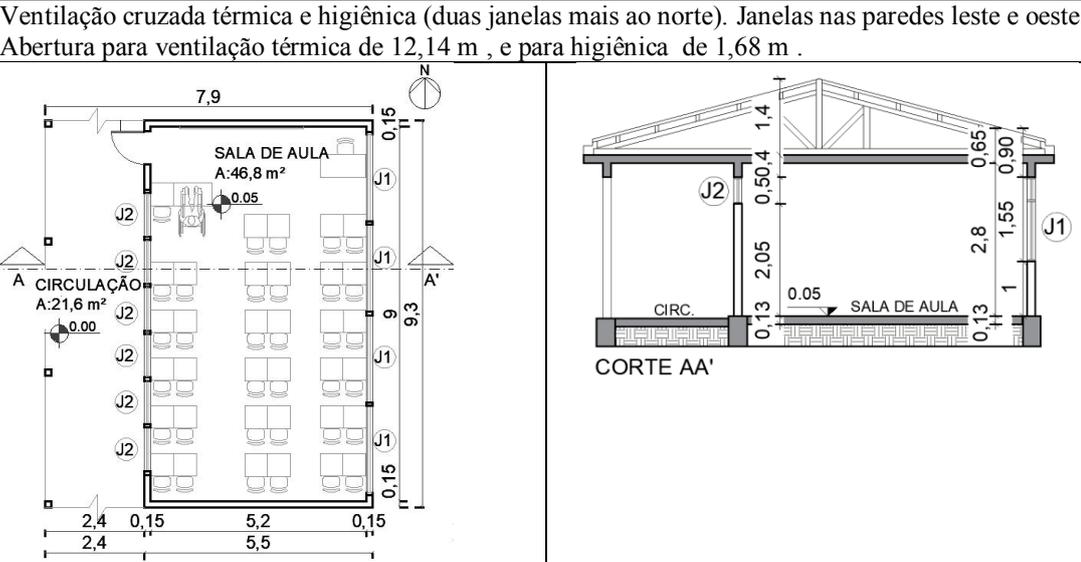
Nome	e cm	σ	ρ	α
Vidro comum	0,30	0,83	0,09	0,08

Fonte: Santos *et al.* (2018).

Figura 3 - Janelas utilizadas



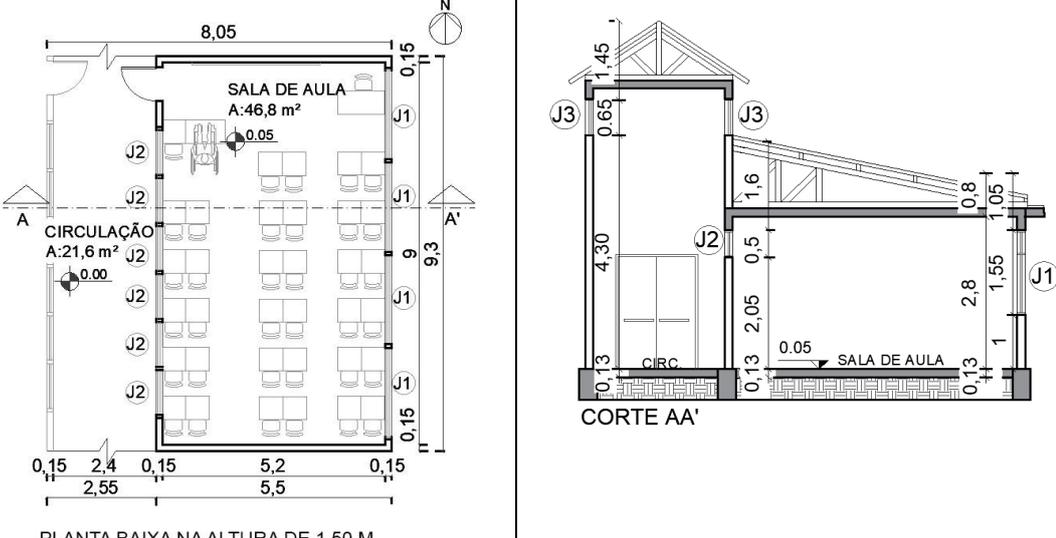
Quadro 1 - Casos de ventilação natural (Continua...)

Nº	Descrição da estratégia	
1	Ventilação unilateral térmica. Janelas na parede leste. Abertura para ventilação: 10,96 m .	
2	Ventilação unilateral térmica e higiênica (duas janelas mais ao norte). Janelas na parede leste. Abertura para ventilação térmica de 9,28 m , e para higiênica 1,68 m .	
3	<p data-bbox="229 539 256 775" style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Planta-baixa e corte</p> 	
	4	Ventilação cruzada térmica. Janelas nas paredes leste e oeste. Abertura para ventilação: 13,82 m .
4	<p data-bbox="229 1167 256 1402" style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Planta-baixa e corte</p> 	
	3	Ventilação cruzada térmica e higiênica (duas janelas mais ao norte). Janelas nas paredes leste e oeste. Abertura para ventilação térmica de 12,14 m , e para higiênica de 1,68 m .

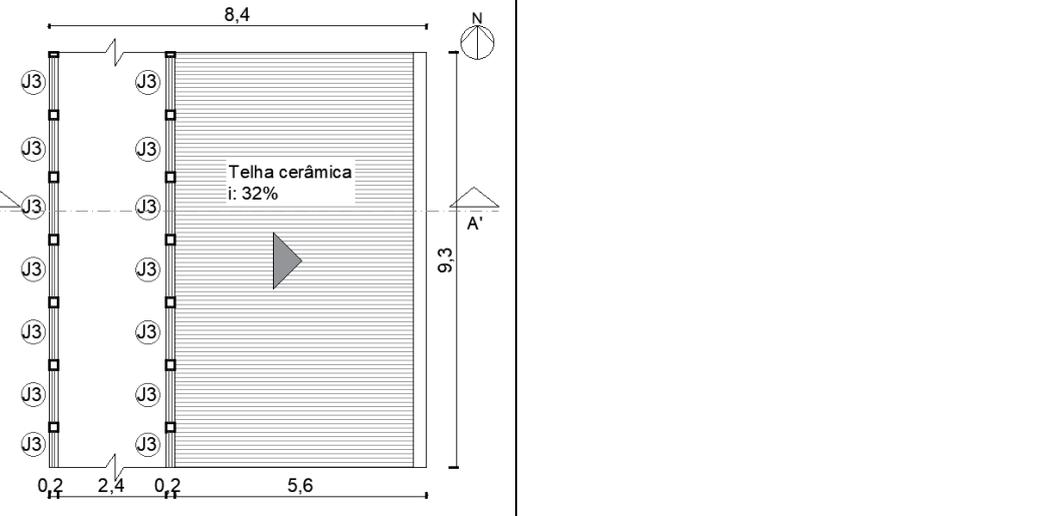
Quadro 1 - Casos de ventilação natural (continuação)

Nº	Descrição da estratégia
5	Ventilação cruzada térmica. Janelas nas paredes leste e oeste, com conexão da sala a uma circulação ventilada por lanternim. Abertura para ventilação: 13,82 m .
6	Ventilação cruzada térmica e higiênica (duas janelas mais ao norte). Janelas nas paredes leste e oeste. Conexão da sala a uma circulação ventilada por lanternim. Abertura para ventilação térmica de 12,14 m , e para higiênica de 1,68 m .

Planta-baixa e corte



PLANTA BAIXA NA ALTURA DE 1,50 M

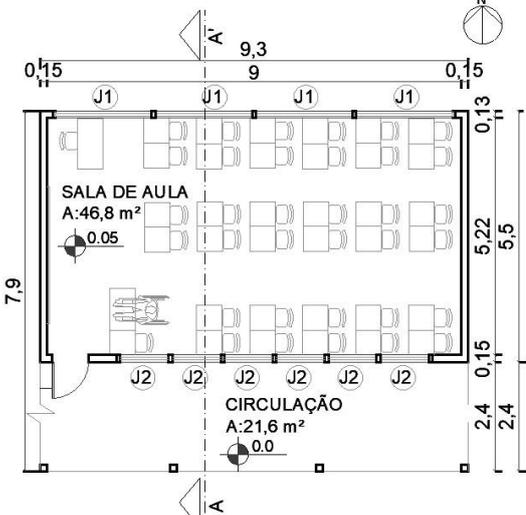
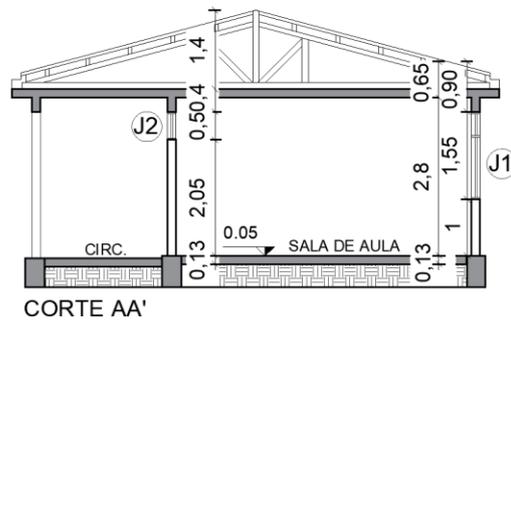
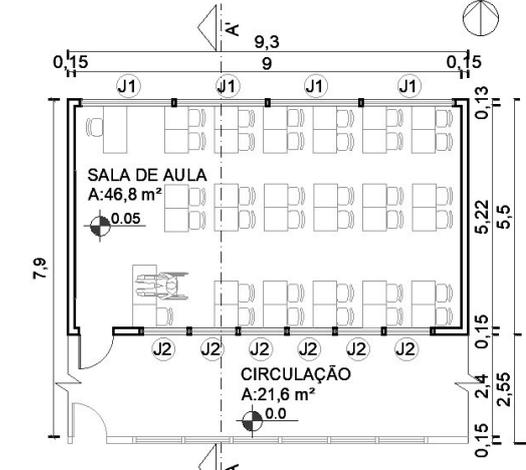
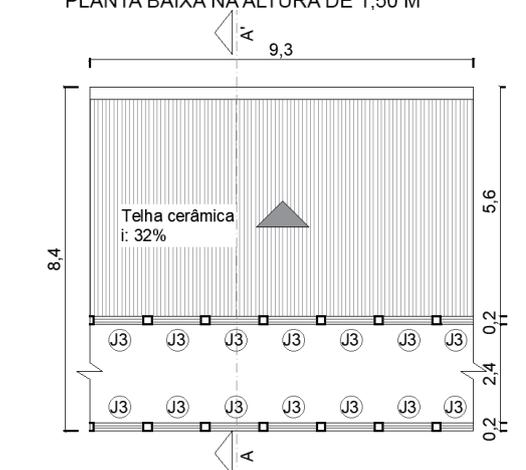
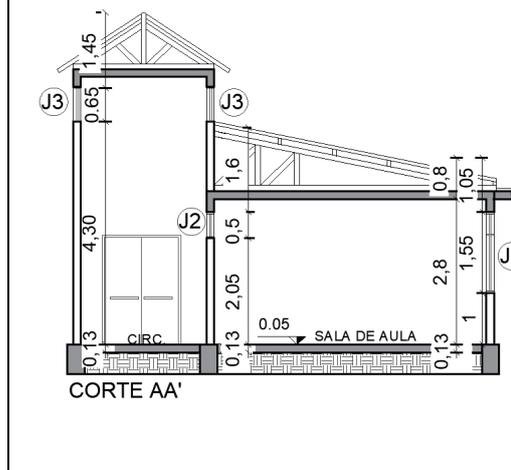


PLANTA BAIXA NA ALTURA DE 4,60 M

Quadro 1 - Casos de ventilação natural (continuação)

Nº	Descrição da estratégia
7	Ventilação térmica, com uso de janelas com peitoril de 1,00 m (leste) e chaminés solares (oeste). Abertura para ventilação: 11,78 m .
8	Ventilação térmica e higiênica (duas janelas mais ao norte). Janelas com peitoril de 1,00 m (leste) e chaminés solares (oeste). Abertura para ventilação térmica de 10,10 m , e para higiênica de 1,68 m .
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Planta-baixa e corte</p>	<p>The floor plan shows a classroom (SALA DE AULA) with an area of 46.8 m² and a circulation area (CIRCULAÇÃO) with an area of 21.6 m². The classroom is 7.9 m wide and 9.3 m long. It features a north wall with two windows (J1) and a west wall with solar chimneys (J4). The circulation area is 2.4 m wide and 0.00 m high. Section AA' shows a cross-section of the classroom with a height of 4.5 m. It includes a solar chimney (J4) with a height of 1.75 m and a window (J1) with a height of 0.9 m. The section also shows the external support (SUPORTE EXTERNO) and the absorber plate (PLACA ABSORVEDORA).</p>
9	Ventilação unilateral térmica. Janelas na parede norte. Abertura para ventilação: 10,96 m .
10	Ventilação unilateral térmica e higiênica (duas janelas mais ao oeste). Janelas na parede norte. Abertura para ventilação térmica de 9,28 m , e para higiênica de 1,68 m .
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Planta-baixa e corte</p>	<p>The floor plan shows a classroom (SALA DE AULA) with an area of 46.8 m² and a circulation area (CIRCULAÇÃO) with an area of 21.6 m². The classroom is 7.9 m wide and 9.3 m long. It features a north wall with two windows (J1) and a west wall with two windows (J1). The circulation area is 2.4 m wide and 0.00 m high. Section AA' shows a cross-section of the classroom with a height of 4.5 m. It includes a window (J1) with a height of 0.9 m and a circulation area (CIRC.) with a height of 0.13 m. The section also shows the external support (SUPORTE EXTERNO) and the absorber plate (PLACA ABSORVEDORA).</p>

Quadro 1 - Casos de ventilação natural (continuação)

Nº	Descrição da estratégia	
11	Ventilação cruzada térmica. Janelas nas paredes norte e sul. Abertura para ventilação: 13,82 m.	
12	Ventilação cruzada térmica e higiênica (duas janelas mais ao oeste). Janelas nas paredes norte e sul. Abertura para ventilação térmica de 12,14 m, e para higiênica de 1,68 m.	
Planta-baixa e corte	 <p>SALA DE AULA A: 46,8 m²</p> <p>CIRCULAÇÃO A: 21,6 m²</p>	 <p>CORTE AA'</p>
13	Ventilação cruzada térmica. Janelas nas paredes norte e sul, com conexão da sala a uma circulação ventilada por lanternim. Abertura para ventilação: 13,82 m.	
14	Ventilação cruzada térmica e higiênica (duas janelas mais ao oeste). Janelas nas paredes norte e sul. Conexão da sala a uma circulação ventilada por lanternim. Abertura para ventilação térmica de 12,14 m, e para higiênica de 1,68 m.	
Planta-baixa e corte	 <p>SALA DE AULA A: 46,8 m²</p> <p>CIRCULAÇÃO A: 21,6 m²</p> <p>PLANTA BAIXA NA ALTURA DE 1,50 M</p>  <p>Telha cerâmica i: 32%</p> <p>PLANTA BAIXA NA ALTURA DE 4,60 M</p>	 <p>CORTE AA'</p>

Quadro 1 - Casos de ventilação natural (conclusão)

Nº	Descrição da estratégia de ventilação
15	Ventilação térmica, com uso de janelas com peitoril de 1,00 m (norte) e chaminés solares (sul). Abertura para ventilação: 11,78 m .
16	Ventilação térmica e higiênica (duas janelas mais ao oeste). Janelas com peitoril de 1,00 m (norte) e chaminés solares (sul). Abertura para ventilação térmica de 10,10 m , e para higiênica de 1,68 m .

