

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ARQUITETURA, URBANISMO E PAISAGISMO

Paula Scherer

**AVALIAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE VENTILAÇÃO NATURAL EM
SALAS DE AULA DE ENSINO FUNDAMENTAL NA ZONA
BIOCLIMÁTICA 2**

Santa Maria, RS
2022

Paula Scherer

**AVALIAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE VENTILAÇÃO NATURAL EM SALAS DE
AULA DE ENSINO FUNDAMENTAL NA ZONA BIOCLIMÁTICA 2**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, Urbanismo e Paisagismo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Arquitetura, Urbanismo e Paisagismo**.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Giane de Campos Grigoletti

Santa Maria, RS
2022

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001

Scherer, Paula
Avaliação de estratégias de ventilação natural em salas de aula de ensino fundamental na Zona Bioclimática 2 / Paula Scherer.- 2022.
197 p.; 30 cm

Orientadora: Giane de Campos Grigoletti
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, Urbanismo e Paisagismo, RS, 2022

1. Ventilação Natural 2. Salas de Aula 3. Conforto Térmico 4. Eficiência Energética 5. Qualidade da Ventilação Interna I. de Campos Grigoletti, Giane II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, PAULA SCHERER, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Paula Scherer

**AVALIAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE VENTILAÇÃO NATURAL EM SALAS DE
AULA DE ENSINO FUNDAMENTAL NA ZONA BIOCLIMÁTICA 2**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, Urbanismo e Paisagismo da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Arquitetura, Urbanismo e Paisagismo**.

Aprovado em 15 de fevereiro de 2022:



Giane de Campos Grigoletti, Dr^a. (UFSM) – por videoconferência
(Presidente/Orientadora)



Eduardo Grala da Cunha, Dr. (UFPel) – por videoconferência



Celina Maria Britto Correa, Dr^a. (UFPel) – por videoconferência

AGRADECIMENTOS

Agradeço à professora orientadora Giane de Campos Grigoletti, pelo suporte dado à pesquisa, tanto em relação ao incentivo, como à partilha de conhecimentos.

Agradeço à CAPES. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Agradeço à UFSM e ao PPGAUP pela oportunidade e acolhida, que possibilitou o desenvolvimento deste trabalho. Sou grata, também, aos demais professores da UFSM, que através de suas disciplinas foram fundamentais para o enriquecimento da pesquisa.

Agradeço aos colegas do PPGAUP, que foram parceiros e compartilharam experiências. Também aos amigos próximos, que deram apoio fundamental para que eu me dedicasse à formação acadêmica e ao crescimento pessoal.

Agradeço, em especial, aos meus familiares, pelo incentivo durante a jornada de pós-graduação. Sou grata por estarem presentes, inclusive, durante os momentos mais conturbados, depositando confiança em meu empenho e capacidade.

RESUMO

AVALIAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE VENTILAÇÃO NATURAL EM SALAS DE AULA DE ENSINO FUNDAMENTAL NA ZONA BIOCLIMÁTICA 2

AUTOR: Paula Scherer
ORIENTADOR: Giane de Campos Grigoletti

Salas de aula escolares são ambientes caracterizados pela longa permanência, sendo ocupadas quase diariamente pela população. As condições construídas desses locais, dessa forma, apresentam grandes impactos à eficiência energética dos edifícios, assim como ao conforto térmico dos usuários. Esses aspectos explicam a relevância dada a estudos voltados ao assunto nos últimos anos. Quanto ao comportamento de uso desses locais, verifica-se que a intensidade e o direcionamento da ventilação nas salas de aula podem impactar sua eficiência energética e o conforto térmico dos usuários. Ademais, em virtude da necessidade de biossegurança frente à pandemia de COVID-19, a ventilação natural em salas de aula escolares é de grande importância. Visto esse panorama, a presente pesquisa objetivou verificar 16 estratégias relacionadas à ventilação natural de salas de aula de ensino fundamental em relação à eficiência energética, ao conforto térmico e a qualidade da ventilação interna, para a Zona Bioclimática 2. A metodologia baseou-se em simulações com o *software* EnergyPlus 8.7.0 e com o ANSYS CFX, e critérios de conforto térmico recomendados pelo modelo adaptativo da ASHRAE 55/2017. Para a qualidade da ventilação interna, foram adotados critérios da OPAS, para as taxas de ventilação, e da OMS, para a umidade relativa do ar. Os resultados obtidos mostraram que, para o modelo de sala de aula estudado, as estratégias de ventilação natural ocasionaram índices de desconforto por frio superiores a 15%, que foram acentuados quando houve uso de ventilação higiênica, alcançando 25%. A estratégia de ventilação cruzada leste-oeste, com conexão, na orientação oeste, a uma circulação ventilada por lanternim, se destacou quando houve apenas o uso de ventilação térmica, evidenciando valores satisfatórios de conforto térmico e qualidade da ventilação. Ela apresentou, também, valores favoráveis quando houve a aplicação de ventilação higiênica nos sistemas superiores das janelas de orientação norte. As estratégias com ventilação unilateral térmica, apesar de evidenciarem conforto térmico elevado, não apresentaram os valores mínimos de taxas de ventilação e renovação de ar na sala de aula analisada, o que prejudicou sua eficiência energética. Esta pesquisa contribuiu para um melhor entendimento de sistemas de aberturas voltados a edifícios escolares que proporcionem qualidade da ventilação interna, eficiência energética e conforto térmico para localidades da Zona Bioclimática 2.

Palavras-chave: Conforto térmico. Salas de Aula. Ventilação Natural.

ABSTRACT

EVALUATION OF NATURAL VENTILATION STRATEGIES IN ELEMENTARY CLASSROOMS IN BIOCLIMATE ZONE 2

AUTHOR: Paula Scherer

ADVISOR: Giane de Campos Grigoletti

School classrooms are environments characterized by long permanence, being occupied almost daily by the population. The built conditions of these places, therefore, have great impacts on the energy efficiency of buildings, as well as on the thermal comfort of users. These aspects explain the relevance given to studies on the subject in recent years. Regarding the usage behavior of these places, it appears that the intensity and direction of ventilation in classrooms can impact their energy efficiency and the thermal comfort of users. In addition, due to the need for biosecurity in the face of the COVID-19 pandemic, natural ventilation in school classrooms is of great importance. Furthermore, due to the need for biosecurity, the present research aimed to verify 16 strategies related to natural ventilation of elementary school classrooms in relation to energy efficiency, thermal comfort and the quality of indoor ventilation, for Bioclimatic Zone 2. The methodology was based on simulations with the software EnergyPlus 8.7.0 and with the ANSYS CFX, and thermal comfort criteria recommended by the adaptive model of ASHRAE 55/2017. For the quality of indoor ventilation, OPAS criteria were adopted for ventilation rates and OMS criteria for relative air humidity. The results obtained showed that, for the classroom model studied, natural ventilation strategies caused discomfort rates due to cold above 15%, which were increased when hygienic ventilation was used, reaching 25%. The east-west cross ventilation strategy, with connection, in the west orientation, to a circulation ventilated by lantern, stood out when there was only the use of thermal ventilation, showing satisfactory values of thermal comfort and ventilation quality. It also presented favorable values when there was the application of hygienic ventilation in the upper systems of the north-oriented windows. Strategies with unilateral thermal ventilation, despite showing high thermal comfort, did not introduced the minimum values of ventilation and air renewal rates in the analyzed classroom, which impaired their energy efficiency. This research contributes to a better understanding of opening systems aimed at school buildings that provide quality of indoor ventilation, energy efficiency and thermal comfort for locations in Bioclimatic Zone 2.

Keywords: Thermal Comfort. Classrooms. Natural Ventilation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Caminhos formados pelo fluxo do ar através dos ambientes em função de divisões internas	33
Figura 2 - Efeito chaminé	33
Figura 3 - Temperatura operativa aceitável para espaços naturalmente condicionados.....	40
Figura 4 - Projetos analisados.....	51
Figura 5 - Planta baixa do protótipo de escola rural	52
Figura 6 - Corte esquemático do estudo preliminar.....	54
Figura 7 - Detalhe das aberturas na fachada sudeste.....	54
Figura 8 - Representação geométrica do modelo de simulação	55
Figura 9 - Vista geral da chaminé solar e do sombreamento gerado	58
Figura 10 - Zona Bioclimática 2 (ZB2).....	60
Figura 11 - Infográfico dos procedimentos metodológicos	64
Figura 12 - Rosa dos ventos para velocidades predominantes e frequência de ocorrência, do TMY2 para Santa Maria	66
Figura 13 - Edifício escolar com ventilação unilateral junto da sala de aula analisada (orientação leste)	71
Figura 14 - Janela adotada no caso base	72
Figura 15 - Edifício escolar com ventilação cruzada junto da sala de aula analisada (orientação leste-oeste)	76
Figura 16 – Edifício escolar com ventilação cruzada e lanternim junto da sala de aula analisada (orientação leste-oeste).....	77
Figura 17 – Edifício escolar com chaminés solares e janelas de peitoril médio junto da sala de aula analisada (orientação leste-oeste).....	79
Figura 18 - Edifício escolar com ventilação unilateral junto da sala de aula analisada (orientação norte)	80
Figura 19 - Edifício escolar com ventilação cruzada junto da sala de aula analisada (orientação norte-sul).....	81
Figura 20 - Edifício escolar com ventilação cruzada e lanternim junto da sala de aula analisada (orientação norte-sul)	82

Figura 21 - Edifício escolar com chaminés solares e janelas de peitoril médio junto da sala de aula analisada (orientação norte-sul).....	83
Figura 22 - Organograma dos casos de ventilação natural simulados	84
Figura 23 - Edifícios nos domínios circulares, para o bloco com 4 salas de aula (superior) e com 8 salas de aula (inferior), no AutoCAD 2021	86
Figura 24 - Configurações da malha no Ansys CFX.....	87
Figura 25 - <i>Inflated boundary</i> para o piso do domínio no módulo <i>Mesh</i>	88
Figura 26 - Limites do domínio no módulo <i>Setup</i>	91
Figura 27 - Configuração da lateral do domínio no módulo <i>Setup</i>	91
Figura 28 - Configuração do Solver Control no módulo <i>Setup</i>	93
Figura 29 - Plano horizontal de velocidade do ar no módulo <i>Results</i>	93
Figura 30 - Faixa de conforto adaptativo utilizada	97
Figura 31 - Velocidade do ar na sala de aula com ventilação unilateral leste, para incidência do vento a $\theta = 90^\circ$ e 135° , em planta baixa na altura de 0,95 m.....	101
Figura 32 - Velocidade do ar na sala de aula com ventilação unilateral leste, para incidência do vento a $\theta = 90^\circ$ e 135° , em planta baixa na altura de 1,50 m.....	102
Figura 33 - Velocidade do ar na sala de aula com ventilação unilateral leste, em corte, $\theta = 90^\circ$ e 135°	102
Figura 34 - Velocidade do ar na sala de aula com ventilação cruzada leste-oeste, $\theta = 90^\circ$ e 135° , em planta baixa na altura de 0,95 m.....	103
Figura 35 - Velocidade do ar na sala de aula com ventilação cruzada leste-oeste, $\theta = 90^\circ$ e 135° , em planta baixa na altura de 1,50 m.....	104
Figura 36 - Velocidade do ar na sala de aula ventilação cruzada leste-oeste, em corte, $\theta = 90^\circ$ e 135°	104
Figura 37 - Velocidade do ar na sala de aula com ventilação cruzada e conectada a uma circulação fechada na orientação oeste, $\theta = 90^\circ$ e 135° , em planta baixa na altura de 0,95 m	105
Figura 38 - Velocidade do ar na sala de aula com ventilação cruzada e conectada a uma circulação fechada na orientação oeste, $\theta = 90^\circ$ e 135° , em planta baixa na altura de 1,5 m	106
Figura 39 - Velocidade do ar na sala de aula com ventilação cruzada e conectada a uma circulação fechada na orientação oeste, em corte, $\theta = 90^\circ$ e 135°	106

Figura 40 - Velocidade do ar na sala de com janelas de peitoril médio na orientação leste e chaminés solares na orientação oeste, $\theta = 90^\circ$ e 135° , em planta baixa na altura de 0,95 m.....	107
Figura 41 - Velocidade do ar na sala de com janelas de peitoril médio na orientação leste e chaminés solares na orientação oeste, $\theta = 90^\circ$ e 135° , em planta baixa na altura de 1,5 m.....	108
Figura 42 - Velocidade do ar na sala de com janelas de peitoril médio na orientação leste e chaminés solares na orientação oeste, em corte, $\theta = 90^\circ$ e 135°	108
Figura 43 - Velocidade do ar na sala de aula com ventilação unilateral norte, $\theta = 90^\circ$ e 135° , em planta baixa na altura de 0,95 m	109
Figura 44 - Velocidade do ar na sala de aula com ventilação unilateral norte, $\theta = 90^\circ$ e 135° , em planta baixa na altura de 1,50 m	110
Figura 45 - Velocidade do ar na sala de aula com ventilação unilateral norte, em corte, $\theta = 90^\circ$ e 135°	110
Figura 46 - Velocidade do ar na sala de aula com ventilação cruzada norte-sul, $\theta = 90^\circ$ e 135° , em planta baixa na altura de 0,95 m	111
Figura 47 - Velocidade do ar na sala de aula com ventilação cruzada norte-sul, $\theta = 90^\circ$ e 135° , em planta baixa na altura de 1,50 m	112
Figura 48 - Velocidade do ar na sala de aula com ventilação cruzada norte-sul, em corte, $\theta = 90^\circ$ e 135°	112
Figura 49 - Velocidade do ar na sala de aula com ventilação cruzada, conectada a uma circulação fechada na orientação sul, $\theta = 90^\circ$ e 135° , em planta baixa na altura de 0,95 m.....	113
Figura 50 - Velocidade do ar na sala de aula com ventilação cruzada, conectada a uma circulação fechada na orientação sul, $\theta = 90^\circ$ e 135° , em planta baixa na altura de 1,50 m.....	114
Figura 51 - Velocidade do ar na sala de aula conectada a uma circulação fechada na orientação sul, em corte, $\theta = 90^\circ$ e 135°	114
Figura 52 - Velocidade do ar na sala de aula com janelas de peitoril médio na orientação norte e chaminés solares na orientação sul, $\theta = 90^\circ$ e 135° , em planta baixa na altura de 0,95 m	115

Figura 53 - Velocidade do ar na sala de aula com janelas de peitoril médio na orientação norte e chaminés solares na orientação sul, $\theta = 90^\circ$ e 135° , em planta baixa na altura de 1,50 m.....	116
Figura 54 - Velocidade do ar na sala de aula com janelas de peitoril médio na orientação norte e chaminés solares na orientação sul, em corte, $\theta = 90^\circ$ e 135°	116
Figura 55 - Temperatura operativa na sala analisada ao longo da semana letiva mais fria, para os casos de orientação leste-oeste e norte-sul, em sequência.....	126
Figura 56 - Temperatura operativa na sala analisada ao longo da semana letiva mais quente, para os casos de orientação leste-oeste e norte-sul, em sequência...	127
Figura 57 - GH_A para cada caso simulado.....	129
Figura 58 - GH_A para cada caso simulado considerando a semana letiva mais quente e a mais fria.....	130
Figura 59 – Histograma anual da renovação de ar das horas ocupadas para os casos de orientação leste e oeste (1 a 8).....	133
Figura 60 – Histograma anual da renovação de ar das horas ocupadas para os casos de orientação norte e sul (9 a 16)	133
Figura 61 - Histograma da renovação de ar na semana letiva mais fria, para os casos de orientação leste-oeste e norte-sul, em sequência	135
Figura 62 - Histograma da renovação de ar na semana letiva mais quente, para os casos de orientação leste-oeste e norte-sul, em sequência.....	137
Figura 63 – Umidade média relativa do ar mensal para os casos de orientação leste-oeste	138
Figura 64 - Umidade média relativa do ar mensal para os casos de orientação norte-sul.....	139
Figura 65 - Mapas de C_p 's nas fachadas dos casos 1 e 2 (salas de aula com ventilação unilateral na orientação leste) e 3 e 4 (salas de aula com ventilação cruzada leste-oeste), para o vento leste ($\theta = 90^\circ$) e sudeste ($\theta = 135^\circ$), em sequência.....	164
Figura 66 - Mapas de C_p 's nas fachadas dos casos 5 e 6 (salas de aula com ventilação cruzada leste-oeste conectadas a uma circulação ventilada por lanternim), para o vento leste ($\theta = 90^\circ$) e sudeste ($\theta = 135^\circ$), em sequência...	165

Figura 67 - Mapas de Cp's nas fachadas dos casos 7 e 8 (ventilação natural na orientação leste com adição de chaminés solares na orientação oeste), para o vento leste ($\theta = 90^\circ$) e sudeste ($\theta = 135^\circ$), em sequência	166
Figura 68 - Mapas de Cp's nas fachadas dos casos 9 e 10 (salas de aula com ventilação unilateral na orientação norte) e 11 e 12 (salas de aula com ventilação cruzada norte-sul) para o vento leste ($\theta = 90^\circ$) e sudeste ($\theta = 135^\circ$), em sequência	167
Figura 69 - Mapas de Cp's nas fachadas dos casos 13 e 14 (salas de aula com ventilação cruzada norte-sul conectadas a uma circulação ventilada por lanternim), para o vento leste ($\theta = 90^\circ$) e sudeste ($\theta = 135^\circ$), em sequência ...	168
Figura 70 - Mapas de Cp's nas fachadas dos casos 15 e 16 (ventilação natural na orientação norte com adição de chaminés solares na orientação sul), para o vento leste ($\theta = 90^\circ$) e sudeste ($\theta = 135^\circ$), em sequência	169

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Recomendações para salas de aula	69
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Aumentos nos limites aceitáveis de temperatura operacional.....	41
Tabela 2 - Limites de fator solar de vidro e de percentual de abertura zenital	61
Tabela 3 - Propriedades dos materiais opacos	74
Tabela 4 - Propriedades do material translúcido	74
Tabela 5 - Propriedades dos materiais da chaminé solar	78
Tabela 6 – Área de abertura para ventilação natural na sala de aula analisada, para cada caso	84
Tabela 7 - Número de elementos das malhas.....	89
Tabela 8 - Número de elementos das malhas.....	90
Tabela 9 - Coeficientes de rugosidade do entorno.....	92
Tabela 10 - Velocidade média do ar para cada caso na sala de aula analisada.....	117
Tabela 11 - PHOCT da sala de aula analisada considerando os 16 casos simulados	119
Tabela 12 - Percentagens de horas ocupadas em desconforto por frio e calor	120
Tabela 13 - Percentagens de horas ocupadas em desconforto por frio e calor para a semana mais fria e a mais quente	124
Tabela 14 - Taxa de ventilação estimada na sala de aula analisada	131
Tabela 15 - Renovações de ar por hora anuais para cada caso	132
Tabela 16 - Umidade média relativa do ar mensal para a semana letiva mais fria e para a mais quente	140
Tabela 17 - Panorama anual dos valores de cada caso simulado, conforme os critérios de avaliação	142
Tabela 18 – Panorama das semanas letivas extremas dos valores de cada caso simulado conforme os critérios de avaliação	143
Tabela 19 – Cp's das aberturas dos casos 1 e 2 considerando o vento de origem leste, $\theta = 90^\circ$	170
Tabela 20 – Cp's das aberturas dos casos 1 e 2 considerando o vento de origem sudeste, $\theta = 135^\circ$	171

Tabela 21 – Cp's das aberturas elevadas dos casos 3 e 4 considerando o vento de origem leste, $\theta = 90^\circ$	172
Tabela 22 – Cp's das aberturas elevadas dos casos 3 e 4 considerando o vento de origem sudeste, $\theta = 135^\circ$	173
Tabela 23 – Cp's das aberturas dos casos 5 e 6 considerando o vento de origem leste, $\theta = 90^\circ$ -	174
Tabela 24 - Cp's das aberturas dos casos 5 e 6 considerando o vento de origem sudeste, $\theta = 135^\circ$	178
Tabela 25 – Cp's das aberturas dos casos 9 e 10 considerando o vento de origem leste, $\theta = 90^\circ$	181
Tabela 26 – Cp's das aberturas dos casos 9 e 10 considerando o vento de origem leste, $\theta = 90^\circ$	182
Tabela 27 – Cp's das aberturas dos casos 11 e 12 considerando o vento de origem sudeste, $\theta = 135^\circ$	184
Tabela 28 – Cp's das aberturas dos casos 13 e 14 considerando o vento de origem leste, $\theta = 90^\circ$	185
Tabela 29 – Cp's das aberturas dos casos 13 e 14 considerando o vento de origem sudeste, $\theta = 135^\circ$	190
Tabela 30 – Cp's das aberturas dos casos 15 e 16 considerando o vento de origem leste, $\theta = 90^\circ$	194
Tabela 31 – Cp's das aberturas dos casos 13 e 14 considerando o vento de origem sudeste, $\theta = 135^\circ$	195

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACH	<i>Air Changes per Hour</i> (Renovações de Ar por Hora)
AFN	<i>Airflow Network</i> (Rede de Fluxo de Ar)
APO	Avaliação Pós-Ocupação
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i> (Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar Condicionado)
BLAST	<i>Basic Local Alignment Search Tool</i> (Ferramenta Básica de Pesquisa de Alinhamento Local)
BRE	<i>Building Research Establishment</i> (Estabelecimento de Pesquisa de Construção)
CEN	<i>Comité Européen de Normalisation</i> (Comité Europeu de Normalização)
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i> (Fluidodinâmica Computacional)
CgTT	Carga Térmica Total
Cp	Coeficiente de pressão
EqNumV	Equivalente Numérico de ambientes não condicionados e/ou Ventilados naturalmente
ENCE	Etiqueta Nacional de Conservação de Energia
FNDE	Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação
FUNDACENTRO	Fundação Jorge Duprat Figueiredo de Segurança e Medicina do Trabalho
GH	Graus-hora
GH _A	Graus-hora anuais
ICenv	Indicador de Consumo da Envoltória
IN	Instrução Normativa
INI-C	Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia

Inmetro	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
RTQ-C	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas
SWERA	<i>Solar and Wind Energy Resource Assessment</i> (Avaliação de recursos de energia solar e eólica)
TMY2	<i>Typical meteorological year - second edition</i> (Ano meteorológico típico – segunda edição)
UH	Unidade Habitacional
UNICEF	<i>United Nations Children's Fund</i> (Fundo das Nações Unidas para a Infância)
US DOE	<i>United States Department of Energy</i> (Departamento de Energia dos Estados Unidos da América)
ZB	Zona Bioclimática

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	21
1.1.	PROBLEMA DA PESQUISA	23
1.2.	JUSTIFICATIVA	23
1.3.	OBJETIVOS	25
1.3.1.	Objetivo geral.....	25
1.3.2.	Objetivos específicos	25
1.4.	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	26
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	28
2.1.	DESEMPENHO TÉRMICO.....	28
2.2.	VENTILAÇÃO NATURAL	31
2.3.	CONFORTO TÉRMICO	38
2.4.	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	42
2.4.1.	Eficiência energética em salas de aula.....	43
2.4.2.	EnergyPlus e simulação da ventilação natural.....	44
2.4.3.	CFD e simulação da ventilação natural	47
2.5.	ESTUDOS CORRELATOS	50
2.6.	A ZONA BIOCLIMÁTICA 2 E SUAS DIRETRIZES.....	59
2.7.	Considerações finais sobre a revisão bibliográfica.....	61
3	MÉTODO DE PESQUISA.....	63
3.1.	ETAPAS E PROCEDIMENTOS DA PESQUISA	63
3.1.1.	Etapa 2: Critérios de avaliação	66
3.1.2.	Etapa 3: Definição do modelo de simulação	69
3.1.3.	Etapa 4: Parâmetros de simulação	85
3.1.3.1.	Obtenção da velocidade do ar e dos C_p no <i>software</i> Ansys CFX	85
3.1.3.2.	Simulação da ventilação natural no <i>software</i> EnergyPlus	94
3.1.4.	Etapa 5: Tratamento e análise dos dados.....	96
3.1.5.	Etapa 6: Conclusões	99
4	RESULTADOS	100
4.1.	VELOCIDADE DO AR INTERNO	100

4.2. PERCENTUAL DE HORAS OCUPADAS EM CONFORTO TÉRMICO (PHOCT).....	118
4.3. GRAUS-HORA PARA AQUECIMENTO E RESFRIAMENTO.....	128
4.4. TAXA DE VENTILAÇÃO E RENOVAÇÕES DE AR POR HORA	131
4.5. UMIDADE RELATIVA DO AR.....	138
4.6. SÍNTESE DOS RESULTADOS ALCANÇADOS	141
5 CONCLUSÕES	145
REFERÊNCIAS	149
Apêndice A	163
MAPAS E ANÁLISE DOS COEFICIENTES DE PRESSÃO DO VENTO.....	163
Apêndice B	170
VALORES DOS COEFICIENTES DE PRESSÃO DO VENTO NAS ABERTURAS	170
Apêndice C	197
INFOGRÁFICO DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	197

1 INTRODUÇÃO

O ambiente térmico confortável é favorável à saúde dos usuários em aspectos físicos e psicológicos. Em ambientes pouco satisfatórios quanto a esse quesito, é verificada, além dos impactos à saúde, a minimização da eficiência energética (DEAR *et al.*, 2015). A relevância da inserção adequada de estratégias que envolvem a ventilação natural em ambientes escolares, no mundo científico, é analisada por vários pesquisadores na última década (RACKES *et al.*, 2015; VIANA; AMORIM, 2013; OLIVEIRA; CUNHA; LEITZKE, 2020; GONÇALVES; VANDERLEI, SOARES, 2012; SILVA; NASCIMENTO; BITTENCOURT, 2015). Além disso, Rackes *et al.* (2015), bem como Paes e Bastos (2013) e Azevedo, Bastos e Blower (2007), pontuam que, em projetos escolares, a supervalorização da referência a modelos preexistentes, em relação à adequação às características ambientais locais, é um obstáculo para a construção de espaços mais eficientes.

Nesse panorama, verifica-se a importância de otimizar a ventilação natural em salas de aula, o que pode viabilizar resultados favoráveis, principalmente em relação à redução das horas de desconforto por calor (RACKES *et al.*, 2015). Quando se trata desses espaços, conforme estudos de Barrett *et al.* (2015) e Kowaltowski (2011), observa-se que a qualidade do ambiente interno, referente, por exemplo, a aspectos térmicos, está diretamente vinculada ao interesse pela aprendizagem. Ademais, em virtude da disseminação da doença do coronavírus (COVID-19), a importância da ventilação natural para higienização de ambientes com grande concentração de usuários se intensifica. No estado do Rio Grande do Sul, um decreto publicado em agosto de 2021, por exemplo, define um distanciamento entre pessoas de mínimo de 1 metro em salas de aula (atividades de educação), desde que seja assegurado, além do uso obrigatório de máscara de proteção facial, o uso de ventilação natural cruzada no ambiente (RIO GRANDE DO SUL, 2021).

Quanto à viabilidade de eficiência energética e de conforto térmico em salas de aula, pesquisas realizadas por Santos e Graça (2014) e Schulze e Eicker (2013) evidenciam que, em casos de espaços internos com temperaturas altas, a ventilação com auxílio de aberturas manuais pode garantir a redução do superaquecimento.

Entretanto, as taxas de ventilação obtidas dependem de características relacionadas à geometria e ao posicionamento das aberturas. Além disso, o desempenho térmico do ambiente também depende das demais propriedades do edifício, como as relacionadas à orientação geográfica (SANTOS; GRAÇA, 2014; SCHULZE; EICKER, 2013).

Deve-se atribuir atenção especial às estratégias bioclimáticas térmicas. Como identificam estudos realizados por Silva, Nascimento e Bittencourt (2015), a adoção de estratégias de ventilação natural deve estar em conformidade com o conhecimento das orientações solares apropriadas e da incidência de ventos predominantes para cada região, além da temperatura do ar externo. A esses estudos soma-se a necessidade de várias regiões do país em aproveitar ventilação nos períodos quentes e de proporcionar inércia térmica e aquecimento solar nos períodos frios, ou seja, estratégias opostas. Assim, torna-se necessário aproveitar a ventilação cruzada nos períodos de altas temperaturas e promover o aquecimento solar através das aberturas no inverno (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

Quanto às lacunas da pesquisa, foi verificada a existência de trabalhos recentes que abordam salas de aula naturalmente ventiladas, como os desenvolvidos por Maciel (2016), Oliveira, Cunha e Leitzke (2020), Rackes *et al.* (2015), Silva, Nascimento e Bittencourt (2015) e Ferreira (2019). Entretanto, eles não se propuseram a investigar estratégias de ventilação natural em salas de aula de ensino fundamental, considerando a inserção na Zona Bioclimática 2 da NBR 15220-3 (ABNT, 2005a). Tendo em vista a relevância da abordagem, o foco da presente pesquisa foi estabelecido através da identificação de estratégias passivas de ventilação que podem ser aplicadas em salas de aula de escolas de ensino fundamental na zona bioclimática mencionada, investigando a viabilização de eficiência energética, bem como a garantia de conforto térmico para os usuários desses ambientes e de qualidade de ventilação interna.

1.1. PROBLEMA DA PESQUISA

As condições do espaço construído apresentam consequências determinantes na funcionalidade da edificação, no conforto ambiental e em sua eficiência energética (DELIBERADOR; KOWALTOWSKI, 2011). Tratando-se de salas de aula escolares, locais de ampla permanência e com grande número de usuários, conforme explicam os mesmos autores, esses impactos podem ser agravados, além de prejudicarem a aprendizagem dos estudantes. Ademais, o uso consciente de energia nesses locais, estando em concordância com as preferências dos usuários, pode possibilitar benefícios ambientais e de conforto térmico (RUPP; VÁSQUEZ; LAMBERTS, 2015).

Considerando as repercussões relacionadas ao ambiente escolar, em especial, às salas de aula, associadas ao conforto térmico e à eficiência energética, foi estabelecida a seguinte questão de pesquisa: Dentre estratégias de ventilação natural pré-estabelecidas, quais seriam mais adequadas para promover conforto térmico e qualidade do ar interno, no que diz respeito à renovação do ar e à umidade do ar, em salas de aula na ZB2?

1.2. JUSTIFICATIVA

A otimização da ventilação natural é uma forma de garantir a qualidade do ar no interior dos ambientes, com baixo consumo energético, pois possibilita o controle dos poluentes por meio da renovação do ar interno. Entretanto, as estratégias de ventilação natural variam de acordo com a posição geográfica, em função das características climáticas, e com a inserção urbana, em decorrência do uso do solo. Estratégias como ventilação cruzada diurna e noturna podem ser determinantes no aumento da quantidade de renovação do ar por hora e na melhora do conforto térmico (AMORIM; SILVA; ALMEIDA, 2014). Além disso, cabe citar que o uso do ar condicionado não é uma alternativa viável para considerável parte dos edifícios, em virtude consumo de energia artificial e custos envolvidos, principalmente quando se

trata de edificações escolares. Dessa forma, a otimização da ventilação natural pode intervir como uma alternativa mais adequada (PROCEL, 2010).

A ventilação natural, seguida do sombreamento, é a estratégia bioclimática mais adequada para edificações no Brasil. Especificamente para a Zona Bioclimática 2, a ventilação cruzada é a mais indicada (ABNT, 2005a; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

Indivíduos que usam frequentemente ambientes artificialmente climatizados podem criar altas expectativas quanto à faixa de homogeneidade da temperatura do ambiente. Já em espaços naturalmente ventilados, verifica-se a expansão dos limites de temperatura do ar de conforto dos usuários. Pessoas que atuam nesses locais desenvolvem maior adaptação às variações de temperatura e melhor controle de seu ambiente, conforme mostra o modelo adaptativo de conforto térmico (ASHRAE, 2017b).

Em uma pesquisa realizada em salas de aula escolares, Viana e Amorim (2013) atentam para a capacidade da ventilação natural em minimizar os ganhos extras de calor. Associadas às direções dos ventos, as dimensões das esquadrias devem ser projetadas de forma a viabilizar uma ventilação satisfatória de acordo com as condições climáticas locais. Nesse âmbito, torna-se, ainda, imprescindível empregar estratégias bioclimáticas de forma holística, apropriando-se de um sistema de aberturas que maximize a ação dos ventos no edifício escolar, garantindo trocas térmicas entre o interior e o exterior das salas de aula principalmente no final da tarde e decorrer da noite, e quando as temperaturas externas não forem extremas (VIANA; AMORIM, 2013).

Quando se refere à importância de estratégias arquitetônicas bioclimáticas no ambiente escolar, deve-se considerar que a escola é um equipamento importante para o desenvolvimento social da população. A adaptação do estudante nesses locais, inclusive, é definidora da evolução do aprendizado. Adicionalmente, para um país em desenvolvimento, a importância da eficiência do edifício escolar se intensifica (FUNARI; KOWALTOWSKI, 2005).