Planta-baixa e corte

CORTE AA'

Parâmetros de simulação

Foram utilizados dois *softwares* de simulação: o Ansys CFX 17.1 e o EnergyPlus 8.7.0. Primeiramente, com o Ansys CFX, obteve-se a velocidade do ar e os coeficientes de pressão (C_p), os quais foram utilizados como dados de entrada no EnergyPlus. O Ansys CFX é um *software* CFD já consolidado na simulação de escoamento de fluidos, como já comentado, e apresenta versatilidade na importação de malhas, interface com outros *softwares* de simulação e um processador avançado para geração de geometria e de malhas (CÓSTOLA, 2006; SANTOS, 2012; SILVA, 2019). O EnergyPlus foi utilizado para as simulações termoenergéticas por ser validado pela Standard 140 (AMERICAN..., 2017a) e atender aos requisitos exigidos pelo INI-C (BRASIL, 2021).

Ansys CFX

No Ansys CFX, foram importadas as geometrias dos blocos escolares junto de seus domínios de escoamento, que foram modelados no AutoCAD 2021. Os domínios, com geometria circular, tiveram as dimensões determinadas conforme as recomendações de Cóstola e Alucci (2011), que pontuam que o ideal é que a altura do domínio corresponda a 5 vezes a altura do edifício e a distância seja de, no mínimo, 10 vezes a altura do edifício nas demais direções. Segundo os autores citados, o domínio circular é vantajoso porque viabiliza usar a mesma modelagem e malha para simular qualquer direção do vento. Também foi analisada a obstrução máxima que a frente do modelo causa no perfil do domínio. Essa obstrução foi inferior a 3%, conforme recomenda European Cooperation in Science and Technology (EUROPEAN..., 2004). As janelas foram modeladas como abertas nas geometrias das simulações no Ansys CFX.

Para a geração das malhas, foi utilizado o módulo *Mesh*. A malha foi definida como tetraédrica estruturada. Na aba *Relevance Center* foi efetuado o refinamento geral da malha, sendo adotado *fine*, valor mais alto. Na opção *Growth Rate*, que determina o fator de expansão das células contíguas, foi adotado o valor padrão 1,2, devendo ser inferior a 1,3, conforme autores como Tamura, Nozawa e Kondo (2008) e Tominaga *et al.* (2008). Para gerar a malha, também foram configuradas duas regiões com *Inflated boundary*, que é a camada de elementos prismáticos das fronteiras do domínio. Foi realizada uma para o piso do domínio, com espessura máxima de 0,4, e uma para a superfície das edificações, com 0,2 (AMARAL, 2017).

Depois de gerada a malha original, para refiná-la, foi utilizada a Equação 4 do fator de refinamento R (CELIK *et al.*, 2008):

$$R = \frac{h_{coarse}}{h_{fine}} \tag{Eq. 4}$$

Onde:

hcoarse = tamanho representativo da malha grosseira; e

hfine = tamanho representativo da malha refinada.

Tendo-se o tamanho (h) da malha original, calcula-se o h da malha a ser gerada, dividindo-se o valor por 1,3 para uma malha mais refinada. A partir do valor h da nova malha é viável definir o número de elementos a ser usado (AMARAL, 2017), conforme a Tabela 3.

Sobre condições de contorno, no módulo *Setup* foram definidas como paredes a superfície da base do domínio e o edifício. Essas são classificadas como sem escorregamento (*no slip*). As superfícies do piso e do corpo do edifício foram definidas como lisas (*smooth*), conforme Cóstola (2006). Quanto aos limites em que o fluido entra e deixa o domínio, as laterais do domínio foram definidas como *inlet* (entrada) e o topo do domínio como *opening* (abertura). Nas laterais do domínio foi atribuída uma velocidade nas componentes cartesianas x, y e z. A velocidade na direção z é zero, e as outras componentes são dadas em variáveis u_1 e v_1 , cujo valor é definido no arquivo. *ccl* (CÓSTOLA; ALUCCI, 2011). O perfil das velocidades de vento foi inserido no arquivo *.ccl*, que contém a equação do perfil de velocidade do ar, conforme a Equação 5 (BUILDING..., 1978).

$$V = V_m \times k \times z^a \quad \text{Eq. 5}$$

Sendo:

V = velocidade média do vento na altura da entrada do ar (m/s);

V_m = velocidade média do vento, conforme a estação meteorológica, a uma altura de 10 m (m/s);

z = altura da abertura de entrada do vento; e

k, a = coeficientes que variam segundo a rugosidade do entorno (Tabela 4).

A velocidade média do vento no município é 2,20 m/s, obtida das normais climatológicas do INMET (INSTITUTO..., 2018) referentes às direções predominantes do vento. Assim, a velocidade do vento no ponto, inserida no arquivo *.ccl*, foi de 3,22 m/s, conforme a Equação 5. Quanto aos coeficientes de rugosidade do entorno, foi utilizada a condição área urbana da Tabela 4, conforme as recomendações de BRE (BUILDING..., 1978).

Tabela 3 - Número de elementos das malhas

Propriedades	Malha original	Malha refinada
Casos 1, 2, 9 e 10		
Nº de elementos	6.259.701,19	13.752.563,51
Volume do domínio (m³)	1.471.300,00	1.471.300,00
H	0,61713	0,47472
R	1,3	1,3
Casos 3, 4, 11 e 12		
Nº de elementos	7.082.833,60	15.560.985,42
Volume do domínio (m³)	1.471.300,00	1.471.300,00
H	0,59224	0,45556
R	1,3	1,3
Casos 5, 6, 13 e 14		
Nº de elementos	16.127.539,87	35.432.205,09
Volume do domínio (m³)	2.094.800,00	2.094.800,00
H	0,50643	0,38956
R	1,3	1,3
Volume do domínio (m³)	1.614.900,00	1.614.900,00
H	0,71378	0,54906
R	1,3	1,3
Casos 7, 8, 15 e 16		
Nº de elementos	4.440.582,99	9.755.960,83
Volume do domínio (m³)	1.614.900,00	1.614.900,00
H	0,71378	0,54906
R	1,3	1,3

Tabela 4 - Coeficientes de rugosidade do entorno

Tipo de terreno	K	a
Área aberta plana	0,68	0,17
Campo com obstáculos espaçados	0,52	0,20
Área urbana	0,35	0,25
Centro de cidade	0,21	0,33

Fonte: BRE (BUILDING..., 1978).

Na opção *Solver Control* do módulo *Setup* do *Workbench*, foi estabelecido o nível de convergência assim que os níveis residuais atingiram 10^{-4} . O modelo de turbulência utilizado foi k- Epsilon, por viabilizar a melhor relação entre o tempo de processamento e precisão (NOZU *et al.*, 2008; BEVILAQUA *et al.*, 2019). Além disso, sua baixa demanda computacional faz com seja um dos mais validados e aplicados em engenharia. O modelo k- Epsilon é de primeira ordem, portanto resolve duas equações de fluxo. Modelos de segunda ordem apresentam altas exigências computacionais, além de aumentarem o tempo de processamento em mais de três vezes, o que limita sua aplicação (FIGUEIREDO, 2008; MOUSA *et al.*, 2017; BALABEL; FAIZAN; ALZAED, 2021; GUPTA; KHARE, 2021).

Quanto às variáveis de saída, no módulo CFX-Post, foram exportados valores de velocidade do ar (m/s) e de C_p do vento nas janelas. Para o cálculo do C_p , conforme Amaral (2017), houve a inserção da Equação 6 no CFX-Post.

$$P_x = 0,5 \times \rho \times C_p \times V^2 \quad \text{Eq. 6}$$

Sendo:

P_x = pressão dinâmica em um ponto da superfície do modelo;

ρ = densidade do fluido;

C_p = coeficiente de pressão; e

V = velocidade de escoamento em um ponto do fluxo de ar não perturbado.

Os resultados de C_p foram exportados em arquivo .csv e uma média foi calculado para cada abertura.

Simulação da ventilação natural no EnergyPlus

No *software* EnergyPlus, foram inseridas a geometria do modelo e as propriedades dos materiais anteriormente apresentadas, além do C_p de cada abertura. O modelo foi realizado no SketchUp Make 2017 com auxílio do *plugin* Euclid (0.9.3). Para as dimensões da edificação, foi considerado o eixo das paredes, sendo realizada uma nova zona térmica para cada ambiente.

O arquivo climático utilizado foi TMY2 para Santa Maria, RS, de formato .epw e com dados registrados pelo INMET. Em *Building* foi mantida a configuração *terrain* (terreno) como *city* (cidade) e os valores padrões do *software* nos demais campos do objeto. Como ganhos de calor interno, considerou-se 37 pessoas com taxa metabólica de 108 W/pessoa para usuários sentados, em repouso (SORGATO; MELO; LAMBERTS, 2014) e utilização de iluminação artificial de 9,90 Watts/m², valor indicado para a obtenção de classificação A de eficiência energética (BRASIL, 2021). No objeto de simulação, foi inserida a iluminação *surface mount*, sendo a fração radiante de 0,72, a fração visível de 0,18 e a de retorno de ar correspondente a zero (ABNT, 2017).

Com exceção da chaminé solar, a simulação da ventilação natural foi realizada no modelo *AirflowNetwork*. O fator de abertura para a ventilação natural, configurado no *AirflowNetwork:Multizone:Surface*, depende da porcentagem de abertura para ventilação de cada janela: as pivotantes horizontais e as do tipo camarão possuem fator de 0,9 e as maxim-ar (abertura 90°) possuem fator de 0,8 (PROGRAMA..., 2012).

Como a edificação tem contato direto com o solo, foi realizado um processo de configuração deste. Primeiro, o piso adiabático foi adotado em todos os ambientes e realizada uma simulação para serem retiradas as temperaturas médias internas mensais. Depois, as médias foram ponderadas pelas áreas dos ambientes e os valores resultantes foram inseridos no arquivo *Slab*. Em seguida, houve a configuração dos objetos *GroundHeatTransfer:Slab:EquivalentSlab*, e *Site:GroundTemperature:BuildingSurface*, para serem realizadas as simulações normalmente.

A inserção dos C_p s, obtidos no Ansys CFX, ocorreu no objeto *AirflowNetwork:Multizone:WindPressureCoefficientvalues*. Foi necessária a configuração do objeto

AirflowNetwork:MultiZone:WindPressureCoefficientArray, onde os ângulos de direção do vento foram inseridos conforme os ventos predominantes. Para *Wind Direction 1* foi estabelecido o valor 90 (direção leste) e para *Wind Direction 2*, 135 (direção sudeste).

Acerca do controle de abertura das esquadrias, na ventilação térmica, uma agenda habilita a ventilação através da janela, que é controlada pela temperatura de *setpoint* de 22 °C. Esse valor foi definido a partir de simulações iniciais nos modelos. Para valores menores de *setpoint*, o desconforto anual por frio foi superior nas situações simuladas, com acréscimos de mais de 20h de desconforto, enquanto que para *setpoints* maiores, observou-se acréscimos de mais de 15h de desconforto. A temperatura de 22 °C corresponde ao limite inferior máximo da faixa de conforto adaptativo (AMERICAN..., 2017b) obtida com o arquivo climático (BULIGON, 2021), conforme a Figura 4.

Na simulação dos modelos com chaminé solar, foi introduzido o objeto *Zone ThermalChimney*. Nele, foram inseridos dados como a área da seção de entrada do canal, como sendo 0,36 m². A agenda de funcionamento da chaminé solar foi estabelecida para um *setpoint* de 22 °C.

Nas simulações, as variáveis de saída foram temperatura operativa da zona (°C), temperatura externa de bulbo seco (°C), renovação do ar por hora (h⁻¹) e umidade relativa do ar (%).

Tratamento e análise de dados

A análise e o tratamento dos dados resultaram em cenários que foram comparados entre si e com resultados outras pesquisas com objetivos similares, como Maciel (2016), Ferreira (2019) e Rackes *et al.* (2015). Os dados foram organizados segundo o PHOCT (total e desconforto por frio e calor); GH_A de aquecimento e resfriamento; velocidade do ar, na altura da respiração das crianças sentadas (0,95 m) e de 1,50 m (MORAIS, 2013; DREYFUSS, 2005), além de um plano vertical de corte; taxas de ventilação; NR/H; e umidade média relativa do ar.

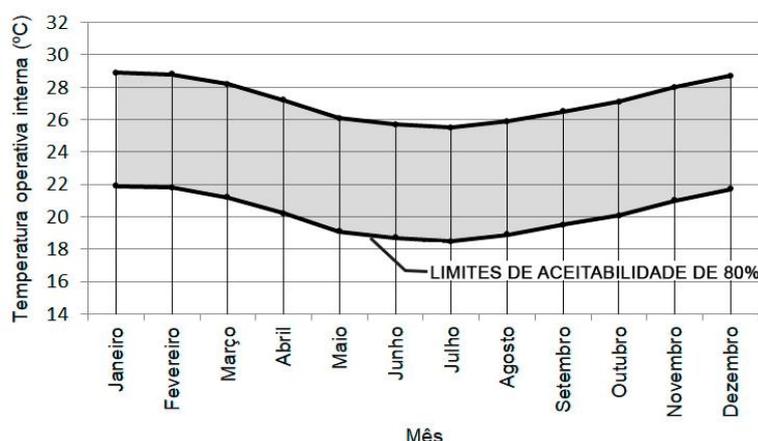
A partir dos dados de saída do EnergyPlus, foram verificados o PHOCT e os percentuais de horas em desconforto por frio e calor, considerando o horário de aulas (das 7h45min às 11h45min e das 13h às 17h). Os meses de janeiro e julho, de férias, não foram contabilizados. Fevereiro teve 3 dias letivos e dezembro teve 10.

A soma dos GH_A considerou valores para aquecimento e resfriamento. Quanto às taxas de ventilação e NR/H, fez-se a comparação com caudais recomendados pela Opas (ORGANIZAÇÃO..., 2021), de no mínimo 10 l/s/pessoa, para ambientes não residenciais.

A umidade relativa do ar foi simulada considerando a média mensal. Para a análise de resultados, os valores limites da umidade foram definidos conforme a faixa recomendada pela OMS (2012), de 60% a 80%.

Os resultados foram apresentados de forma a destacar as melhores estratégias que viabilizam eficiência da ventilação natural sem comprometer o conforto térmico e a qualidade de ventilação interna expressa em taxas de ventilação e umidade relativa do ar.

Figura 4 - Faixa de conforto adaptativo utilizada



Resultados e discussão

PHOCT

Conforme os resultados (Figura 5), a estratégia 1 (ventilação unilateral com aberturas a leste) foi a que teve maior PHOCT, com 80,07%, provavelmente em virtude da menor área de abertura para ventilação e de ausência de ventilação higiênica, evitando perdas de calor no inverno. Os casos 4 (ventilação cruzada leste-oeste, higiênica e térmica) e 12 (ventilação cruzada norte-sul, higiênica e térmica) apresentaram menor PHOCT (70,42% e 70,63%, respectivamente). Ambos são conectados a uma circulação aberta, o que potencializa trocas térmicas por ventilação.

Nota-se, a despeito da diferença de clima, que o desconforto por frio atinge percentagens significativas (cerca de 1/4 das horas ocupadas). Já na pesquisa de Ferreira (2019), que envolveu simulações termoenergéticas de diferentes estratégias de climatização natural em salas de aula universitárias de Cachoeira do Sul, RS, o caso mais favorável teve desconforto por calor de 9,47% e por frio de 1,95%. Além de ventilação cruzada, as estratégias adotadas incluíam: vidros duplos, inércia térmica e sombreamento com vegetação.

Observa-se que os casos com ventilação higiênica apresentaram maior desconforto térmico se comparados às situações que tiveram a mesma configuração, apenas com ventilação térmica, com percentagens de desconforto total até 7,56% superiores (casos 7 e 8). Isso se deve ao fato do período letivo, que abrange os meses mais frios do ano. Nesse caso, a ventilação higiênica potencializa perdas de calor, aumentando o desconforto por frio.

Conforme a Tabela 5, o caso 1 (ventilação unilateral com aberturas a leste) apresentou menor quantidade de horas anuais em desconforto por frio, com 250h (15,62%), e também foi o caso com maior PHOCT. O caso 1 possui ventilação unilateral, com janelas a leste, o que dificulta trocas de calor por ventilação. Os casos 7 (ventilação cruzada com chaminé solar) e 9 (ventilação térmica unilateral) também apresentaram percentagem baixa de desconforto por frio e desconforto total e valores altos de PHOCT comparativamente aos demais casos. Essas duas situações apresentam resultados próximos com soluções diferentes, com e sem a ventilação cruzada.

Considerando-se a importância da ventilação cruzada preconizada por diversos autores, a solução 7 seria uma melhor opção, quando comparada a uma sala simples, com sistema de abertura unilateral. As situações 4 (ventilação cruzada leste-oeste, higiênica e térmica) e 12 (ventilação cruzada norte-sul, higiênica e térmica), que tiveram os menores PHOCT, apresentaram valores altos de desconforto por frio se comparados aos demais casos, demonstrando que a circulação aberta associada à ventilação cruzada é uma solução desfavorável para o clima estudado. Já o desconforto por calor foi inferior a 6% em todos os casos, provavelmente em decorrência da abrangência anual do período letivo.

O desconforto por frio atinge maior número de horas do período letivo, com destaque para os meses de inverno (junho a setembro). O período letivo normalmente não abrange os meses de estação de verão (dezembro a março), como pode ser identificado nas Figuras 6 e 7, uma vez que janeiro é mês de férias, e dezembro, fevereiro e março são parcialmente letivos.

Figura 5 - PHOCT para cada caso

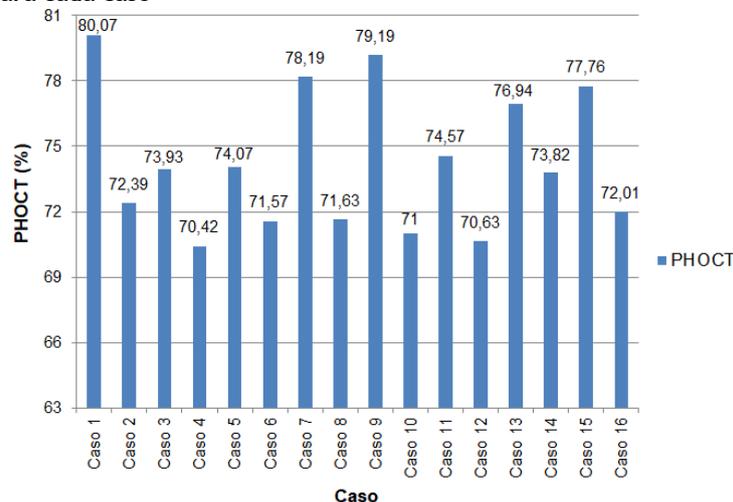


Tabela 5 - Percentagens anuais de horas ocupadas em desconforto

Nº do caso	Percentagem de horas ocupadas desconfortável por frio	Percentagem de horas ocupadas desconfortável por calor	Percentagem total de horas ocupadas em desconforto
1	15,62%	4,31%	19,93%
2	22,88%	4,81%	27,61%
3	21,31%	4,81%	26,07%
4	24,64%	4,94%	29,58%
5	21,75%	4,18%	25,93%
6	23,37%	5,06%	28,43%
7	16,87%	4,94%	21,81%
8	23,37%	5,00%	28,37%
9	17,19%	3,62%	20,81%
10	25,25%	3,75%	29,00%
11	21,37%	4,06%	25,43%
12	25,06%	4,31%	29,37%
13	20,44%	2,62%	23,06%
14	23,37%	2,81%	26,18%
15	18,62%	3,62%	22,24%
16	24,37%	3,62%	27,99%

Figura 6 - Percentagens mensais de horas ocupadas em desconforto: casos 1 a 8

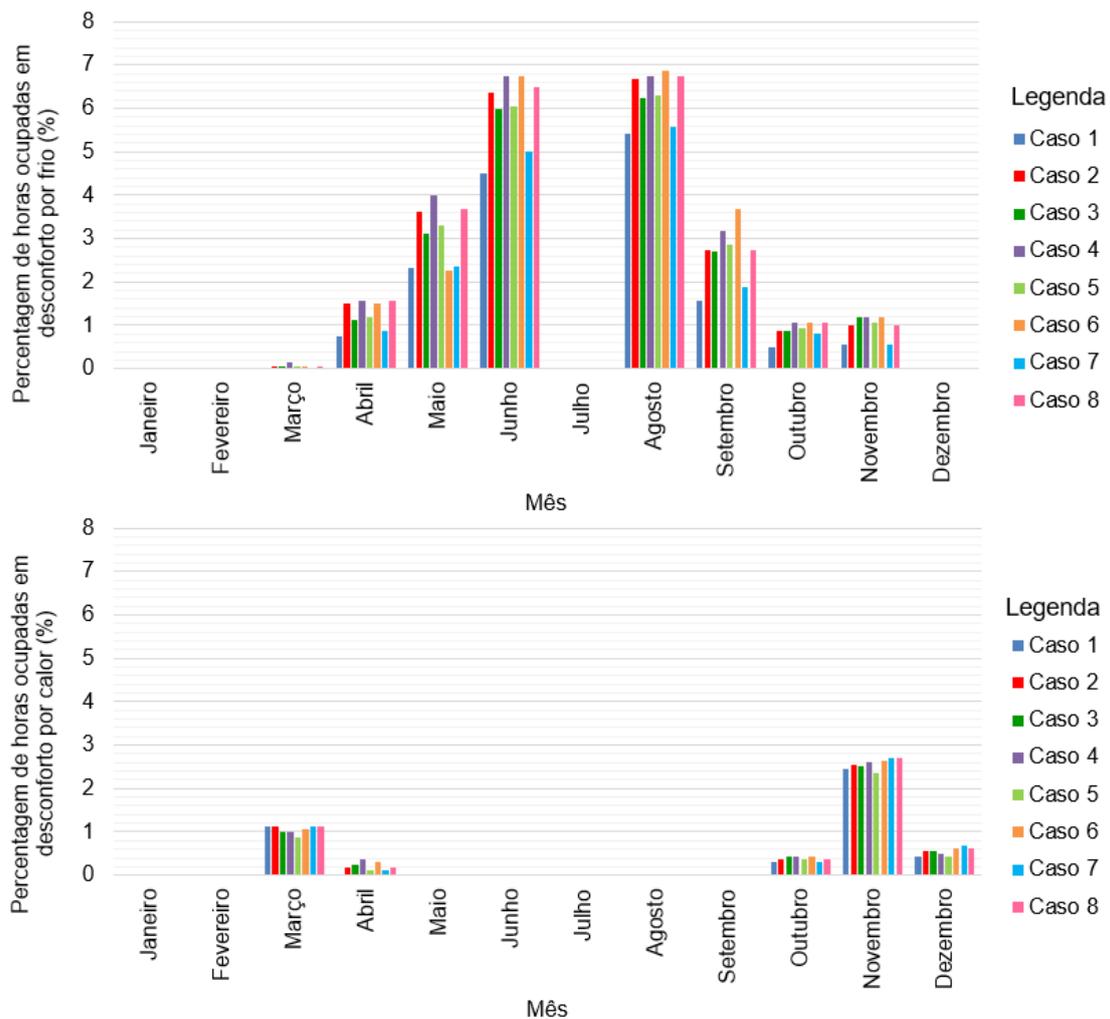
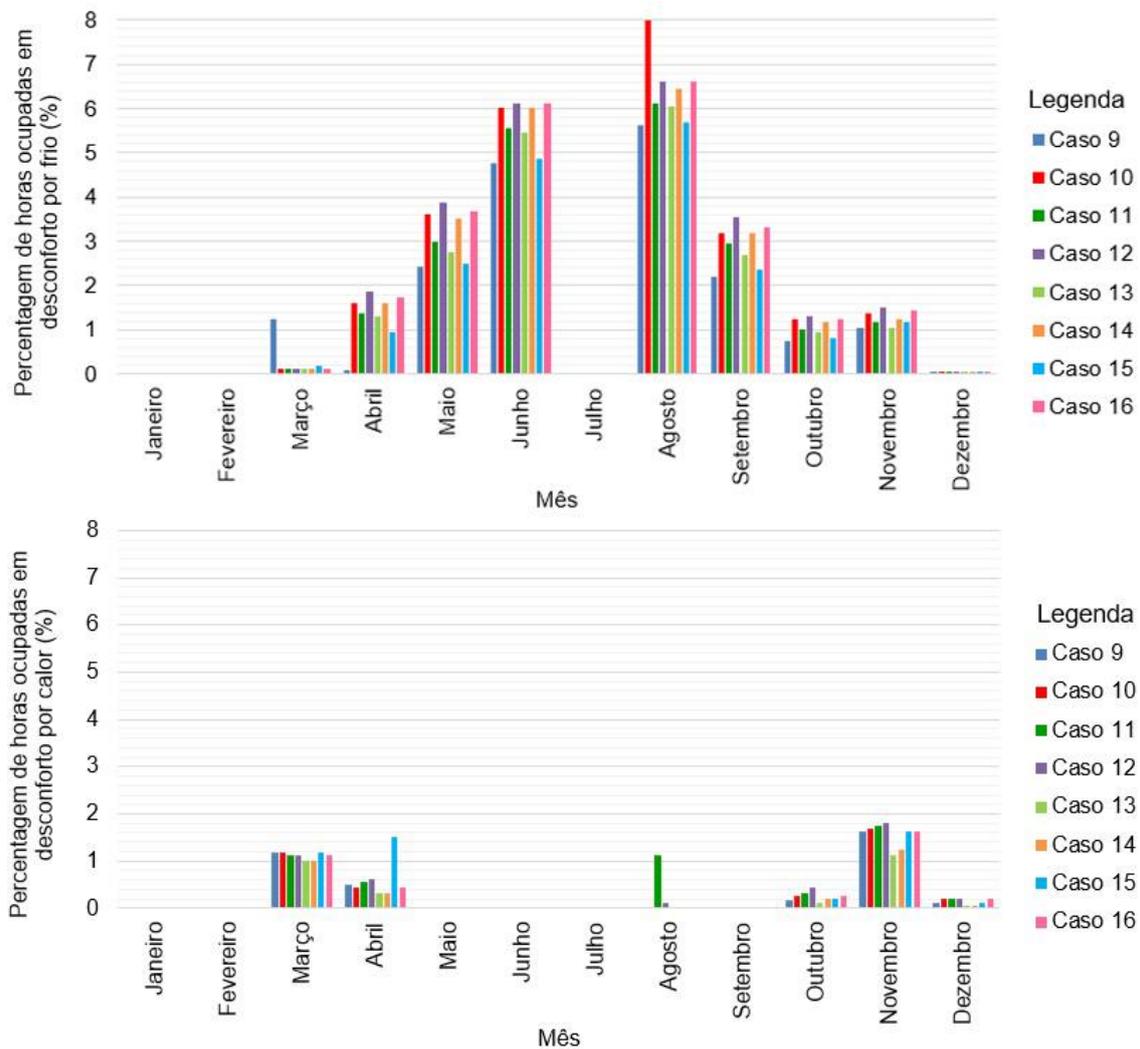


Figura 7 - Percentagens mensais de horas ocupadas em desconforto: casos 9 a 16



Na pesquisa de Maciel (2016), os resultados obtidos foram similares. No estudo foram desenvolvidas simulações de ventilação natural de uma sala de aula escolar de Viçosa, com clima quente e temperado (Cwa). A situação mais favorável ocorreu quando houve ventilação unilateral norte sem brise-chaminé-solar: o desconforto anual por frio foi de 25,55% e de calor foi nulo.