Conforme afirma Pereira *et al.* (2014), é indiscutível a responsabilidade social do edifício escolar, independente da região em que se situe. Para tanto, a eficiência energética e os níveis adequados de qualidade ambiental interna, neste tipo de

ambiente, podem impactar a condição socioeconômica da população. Um estudo desenvolvido por Deliberador e Kowaltowski (2011) evidencia, entretanto, que a maioria das APO's verificadas, realizadas no país, indicam a falta de planejamentos arquitetônicos que valorizem as condições de ventilação e insolação locais. Dessa forma, inúmeras escolas acabam sendo avaliadas negativamente em relação ao conforto térmico. Situações como as citadas pelos autores reafirmam a necessidade de maior estudo e aplicação de estratégias bioclimáticas em espaços educacionais, como salas de aula de escolas de ensino fundamental. A maior investigação de estratégias e recursos que viabilizem desempenho energético satisfatório, assim como o compartilhamento das pesquisas, tende a possibilitar a criação de espaços mais eficientes e auxiliar na melhora do bem-estar da população em suas atividades cotidianas.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo geral

Avaliar estratégias de ventilação natural no que tange à eficiência energética, ao conforto térmico e à qualidade da ventilação natural para salas de aula do ensino fundamental localizadas na Zona Bioclimática 2.

1.3.2. Objetivos específicos

- Levantar estratégias de ventilação natural aplicáveis a salas de aula.
- Avaliar estratégias de ventilação natural que promovem melhor eficiência energética em salas de aula para a Zona Bioclimática 2.
- Indicar quais estratégias de ventilação natural viabilizam o conforto térmico dos usuários de salas de aula para a Zona Bioclimática 2.

- Indicar quais estratégias de ventilação natural promovem melhor qualidade de ventilação interna considerando o número de renovações de ar por hora e a umidade do ar interno de salas de aula para a Zona Bioclimática 2.

1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente pesquisa foi organizada através de 5 capítulos temáticos. A abordagem do primeiro capítulo diz respeito à **introdução** do trabalho. Nele, foi apresentada a contextualização da pesquisa com destaque à importância científica do tema atualmente. Também foram expostas as questões da pesquisa, a justificativa da importância da realização da mesma, os objetivos gerais e específicos e a estrutura da dissertação.

No segundo capítulo foi apresentada a **revisão da literatura**, que trouxe fundamentos físicos e abordagens científicas inerentes ao ambiente educacional, considerando o desempenho e o conforto térmico, a ventilação natural, a eficiência energética, e estudos correlatos, ou seja, que possuem temas e objetivos semelhantes aos da pesquisa. Também foram definidas, ao fim do capítulo, as características e diretrizes de eficiência energética para a Zona Bioclimática 2 e as conclusões da revisão da literatura.

No terceiro capítulo, denominado **método de pesquisa**, foi organizada e explicada, em 6 etapas, a metodologia empregada para o desenvolvimento do trabalho. Essa abrange a revisão da literatura, o estabelecimento de critérios de avaliação, a definição do modelo de simulação, a determinação de parâmetros de simulação, o tratamento e análise de dados, e por último, as conclusões.

O quarto capítulo do trabalho, por sua vez, aborda os **resultados**, com identificação das velocidades do ar interno, dos percentuais de horas ocupadas em conforto térmico, das taxas de ventilação e renovações de ar por hora, dos GH_A (graus-hora anuais) em desconforto e da umidade relativa do ar no período de ocupação da sala de aula analisada, conforme as diferentes configurações de ventilação natural.

No Capítulo 5, denominado **conclusões**, são apresentadas as considerações finais tendo em vista os objetivos, as etapas metodológicas desenvolvidas no trabalho e os resultados mais e menos satisfatórios. Em seguida, foram apresentadas as **referências** utilizadas, bem como os **apêndices A, B e C**.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura busca definir os conceitos e temas pertinentes à ventilação natural, eficiência energética, considerando a aplicação em salas de aula de edificações escolares de ensino fundamental, além de abordar o estudo do desempenho térmico e do conforto térmico. Adicionalmente, o texto apresenta publicações correlatas ao assunto da pesquisa, bem como as características da ZB2, contexto deste trabalho.

2.1. DESEMPENHO TÉRMICO

O desempenho de uma edificação, segundo a NBR 15575-1, é definido como o “comportamento em uso de uma edificação e de seus sistemas” (ABNT, 2013, p.6). Para verificar o desempenho térmico do ambiente construído, recomenda-se a análise considerando o zoneamento bioclimático brasileiro, disponibilizado na NBR 15220 (ABNT, 2005a, 2005b, 2005c).

O zoneamento bioclimático divide o território brasileiro em oito zonas bioclimáticas, segundo seu clima, atribuindo recomendações para desempenho térmico das edificações. Dessa forma, para cada uma das zonas, são definidas estratégias passivas em conformidade com a estação do ano, além de vedações indicadas para a edificação (ABNT, 2005c).

O desempenho térmico da edificação é dependente de variáveis climáticas, como a oscilação diária e anual da temperatura e umidade relativa, a radiação solar incidente, a nebulosidade, as precipitações, a direção e a velocidade dos ventos, conforme época do ano, (FROTA; SCHIFFER, 2009).

A avaliação do desempenho térmico baseada na NBR 15575-1 (ABNT, 2021) pode ser realizada através de simulação computacional. Quanto ao procedimento de simulação computacional, destaca-se a necessidade de simulações com base em arquivos climáticos com dados horários das principais variáveis para um ano considerado representativo do clima da região. Ademais, na avaliação por simulação, deve haver a consideração da edificação na fase de uso e operação;

com e sem ventilação natural; modelagem de janelas operáveis, com renovações de ar obtidas através da velocidade e direção do vento fornecidas pelo arquivo climático; consideração do cálculo da carga térmica, frente ao uso de ar condicionado; comparação entre um modelo do edifício projetado e um modelo de referência; e adoção do percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa (PHFT), da temperatura operativa anual máxima e mínima da UH ($T_{omáx}$ e $T_{omín}$) e da carga térmica total (CgTT), como novos indicadores do desempenho térmico (ABNT, 2021).

No que diz respeito às definições e fundamentos físicos de desempenho térmico, conceitua-se a capacidade térmica (C) como uma propriedade física que compreende a “quantidade de calor necessária para variar em um a unidade a temperatura de um sistema em $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ”, conforme a NBR 15575-1 (ABNT, 2021, p. 3). A mesma norma define a transmitância térmica como a transmissão de calor em unidade de tempo e por meio de uma área de um elemento ou, então, componente construtivo. Neste caso, dos vidros e dos componentes opacos das paredes externas e coberturas, considerando as resistências superficiais interna e externa, provocadas pela diferença de temperatura entre dois ambientes

A absorptância à radiação solar (α), conforme a NBR 15220-1, é definida como o quociente da taxa de radiação do sol que é absorvida por uma superfície pela taxa de radiação do sol que incide na mesma superfície (ABNT, 2005a).

O fator solar de elementos opacos (FS_o) é definido como o quociente da taxa de radiação do sol transmitida por um componente opaco pela taxa da radiação do sol total que incide na sua superfície externa, de acordo com a NBR 15220-1 (ABNT, 2005a). Já o fator solar de elementos transparentes ou translúcidos (FS_t), conforme a mesma norma, corresponde ao quociente da taxa de radiação solar transmitida diretamente através de um material transparente ou translúcido, com um determinado ângulo de incidência, mais, ainda, a parcela absorvida e retransmitida para o interior pela taxa de radiação solar total que incide sobre a superfície externa (ABNT, 2005a).

A irradiância (G), ainda conforme a NBR 15220-1, é conceituada como “a taxa de radiação incidente sobre um corpo, por unidade de área de superfície” (ABNT, 2005a, p.3).

A condutividade térmica (λ) é definida como “Propriedade física de um material homogêneo e isotrópico, no qual se verifica um fluxo de calor constante, com densidade de 1 W/m^2 , quando submetido a um gradiente de temperatura uniforme de 1 Kelvin por metro²” (ABNT, 2005a, p.1). A condutividade térmica corresponde a capacidade do material de conduzir mais ou menos calor por unidade de tempo. Ela depende da densidade do material (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

A resistência térmica (R) é definida como a capacidade de determinado material em resistir à passagem do calor. Quanto maior a espessura de um material maior é a sua resistência. De forma análoga, quanto maior a condutividade térmica (λ), maior a quantidade de calor a ser transferida entre as superfícies do componente e menor sua resistência térmica (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

A resistência térmica superficial de um material expressa capacidade dele em facilitar ou dificultar trocas de calor por radiação e convecção entre a superfície do material e o meio. Quando a superfície está limitando o material e o meio externo, a resistência superficial considerada é a externa. Entretanto, quando a superfície limita o material e o meio interior, a resistência superficial passa a ser interna (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). Se, por exemplo, a temperatura exterior foi maior que a interior, a superfície externa do fechamento recebe calor através de convecção e radiação, caracterizando a fase inicial da transmissão de calor. Será, assim, verificado o incremento de temperatura da superfície em uma proporção que depende da sua resistência superficial externa R_{SE} (ABNT, 2005b; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

A emissividade (ϵ) pode ser conceituada como uma propriedade física dos materiais que identifica a quantidade de energia térmica emitida por unidade de tempo. Essa característica pertence à camada superficial do material emissor. Materiais de construção metálicos possuem baixa emissividade (entre 0,05 e 0,30), enquanto que os não metálicos detêm altas emissividades (de 0,85 a 0,90) (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

A NBR 15220-1 define o atraso térmico (φ) como sendo o “Tempo transcorrido entre uma variação térmica em um meio e sua manifestação na superfície oposta de um componente construtivo submetido a um regime periódico de transmissão de calor” (ABNT, 2005a, p. 2).

Já a inércia térmica é a capacidade de um edifício, por meio de seus componentes, de acumular e transferir calor. A inércia térmica corresponde a uma solução passiva de conforto ambiental aplicada milenarmente em construções, principalmente onde há grandes amplitudes diárias da temperatura do ar e radiação solar intensa. Edifícios com componentes construtivos espessos em sua envoltória normalmente possuem alta capacidade térmica (C), o que resulta em alta inércia térmica da edificação. Além disso, edificações semi-enterradas, com pequenas aberturas e dispositivos de sombreamento, também possuem alta inércia térmica (BRITO, 2015).

A temperatura operativa (T_o), segundo a NBR 15220-1, é definida como a temperatura uniforme de determinado espaço com comportamento de corpo negro imaginário, onde o usuário poderia trocar a mesma quantidade de calor por radiação e convecção que no espaço real não uniforme (ABNT, 2005a).

2.2. VENTILAÇÃO NATURAL

No ambiente construído, a ventilação natural tem como um dos principais objetivos a renovação do ar, sendo capaz de dissipar os vapores e os poluentes, promovendo, assim, a higienização dos ambientes. Em salas de aula, a ventilação inadequada juntamente com fatores que incluem elevada umidade e altas temperaturas, pode ocasionar desconforto térmico. A união desses fatores poderá contribuir para a sonolência, a alteração nos batimentos cardíacos e o desinteresse pelo trabalho (KOWALTOWSKI, 2011). Viana e Amorim (2013), frente a esse cenário, pontuam a importância de investir em um sistema de ventilação que inclua esquadrias que maximizem a ação dos ventos no edifício escolar quando as condições externas não forem extremas, garantindo as trocas térmicas entre o interior e o exterior.

Seguida do sombreamento, a ventilação natural é a estratégia bioclimática mais recorrente para diferentes regiões brasileiras. Alguns municípios da região sul, como Florianópolis e Porto Alegre, necessitam de ventilação natural em mais de 55% das horas do verão. Já em cidades de outras regiões do país, como São Luís

(MA) e Natal (RN), esse valor ultrapassa 85% (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

A ventilação natural é uma estratégia recomendada quando a temperatura interior for maior que 29°C ou a umidade relativa for superior a 80%. Em relação ao exterior das edificações, espaços amplos e com um número reduzido de barreiras edificadas são benéficos para a boa distribuição do movimento do ar (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014)

Existem duas maneiras principais para melhorar o conforto térmico usando ventilação natural. Uma delas é por efeito direto, proporcionando uma maior velocidade do ar interior ao abrir as janelas, aumentando assim a sensação de frescura dos usuários. A outra forma é indireta e se dá através da ventilação apenas à noite, resfriando-se a massa interna da edificação para que, no dia seguinte, a massa resfriada reduza a taxa de aumento da temperatura interna (GIVONI, 1992).

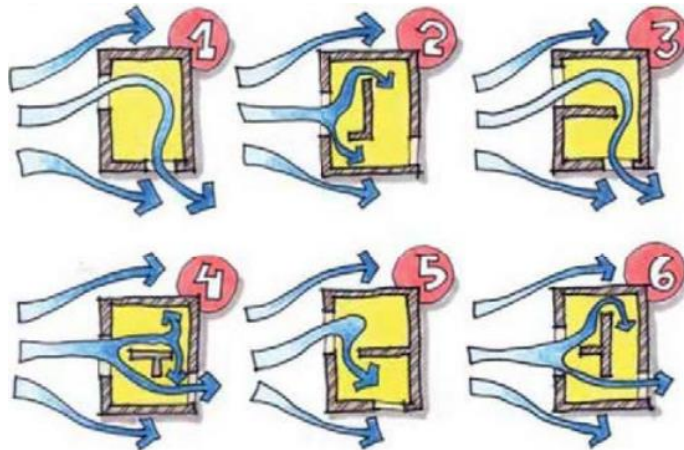
Nesse contexto, Schulze e Eicker (2013) afirmam que a ventilação natural pode atingir taxas de ventilação muito mais altas do que os sistemas de ventilação mecânica, que são especialmente projetados para o fornecimento de ar fresco. Os mesmos autores destacam que a capacidade da ventilação natural em proporcionar conforto no ambiente depende da situação de carga térmica da sala, que ocorre em função das perdas e ganhos de calor da edificação e desempenho de proteção solar, por exemplo. Quanto mais altas as cargas, necessita-se maior área de abertura efetiva e maior altura, considerando a melhora do conforto nos períodos quentes.

Tratando-se de edificações escolares, é essencial situar as salas de aula de forma a melhor aproveitarem os ventos predominantes locais, como explicam Silva e Oiticica (2013). Nesse contexto, Rackes *et al.* (2015) salientam que a ventilação natural apresenta um abrangente potencial em escolas. Entretanto, a ampla existência de projetos padronizados, no Brasil, não permite a otimização desse recurso, sendo desconsiderada a interação entre as propriedades arquitetônicas e condições climáticas das regiões.

Em edificações, a diferença de pressão e o caminho para o fluxo do ar (Figura 1), que é feito entre as aberturas da edificação, são fundamentais para a movimentação de ar nos ambientes. A diferença de pressão, por sua vez, pode

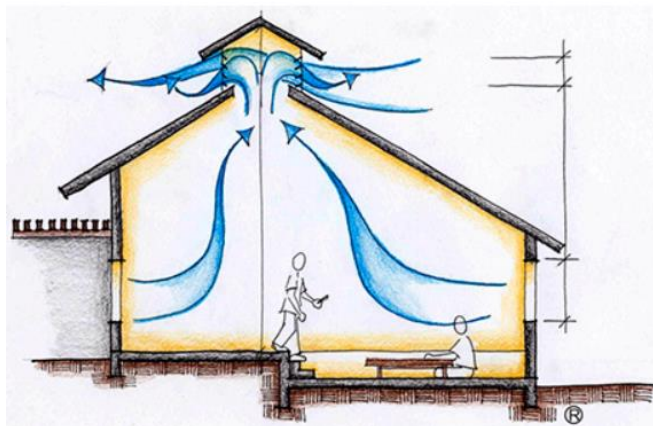
acontecer em virtude da diferença de densidade do ar, chamado efeito chaminé (Figura 2), ou então pela ação do vento (ALLARD; SANTAMOURIS, 1998).

Figura 1 - Caminhos formados pelo fluxo do ar através dos ambientes em função de divisões internas



Fonte: Lamberts, Dutra, Pereira (2014).

Figura 2 - Efeito chaminé



Fonte: ProjetEEE ([20--?]).

A ventilação natural por diferença de temperatura é aquela em que é provocado um deslocamento da massa de ar da zona em que há maior pressão para a de menor pressão, baseando-se na diferença de temperaturas externas e internas. Se, nesse caso, existirem aberturas em alturas distintas, ocorre o efeito chaminé,

que acontece através da circulação do ar da abertura inferior para a superior (LAMBERTS, [2017?]).