O *setpoint* de abertura das esquadrias influenciou fortemente os resultados, uma vez que determina a abertura das janelas. Também se deve considerar que as simulações foram feitas sem haver vestimentas específicas para frio e inverno, no EnergyPlus. A vestimenta pode atenuar os índices de desconforto, uma vez que viabiliza resistência à transferência de calor entre o corpo e o ambiente (RUAS, 1999).

GH_A de aquecimento e resfriamento

O caso 1 apresentou menor GH_A de aquecimento (desconforto por frio), com 408,37 graus-hora. Esse caso também somou a menor quantidade total de GH_A, com 468,67 graus-hora, conforme a Figura 8. O caso 13 apresentou o menor valor de GH_A de resfriamento (desconforto por calor), equivalente a 42,00 graus-hora. Possivelmente, isso se deu em virtude dos valores de velocidade do ar, que foram superiores a 0,150 m/s, conforme as médias da Tabela 4, e das orientações das aberturas (norte e sul) que somadas podem proporcionar menor incidência solar direta do que as orientações leste e oeste, conforme a latitude da cidade (29,75°S) (ALBUQUERQUE; AMORIM, 2012). No entanto, observa-se que os GH_A para resfriamento foram, para todos os casos, inferiores a 100 graus-hora, com valores muito próximos. Maior diferença observa-se para os graus-hora de aquecimento, com destaque para o caso 10 e 12, estratégias que possuem as salas vinculadas a uma circulação aberta. Tais valores corroboram com os resultados de PHOCT.

O mês integralmente letivo com maiores valores de GHA de desconforto por baixas temperaturas, no município, é agosto, atingindo 437,3 graus-hora para o caso 10. Esse também foi um dos meses letivos mais frios, conforme a Figura 1. Os maiores valores de GHA de desconforto por altas temperaturas ocorreram em novembro, sendo o valor máximo de 55,85 graus-hora, para o caso 6, conforme as Figuras 9 e 10. Novembro é o mês integralmente letivo menos úmido e um dos mais quentes (Figura 1).

Em semelhança ao presente estudo, Rackes *et al.* (2015) encontraram o valor máximo de GHA de desconforto por frio para uma escola modelo FNDE com ventilação cruzada (leste-oeste) inserida em Curitiba (ZB1), cidade de clima tipo Cfb. Na pesquisa a maior porcentagem de abertura das esquadrias nas ZBs 1 e 3 ocasionou maior desconforto por frio.

Aqui, a conexão das salas com ventilação cruzada, higiênica e aberturas voltadas a uma circulação aberta foi a principal característica que influenciou o desconforto por frio. Portanto, para o período frio, no clima analisado, a ventilação natural é uma alternativa pouco favorável ao conforto térmico e à eficiência energética, se comparada ao período quente.

Velocidade do ar interno

As Figuras 11 a 14 apresentam a velocidade do ar na sala analisada para cada caso, conforme a Tabela 7.

Observa-se tendência de maior velocidade do ar quando o ângulo do vento é oblíquo às janelas. Há uma distribuição mais favorável quando há janelas em mais de uma parede, conforme esperado. Valores de velocidade maiores do que o máximo recomendado por Bayoumi (2021), que é 1,20 m/s, não foram identificados na altura de 0,95 m, apenas na de 1,50 m, em pequenas regiões, possivelmente em decorrência da altura do peitoril (1,00 m).

Os casos em que a sala de aula teve ventilação cruzada e conexão a uma circulação ventilada por lanternim (5 e 6; 13 e 14) apresentaram as maiores velocidades médias nas alturas de respiração. Foram encontrados 50% de valores inferiores a 0,10 m/s quando o vento foi de origem leste, em virtude de a direção do vento ser perpendicular às aberturas.

Conforme Bayoumi (2021), em salas com ventilação natural, sua influência é sentida sobre a sensação térmica a partir de 0,10 m/s. Isso pode ser desejável para valores de temperatura no limite da zona de conforto, segundo Ding, Zhang e Bluysen (2021), Oliveira e Carlo (2021) e ASHRAE (AMERICAN..., 2017b). Portanto, nos casos de maior velocidade da Tabela 5, a probabilidade é de menor desconforto nos dias quentes, especialmente para a ventilação térmica. Os valores de velocidade foram mais baixos para a altura de 0,95 m, sendo insuficientes para o período de verão. Em 31,25% dos casos a média foi inferior a 0,10 m/s, nessa altura, e em 75% foi inferior a 0,20 m/s. Ademais, nos casos de ventilação unilateral, o desconforto nas épocas de altas temperaturas também tende a ser maior, visto que as velocidades foram, majoritariamente, inferiores a 0,20 m/s.

Figura 8 - GHA para cada caso

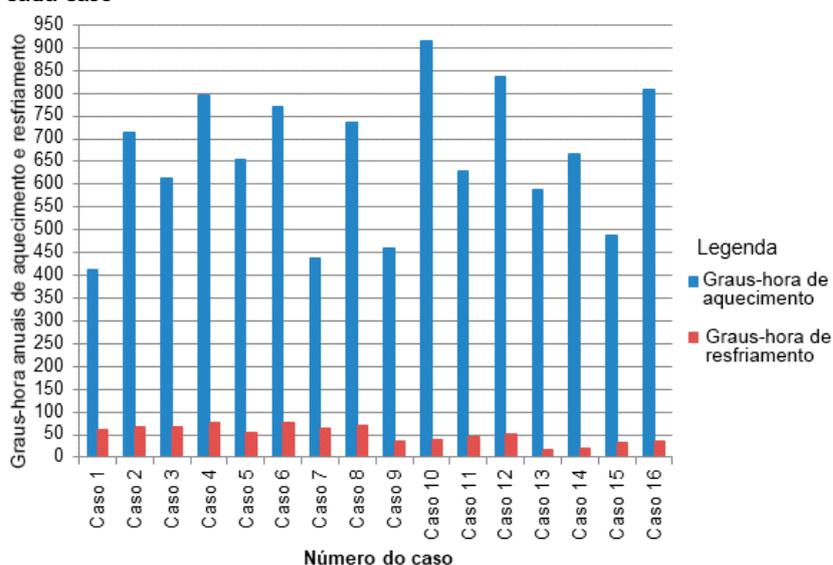


Figura 9 - GH mensais: casos 1 a 8

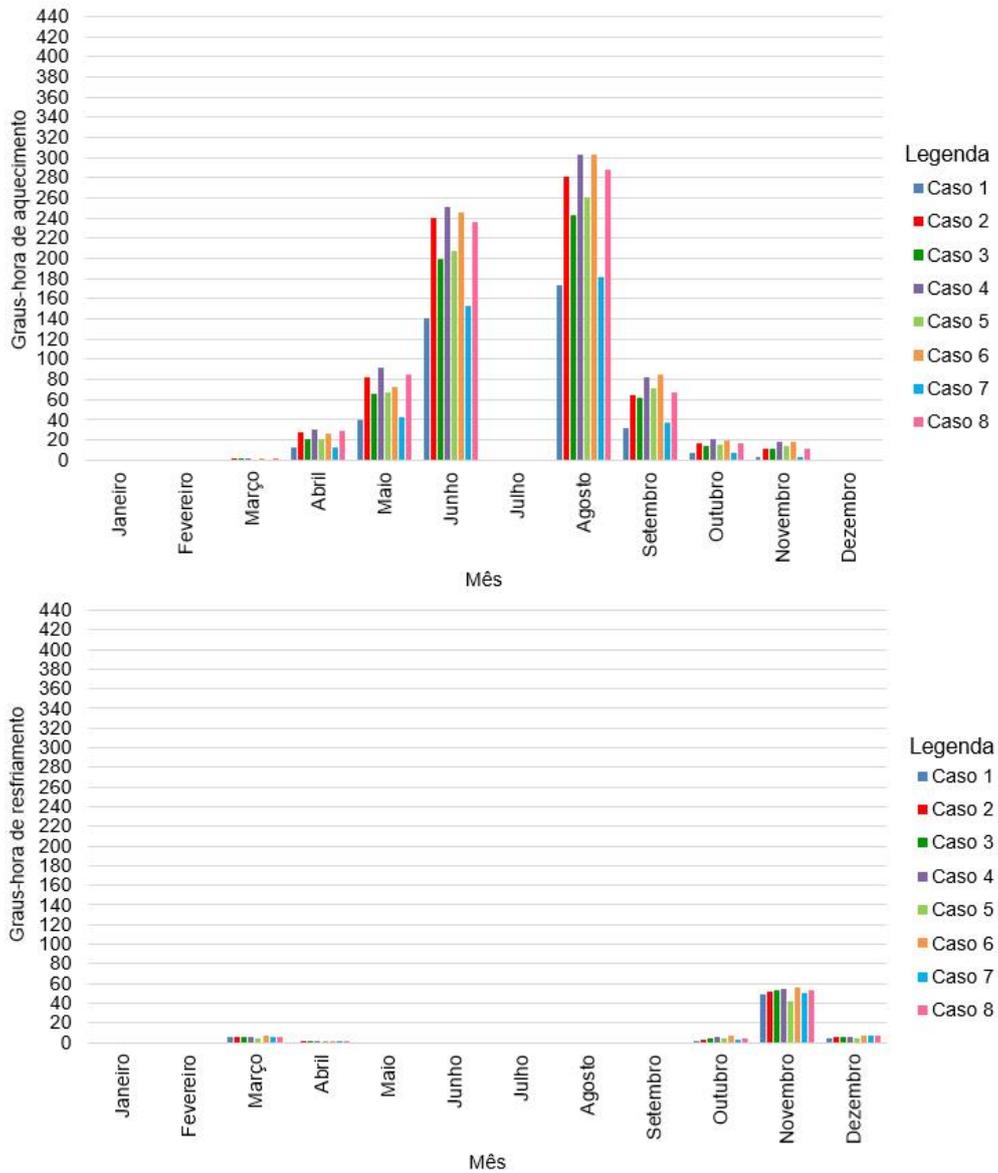


Figura 10 - GH mensais: casos 9 a 16

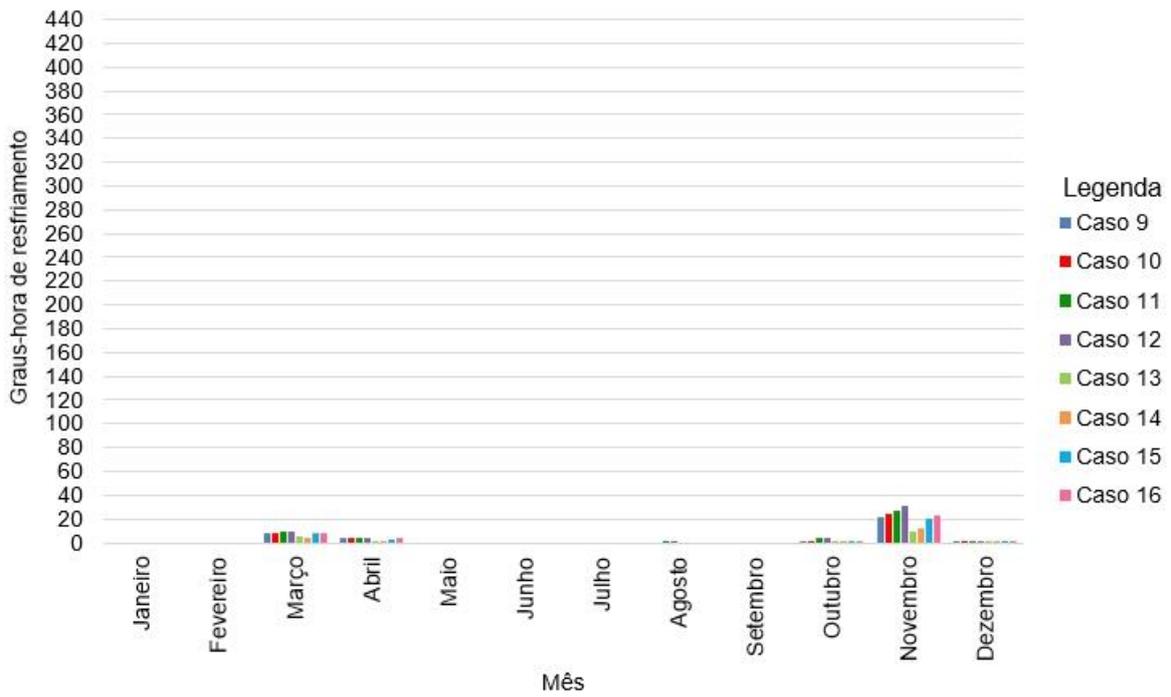
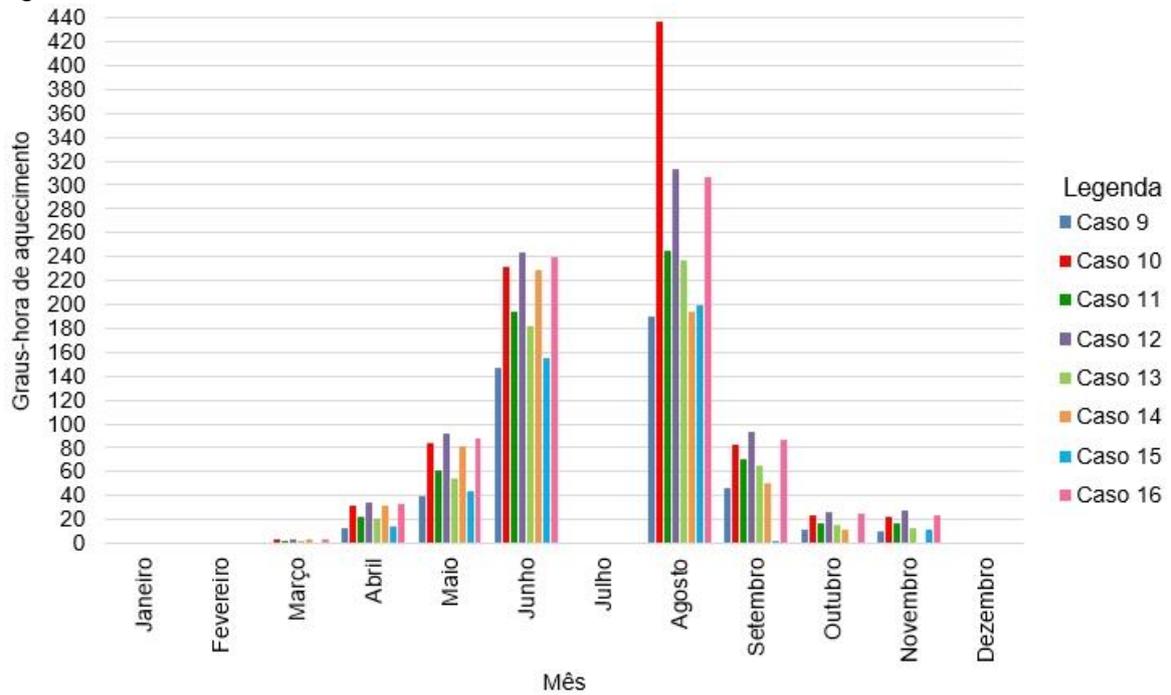


Figura 11 - Velocidade do ar: casos 1 a 4

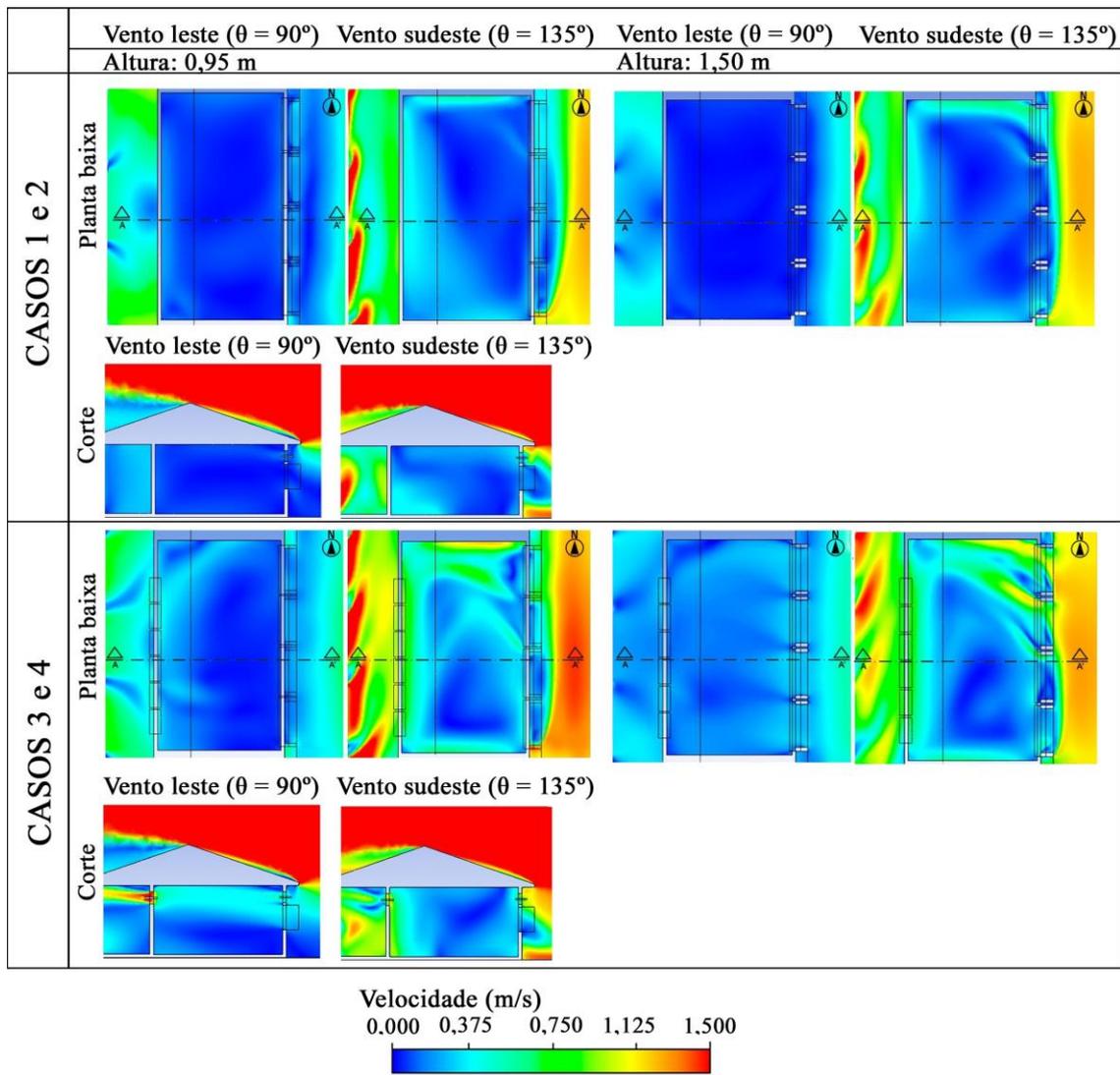


Figura 12 - Velocidade do ar: casos 5 a 8

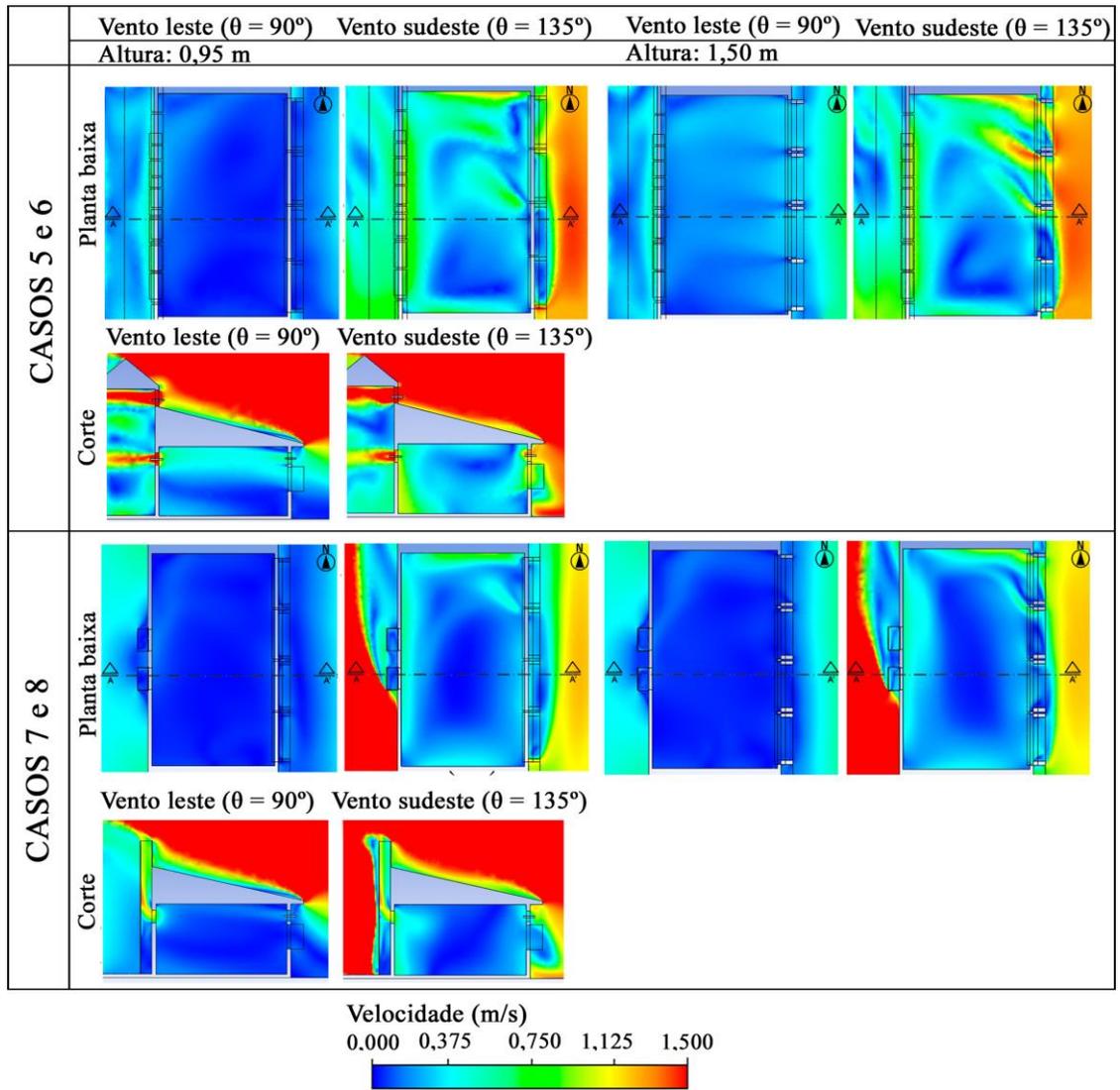


Figura 13 - Velocidade do ar: casos 9 a 12

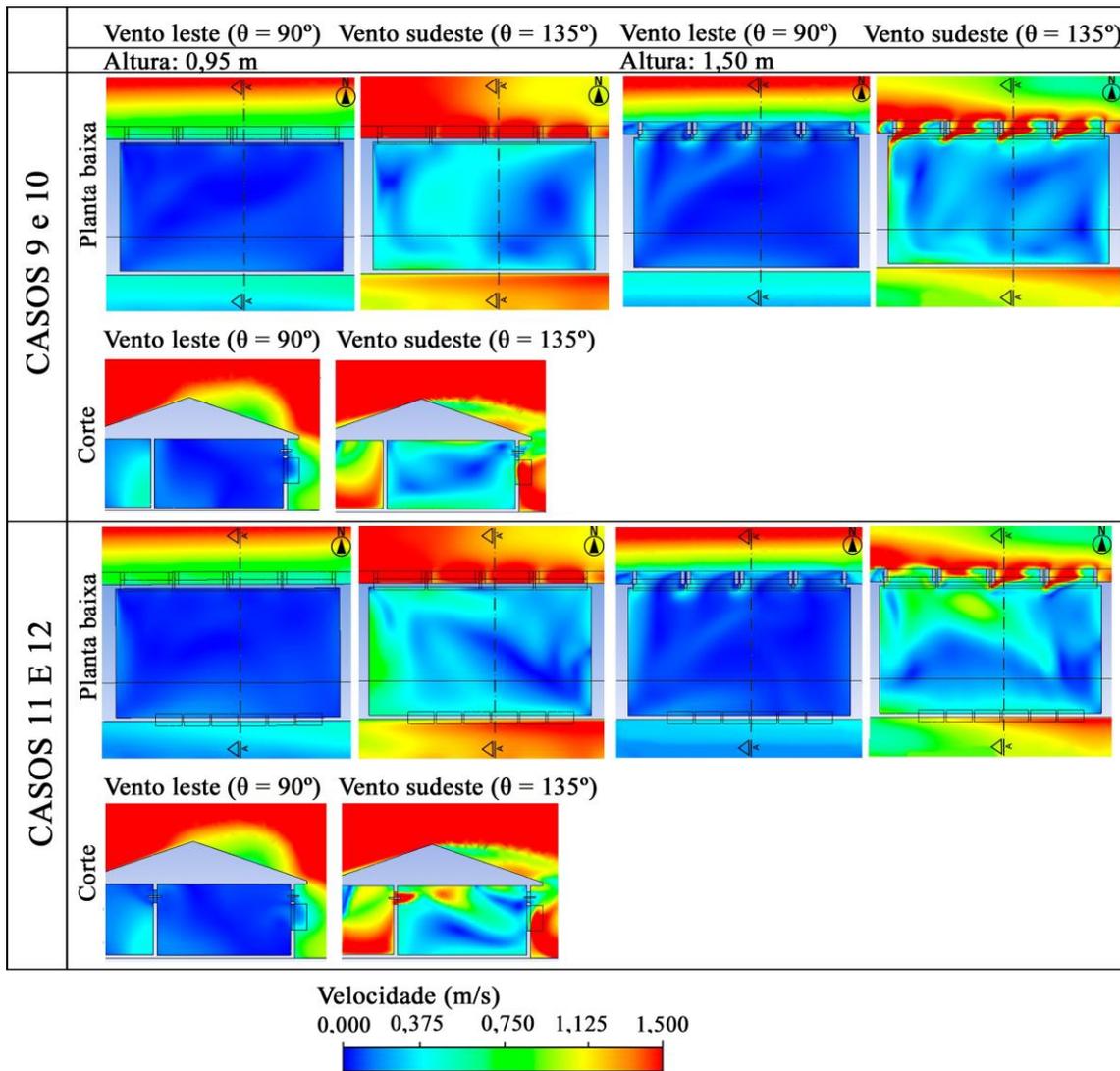


Figura 14 - Velocidade do ar: casos 13 a 16

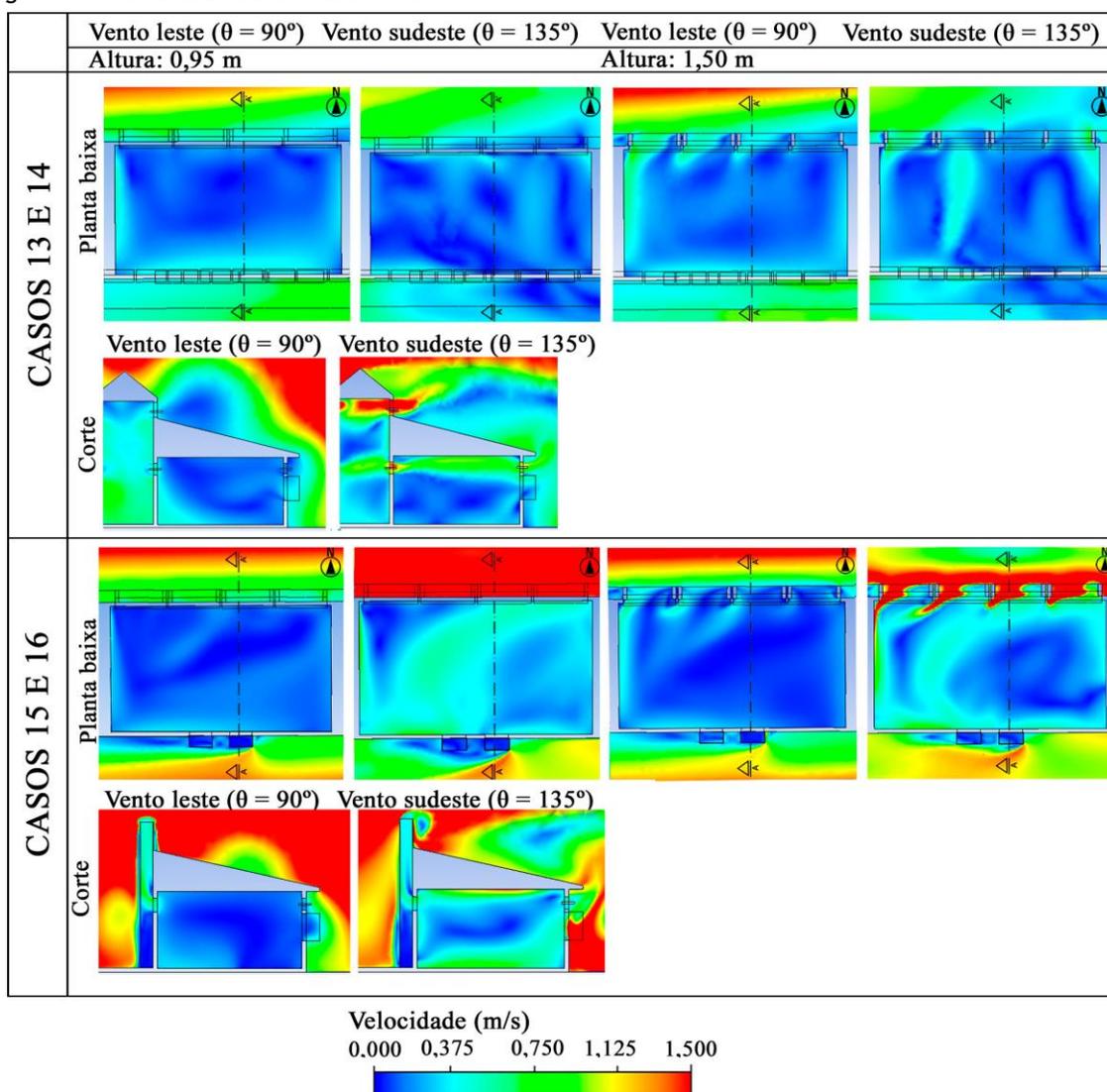


Tabela 7 - Velocidade média do ar

Casos	Velocidade média do ar (m/s)			
	Altura de respiração: 0,95 m		Altura de respiração: 1,5 m	
	Vento leste	Vento sudeste	Vento leste	Vento sudeste
1 e 2	0,032	0,155	0,028	0,125
3 e 4	0,083	0,201	0,154	0,226
5 e 6	0,104	0,315	0,198	0,395
7 e 8	0,050	0,167	0,068	0,176
9 e 10	0,041	0,181	0,091	0,225
11 e 12	0,057	0,272	0,098	0,311
13 e 14	0,167	0,155	0,347	0,185
15 e 16	0,113	0,302	0,130	0,210

Taxa de ventilação e renovações de ar por hora (ach)

Considerando a referência da Opas (ORGANIZAÇÃO..., 2021), que leva em conta a necessidade de remoção do ar em taxas suficientes para evitar o contágio por doenças virais, como a Covid-19, os casos com ventilação unilateral não atenderam ao critério de 10 l/s/p. Isso pode ser identificado na Tabela 8. Conforme destacado na fundamentação teórica, o valor mínimo definido pela Opas (ORGANIZAÇÃO..., 2021) é superior ao estabelecido pela Anvisa (AGÊNCIA..., 2003), 7,5 l/s/p, para ambientes climatizados de

uso coletivo e longa permanência. Foram adotadas as recomendações da Opas (ORGANIZAÇÃO..., 2021), uma vez que consideram a ventilação natural e a mitigação da transmissão de Covid-19.

Para as situações que não atingem o valor mínimo, a Opas (ORGANIZAÇÃO..., 2021) recomenda aumento da área de abertura ou ventilação cruzada, no caso de novos projetos ou reformas, ou manter a porta da sala aberta, para redução da concentração de CO₂ (FRANCESCHINI; LIGUORI; NEVES, 2021), o que, como foi visto, pode causar desconforto por frio. Nessa mesma direção, manter várias janelas parcialmente abertas em vez de uma totalmente aberta, pode ajudar a maximizar a distribuição de ventilação natural sem causar excessivamente esse desconforto (IRLANDA, 2021), evitando, nesse caso, doenças respiratórias típicas de inverno (SOUZA *et al.*, 2012).

Considerando que 10 l/s/pessoa equivalem a 10,16 NR/H para o ambiente analisado, as médias anuais NR/H são apresentadas na Figura 15 e as mensais na Figura 16.

A maioria dos casos apresentou NR/H anual inferior ao indicado como ideal, o que pode ser explicado pela alta taxa de ocupação no ambiente e a configuração das aberturas, em geral, dispostas unilateralmente, a norte ou para circulação fechada.

Fevereiro e março, meses predominantemente de verão, tiveram a maior média de trocas de ar na maioria dos casos. Isso em virtude de as janelas permanecerem mais tempo abertas, visto a temperatura de *setpoint* de 22 °C.

As situações em que o valor mínimo foi atingido, na média anual, possuem ventilação cruzada leste-oeste potencializando a captação dos ventos predominantes. Isso revela a importância dessa estratégia para garantir a qualidade de ventilação em espaços fechados de alta concentração de pessoas. Esse resultado vai ao encontro de estudos de Chen, Gall, e Chang (2016) e Liu *et al.* (2020), que apontam a importância da ventilação cruzada, sendo esta capaz de reduzir a concentração de mais de 15% dos poluentes em ambientes internos em comparação com a ventilação unilateral.