O fluxo de ar de um local é definido em função da velocidade média do vento na altura da abertura de entrada do ar (m/s), área da abertura (m²), e, em determinados casos, coeficiente de pressão do vento. Todavia, o fluxo de ar que atravessa um ambiente é calculado de forma diferente quando se trata da ventilação unilateral ou cruzada. Na ventilação cruzada e na unilateral, o fluxo de ar é definido pelas seguintes Equações (1,2), sequencialmente (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014):

$$Q = 0,6 \cdot A_J \cdot V \cdot \sqrt{\Delta C_P} \quad (1)$$

Onde:

Q = fluxo de ar com ventilação cruzada em m³/s;

A_J= área útil para ventilação da abertura (m²), reduzindo a veneziana ou tela;

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

ΔC_{PL}= coeficiente de pressão do vento.

$$Q = 0,025 \cdot A \cdot V \quad (2)$$

Onde:

Q = fluxo de ar com ventilação unilateral em m³/s;

A_J= área útil para ventilação (m²), reduzindo a veneziana ou tela;

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

Sobre o número de renovações de ar, sempre que se calcula o fluxo de ar (Q) de um ambiente, é possível obter o número de renovações de ar por pessoa/hora (n) no local. Para isso, segundo Lamberts, Dutra e Pereira (2014), usa-se a equação (3):

$$n = \frac{Q \cdot 3600}{v} \quad (3)$$

Onde:

n = número de renovações de ar por hora;

v = volume do ambiente ventilado, em m^3 ;

Q = fluxo de ar (m^3/s).

O cálculo do fluxo de calor sensível removido ou adicionado pela ventilação natural é calculado de acordo com as equações (4 a 7), para um número de trocas de ar por hora N (LAMBERTS, 2016):

$$\phi = m \times c \times \Delta t \text{ (kcal/h)} \quad (4)$$

$$m = \rho \times V \text{ (kg/h)} \quad (5)$$

$$\phi = \rho \times V \times c \times \Delta t \text{ (kcal/h)} \quad (6)$$

$$V = N \times v \text{ (m}^3\text{/h)} \quad (7)$$

Onde:

ϕ = fluxo de calor (kcal/h ou W);

m = vazão mássica (kg/h);

c = calor específico (kcal/kg°C);

Δt = diferença de temperatura do ar externo e interno (°C);

ρ = densidade do ar (kg/m^3);

V = vazão volumétrica (m^3/h);

N = Número de trocas por hora (trocas/h)

v = volume (m^3).

Tratando-se de ambientes naturalmente ventilados, a taxa de ventilação, em l/s/p (litros/segundo/pessoa), é “a taxa de ventilação natural impulsionada pelo vento através de uma sala” (OPAS, 2021, p.19). Para locais não residenciais, recomenda-se que o valor seja de, no mínimo, 10 l/s/p (CEN, 2019). A estimativa, conforme indica a OPAS (2021), pode ser calculada através da equação (8):

$$\text{Taxa de vent.} = k \times \text{Velocidade do vento} \times \text{Menor área de abertura} \times 1000 \quad (8)$$

Onde:

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

Velocidade do vento = Corresponde ao valor na altura do edifício em um local sem quaisquer obstruções.

Sendo o valor recomendado pela OPAS (2021) de 10 l/s/p , o valor de renovações de ar por hora (ACH) equivalente pode ser calculado conforme as Equações (9 e 10) a seguir:

$$\text{Vazão volumétrica (l/h)} = N^{\circ} \text{ de pessoas} \times 3600 \times 1000 \quad (9)$$

$$\text{ACH} = \text{Vazão volumétrica (l/h)} \div \text{Volume do ambiente (l)} \quad (10)$$

Sabendo-se que:

1 segundo = 1 renovação = 10 l/s/p

1 hora = 3600 renovações, logo $1 \text{ h} = 36\,000 \text{ renovações} = 36\,000 \text{ l/h/p}$

Quanto aos dispositivos que viabilizam a ventilação natural no ambiente interno, acerca das janelas, é fundamental considerar a área útil de ventilação, que diz respeito à área efetiva de ventilação quando a janela é totalmente aberta. Essa área irá variar conforme ao tipo de janela inserida no projeto arquitetônico (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). Janelas de abrir (90°) de uma ou duas folhas, por exemplo, viabilizam área útil de ventilação natural de 90%, assim como janelas oscilobatentes, janelas do tipo camarão e as pivotantes. Janelas de correr de duas folhas possuem área útil de ventilação natural de 45%, enquanto que para as janelas de correr de 4 folhas (2 fixas e 2 móveis) essa área é reduzida para 40%. Janelas maxim-ar (abertura 90°), por sua vez, possuem área de ventilação natural de 80%, assim como as janelas basculantes sem esquadria (PBE EDIFICA, 2012).

A área útil da ventilação é um conceito relevante na seleção de esquadrias, uma vez que representa a área efetiva da ventilação quando a esquadria está totalmente aberta, essa área, assim, depende do tipo de abertura empregada. (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). Para cálculos mais acurados é necessário descontar a área ocupada pelos caixilhos fixos da esquadria.

Quanto às estratégias de ventilação, a ventilação unilateral é aquela que ocorre através de uma ou mais aberturas dispostas no mesmo plano da edificação, em zona de igual pressão ou de pequena diferença, dificultando, assim, a circulação de ar (SOUZA; ROCHA, 2007). Já ventilação cruzada é uma técnica bastante eficaz de ventilação no ambiente construído, exigindo, apenas, aberturas em paredes diferentes e conhecimento dos ventos desejáveis em períodos quentes. Aberturas paralelas em paredes opostas podem provocar uma ventilação cruzada de alta velocidade, dependendo da geometria do ambiente. Quando elas não são paralelas, é possível verificar uma curvatura no fluxo do vento (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

A ventilação noturna, também conhecida como ventilação estrutural, costuma ser empregada para reduzir a temperatura da edificação à noite, quando a temperatura do ar externo é menor do que a do ar interno. Edificações que detêm grande inércia térmica são mais indicadas para aproveitamento desta técnica, pois mantêm a temperatura de elementos estruturais, como entrespisos e paredes internas, o que reduz os picos de temperatura no dia seguinte. Outrossim, é importante prever tomadas de ar externo nas fachadas e com saídas de ar na cobertura. Deve-se evitar tomadas de ar externo em locais com maiores nível de poluição, como estacionamentos e paradas de ônibus (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

A ventilação higiênica, por sua vez, é a ventilação necessária em todas as épocas do ano, portanto, é permanente. Enquanto isso, a ventilação térmica se faz necessária quando o ar do microclima interno é mais quente que o ar externo sendo indicada para uma situação de verão (ROSA; SEDREZ; SATTLER, 2001).

A NBR 16401-2, da ABNT (2017, p.5), define a corrente de ar como “resfriamento local indesejado no corpo causado pela velocidade do ar resultando em sensação de frio”. A mesma norma, inclusive, estabelece o conceito de edificações híbridas como sendo aquelas que combinam a ventilação natural viabilizada pelas esquadrias (manual ou por automação) ao condicionamento mecânico (por ar condicionado ou ventiladores).

2.3. CONFORTO TÉRMICO

Conforme ASHRAE (2017b), o conforto térmico é entendido como uma condição psicológica em que o ser humano se sente satisfeito com a situação térmica do ambiente. Tanabe (1988), nesse contexto, define ainda a neutralidade térmica como um estado mental em que o indivíduo está satisfeito com a temperatura do corpo.

As variáveis de conforto térmico abrangem as variáveis ambientais e as variáveis humanas. As variáveis ambientais são a temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$), a temperatura radiante ($^{\circ}\text{C}$), a umidade relativa (%) e a velocidade do ar (m/s). As variáveis humanas são a atividade física e a vestimenta. O nível de atividade física é responsável pela quantidade de calor gerada pelo organismo humano. A variável da atividade física é expressa em *met* ou W/m^2 . É importante prever o nível de atividade que será exercido em um ambiente para definir estratégias que viabilizem o conforto térmico. A vestimenta é expressa em *clo* ou $(\text{m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C})/\text{W}$ e está relacionada com a resistência térmica promovida pelas roupas que a pessoa está vestindo. A unidade 01 *clo* corresponde uma resistência térmica de $0,155 (\text{m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C})/\text{W}$, equivalendo, por exemplo, a um terno. Dessa forma, quanto maior a resistência térmica da vestimenta, menores as trocas de calor com o meio em que o usuário está inserido (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

O conforto térmico envolve processos de trocas de calor entre o corpo humano e o meio que o circunda, que incluem condução, convecção, radiação e evaporação. Eles ocasionam ganhos e perdas de energia com o meio, através das variáveis ambientais e humanas (PAGNOSSIN; BURIOLO; GRACIOLLI, 2001). Dentre as variáveis ambientais, salienta-se, aqui, que a direção e intensidade do vento são influenciadas por elementos como posição e tipos de aberturas. A velocidade do ar influencia trocas de calor por convecção e evaporação do suor gerado pelo corpo humano (VAREJÃO-SILVA, 2006).

A zona de conforto, segundo a NBR 16401-2 (ABNT, 2017), é conceituada como a faixa de variação bidimensional da temperatura operativa e da umidade relativa do ar, para condições predefinidas de velocidade do ar, taxa metabólica e isolamento de vestimenta.

Conforme a ASHRAE (2017b), o método adaptativo de conforto térmico trata-se de um modelo empírico de respostas humanas adaptativas a ambientes que oferecem controle de janela operável. Assim, a zona de conforto dependerá de uma média contínua das temperaturas do ar externo, definida como o ar externo médio predominante, às quais as pessoas se adaptam ao longo do tempo.

Ambientes com condições climáticas internas abaixo da zona de conforto e que possuem má qualidade do ar são responsáveis por reduzirem a satisfação humana no desempenho de atividades. A fadiga e a cefaleia são consequências diretas dessa situação, ficando perceptível a diminuição da produtividade do trabalho por aspectos relacionados à qualidade do ambiente construído (WYON, 1996).

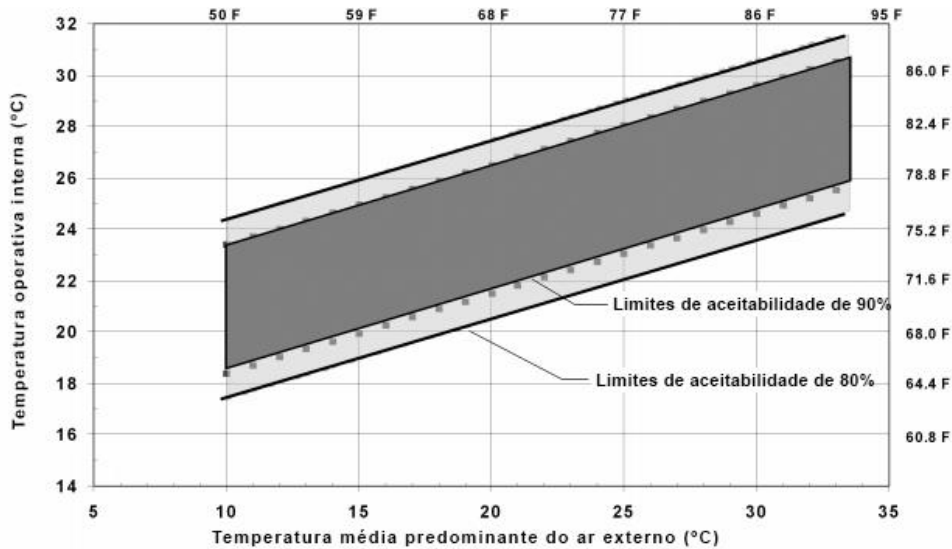
A qualidade dos edifícios escolares tem enorme impacto na saúde, bem estar e desempenho educacional dos alunos. Os governos, em contexto global, mostram esforços consideráveis para que as escolas detenham conforto térmico e alcancem a eficiência energética (MONNA *et al.*, 2019). Como identificam Katafygiotou e Serghides (2014), um dos desafios evidentes nas escolas é garantir ambientes termicamente confortáveis. Isso pode ser viabilizado através da análise de todos os fatores contribuintes e adoção de soluções de caráter passivo.

Quanto ao conforto térmico em espaços escolares, Kamaruzzaman e Tazilan (2013) pontuam os impactos do problema recorrente de excesso de ocupação das salas de aula. Se a região for caracterizada por altas temperaturas, assentos muito próximos farão com que os alunos sintam desconforto por calor. Nesses casos, os sistemas de ventilação deverão ser ainda mais efetivos (KAMARUZZAMAN, TAZILAN, 2013). As soluções de refrigeração passiva e de baixo consumo de energia precisam ser incorporadas nas fases iniciais de projeto, para evitar a necessidade de instalação pós-ocupação de sistemas de resfriamento mecânico, que, inclusive, contam com alto dispêndio energético em regiões onde o desconforto por calor nem mesmo é habitual (TELI; JENTSCH; JAMES, 2014).

No país, não há normas regulatórias que recomendem a zona de conforto admissível para ambientes escolares naturalmente ventilados. Considerando essa inexistência de regulamentação, foi adotado o modelo adaptativo de conforto térmico da ASHRAE (2017b), que relaciona as temperaturas de projeto interno ou faixas de temperatura aceitáveis a parâmetros meteorológicos ou climatológicos externos. Seu

uso é feito em espaços condicionados naturalmente com janelas operáveis para determinar os limites da zona de conforto, conforme a Figura 3 (ASHRAE, 2017b).

Figura 3 - Temperatura operativa aceitável para espaços naturalmente condicionados



Fonte: Traduzido de ASHRAE (2017b).

A Figura 3 inclui dois de limites de temperatura operacional, um para 80% de aceitabilidade e outro para 90% de aceitabilidade. O limite de de 80% é usado para aplicações típicas. O limite de 90% é usado quando busca-se um padrão mais alto de conforto térmico. Essa abordagem deve ser aplicada apenas em espaços onde os ocupantes são livres para adaptar suas roupas às condições térmicas, o que normalmente acontece em salas de aula. A faixa permitida de roupas aceitáveis deve ser de pelo menos 0,5 a 1,0 *clo* (ASHRAE, 2017b). Os aumentos nos limites aceitáveis de temperatura operacional (Δt_0) em espaços naturalmente condicionados, resultantes do aumento da velocidade do ar, podem ser verificados conforme as diretrizes da ASHRAE (2017b) na Tabela 1.

Tabela 1 - Aumentos nos limites aceitáveis de temperatura operacional

Velocidade média do ar de 0,6 m/s (118 fpm)	Velocidade média do ar de 0,9 m/s (177 fpm)	Velocidade média do ar de 1,2 m/s (236 fpm)
1,2°C (2,2°F)	1,8°C (3,2°F)	2,2°C (4,0°F)

Fonte: ASHRAE (2017b)

Quanto à a umidade relativa do ar, seu valor não deve ficar abaixo dos 30%, segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS, 2012). O nível ideal deve estar entre 60% e 80%. Abaixo de 20% a situação passa a ser de estado de alerta (OMS, 2012).

Um exemplo de estudo realizado no Brasil, acerca de salas de aula escolares, que utilizou os limites da zona de conforto do modelo adaptativo de conforto térmico da ASHRAE 55/2013, foi o realizado por Rackes *et al.* (2015). Para a simulação computacional, os autores utilizaram o *software* EnergyPlus (versão 8.3). No estudo foi realizada uma análise do potencial de conforto térmico considerando um protótipo de escola rural naturalmente ventilada, com dois parâmetros construtivos diferentes, inserido em diferentes zonas bioclimáticas (1, 3, 8) segundo o Zoneamento Bioclimático Brasileiro (ABNT, 2005c).

Outra pesquisa que teve como objeto salas de aula, e que adotou o modelo adaptativo de conforto térmico da ASHRAE 55/2013 foi a desenvolvida por Ferreira (2019). Na pesquisa, a simulação computacional foi realizada através do *software* EnergyPlus. Foi considerada a ZB2, conforme ABNT (2005c). O trabalho objetivou verificar o potencial de estratégias de condicionamento natural visando o conforto térmico em salas de aula da Universidade Federal de Santa Maria, no Campus de Cachoeira do Sul. O estudo explorou o uso da ventilação cruzada considerando, ainda, a adoção de brises, estantes de luz, sombreamento com vegetação, parede de trombe, parede de vidro, duto subterrâneo e chaminé solar (FERREIRA, 2019).