Salas de aula com janelas voltadas a norte só atingem o valor de referência para a situação de presença de ventilação cruzada e higiênica e com conexão a circulação aberta, mas, como visto, o conforto térmico fica comprometido.

Tabela 8 - Taxa de ventilação estimada

Casos	Taxa de ventilação estimada (l/s/pessoa)
Ventilação unilateral: 1, 2, 9 e 10	2,38
Ventilação cruzada: 3 ao 6 e 11 ao 14	15,49
Uso de chaminé solar, com ventilação cruzada: 7,8,15 e 16	13,28

Figura 15 - Média anual NR/H

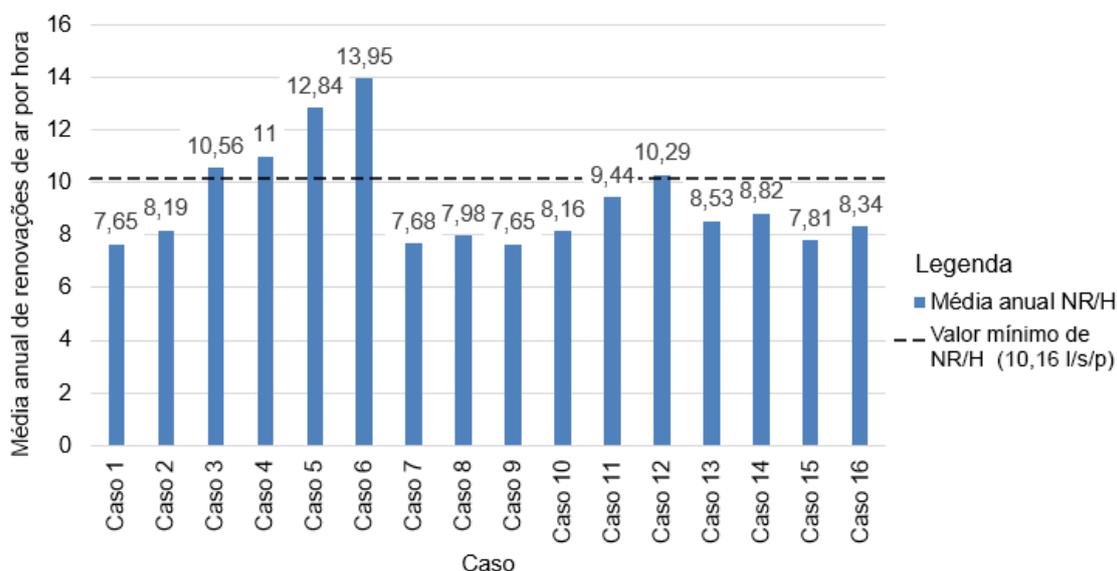
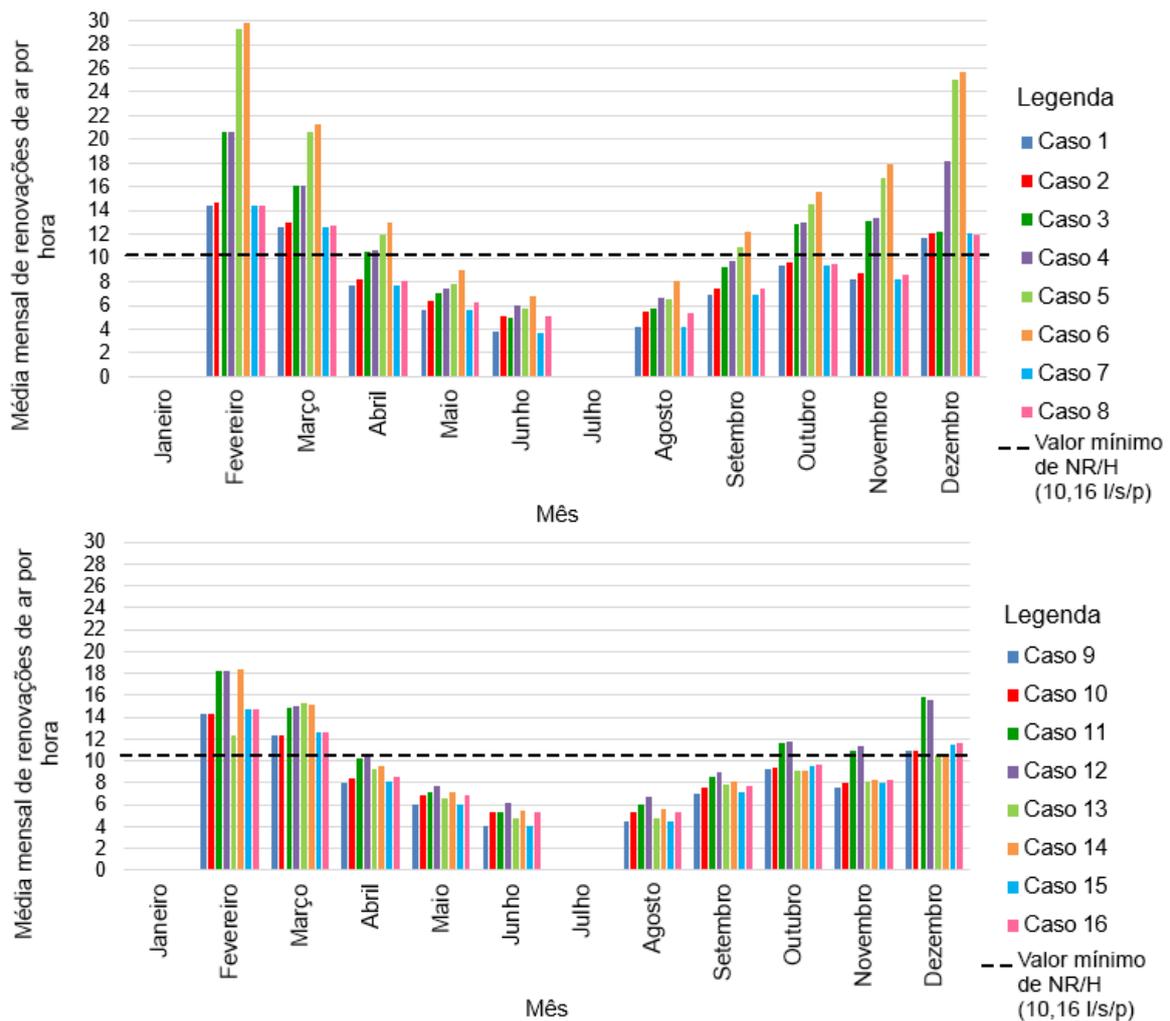


Figura 16 - Média mensal NR/H



Umidade relativa do ar

Valores de umidade do ar fora do intervalo preconizado pela OMS, 60%-80%, podem causar várias doenças, como mal funcionamento pulmonar, gripes, resfriados, rinites, bronquites e piora de casos crônicos de asma (MORAES *et al.*, 2019). Daí a importância de a ventilação natural proporcionar a redução da umidade do ar em ambientes com alta densidade de ocupação, como salas de aula.

Considerando o critério da OMS (ORGANIZAÇÃO..., 2012), nenhum caso teve médias mensais inadequadas de umidade relativa do ar (Figuras 17 e 18). Os casos com ventilação higiênica apresentaram menores umidades em relação àqueles com apenas ventilação térmica, já que a ventilação higiênica, sendo permanente, é fundamental para remoção da umidade, na situação da ventilação térmica estar fechada devido ao frio.

Há uma relação inversa entre umidade relativa do ar e valor NR/H. Os casos em que as médias anuais de NR/H foram superiores ao valor mínimo (10,16) foram os que tiveram a média de umidade inferior a 67,50%, já que o ar interno, devido à ocupação, possui maior conteúdo de umidade. O valor médio mínimo de umidade do ar anual foi de 66,40%, para o caso 6, e o máximo de 69,93% para o 15. O primeiro possui área de abertura para ventilação 2,04 m maior e apresenta ventilação térmica e higiênica, diferente do segundo que possui apenas térmica.

Síntese dos resultados

Considerando a síntese dos resultados (Tabela 9), são recomendadas as estratégias 3 a 6 e 12, que correspondem às seguintes soluções, sequencialmente: ventilação térmica cruzada leste-oeste; ventilação cruzada leste-oeste, com ventilação higiênica em duas aberturas a leste e ventilação térmica nas demais

janelas; ventilação térmica cruzada leste-oeste com conexão da sala a uma circulação ventilada por lanternim; ventilação cruzada leste-oeste com conexão da sala a uma circulação ventilada por lanternim, com ventilação higiênica em duas aberturas a leste e ventilação térmica nas demais janelas; e ventilação cruzada norte-sul, havendo incorporação de ventilação higiênica em duas aberturas a norte e ventilação térmica nas demais aberturas.

Na Tabela 9, os dados que atendem aos critérios assumidos foram destacados em verde e os que não atendem, em vermelho. Dados de PHOCT em laranja evidenciam desconforto por frio superior a 20% e os em verde claro, inferior. Nessa coluna, houve uma diferenciação de cores, uma vez que, conforme Brasil (2021), o PHOCT (anual) encontra-se na faixa recomendada. Para edificações naturalmente ventiladas ou híbridas, a INI-C estabelece que quando o PHOCT é inferior a 90%, considerando as horas excedentes por calor, deve haver projeto de condicionamento de ar (BRASIL, 2021). Nenhum dos casos teve fração de horas excedentes por calor superior a 10%.

Figura 17 - Umidade média relativa do ar mensal: casos 1 a 8

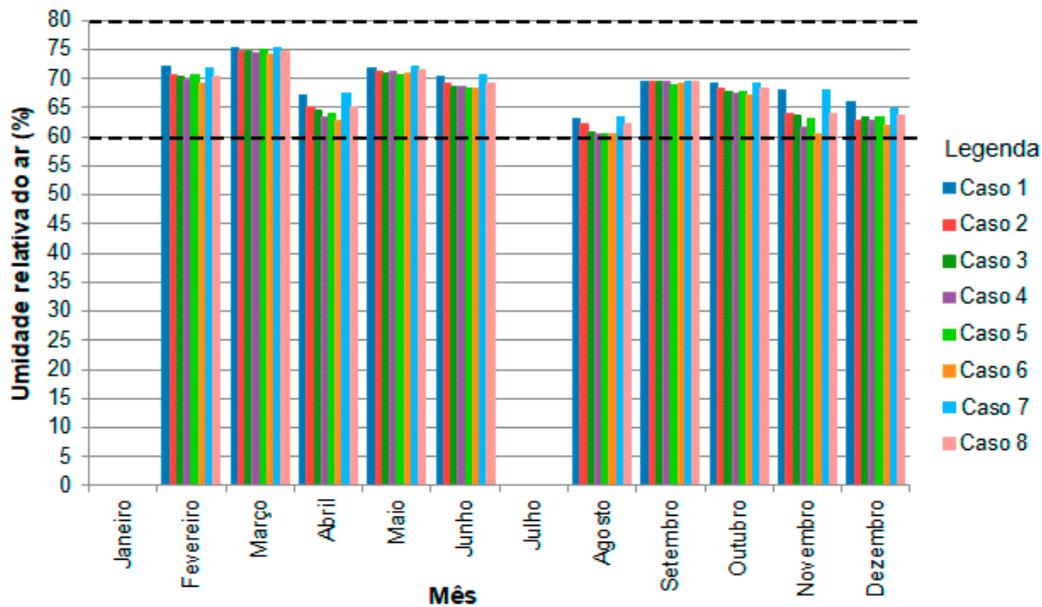


Figura 18 - Umidade média relativa do ar mensal: casos 9 a 16

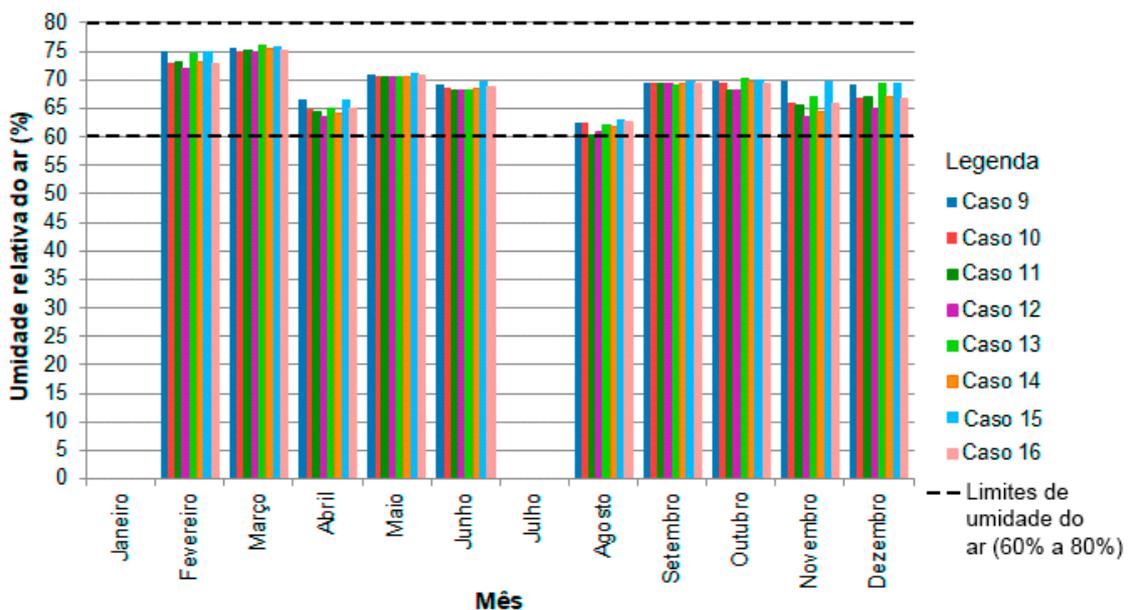


Tabela 9 - Panorama anual dos resultados

Casos	Critérios						
	Velocidade média do ar na altura de 0,95 m (BAYOUMI, 2021) (m/s)		PHOCT (BRASIL, 2021) ($\geq 70\%$)	PHOCT - desconforto por frio ($\leq 20\%$)	Taxa de ventilação estimada (ORGANIZAÇÃO..., 2021) (≥ 10 l/s/pessoa)	NR/H (ORGANIZAÇÃO..., 2021)	UR ^{média} (ORGANIZAÇÃO..., 2012) (60% a 80%)
	Vento leste	Vento sudeste					
1	0,032	0,155	80,07	15,62	2,38	7,65	69,25
2	0,032	0,155	72,39	22,88	2,38	8,19	67,86
3	0,083	0,201	73,93	21,31	15,49	10,56	67,05
4	0,083	0,201	70,42	24,64	15,49	11,00	66,92
5	0,104	0,315	74,07	21,75	15,49	12,84	67,21
6	0,104	0,315	71,57	23,37	15,49	13,95	66,40
7	0,050	0,167	78,19	16,87	13,28	7,68	69,23
8	0,050	0,167	71,63	23,37	13,28	7,98	67,49
9	0,041	0,181	79,19	17,19	2,38	7,65	69,87
10	0,041	0,181	71,00	25,25	2,38	8,16	68,64
11	0,057	0,272	74,57	21,37	15,49	9,44	68,19
12	0,057	0,272	70,63	25,06	15,49	10,29	67,59
13	0,167	0,155	76,94	20,44	15,49	8,53	69,22
14	0,167	0,155	73,82	23,37	15,49	8,82	68,35
15	0,113	0,302	77,76	18,62	13,28	7,81	69,93
16	0,113	0,302	72,01	24,37	13,28	8,34	68,65

Os resultados mais satisfatórios dizem respeito ao conforto térmico, visto que são superiores a 70%. Quanto à qualidade do ar, os melhores resultados ocorrem quando a ventilação é cruzada e leste-oeste, em virtude da remoção de poluentes e gases acumulados junto ao teto por meio de janelas em paredes opostas. Também em função da presença de aberturas em orientação com ventos predominantes, conforme discutido anteriormente.

Quando a sala teve ventilação unilateral térmica, apesar de a qualidade de ventilação não ser favorável, os resultados de conforto térmico foram, na maioria das situações, mais altos. Já nos casos 11 a 16, mesmo a presença de ventilação cruzada (norte-sul) não foi suficiente para se atingir sempre o NR/H mínimo. Nesse âmbito, conforme destacam Morawska *et al.* (2020), as consequências da pandemia de Covid-19 mostraram que atuais esquemas de projeto de ventilação cruzada de inúmeros edifícios são insuficientes para fornecer a taxa de ventilação necessária. Portanto, medidas como inserção de aberturas coerentes com os ventos predominantes da região e menor concentração de usuários nos ambientes devem ser consideradas.

Conclusões

Este estudo avaliou 16 estratégias de ventilação natural para salas de aula do ensino fundamental, conforme o modelo preconizado pelo FNDE, para clima subtropical úmido, representado pela cidade de Santa Maria, RS. Foi considerada a eficiência energética, o conforto térmico e a qualidade de ventilação interna expressa pela taxa de ventilação e umidade relativa do ar frente a novas exigências impostas pela pandemia de Covid-19.

Segundo os resultados, a introdução de estratégias de ventilação natural deve ser realizada atentando-se ao desconforto por frio para o clima estudado. As situações menos satisfatórias para desconforto por frio foram aquelas com ventilação cruzada e higiênica. A estratégia que viabilizou maior eficiência energética considerando GH_A foi a que teve apenas ventilação térmica unilateral leste (caso 1). Entretanto, nessa situação, houve valores de taxa de ventilação e de renovação bastante inferiores aos recomendados pela Opas (ORGANIZAÇÃO..., 2021), portanto não são seguras em relação à disseminação da Covid-19. Salas escolares com ventilação unilateral, todavia, ainda são presentes no Brasil (DECKER *et al.*, 2020; FRANCESCHINI; LIGUORI; NEVES, 2021; STEFENON, 2019), o que evidencia um cenário preocupante. Estudos que definam melhor esse parâmetro, dependente também de aspectos econômicos e culturais, como as vestimentas, são importantes de serem encaminhados para aperfeiçoar as simulações.

Quanto ao desconforto por calor, a estratégia de ventilação natural evidenciou um cenário favorável no ambiente simulado para o clima de Santa Maria, RS, uma vez que, mesmo nos casos com ventilação higiênica, os valores médios foram inferiores a 6%. O caso mais favorável, nesse âmbito, foi o que apresentou ventilação térmica cruzada (norte-sul), sendo a sala conectada a uma circulação ventilada por lanternim.

Ao se considerar as variáveis taxa de ventilação e NR/H, os casos 3 a 6 e 12 são os que atenderam aos critérios. Dentre estes, o que apresenta menor desconforto por frio é o caso 3, cruzada leste-oeste, somente ventilação térmica, com circulação aberta. No entanto, considera-se o desconforto por frio ainda elevado nesses casos, acima de 20%, o que pode implicar doenças respiratórias causadas pela exposição a baixas temperaturas.

Os casos com menor desconforto por frio foram 1, 7, 9 e 15, com NR/H 7,65, 7,68, 7,65 e 7,81, respectivamente, e taxa de ventilação estimada de 2,97, 13,28, 2,97 e 13,28, respectivamente. Observa-se que, considerando o critério da Opas para taxa de ventilação, os casos 7 e 15 satisfariam esse critério. As estratégias envolvem orientação leste ou norte com chaminé solar, corroborando a eficácia da chaminé solar para ventilação de salas de aula.

Esta pesquisa assumiu simplificações para possibilitar a simulação, como o uso de uma rotina fixa de abertura de janelas, que influenciaram os resultados obtidos. No uso real de salas naturalmente ventiladas, os professores são agentes importantes no controle da ventilação e devem ter o discernimento de abri-las conforme a percepção de ar viciado ou frio excessivo. Os costumes no vestir também podem alterar os limites de conforto para baixo, durante o inverno. Também se chama a atenção para a variabilidade da direção do vento. Foi assumida a condição de maior frequência, escolha determinante para os resultados. Estudos que incorporem outras estratégias de ventilação natural ou ajustes nas simuladas neste estudo, além de outros contextos climáticos, trariam contribuição para a definição de salas de aula que se adequem melhor a exigências que se impõem, principalmente no que tange à higiene do ar interno.

Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. **Resolução-RE Nº 09**, de 16 de janeiro de 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. 2003. Disponível em: http://antigo.anvisa.gov.br/documents/10181/2718376/RE_09_2003_.pdf/8ccafc91-1437-4695-8e3a-2a97deca4e10. Acesso em: 3 jun. 2022.
- ALBUQUERQUE, M. S. C.; AMORIM, C. N. D. Iluminação natural: indicações de profundidade-limite de ambientes para iluminação natural no regulamento técnico da qualidade do nível de eficiência energética de edifícios residenciais - RTQ-R. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 12, n. 2, p. 37-57, abr./jun. 2012.
- AMARAL, D. O. **Avaliação das metodologias de ventilação natural da normalização brasileira de desempenho térmico e eficiência energética de edificações habitacionais**. Belo Horizonte, 2017. 152 f. Dissertação (Mestrado em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Standard 140-2011**: standard method of test for the evaluation of building energy analysis computer programs. Atlanta: ASHRAE, 2017a.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Standard 55**: thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta, 2017b.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Handbook**: fundamentals. Atlanta, 2017c.
- ANGELOPOULOS, C. *et al.* Evaluation of thermal comfort in naturally ventilated school classrooms during the heating season using CFD. In: CONFERENCE OF INTERNATIONAL BUILDING PERFORMANCE SIMULATION ASSOCIATION, 15., São Francisco, 2017. **Proceedings [...]** São Francisco: IBPSA, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-1**: desempenho térmico de edificações: parte 1. Rio de Janeiro, 2005a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-2**: desempenho térmico de edificações: parte 2. Rio de Janeiro, 2005b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3**: desempenho térmico de edificações: parte 3. Rio de Janeiro, 2005c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16401-2**: instalações de ar-condicionado: sistemas centrais e unitários. Rio de Janeiro, 2017. 3. projeto revisão.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16401-3**: instalações de ar-condicionado. Sistemas centrais e unitários: parte 3. Rio de Janeiro, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO/CIE 8995-1**: iluminação de ambientes de trabalho. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto 02:135.07-001**: desempenho térmico de edificações: parte 1: definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro, 2004.
- BALABEL, A.; FAIZAN, M.; ALZAED, A. Towards a computational fluid dynamics-based fuzzy logic controller of the optimum windcatcher internal design for efficient natural ventilation in buildings. **Mathematical problems in Engineering**, v. 2021, article ID 9936178, 2021.
- BANGALEE, M. Z. I.; LIN, S. Y.; MIAU, J. J. Wind driven natural ventilation through multiple windows of a building: a computational approach. **Energy and Buildings**, v. 45, p. 317-325, 2012.
- BARRETT, P. *et al.* The impact of classroom design on pupil's learning: Final results of a holistic, multi-level analysis. **Building and Environment**, v. 89, p. 118-133, 2015.
- BAYOUMI, M. Improving Indoor Air Quality in Classrooms via Wind-Induced Natural Ventilation. **Modelling and Simulation in Engineering**, n. 5, p.1-14, jun. 2021.
- BEVILAQUA, C. P. *et al.* Análise da ventilação natural. **Parc Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, v. 10, p. 190221-1902213, maio 2019.
- BOWEN, A. Classification of Air Motion Systems and Patterns. In: INTERNATIONAL PASSIVE AND HYBRID COOLING CONFERENCE, Newark, 1981. **Proceedings [...]** Newark: American Section of ISES, 1981.
- BRASIL. **Decreto-lei nº 872**, de 15 de setembro de 1969. Complementa disposições da Lei 5537, de 21 novembro de 1968, e dá outras providências. 1969. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto-lei/1965-1988/del0872.htm. Acesso em: 8 maio 2022.
- BRASIL. **Lei n. 11.274**, de 06 de fevereiro de 2006. Altera a redação dos arts. 29, 30, 32 e 87 da Lei nº 9.394, de 20 de dezembro de 1996, que estabelece as diretrizes e bases da educação nacional. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2006/lei/111274.htm. Acesso em: 6 dez. 2021.
- BRASIL. **Lei n. 9.394**, de 20 de dezembro de 1996. Estabelece as diretrizes e bases da educação nacional. 1996. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9394compilado.htm. Acesso em: 25 jan. 2021.
- BRASIL. Ministério da Economia. **Portaria Nº 42, de 24 de fevereiro de 2021**. Aprova a Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C). Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002707.pdf>. Acesso em: 5 maio 2021.
- BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT. **Principles of natural ventilation**. Watford: BRE, 1978.
- BULIGON, L. B. **Comportamento higrotérmico e energético de painéis de vedação vertical externa em madeira para a zona bioclimática 2**. Santa Maria, 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2021.
- CARVALHO, P. M.; SILVA, M. G.; RAMOS, J. E. Influence of weather and indoor climate on clothing of occupants in naturally ventilated school buildings. **Building and Environment**, v. 59, p. 38-46, jan. 2013.
- CELIK, I. *et al.* Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications. **Journal Of Fluids Engineering**, v. 130, n. 7, p. 0780011-0780014, 2008.
- CHEN, A.; GALL, E. T.; CHANG, V. W. C. Indoor and outdoor particulate matter in primary school classrooms with fan-assisted natural ventilation in Singapore. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 23, n. 17, p. 17613-17624, maio 2016.
- CÓSTOLA, D. **Ventilação por ação do vento no edifício**: procedimentos para quantificação. São Paulo, 2006. Dissertação (Mestrado em Tecnologia da Construção) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- CÓSTOLA, D.; ALUCCI, M. P. Aplicação de CFD para o cálculo de coeficientes de pressão externos nas aberturas de um edifício. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 11, n. 1, p. 145-158, jan./mar. 2011.