2.4. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A eficiência energética tem como objetivo um menor consumo – baixo dispêndio de energia, por consequência, menor impacto ambiental, sem comprometer o conforto dos usuários. Dessa forma, um espaço construído possui maior eficiência energética do que outro quando proporciona as mesmas condições de conforto com menor consumo de energia (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

Para a recomendação de determinado aproveitamento energético e suprimento de demandas existentes, considera-se, principalmente, a disponibilidade local, viabilidade econômica e questões ambientais. Aliado a esses fatores, destaca-se a utilização direta de fontes de energia sem conversão, para a garantia de maior economia e eficiência (FRANCO; ANGELONI, 2012).

O comportamento da ventilação natural, em relação ao ambiente interno, está diretamente associado à eficiência energética das edificações. O consumo de energia, assim como o conforto ambiental, passam a ser condicionados por esses processos de troca, que podem ocorrer em virtude das condições climáticas e do uso da edificação (ASHRAE, 2017c).

Quanto aos dispositivos que viabilizam a ventilação natural no ambiente interno, acerca das janelas, é fundamental considerar a área útil de ventilação, que diz respeito à área efetiva de ventilação quando a janela é totalmente aberta. Essa área irá variar conforme ao tipo de janela inserida no projeto arquitetônico (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). Janelas de abrir (90°) de uma ou duas folhas, por exemplo, viabilizam área útil de ventilação natural de 90%, assim como janelas oscilobatentes, janelas do tipo camarão e as pivotantes. Janelas de correr de duas folhas possuem área útil de ventilação natural de 45%, enquanto que para as janelas de correr de 4 folhas (2 fixas e 2 móveis) essa área é reduzida para 40%. Janelas maxim-ar (abertura 90°), por sua vez, possuem área de ventilação natural de 80%, assim como as janelas basculantes sem esquadria (PBE EDIFICA, 2012).

Os sistemas de proteção solar são mecanismos que visam à eficiência energética, uma vez que possibilitam controle seletivo de ganhos térmicos. Em grande parte do Brasil, o controle da entrada da radiação solar no ambiente é diário.

Na região sul do país, em virtude do clima ser composto por período frio e quente, faz-se necessário o controle seletivo. A tipologia do edifício determina diferentes abordagens de eficiência energética. Em uma escola, é importante que se priorize o conforto visual e que se minimize a radiação solar direta que pode causar ofuscamento (CUNHA, 2011).

2.4.1. Eficiência energética em salas de aula

A eficiência energética, através do consumo responsável de energia para a adaptação humana às condições ambientais, está diretamente relacionada ao conforto ambiental (RUPP; VÁSQUEZ; LAMBERTS, 2015). Dessa forma, é importante que mecanismos artificiais sejam suplementos positivos para um ambiente construído satisfatório.

A qualidade e a quantidade de iluminação artificial, além do aquecimento central com controle termostático e da ventilação mecânica, têm capacidade de oferecer aos professores e aos alunos oportunidades de ajustar o ambiente a um nível mais confortável e, portanto, maximizar a satisfação dos usuários ao mesmo tempo que viabiliza eficiência energética (BARRETT *et al.*, 2015).

O Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C) apresenta procedimentos para que seja possível atingir níveis elevados de eficiência energética nas edificações. Os níveis finais e parciais da eficiência da edificação são apresentados na Etiqueta Nacional de Conservação de Energia - ENCE (PBE EDIFICA, 2017). Em março de 2021, o Inmetro aprovou a INI-C, Instrução Normativa para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas, que especifica os critérios e métodos para a classificação destas edificações.

Nesse âmbito, a estimativa do consumo de energia pode ser realizada pelo método simplificado ou por simulação, ou ambos. (BRASIL, 2021).

O método de simulação pode ser aplicado para qualquer tipo de edificação. Para a realização da simulação, conforme exige INI-C, o programa computacional deve atender às seguintes especificações:

a) Ser um programa para a análise do consumo de energia em edifícios; b) Ser validado pela ASHRAE Standard 140; c) Modelar 8.760 horas por ano; d) Modelar variações horárias de ocupação, potência de iluminação e equipamentos, sistemas de condicionamento de ar e ventilação natural definidos, separadamente, para cada dia da semana e feriados; e) Modelar efeitos de inércia térmica; f) Modelar trocas de calor entre a edificação e o solo; g) Calcular cargas térmicas latente e sensível; h) Ser capaz de simular o sombreamento proveniente de elementos externos às zonas térmicas, como brises, sacadas e o entorno (quando considerado); i) Ser capaz de simular os efeitos da ventilação cruzada em um ambiente, ou entre dois ou mais 4 ambientes. j) Permitir a modelagem de multi-zonas térmicas; k) Ter capacidade de simular os efeitos das estratégias bioclimáticas adotadas no projeto; l) Caso a edificação proposta utilize sistema de condicionamento de ar, o programa deve permitir modelar todos os sistemas de condicionamento de ar presentes na edificação; m) Determinar a capacidade solicitada pelo sistema de condicionamento de ar; n) Calcular as horas não atendidas pelo sistema de condicionamento de ar; o) Calcular as curvas de desempenho de carga parcial para o sistema de condicionamento de ar; p) Calcular as curvas de correção de capacidade e eficiência para o sistema de aquecimento e refrigeração; q) Caso a edificação proposta utilize ventilação natural, o programa deve permitir modelar os dados de entrada referentes ao funcionamento da ventilação natural na edificação; e r) Produzir relatórios horários do uso final de energia (BRASIL, 2021, p. 122).

Em edificações naturalmente ventiladas ou que possuam áreas de longa permanência não condicionadas, as temperaturas devem ficar dentro da zona de conforto para um percentual de horas ocupadas, chamado PHOCT (BRASIL, 2021).

O PHOCT 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).

2.4.2. EnergyPlus e simulação da ventilação natural

O *software* EnergyPlus disponibiliza um método de simulação de ventilação natural validado e amplamente usado no meio científico. Os valores obtidos através de simulações no *software* foram comparados com dados reais obtidos pelo Laboratório Nacional de Oak Ridge (ORNL) e pelo Centro de Energia Solar da Flórida (FSEC) e evidenciaram coerência com medições em ambiente real, comprovando que o método inserido no programa EnergyPlus é confiável. O programa foi criado pelo Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) e outros laboratórios, a partir de dois programas, o DOE2 e o BLAST, (PEREIRA *et al.*, 2013).

O Departamento de Energia norte-americano (US DOE) é responsável pela contínua atualização do programa, aperfeiçoando o código computacional que, além de calcular a carga térmica da edificação, também é capaz de prever o consumo de energia (US DOE, 2014).

Os dados de entrada do EnergyPlus incluem a descrição do ambiente por meio de suageometria, seus materiais, detalhe das fenestraçãoes, sua localização e orientação, além da rotina de ocupação dos usuários, cargas internas (iluminação, taxas metabólicas e outros equipamentos), e a descrição do sistema de condicionamento artificial do ar. A definição desses elementos serve para computar os fluxos de energia, temperatura das zonas, vazão de ar e níveis de conforto em períodos diários e anuais (O'NEILL *et al.*, 2011).

Considerando a simulação de eficiência energética através do *software* EnergyPlus, há modelar a edificação com o funcionamento o mais próximo do real, inserindo dados que incluem a ocupação média, cargas de iluminação e equipamentos, rotinas de funcionamento, bem como as características térmicas dos materiais construtivos, como condutividade térmica (W/Mk) e calor específico (J/KgK). O programa Energyplus, então, pode realizar a simulação do consumo de energia elétrica e demanda de potência ativa da edificação em relação às estações do ano, além das temperaturas internas mediante os diferentes sistemas adotados (VASCONCELLOS *et al.*, 2010).

Para a verificação dos impactos da ventilação natural no edifício, o Energyplus disponibiliza o modelo *AirflowNetwork*. Este permite simular os fluxos de ar devido à ação dos ventos em múltiplas zonas através de um modelo de rede, além de verificar os impactos desses fluxos no consumo energético. O modelo calcula a pressão do ar e o fluxo de ar em cada ponto de referência de acordo com dados de pressão externa do vento por meio de simulações horárias. Através das taxas de ventilação, obtém-se os valores de temperatura do ar e umidade relativa do ar (GU, 2007).

Exemplificando o uso do *AirflowNetwork* para análise da eficiência energética em prédios de salas de aula naturalmente ventilados, cita-se o estudo de Oliveira, Cunha e Leitzke (2020), para o município de Pelotas (RS). Nesse estudo citado, a operação das janelas foi definida pelo controle ASHRAE55 Adaptive, baseado na

temperatura média da faixa de conforto adaptativo da ASHRAE 55/2017. Os coeficientes de pressão utilizados foram calculados automaticamente pelo programa. A simulação realizada pelos autores permitiu determinação do POC através de variáveis de saída que englobaram a temperatura do ar externo e a temperatura operativa em cada zona térmica.

Considerando a modelagem no EnergyPlus com a ferramenta *AirflowNetwork*, as especificações de entrada (*Input objects*) consistem em algumas seções principais: *AirflowNetwork: SimulationControl*, que é usada para estabelecer os parâmetros básicos para a simulação da ventilação; *AirflowNetwork:MultiZone:Zone*, que controla a ventilação natural através das aberturas da zona térmica; *AirflowNetwork:Multizone:Surface*, que diz respeito às propriedades das superfícies para a ventilação natural; *AirflowNetwork:MultiZone:Component:DetailedOpening*, utilizada para definir as características da ventilação natural através das esquadrias e *AirflowNetwork:MultiZone:ExternalNode*, que determina as condições externas da edificação (PEREIRA *et al.* 2013).

Em relação à pressão do vento, existem os objetos de entrada *AirflowNetwork:Multizone:WindPressureCoefficientArray*, usado para definir as características do vento; e *AirflowNetwork:Multizone:WindPressureCoefficientValues*, definido conforme a direção de cada fachada do edifício (PEREIRA *et al.* 2013).

O programa EnergyPlus, em seu modelo de simulação de ventilação natural, viabiliza inúmeras variáveis de saída para a análise de comportamento do edifício e os impactos da ventilação natural. A maioria delas associa o sistema de ventilação a um sistema de condicionamento artificial de ar (*mixed-mode*). Quanto ao uso da ventilação natural, as variáveis de saída mais utilizadas, conforme Pereira *et al.* (2013), são descritas a seguir.

- *Zone Mean Air Temperature*: estabelece a temperatura interna da zona, viabilizando a análise do funcionamento da ventilação natural conforme seu tipo de controle.
- *AFN Node Wind Pressure*: determina a pressão do vento para os nós externos.
- *AFN Surface Venting Window or Door Opening Factor*: determina o fator de abertura relacionado com uma janela/porta inserida.

- *AFN Surface Venting Inside Setpoint Temperature*: estabelece a temperatura de ventilação por *time-step*.
- *AFN Surface Venting Availability Status*: determina os valores agendados de abertura das esquadrias da edificação.
- *AFN Zone Infiltration Air Change Rate*: determina as renovações de ar por hora da ventilação da zona, através das aberturas.
- *AFN Surface Venting Window or Door Opening Modulation Multiplier*: permite a análise do funcionamento das *schedules* inseridas no arquivo.

Dois análises possíveis, a partir dos dados de saída do EnergyPlus, são a comparação da temperatura do ar interno e externo com e sem a utilização da ventilação natural, e a análise das renovações de ar da edificação em relação à velocidade do vento (PEREIRA *et al.*, 2013).

2.4.3. CFD e simulação da ventilação natural

A Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) permite predições quantitativas de fluxos de fluidos, como o ar, através de códigos computacionais. Para isso, 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, pressão e temperatura, para um determinado domínio, para regime estacionário ou variável (KUNDU; COHEN; HU, 2002).

O domínio é o volume do espaço em que o escoamento do fluido será considerado, já que, no mundo real, esse volume tende ao infinito. Como não é possível simular condições de campo aberto total, é necessário definir um volume passível de simulação que represente da melhor forma possível a condição real. A dimensão do domínio tem relação com o tamanho do edifício simulado, por isso ele deve ser tal que não se faça perceber nas fronteiras a presença do modelo (CÓSTOLA, 2006). Diferentes proporções de domínio foram simuladas por Ramponi e Blocken (2012), que concluíram que quando o mesmo é muito pequeno quando comparado com as dimensões do modelo sendo simulado, há o aumento da velocidade local.

Em uma simulação de CFD, o volume de ar ao redor do edifício é dividido em uma malha composta de pequenos volumes, onde são realizados os cálculos de conservação de massa e momento. Quanto mais fina a malha, mais precisos são os resultados e, conseqüentemente, maior o tempo e capacidade de processamento necessário para a simulação. Na simulação, deve-se objetivar a independência do resultado obtido em relação à densidade da malha. Para garantir essa independência, é importante proceder sempre a um teste de refinamento da malha e comparação dos resultados. A malha deve ser gerada de modo que seu refinamento não mude significativamente o resultado encontrado (COST, 2004).

O CFD apresenta vantagens claras se comparado com outras abordagens de simulação computacional, conforme Ramponi e Blocken (2012). O CFD fornece dados de parâmetros relevantes em todos os pontos do domínio computacional, além de evitar incompatibilidades em relação ao uso de modelos reduzidos, pois neles os modelos estão em escala real. Ademais, o CFD viabiliza o controle acerca das condições de contorno (RAMPONI; BLOCKEN, 2012).

O uso de ferramentas CFD, considerando condições coerentes de parametrização da malha, organização de fases anteriores e posteriores à simulação, bem como controle das condições de contorno, torna viável produzir resultados próximos à realidade (CÓSTOLA; ALUCCI, 2011). 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 desenvolvidas por Kouhirostami (2018), Angelopoulos *et al.* (2018) e Maciel (2016).

De acordo com Ferreira, Assis e Ferreira (2009), a definição do modelo computacional está associada ao desempenho dos *softwares* bem como à escala de análise dos estudos. Na escala microclimática (local), verifica-se o amplo uso de programas do tipo CFD. Já quanto à escala mesoclimática (regional), os modelos mais sofisticados em termos dos métodos numéricos estão sendo progressivamente desenvolvidos, para prever com maior precisão o comportamento do ar.

Quanto ao modelo de turbulência, uma abordagem frequente em simulações de CFD é a técnica de *Reynolds-averaged Navier-Stokes* (RANS) baseada em equações de conservação simplificadas. Através do RANS é possível calcular o escoamento médio do fluido sem resolver a turbulência, através da sua abordagem

estatística, porque consideram o aspecto anisotrópico do escoamento.. . Ainda assim, o desempenho desses modelos não é superior a modelos de fechamento de primeira ordem em escoamentos ao redor do edifício (CÓSTOLA; ALUCCI, 2011).

O modelo κ - ϵ padrão (*standard k- ϵ*) é de primeira ordem, realizando a modelagem utilizando as equações da energia cinética turbulenta (k) e de sua taxa de dissipação (ϵ). Por se tratar de um modelo robusto, econômico e relativamente preciso, se tornou uma ferramenta poderosa para problemas práticos de engenharia envolvendo fluxos turbulentos (ANSYS, 2016a). O modelo *standard k- ϵ* , dessa forma, é vantajoso devido à relação entre qualidade dos resultados e pequena capacidade de processamento necessária (NOZU *et al.*, 2008).

O Ansys CFX utiliza equações de conservação de massa, de conservação de energia, para fenômenos térmicos, de dispersão de fumaça e poluentes, de conservação de momento e turbulência. O programa também permite que o usuário insira equações específicas para diversas variáveis, de forma a viabilizar um maior nível de detalhamento (MARCONDES; UMAKOSI, 2007).

A estrutura do Ansys CFX é composta de cinco módulos, onde são realizadas etapas da simulação que vão desde a confecção do modelo até a apresentação e tratamento dos resultados. Eles são: ICEM-CFD, CFX-Pre, CFXSolver, CFXSolver Manager e CFX-Post (SILVA, 2019).

O ICEM-CFD serve para especificar a malha e a geometria dos modelos de CFD. Também viabiliza a importação de geometria de outro *software* tipo CAD. Através do CFX-Pre é realizada a especificação da física do problema, das condições de contorno, dos valores iniciais e parâmetros de solução. Ele disponibiliza uma ampla gama de condições de contorno, incluindo entrada (*inlet*), saída (*outlets*), aberturas (*opening*), paredes sólidas (*wall*) e simetrias (*symetry*). O CFXSolver, por sua vez, resolve todas as variáveis da simulação através da especificação realizada no CFX-Pre. O CFXSolver Manager é um módulo que oferece controle sobre o gerenciamento do processo de solução. Por meio dele é possível: especificar os arquivos de entrada; iniciar e parar o CFXSolver; monitorar a solução; e configurar o CFXSolver tendo em vista o processamento paralelo. O CFX-Post, por fim, fornece ferramentas gráficas de pós-processamento para analisar e

apresentar os resultados das simulações, com variáveis definidas pelo usuário (SILVA, 2019).