DECKER, P. H. B. *et al.* Uso da ventilação natural como estratégia para redução de riscos na transmissão da Covid-19 em salas de aula: relatos de estudos em escolas municipais de Londrina-PR. **Extensão em Foco**, Palotina, v. 20, p. 166-185, mar. 2020.

DING, E.; ZHANG, D.; BLUYSSSEN, P. M. O. Avaliação da qualidade do ar interior durante a pandemia de COVID-19 em salas de aula naturalmente ventiladas. In: HEALTHY BUILDINGS EUROPE 2021 ONLINE CONFERENCE, Trondheim, 2021. **Proceedings [...]** Trondheim: ISIAAC, 2021.

DREYFUSS, H. **As medidas do homem e da mulher: fatores humanos em design**. Porto Alegre: Bookman, 2005.

EUROPEAN COOPERATION IN SCIENCE AND TECHNOLOGY. **Cost action 14: recommendations on the use of CFD in predicting pedestrian wind environment**. Brussels: COST, 2004.

FERDYN-GRYGIEREK, J. *et al.* Thermal diagnostics of natural ventilation in buildings: an integrated approach. **Energies**, v. 12, n. 23, p. 4556, nov. 2019.

FERREIRA, C. A. **Eficácia das técnicas de climatização natural em um prédio de salas de aula: estudo de caso campus UFSM-CS**. Santa Maria, 2019. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

FIGUEIREDO, C. M. **Ventilação natural para conforto térmico em edifícios de escritórios**. São Paulo, 2008. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

FRANCESCHINI, P. B.; LIGUORI, I. N.; NEVES, L. O. Avaliação da qualidade do ar interior durante a pandemia de COVID-19 em salas de aula naturalmente ventiladas. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 26.; ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 22., Palmas, 2021. **Anais [...]** Porto Alegre: ANTAC, 2021.

FUNDO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO DA EDUCAÇÃO. **Infraestrutura física (escolar)**. 2019. Disponível em: <https://www.fnde.gov.br/programas/par/eixos-de-atuacao/infraestrutura-fisica-escolar>. Acesso em: 3 jun. 2022.

FUNDO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO DA EDUCAÇÃO. **Manual de orientações técnicas: elaboração de projetos de edificações escolares: ensino fundamental**. Brasília: Ministério da Educação, 2017.

GIVONI, B. **Man, climate and architecture**. 2nd. ed. Londres: Applied Science Publisher, 1976.

GUPTA, D.; KHARE, V.R. Natural ventilation design: predicted and measured performance of a hostel building in composite climate of India. **Energy and Built Environment**, v. 2, p. 82-93, 2021.

HAJDUKIEWICZ, M.; GERON, M.; KEANE, M.M. Formal calibration methodology for CFD models of naturally ventilated indoor environments. **Building and Environment**, v. 59, p. 290-302, 2013.

HAMZAH, B. *et al.* Adaptive thermal comfort of naturally ventilated classrooms of elementary schools in the tropics. **Iop Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 402, n. 1, p. 1-8, jan. 2020.

HOU, D.; KATAL, A.; WANG, L. L. Bayesian calibration of using CO₂ sensors to assess ventilation conditions and associated COVID-19 airborne aerosol transmission risk in schools. **Medrxiv Preprint**, p. 1-42, fev. 2021.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Normais climatológicas do Brasil**. 2018. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/normais>. Acesso em: 10 out. 2021.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 9920: ergonomics of the thermal environment: estimation of thermal insulation and water vapour resistance of a clothing ensemble**. 2nd. ed. Geneva: ISO, 2007.

IRLANDA. **Practical steps for the deployment of good ventilation practices in schools**. Dublin: An Roinn Oideachais, Department of Education, 2021. v. 3.

JINDAL, A. Thermal comfort study in naturally ventilated school classrooms in composite climate of India. **Building And Environment**, v. 142, p. 34-46, set. 2018.

JONES, N. R. *et al.* Two metres or one: what is the evidence for physical distancing in COVID-19? **British Medical Journal**, v. 3223, n. 370, p. 1-6, ago. 2020.

KUNDU, P. K.; COHEN, I. M.; HU, H. H. **Fluid Mechanics**. Orlando: Academic Press, 2002.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. 3. ed. São Paulo: PW Editores, 2014.

LIU, X. *et al.* Experimental study of airflow and pollutant dispersion in cross-ventilated multi-room buildings: effects of source location and ventilation path. **Sustainable Cities And Society**, v. 52, p. 101822, jan. 2020.

MACIEL, L. F. **Brise-chaminé-solar**: avaliação experimental e por simulação CFD/Energyplus de um dispositivo de ventilação. Viçosa, 2016. 133 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.

MORAES, S. L. *et al.* Variáveis meteorológicas e poluição do ar e sua associação com internações respiratórias em crianças: estudo de caso em São Paulo, Brasil. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 35, n. 7, p. 1-16, 2019.

MORAIS, J. M. S. **Ventilação natural em edifícios multifamiliares do programa “Minha Casa Minha Vida”**. Campinas, 2013. 211 f. Tese (Doutorado em Arquitetura, Tecnologia e Cidade) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

MORAWSKA, L. *et al.* How can airborne transmission of COVID-19 indoors be minimised? **Environment International**, v. 142, p. 105832-105.838, set. 2020.

MOUSA, W. A. Y. *et al.* A pattern recognition approach for modeling the air change rates in naturally ventilated buildings from limited steady-state CFD simulations. **Energy and Buildings**, v. 155, p. 54-65, 2017.

NEVES, L. O.; RORIZ, M. Procedimentos estimativos do potencial de uso de chaminés solares para promover a ventilação natural em edificações de baixa altura. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 12, n. 1, p. 177-192, jan./mar. 2012.

NOZU, T. *et al.* LES of the flow and building wall pressures in the center of Tokyo. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 96, n. 10-11, p. 1762-1773, out. 2008.

OLIVEIRA, M. M.; CARLO, J. C. Análise da qualidade da simulação do fluxo de ar de chaminés solares com o EnergyPlus. **Parc Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, v. 9, n. 2, p. 86-96, jun. 2018.

OLIVEIRA, M. M.; CARLO, J. C. Avaliação do conforto térmico e renovação de ar em ambientes com chaminés solares. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n. 1, p. 293-314, jan./mar. 2021.

OLIVEIRA, W. C.; CUNHA, E. G.; LEITZKE, R. K. Eficiência energética em prédios de salas de aula naturalmente ventilados. **Parc Pesquisa em Arquitetura e Construção**, São Paulo, v. 11, p. 1-21, ago. 2020.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **Actas Oficiais de La OMS**. n°2, 2012. Disponível em: <https://www.who.int/library/collections/historical/es>. Acesso em: 2 fev. 2021.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **Home care for patients with suspected or confirmed COVID-19 and management of their contacts**. Genebra: Organização Mundial da Saúde, 2020. Disponível em: [https://www.who.int/publications-detail/home-care-for-patients-with-suspected-novel-coronavirus-\(ncov\)-infection-presenting-with-mild-symptoms-and-management-of-contacts](https://www.who.int/publications-detail/home-care-for-patients-with-suspected-novel-coronavirus-(ncov)-infection-presenting-with-mild-symptoms-and-management-of-contacts). Acesso em: 3 jun. 2022.

ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DA SAÚDE. **Roteiro para melhorar e garantir a boa ventilação de ambientes fechados no contexto da doença causada pelo novo coronavírus, COVID-19**. Brasília: OPAS, 2021. Disponível em: <https://iris.paho.org/handle/10665.2/53938>. Acesso em: 9 out. 2021.

PROGRAMA BRASILEIRO DE ETIQUETAGEM. **Manual para a aplicação do RTQ-C**. Eletrobras/Procel, 2017.

PROGRAMA BRASILEIRO DE ETIQUETAGEM. **Manual para a aplicação do RTQ-R**. Eletrobras/Procel, 2012. 202 p.

RACKES, A. *et al.* Avaliação do potencial de conforto térmico em escolas naturalmente ventiladas. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 13.; ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 9., Florianópolis, 2015. **Anais [...]** Campinas: ANTAC, 2015.

ROSA, T. F.; SEDREZ, M. M.; SATTLER, M. A. Conforto ambiental em um contexto de sustentabilidade: o Protótipo Alvorada. **Ciência & Ambiente**, Santa Maria, v. 12, n. 22, p. 91-106, jan. 2001.

- RUAS, A. C. **Conforto térmico nos ambientes de trabalho**. São Paulo: FUNDACENTRO, 1999.
- SANTOS, A. A. C. **Investigação numérica e experimental do escoamento de água em feixe de varetas representativo de elementos combustíveis nucleares de reatores do tipo PWR**. Belo Horizonte, 2012. 216 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.
- SANTOS, J. C. P. *et al.* Comportamento ótico de vidros e policarbonatos translúcidos frente à radiação solar. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 3, p. 1-13, out. 2018.
- SHI, L. *et al.* Developing an empirical model for roof solar chimney based on experimental data from various test rigs. **Building and Environment**, v. 110, p. 115-128, dez. 2016.
- SILVA, C.V. **Introdução ao Ansys CFX**. Erechim: URI/GEAPI/LABSIM, 2019. Disponível em: https://www.uricer.edu.br/cursos/arq_trabalhos_usuario/3782.pdf. Acesso em: 6 mai. 2022.
- SILVA, L. G. O.; NASCIMENTO, V. S.; BITTENCOURT, L. Estudo preliminar de uma escola modelo do UNICEF a ser implantada em Coribe - BA. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 13.; ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 9., Maceió, 2015. **Anais [...]** Campinas: ANTAC, 2015.
- SOBIN, H. Window design for passive ventilation. In: INTERNATIONAL PASSIVE AND HYBRID COOLING CONFERENCE, Newark, 1981. **Proceedings [...]** Newark: American Section of ISES, 1981.
- SORGATO, M. J. **Desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares ventiladas naturalmente**. Florianópolis, 2009. 216 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.
- SORGATO, M. J.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. Análise do método de simulação de desempenho térmico da norma NBR 15575. **Paranoá**, Brasília, v. 12, n. 12, p. 13-22, set. 2014.
- SOUZA, A. *et al.* Potenciais impactos da variabilidade climática sobre a morbidade respiratória em crianças, lactentes e adultos. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, v. 38, n. 6, p. 708-715, 2012.
- STEFENON, J. H. **Caracterização dos edifícios e avaliação do desempenho térmico de escolas da rede estadual de Passo Fundo/RS**. Passo Fundo, 2019. 173 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade IMED, Passo Fundo, 2019.
- TAMURA, T.; NOZAWA, K.; KONDO, K. AIJ guide for numerical prediction of Wind loads on buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 96, 1974-1984, out./nov. 2008.
- TOMINAGA, Y. *et al.* AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. **Journal Of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics**, v. 96, n. 10-11, p. 1749-1761, out. 2008.
- TORRES, S. C.; MACHADO, P. J. O. **Introdução à climatologia**. São Paulo: Cengage Learning, 2011.
- WEBER, F. S. *et al.* **Elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos brasileiros para o uso no programa EnergyPlus**. Florianópolis: LabEEE, 2017. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/node/714>. Acesso em: 18 nov. 2020.
- WRIGHT, N.; HARGREAVES, D. Unsteady CFD simulations for natural ventilation. **International Journal of Ventilation**, v. 5, n. 1, p. 13-20, 2016.

Paula Scherer

Conceitualização, Curadoria de dados, Análise de dados, Pesquisa, Metodologia, Administração do projeto, Supervisão, Validação de dados e experimentos, Design da apresentação de dados, Redação do manuscrito original, Redação - revisão e edição.

Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo | Universidade Federal de Santa Maria | Rua São João, 289, Centro | São Paulo das Missões - RS - Brasil | CEP 97980-000 | Tel.: (55) 99657-1466 | E-mail: paula_scherer@hotmail.com

Giane de Campos Grigoletti

Conceitualização, Curadoria de dados, Análise de dados, Pesquisa, Metodologia, Administração do projeto, Supervisão, Validação de dados e experimentos, Design da apresentação de dados, Redação do manuscrito original, Redação - revisão e edição.

Departamento de Arquitetura e Urbanismo | Universidade Federal de Santa Maria | Av. Roraima, 1.000, Prédio 9F, Sala 109F, Camobi | Santa Maria - RS - Brasil | CEP 97105-900 | E-mail: giane.c.grigoletti@ufsm.br

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

www.scielo.br/ac

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



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