2.5. ESTUDOS CORRELATOS

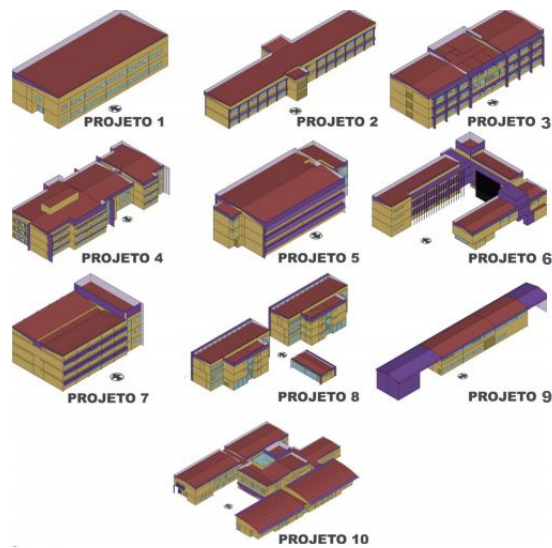
Tendo em vista a análise de estratégias construtivas que viabilizaram eficiência energética, foram reunidas informações de trabalhos que versam, no todo ou em parte, sobre o assunto da dissertação. As conclusões dos autores, com base nos resultados de suas estratégias, identificam que premissas devem ser valorizadas no desenvolvimento e aplicação de estratégias bioclimáticas.

Oliveira, Cunha e Leitzke (2020) investigaram a eficiência energética em salas de aula naturalmente ventiladas, considerando a metodologia adotada pelo RTQ-C para etiquetagem do nível de eficiência energética. No estudo, foi adotada a faixa de conforto adaptativo da ASHRAE 55/2017. Os autores analisaram 10 projetos de edifícios de salas de aula de instituições de ensino superior naturalmente ventiladas (Figura 4), localizados na ZB2, de acordo com o Zoneamento Bioclimático Brasileiro (ABNT, 2005c).

Ao utilizarem a metodologia do RTQ-C para verificar se projetos de edifícios de salas de aula atendem à IN 02/2014, e em caso negativo, intervir para atingirem o nível mais alto, os autores realizaram simulações do conforto térmico e determinaram a eficiência dos sistemas de iluminação. Também efetuaram o cálculo dos pontos de bonificação, que incluem comprovar a economia de água, do consumo de eletricidade, ou da incorporação de sistemas de cogeração e inovações tecnológicas (OLIVEIRA; CUNHA; LEITZKE, 2020).

A simulação para a verificação do POC foi realizada através do *software* OpenStudio e seu *plugin* para SketchUp. Os autores também realizaram simulações para consumo de eletricidade considerando a hipótese de climatização dos ambientes, através do mesmo *software*, objetivando comparar o desempenho dos 10 prédios adotados (OLIVEIRA; CUNHA; LEITZKE, 2020).

Figura 4 - Projetos analisados



Fonte: Oliveira, Cunha e Leitzke (2020)

Através da pesquisa, Oliveira, Cunha e Leitzke (2020) concluíram que o método de determinação de eficiência energética proposto pelo RTQ-C contém dispositivos que, quando explorados, podem elevar a nota de um edifício menos eficiente energeticamente. O fato de as áreas de permanência temporária receber de forma automática o maior equivalente numérico de cálculo tem a capacidade de aumentar a nota de uma edificação com baixos índices de conforto térmico. Dessa forma, os autores verificaram que a remoção das áreas de permanência temporária da avaliação pode ser uma alternativa para que o EqNumV (Equivalente Numérico de ambientes não condicionados e/ou Ventilados naturalmente) reflita o nível de conforto da edificação de uma forma mais precisa (OLIVEIRA; CUNHA; LEITZKE, 2020).

Além disso, Oliveira, Cunha e Leitzke (2020) identificam que a comprovação de economia de água para a obtenção de pontos extras também viabiliza que sejam adquiridos benefícios, por vezes, inadequados. Isso porque o cálculo do percentual de economia é influenciado pelos tipos de aparelhos utilizados, assim, a quantidade ou o tamanho da população do prédio tem pouca relevância.

Rackes *et al.* (2015), por sua vez, avaliaram o conforto térmico de um protótipo de escola rural¹ naturalmente ventilada para diferentes zonas bioclimáticas brasileiras (Figura 5). Para isso, definiram parâmetros construtivos para duas situações limites: o melhor e o pior desempenho esperado. Posteriormente, realizaram a modelagem e simulação do protótipo para a realização de análise com base nos resultados obtidos. Foram estudadas as zonas bioclimáticas 1, 3 e 8, representando dois climas extremos e um clima intermediário. A modelagem do edifício foi feita no programa OpenStudio (versão 1.7) e a simulação no EnergyPlus (versão 8.3). A análise considerou os limites de conforto adaptativo da ASHRAE 55/2013.

Figura 5 - Planta baixa do protótipo de escola rural



Fonte: Projetos Padrão Construção de Escolas FNDE (2011, apud RACKES *et al.*, 2015).

No caso 1 elaborado por Rackes *et al.* (2015), foram escolhidas janelas com 50% do tamanho do vão livre para ventilação e orientação leste-oeste. Foi adotada uma absorvância de 30% para paredes e cobertura. Esta última possuía um ático com revestimento de emissividade 0,2, com o objetivo de reduzir o fluxo de calor por onda longa.. A capacidade térmica das paredes foi de 400 kJ/m²K. No segundo caso, considerou-se janelas com aberturas de até 20% do tamanho do vão para ventilação, orientação norte-sul, e absorvância de 90% para paredes e coberturas. A

¹ No trabalho realizado por Rackes *et al.* (2015) não foi especificado que etapas de educação básica são desenvolvidas na escola, apenas que ela é rural.

emissividade adotada foi 0,9 e capacidade térmica de 150 kJ/m²K (RACKES *et al.*, 2015).

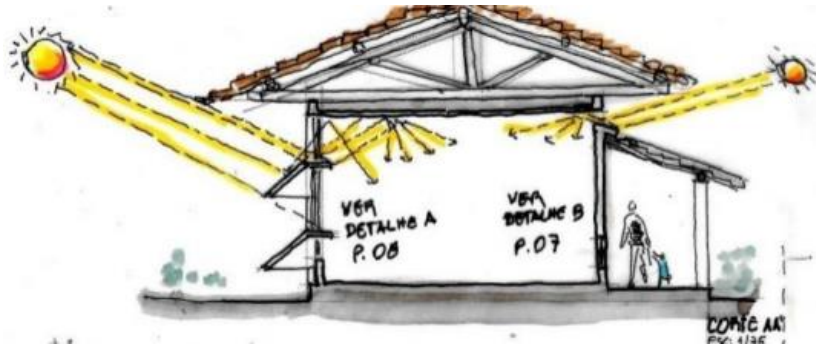
Rackes *et al.* (2015) verificaram que, quanto à temperatura do ar, o caso 1 apresentou a maioria das horas ocupadas dentro da zona de conforto. Já o caso 2, apresentou valores de temperatura radiante média e a operativa fora da zona de conforto na maioria das horas ocupadas. Em relação às renovações de ar, os casos 1 e 2 apresentaram distribuições parecidas tanto para a zona bioclimática 1 como para a 3. No caso 1, as renovações de ar foram inferiores, em função dos ganhos de calor serem menores, reduzindo a necessidade de ventilação natural para resfriamento. Entretanto, na zona bioclimática 8, as renovações foram mais elevadas, pois as esquadrias ficaram abertas por mais tempo, sendo que o caso 1 apresentou maior número de renovações de ar. Os autores, por fim, pontuam que, em projetos padronizados, a escolha adequada dos sistemas construtivos pode minimizar a utilização do condicionamento de ar (RACKES *et al.*, 2015).

Silva, Nascimento e Bittencourt (2015), por exemplo, objetivando a elaboração de espaços escolares com desempenho lumínico e térmico adequado, desenvolveram projetos de aberturas e protetores solares a serem inseridos em um estudo preliminar de uma escola modelo UNICEF localizada em Coribe, no oeste do estado da Bahia (Zona Bioclimática 8). A metodologia do trabalho teve as seguintes etapas: coleta e análise dos dados climáticos da região; identificação das estratégias bioclimáticas recomendadas para a região; avaliação da implantação do edifício de forma a maximizar o aproveitamento das estratégias bioclimáticas recomendadas; e simulação computacional simplificada com o *software* EnergyPlus 8.2, considerando a zona de conforto adaptativo definida pela ASHRAE Standard Model 55/2013. Como observa-se nas Figuras 6 e 7, as janelas do projeto foram divididas em duas partes. Para evitar ganhos de calor oriundos da radiação solar direta e aproveitar a iluminação natural, as partes envidraçadas das esquadrias foram posicionadas nas partes elevadas das folhas, onde os beirais protegem a radiação solar direta (SILVA; NASCIMENTO; BITTENCOURT, 2015).

Nas partes mais baixas da janela da escola modelo, que estão desprotegidas, Silva, Nascimento e Bittencourt (2015) planejaram a inserção de venezianas móveis, que são capazes de evitar a entrada da radiação direta no ambiente, e permitir o

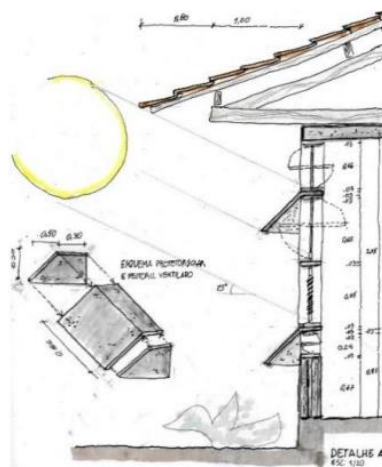
controle de ventos, bem como da circulação do ar no ambiente. Além disso, os elementos que constituem os protetores solares servem de peitoris ventilados na fachada sudeste, para a captação dos ventos dominantes (Figura 7).

Figura 6 - Corte esquemático do estudo preliminar



Fonte: Silva, Nascimento e Bittencourt (2015)

Figura 7 - Detalhe das aberturas na fachada sudeste



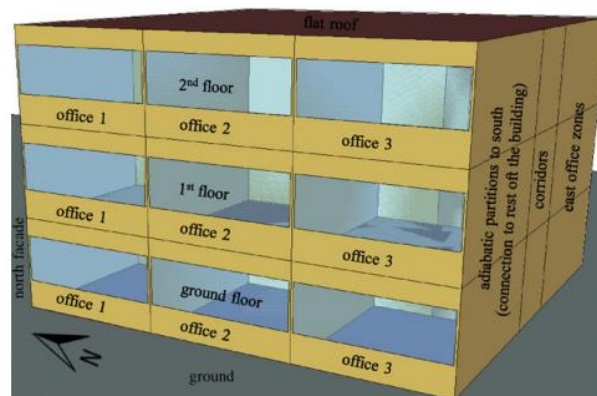
Fonte: Silva, Nascimento e Bittencourt (2015).

No estudo, conforme pontuam Silva, Nascimento e Bittencourt (2015), levando-se em consideração que foram analisadas as situações mais críticas do ano, tanto por calor como por frio, pode-se concluir que os resultados obtidos sugerem que as soluções adotadas evidenciaram razoável desempenho térmico. No período mais quente houve um amortecimento de até 10°C no interior da sala. Apesar disso, principalmente no horário vespertino, as temperaturas internas ficam

2°C acima da zona de conforto. Em relação ao período mais frio do ano, a temperatura ficou fora da zona de conforto entre as 07h e 09h da manhã, com valores entre os 17°C e 22°C. Por se tratar de um curto período de tempo de desconforto por frio, conforme os autores, o mesmo pode ser superado pelos usuários utilizando vestimentas mais pesadas, não sendo necessárias intervenções arquitetônicas.

Tendo em vista saber qual o potencial de conservação de energia, qualidade do ar interno e desempenho de conforto térmico de edifícios situados em climas europeus moderados e que adotam a ventilação natural, Schulze e Eicker (2013) desenvolveram uma pesquisa que busca determinar quais estratégias de ventilação natural são mais eficientes nesses climas. A metodologia adotada baseou-se em uma revisão bibliográfica acerca de estratégias de controle da ventilação natural, consumo de energia e indicadores de desempenho. Também considerou a realização de equações analíticas e simulações computacionais através do EnergyPlus. O objeto analisado foi um edifício de escritórios de três pavimentos a ser inserido em Turim, Stuttgart e Istambul (Figura 8). As variáveis de saída foram taxas de renovações de ar por hora, temperatura externa de bulbo seco (°C) e temperatura interna (°C). Também foi simulado o consumo energético (KWh). Os parâmetros de avaliação para a pesquisa foram a faixa de conforto adaptativo conforme a EN 15251, sendo que para as taxas de troca de ar, foi verificada a EN 13779 (SCHULZE; EICKER, 2013).

Figura 8 - Representação geométrica do modelo de simulação



Fonte: Schulze e Eicker (2013).

Os autores simularam a ventilação unilateral com três configurações de abertura: janela com abertura superior maxim-ar de 40 cm e peitoril de 2,60 m; janela de correr de 1,60 m de altura e peitoril de 1,00 m, e janelas com aberturas superior (peitoril = 2,64 cm) e inferior (peitoril \cong 30 cm), ambas com 9 cm de altura e 0,44 m² de área útil de ventilação (SCHULZE; EICKER, 2013).

Também foi simulada a ventilação cruzada, com janelas dispostas na orientação leste e oeste, considerando 4 casos. Primeiramente, considerou-se dispor duas janelas maxim-ar na mesma altura, estratégia puramente movida pelo vento. Foi adotado 2% de área de abertura efetiva em relação à área útil. No segundo caso, foi modelada uma estratégia puramente impulsionada por fluutuabilidade. Novamente, foram utilizadas duas janelas maxim-ar, mas em alturas diferentes, uma perto do nível do teto e outra perto do nível do chão, sem diferença de pressão do vento. As áreas efetivas de abertura são dimensionadas quanto à ventilação flutuante unilateral (3% da área do piso). O terceiro caso de ventilação cruzada fornece uma visão dos efeitos combinados de fluutuabilidade e pressão do vento. A abertura de entrada, em nível baixo, é principalmente modelada no lado de barlavento, adicionando as forças do vento e as térmicas. Por último, um modelo com ventilação cruzada, considerando uma chaminé externa foi modelado, que novamente é puramente impulsionado por fluutuabilidade, mas com uma diferença de nível mais alta do que no segundo caso (SCHULZE; EICKER, 2013).

Schulze e Eicker (2013) concluíram que a viabilidade de conforto térmico adaptativo através da ventilação natural depende da carga térmica do ambiente, que se dá em função das perdas e ganhos de calor da edificação. Além disso, pontuam que as taxas de ventilação são altamente dependentes do projeto de ventilação natural. No primeiro caso, elas estão em cerca de 3-4 renovações de ar por hora no verão, com resultados de conforto razoáveis. Se a área de abertura for reduzida a 50%, isso reduzirá as renovações de ar por hora para cerca de 2-1, que é um valor insuficiente para resfriamento em climas quentes de verão (Turim e Istambul). Além disso, pontuam que a janela maxim-ar com pequena altura de abertura efetiva não é uma boa solução de ventilação unilateral para resfriamento. Se os potenciais forem

aumentados, através de duas aberturas em alturas diferentes para fluxo flutuante, o risco de superaquecimento pode ser reduzido (SCHULZE; EICKER, 2013).

Os resultados também mostram que sistemas de ventilação natural bem projetados economizam entre 13 e 44 kWh/m² de energia de resfriamento por ano para os três locais. Ademais, os resultados mostram que a ventilação unilateral funciona melhor se as aberturas forem altas ou divididas em diferentes níveis, e que se deve ter cuidado para garantir taxas de ventilação adequadas. Essas são determinadas, por exemplo, pela área de abertura das esquadrias (SCHULZE; EICKER, 2013).

Outro estudo correlato à pesquisa é o desenvolvido por Maciel (2016), onde foi investigado o potencial de utilização de proteções solares em forma de chaminés-solares, de modo a viabilizar ventilação natural nos espaços internos. A metodologia do trabalho, realizada com auxílio de simulações computacionais e medições, compreende três etapas distintas, cujos critérios avaliados são o desempenho térmico de ambientes educacionais com ventilação natural bem como o desempenho luminoso.

Primeiramente, a chaminé solar foi introduzida na orientação oeste de dois laboratórios com mesmas dimensões aberturas e orientação solar, localizados na Universidade Federal de Viçosa, em Minas Gerais (ZB3). Os resultados, através das simulações no EnergyPlus, com a chaminé térmica (*Thermal Chimney*), e das simulações no Ansys CFX, basearam-se nas seguintes variáveis de saída: volume do ar movimentado pela chaminé (m³/dia); radiação solar direta incidida no vidro (W/m²); fluxo de ar (m³/s); temperatura da placa absorvedora (°C); velocidade do ar (m/s); e temperaturas superficiais do dispositivo (°C).

A autora constatou que o Ansys CFX (versão 15.0) é mais sensível às variações de temperatura das superfícies internas do que o EnergyPlus (versão 8.0). Os resultados obtidos através do EnergyPlus levariam à inserção de uma maior quantidade de brises-chaminé-solar tendo em vista o melhor desempenho térmico. Entretanto, menos dispositivos atenderiam à demanda de renovação de ar tendo em vista os dados obtidos no Ansys CFX (MACIEL, 2016).

Em uma segunda etapa, foram encaminhadas medições em uma chaminé solar construída (Figura 9), com o objetivo de verificar as diferenças entre os dados

experimentais e os dados obtidos através da simulação CFD, por meio do Ansys CFX. Foram feitas medições de temperatura, velocidade do ar, radiação solar e temperatura superficial. Os dados reais evidenciaram a validação dos resultados obtidos no Ansys CFX. Além disso, a chaminé solar mostrou ser favorável para renovação de ar de ambientes internos, principalmente quando há altas taxas de radiação solar no local (MACIEL, 2016).

Figura 9 - Vista geral da chaminé solar e do sombreamento gerado



Fonte: Maciel (2016)

Posteriormente, foi avaliado o desempenho térmico e lumínico de uma sala de aula com brise-chaminé-solar também localizada em Viçosa. O ambiente, conforme Maciel (2016), possui área útil de 89,25 m² e capacidade para 54 alunos.

Assim, a metodologia compreendeu avaliação comparativa entre duas configurações de sala de aula, com auxílio de simulação computacional. Uma possui uma série de chaminés solares, enquanto a outra não apresenta mecanismo para sombreamento, sendo inseridas apenas aberturas tradicionais para a ventilação natural. O programa utilizado para simulação do desempenho luminoso foi o TropLux (versão 7.2), enquanto que para o desempenho térmico foi utilizado o EnergyPlus (versão 8.0). Foram utilizados os resultados de vazão volumétrica obtidos na simulação CFD como estimativa da vazão nas simulações. Os brises verticais foram modelados como um plano vertical com profundidade de 0,90 m, sendo a altura do brise de 3,00 m. As simulações no TropLux consideraram três tipos de céu: CIE 1

(encoberto), CIE 10 (parcialmente encoberto) e CIE 14 (claro). As variáveis de saída foram obtidas para 12 dias anuais (dia 22 de cada mês), considerando o intervalo de 8h às 18h (MACIEL, 2016).

Quanto às métricas e critérios de avaliação utilizados, para a avaliação do conforto térmico, Maciel (2016) utilizou a norma europeia EN 15251. Com relação à qualidade do ar, a taxa de renovação de ar do ambiente foi avaliada tendo em vista a recomendação da Anvisa de 27m³/pessoa/hora. Para a análise da iluminação natural, por sua vez, foi utilizada a métrica UDI (*Useful Daylight Illuminance*, ou Iluminância Natural Útil).

Maciel (2016) concluiu que o brise-chaminé-solar desenvolvido e avaliado possui potencial de redução da temperatura operativa. Além disso, observou-se que o uso de quantidades e alturas diferentes de brise-chaminé-solar não influenciou as horas de conforto, sendo os resultados muito próximos nas distintas situações. Acerca do conforto luminoso na sala de aula, o brise-chaminé-solar foi capaz de reduzir o desconforto por excesso de iluminação. Entretanto, nos casos de céu claro e parcialmente encoberto, o percentual de UDI na faixa de conforto foi reduzido, tornando necessária a iluminação complementar (MACIEL, 2016).

2.6. A ZONA BIOCLIMÁTICA 2 E SUAS DIRETRIZES

A arquitetura, para ser eficiente, deve ser concebida de forma a utilizar, com auxílio de seus elementos, as condições favoráveis do clima em que se situa, para satisfazer as necessidades de conforto térmico do ser humano (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). Nesse âmbito, a ABNT (2005c), através da NBR 15220-3, divide o território brasileiro em oito zonas bioclimáticas homogêneas em seu clima, para as quais foram atribuídas recomendações que otimizam o desempenho térmico das edificações. A Norma dispõe que os municípios de Santa Maria (RS), Caparaó (MG), Ibitaré (MG), Itajubá (MG), Machado (MG), Passa Quatro (MG), São João Del Rei (MG), São Lourenço (MG), Três Corações (MG), Ivaí (PR), Jaguariaiva (PR), Ponta Grossa (PR), Rio Negro (PR), Nova Friburgo (RJ), Teresópolis (RJ), Alegrete (RS), Bagé (RS), Cruz Alta (RS), Encruzilhada do Sul (RS), Passo Fundo

(RS), Pelotas (RS), Santa Vitória do Palmar (RS), São Luiz Gonzaga (RS), Uruguaiana (RS), Araranguá (SC), Laguna (SC), Porto União (SC), Urussanga (SC), Valões (SC), Xanxerê (SC), Casa Grande (SP), Itapeva (SP) e Piracicaba (SP), são integrantes da ZB2 (ABNT, 2005c), visível na Figura 10. A ZB2 corresponde a aproximadamente 7% do território nacional e 11% da população total do Brasil (IBGE, 2020).

Figura 10 - Zona Bioclimática 2 (ZB2)



Fonte: ABNT (2005c).

A bioclimatologia propõe usar os conhecimentos a respeito do clima de uma determinada região como recurso para definir estratégias passivas de projeto. O objetivo é viabilizar um ambiente interior que atenda às necessidades térmicas dos usuários (OLGYAY, 1968).

Para classificação do nível de eficiência da envoltória, devem ser verificados requisitos de acordo com o nível pretendido. Os valores variam em conformidade com a zona bioclimática. Segundo INMETRO (2010), para a obtenção do nível A da ENCE, considerando a ZB2 (determinada pela NBR 15220-3), a transmitância térmica da cobertura (U_{cob}) de ambientes não condicionados não deve ultrapassar $1,00 \text{ W/m}^2\text{K}$ bem como a transmitância das paredes (U_{par}). Para esta zona é obrigatória a utilização de materiais de revestimento de paredes com absorvância solar baixa, ($\alpha < 0,50$ do espectro solar). Em coberturas, também deve haver a

utilização de cores com absorvância menor do que 0,50, telhas cerâmicas não esmaltadas, teto jardim ou reservatórios de água (INMETRO, 2010).

Quando a edificação possuir aberturas zenitais, o PAZ (Percentual de Abertura Zenital) deve atender aos critérios apresentados na Tabela 2. Além desses critérios, quando PAZ for superior à 5%, deve ser realizada a simulação computacional (INMETRO, 2010).

Tabela 2 - Limites de fator solar de vidro e de percentual de abertura zenital

Iluminação Zenital	PAZ	0 a 2%	2,1 a 3%	3,1 a 4%	4,1 a 5%
(PAZ < 5%)	FS	0,87	0,67	0,52	0,3

Fonte: PBE Edifica (2014).

Para a obtenção do nível B, para a ZB2, é determinado que a transmitância térmica da cobertura deve ser no máximo 1,50 W/m²K, para ambientes não condicionados. A transmitância térmica das paredes externas, por sua vez, não deve ultrapassar 2,00 W/m²K. Acerca das cores e absorvância de superfícies, em coberturas é obrigatório utilizar cor de absorvância solar baixa ($\alpha < 0,50$ do espectro solar), telhas cerâmicas não esmaltadas, teto jardim ou reservatórios de água (INMETRO, 2010). Quando houver aberturas zenitais, os valores do fator solar devem ser atendidos em relação ao PAZ, conforme a Tabela 2.

Considerando a obtenção dos níveis C e D, para qualquer zona bioclimática, a transmitância térmica da cobertura não deve ultrapassar 2,00 W/m²K. Quanto à transmitância térmica das paredes, para a ZB2, o valor máximo deve ser 3,70 W/m²K (INMETRO, 2010).

2.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Quanto às contribuições da revisão da literatura do presente trabalho, destaca-se a relevância inerente à conceituação de fundamentos físicos associados ao desempenho térmico e aos aspectos da ventilação. Os mesmos foram

necessários à compreensão de procedimentos metodológicos que envolvem simulações de comportamento de uso do ambiente construído, assim como melhor entendimento de pesquisas correlatas.

O conhecimento e aprofundamento de estratégias arquitetônicas associadas à bioclimatologia formaram embasamentos fundamentais à pesquisa, bem como a identificação de características do programa computacional EnergyPlus e ANSYS CFX e como se dá a utilização dos mesmos na simulação da ventilação natural. A assimilação de estratégias e metodologias já realizadas por outros pesquisadores permitiu verificar o grau de eficiência de tais técnicas em relação às características ambientais e climáticas, ao conforto usuários do espaço, assim como às propriedades construtivas dos variados sistemas.

Também foram verificadas as características da ZB2, definida pela NBR 15220-3 (ABNT, 2005c), onde se situa o município de Santa Maria (RS). Foram identificados os pré-requisitos que garantem um maior nível de eficiência energética para a envoltória de um prédio situado nessa zona, conforme a metodologia do RTQ-C. Quanto à eficiência energética, também foi abordada à INI-C, pois corresponde à nova Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas, que aperfeiçoa o RTQ-C e especifica os critérios e métodos para a classificação (BRASIL, 2021).

Em suma, como identificaram Marconi e Lakatos (2003), a revisão da literatura é imprescindível para que não haja duplicação de esforços já expressos em um trabalho, mesmo quando for exploratória. Outrossim, a citação de outros autores salientou a contribuição da pesquisa a ser realizada, reafirmando comportamentos e atitudes. Tanto a confirmação dos resultados obtidos quanto a enumeração de discrepâncias são importantes para a pesquisa.

3 MÉTODO DE PESQUISA

O Capítulo 3 da pesquisa refere-se às definições dos métodos utilizados no trabalho, assim como das ferramentas de simulação computacional necessárias para o desenvolvimento da pesquisa. Nesse capítulo são apresentadas as estratégias e soluções de ventilação natural que são avaliadas no modelo de estudo, bem como os critérios de avaliação, parâmetros de simulação e medidas de análise e tratamento de dados.

3.1. ETAPAS E PROCEDIMENTOS DA PESQUISA

A pesquisa estrutura-se em seis etapas, conforme indicado na Figura 11. Na primeira etapa, foi realizada a revisão da literatura apresentada no Capítulo 2 da dissertação. Na mesma, foram definidas as fundamentações do tema, estruturadas em 4 tópicos principais: desempenho térmico, ventilação natural, conforto térmico e eficiência energética. Através da primeira etapa, também foram apresentadas publicações similares ao tema da pesquisa, bem como a fundamentação do método, tendo em vista a metodologia do RTQ-C, da INI-C e a simulação da ventilação natural através do *software* EnergyPlus e do Ansys CFX. A etapa 1 também foi importante no levantamento de estratégias de ventilação natural aplicáveis a salas de aula do ensino fundamental, que é um dos objetivos específicos do trabalho.

Figura 11 - Infográfico dos procedimentos metodológicos



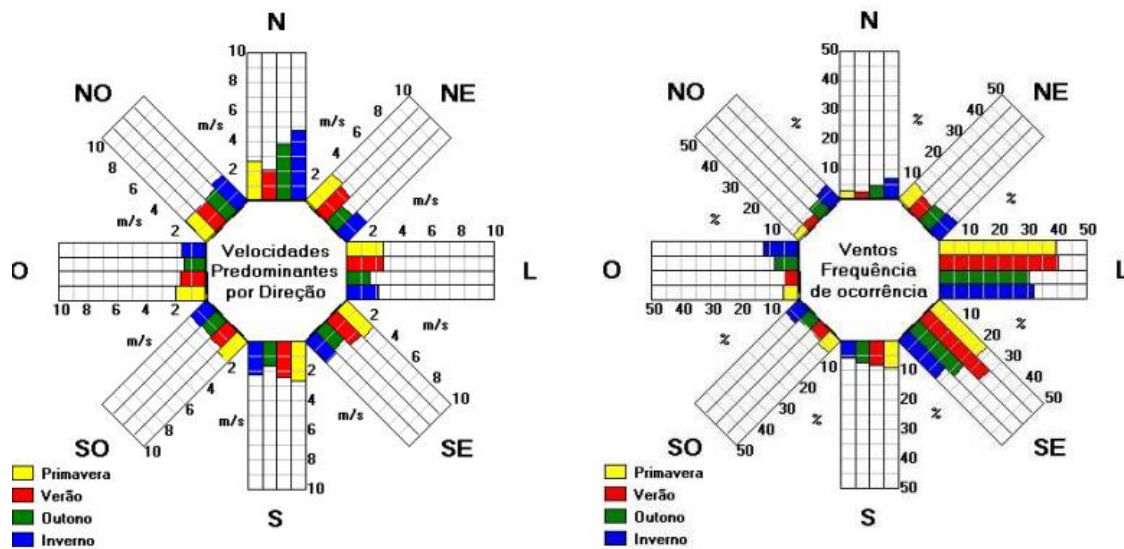
Fonte: Autora (2022).

Tendo em vista as 5 etapas posteriores, nos tópicos a seguir são apresentados seus procedimentos, ferramentas necessárias, além da vinculação aos objetivos e à questão da pesquisa.

O arquivo climático utilizado nas simulações com o *software* EnergyPlus é TMY2, de formato .epw com dados registrados pelo INMET para Santa Maria – RS (BULIGON, 2021). Conforme o arquivo climático, Santa Maria caracteriza-se por possuir uma média máxima anual de temperatura de bulbo seco correspondente a 32°C e uma média mínima anual de 14,70°C. A média máxima anual de umidade relativa do ar, por sua vez, é de 99%, enquanto que a média mínima equivale a 31,6%. Ainda de acordo com o arquivo climático, em relação à velocidade do ar, a média máxima é de 7,33 m/s e a mínima 0,05 m/s (BULIGON, 2021).

O município de Santa Maria é situado na Zona Bioclimática 2, conforme a ABNT (2005c). O clima do município de Santa Maria (RS) é subtropical úmido, sendo a umidade relativa do ar alta na maior parte do ano. Isso se dá em função do regime pluviométrico isoigro (com boa distribuição das chuvas ao longo do ano) e das variações de temperatura. A umidade relativa do ar no município é mais alta nos meses de outono e inverno. Santa Maria caracteriza-se como uma das cidades de clima mais quente do estado em virtude, por exemplo, da baixa altitude e da continentalidade (HELDWEIN; BURIOL; STRECK, 2009). O vento predominante é o sudestado, sendo frio e úmido, com direção média do quadrante leste, havendo variações de direção sul a nordeste (HELDWEIN; BURIOL; STRECK, 2009; SARTORI, 1979). As rosas dos ventos, apresentadas na Figura 12, são baseadas nos resultados do ano metodológico típico (TMY) de Santa Maria (RS). Verifica-se que a maior velocidade atinge 5 m/s e ocorre no inverno, na direção norte. Já a maior frequência de velocidade, com 42%, ocorre na orientação leste, na estação do verão. Leste e sudeste são as orientações com mais ventos (FLORES, 2014).

Figura 12 - Rosa dos ventos para velocidades predominantes e frequência de ocorrência, do TMY2 para Santa Maria



Fonte: Flores (2014)

Quanto à disponibilidade de radiação solar, Santa Maria (RS) apresenta um dos menores valores do estado. Isso se deve, dentre outros fatores, à nebulosidade e à alta frequência de nevoeiros. A amplitude térmica anual, por sua vez, é de aproximadamente 10,7 °C. O mês de janeiro é o mais quente e os meses mais frios são junho e julho (MACHADO, 1950, apud LAZAROTTO, 2015). A amplitude térmica diária de Santa Maria possui menor valor médio no mês de junho, com 9,5 °C, e maior valor no mês de dezembro, com média de 11,5 °C (HELDWEIN; BURIOL; STRECK, 2009; SARTORI, 1979).

3.1.1. Etapa 2: Critérios de avaliação

Nesta etapa, foram estabelecidas as referências para a avaliação dos sistemas e estratégias de ventilação natural que foram simulados. Nesse âmbito, foi adotado o PHOCT (Percentual de Horas Ocupadas em Conforto Térmico). O mesmo foi definido conforme a metodologia da INI-C. Segundo BRASIL (2021), considerando a obtenção da ENCE em edificações naturalmente ventiladas, ou que

possuam áreas de longa permanência não condicionadas, deve haver a comprovação da viabilização de temperaturas dentro da zona de conforto durante um percentual das horas ocupadas nesses locais. O PHOCT, dessa forma, corresponde à razão entre as horas ocupadas que atendem aos requisitos de conforto térmico e o total de horas ocupadas da edificação (BRASIL, 2021).

Para a definição do PHOCT, foi utilizado o Modelo Adaptativo de Conforto Térmico da ASHRAE 77 (ASHRAE, 2017b). Conforme explicado anteriormente, o modelo relaciona as temperaturas de projeto ou faixas de temperatura aceitáveis a parâmetros meteorológicos ou climatológicos externos. Seu uso é feito em espaços condicionados naturalmente com janelas operáveis, para determinar os limites da zona de conforto (ASHRAE, 2017b). Quanto a este modelo, foram adotados limites de aceitabilidade de 80%, que se destinam a aplicações típicas segundo ASHRAE (2017b). Tal limite de aceitabilidade foi utilizado, por exemplo, nas pesquisas de Oliveira, Cunha e Leitzke (2020) e Rackes *et al.* (2015), que também se aplicam a salas de aula brasileiras.

Quanto à velocidade do ar, a referência utilizada como critério de avaliação é a velocidade máxima admitida em salas de aula de acordo com Bayoumi (2021). Conforme o autor, a partir de 1,20 m/s, observa-se insatisfação dos ocupantes em virtude das correntes de ar incômodas, além do vôo indesejado de papéis. Esse limite também é apontado na obra de Daniels (2003).

Para a avaliação da umidade relativa do ar no ambiente, foi utilizado como critério os limites ideais conforme a OMS (2012). Segundo a Organização, a umidade relativa do ar recomendada para a saúde dos usuários deve ficar entre 60% a 80%. Quando é inferior a 20%, a situação é de alerta, e menor do que 12%, entende-se como um caso de emergência sanitária. Entretanto, a alta umidade relativa do ar também pode ocasionar problemas à saúde. Conforme as pesquisas de McNeel e Kreutzer (1996) e Ren *et al.* (2001) fungos e ácaros preferem ambientes com umidade relativa do ar superior a 70%. Arundel *et al.* (1986) destacam que, quando a umidade relativa do ar é alta, há maior chance de ocorrência de doenças alérgicas e infecções respiratórias. Esse cenário é acentuado quando a umidade fica em torno de 80%.

Quanto à taxa de ventilação na sala de aula analisada, foi adotada a recomendação da OPAS (2021) para ambientes fechados não residenciais no contexto da doença causada pelo novo coronavírus, COVID-19. Considerando o uso de ventilação natural, a taxa mínima recomendada é de 10 l/s/p, tendo em vista a EN 16798-1 (CEN, 2019).

Como critérios de avaliação também foram selecionados estudos similares, para que seja possível a comparação dos resultados obtidos. Dentre esses estudos, está o realizado por Oliveira, Cunha e Leitzke (2020), onde foi investigada a eficiência energética em edificações escolares da ZB2, com salas de aula naturalmente ventiladas, considerando a metodologia adotada pelo RTQ-C para etiquetagem do nível de eficiência energética. No estudo, foi adotada a faixa de conforto adaptativo da ASHRAE 55/2017 para a definição do POC. Também foi selecionada a publicação de Rackes *et al.* (2015), onde é avaliado o potencial de conforto térmico de um protótipo de escola rural naturalmente ventilada, nas zonas bioclimáticas brasileiras 1, 3 e 8. Tal pesquisa considerou os limites de conforto adaptativo da ASHRAE 55 (ASHRAE, 2013).

A publicação de Oliveira e Carlo (2021), acerca do conforto térmico e renovação de ar a partir da utilização de chaminés solares, foi utilizada como critério de avaliação e discussão de resultados para as estratégias que adotaram chaminé solar. Esse estudo considerou a simulação de dois ambientes naturalmente ventilados de mesma geometria: uma sala de aula (altas cargas térmicas: 103,0 w/m²) e um escritório (baixas cargas térmicas: 59,6 w/m²). Os autores aplicaram o estudo nas oito zonas bioclimáticas brasileiras, sendo avaliado o POC, a percentagem de horas anuais em desconforto por frio e calor e a renovação de ar por hora. A avaliação da influência do uso de chaminés foi feita tendo em vista o modelo de conforto adaptativo da norma ASHRAE 55/2017.

A pesquisa de Maciel (2016), assim como o estudo anterior, foi adotada para avaliação dos casos em que houve utilização de chaminés solares. Nessa pesquisa, aplicada em Viçosa (MG), objetivou-se: analisar o potencial desempenho de chaminés solares e suas variações geométricas e avaliar as potencialidades e limitações dos programas de computador utilizados; investigar o potencial de ventilação num protótipo em escala real e verificar as diferenças com relação à

modelagem em CFD (*Computational Fluid Dynamics*); e investigar o desempenho térmico e luminoso de ambientes com brise-chaminé-solar, com auxílio de programas de simulação térmica e luminosa. A metodologia do trabalho foi realizada com auxílio de simulações computacionais, através do EnergyPlus e do ANSYS CFX, bem como medições. Para a avaliação do conforto térmico, foi utilizada a EN 15251. A taxa de renovação de ar do ambiente foi avaliada tendo em vista a recomendação da Anvisa (2000). Para a análise da iluminação natural, por sua vez, foi utilizada a métrica UDI (*Useful Daylight Illuminance*, ou Iluminância Natural Útil).

3.1.2. Etapa 3: Definição do modelo de simulação

O modelo de simulação é uma sala de aula do ensino fundamental na Zona Bioclimática 2, representada pelo município de Santa Maria (RS), conforme a NBR 15220-3 (ABNT, 2005c). O município foi escolhido em virtude da disponibilidade de arquivo climático atualizado para a realização das simulações (BULIGON, 2021). Além disso, Santa Maria possui população estimada de 285.159 habitantes, sendo o terceiro município mais populoso da Zona Bioclimática 2, estando atrás de Ponta Grossa (PR), com 358.838 habitantes (1º mais populoso) e Pelotas (RS), com 343.826 habitantes (2º mais populoso), conforme os dados disponibilizados pelo IBGE (2021). A sala de aula foi configurada segundo as diretrizes do Manual de Orientações Técnicas do FNDE (2017). As recomendações que nortearam o leiaute do espaço, conforme a referência, estão representadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Recomendações para salas de aula

(Continua)

Requisito	Recomendação
Ocupação	Máxima de 36 alunos.
Área mínima	1,30 m ² a 1,50 m ² por aluno.
Pé-direito	2,70 m a 3,00 m.
Iluminação natural mínima	1/5 da área do piso.

Quadro 1 - Recomendações para salas de aula

(Conclusão)

Requisito	Recomendação
Ventilação natural mínima	1/10 da área do piso.
Esquadrias	Material de fácil manutenibilidade, resistente e estanque. Portas de entrada com visores de vidro e com abertura no sentido de saída. O peitoril das janelas deve ser médio ou alto.
Superfície do Piso	Material de cor clara, liso, mas não escorregadio (porcelanato, cerâmica de PEI ≥ 4 , piso vinílico, piso monolítico polido do tipo granitina, cimento queimado ou semelhante).
Superfície do teto	Material com cor clara e de superfície lisa.
Superfície da parede	Material de cor clara, liso, lavável e impermeável, considerando a altura mínima de 0,90m.

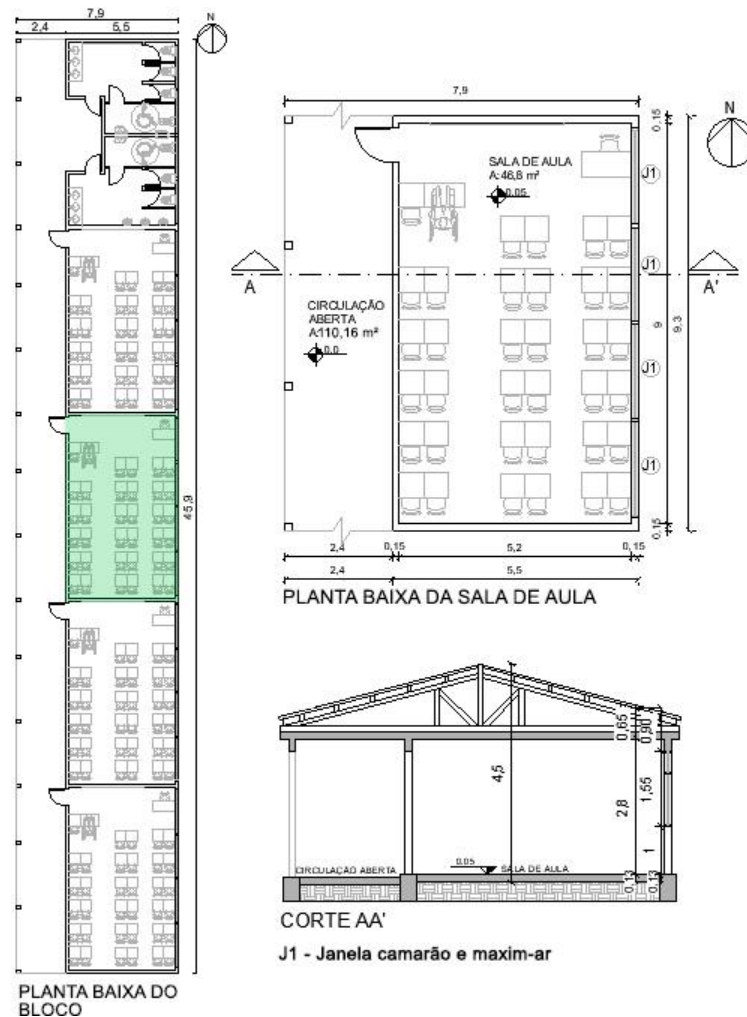
Fonte: Autora (2022).

O manual ainda determina o atendimento às diretrizes da NBR 15575, que é a Norma de Desempenho (FNDE, 2017), e que passou por uma revisão, sendo que a emenda da norma entrou em consulta nacional entre novembro e dezembro de 2020. A principal inovação no procedimento simplificado de avaliação foi a implementação do critério Elementos Transparentes, que objetiva limitar a área de superfície de elementos transparentes nos ambientes de permanência prolongada. Outras alterações foram estabelecidas para métodos de simulação computacional, como estabelecimento de simulações anuais e modelagem de janelas operáveis, sendo as renovações de ar obtidas pela velocidade e também direção do vento fornecidas pelo arquivo climático (LABEEE, 2020).

Nas recomendações, o FNDE (2017) também estabelece que deve ser considerado o atendimento às normas prescritivas que regem cada tipo de sistema estrutural: para estruturas em concreto (NBR 6118), em madeira (NBR 7190), mistas e em aço (NBR 8800), pré-moldadas de concreto (NBR 9062), de alvenaria estrutural em blocos vazados de concreto (NBR 10837), de alvenaria estrutural em blocos cerâmicos (NBR 15812), para estruturas de aço de perfis formados a frio (NBR 14762) e para parede de concreto moldada no local (NBR 16055).

A partir das orientações contidas no FNDE, foi desenvolvido um bloco linear com 2 sanitários e 4 salas de aula como sendo o caso base. O edifício é observado na Figura 13. No mesmo, foi destacada uma sala de aula intermediária, que é o ambiente analisado nos resultados, sendo apresentada em planta baixa e corte.

Figura 13 - Edifício escolar com ventilação unilateral junto da sala de aula analisada (orientação leste)

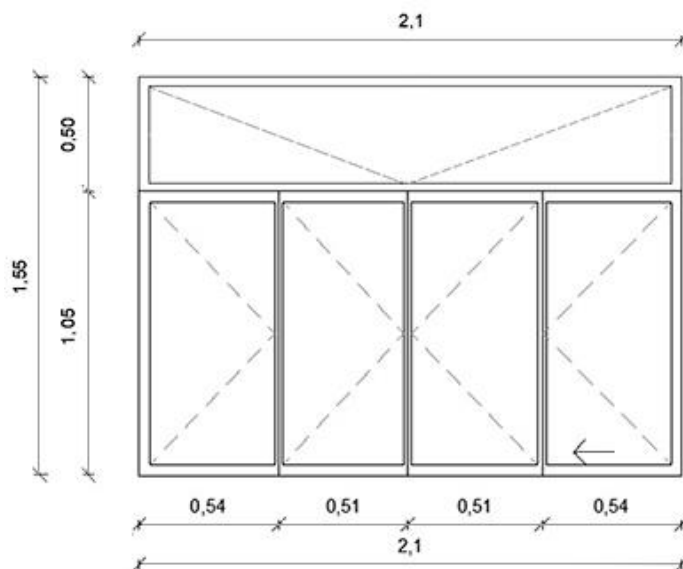


Fonte: Autora (2021).

Na sala de aula analisada, bem como nas demais salas do bloco, foi estabelecida ocupação máxima de 36 alunos, disponibilidade de ventilação natural unilateral térmica, com área de abertura de 10,96 m² para ventilação natural, e a área da sala admitiu o critério de 1,30 m² por aluno, sendo o pé-direito de 2,80 m. As esquadrias são do tipo camarão na parte inferior e maxim-ar (abertura de 90°) na

parte superior, conforme a Figura 14, possuindo peitoril de 1,0 m e estando orientadas para leste, considerando os ventos predominantes. Também foram testadas janelas para as orientações norte e sul, por serem as orientações mais favoráveis do ponto de vista de ganhos de radiação solar (orientação norte, no inverno) e iluminação natural (na orientação sul há melhor distribuição de luz natural da abóbada celeste, sem radiação solar direta). Para o sistema superior das janelas, que é maxim-ar, as porcentagens de abertura para ventilação e iluminação naturais são de 80% cada, enquanto que para o sistema inferior, que é do tipo camarão, são de 90%, conforme dispõe PBE Edifica (2017). Salienta-se que o Manual de Orientações Técnicas para Projetos de Edificações Escolares de Ensino Fundamental, do FNDE (2017) não estabelece modelos ou tipos de janelas para as salas de aula, apenas que devem ser utilizados materiais resistentes, estanques e de fácil manutenibilidade, sendo o peitoril médio ou alto, e que viabilizem, pelo menos, a ventilação e a iluminação mínima, conforme o Quadro 1 apresentado anteriormente.

Figura 14 - Janela adotada no caso base



Fonte: Autora (2021).

Segundo os dados disponibilizados por Grigoletti, Flores e Santos (2016) e INMET (2018, 2021), no município de Santa Maria (RS), por exemplo, a maior frequência de ocorrência dos ventos tem origem nas orientações leste e sudeste, sendo a maior frequência com velocidade de 0 a 2 m/s. Tendo em vista o aproveitamento dos ventos predominantes, foi admitida a orientação leste para as esquadrias do caso base.

Os materiais que constituem os sistemas construtivos do modelo foram especificados no Quadro 2 e nas Tabelas 3 e 4 a seguir, segundo a biblioteca de componentes construtivos brasileiros para o EnergyPlus, disponibilizada por Weber (*et al.*, 2017), conforme a ABNT (2005a, 2005b) e Rivero (1986), sendo atendidas as orientações do FNDE (2017). Nas Tabelas 3 e 4 foram descritas as características: espessura (e), condutividade térmica (λ), peso específico aparente (ρ), calor específico (c), emitância térmica (ϵ), absorvância solar (α), transmissividade (σ) e refletividade (ρ). Para a pesquisa, foram adotados padrões construtivos adequados à realidade do país, conforme Weber *et al.* (2017). A parede do modelo possui transmitância térmica calculada equivalente a 1,27 W/m².°C e capacidade térmica de 195 kJ/m².°C. A cobertura do modelo possui transmitância térmica de 1,26 W/m².°C e capacidade térmica com 150 kJ/m².°C (WEBER *et al.*, 2017; ABNT, 2005a, 2005c).

Quadro 2 - Sistemas construtivos do modelo adotado

Sistema construtivo	Constituição
Laje de concreto e piso cerâmico	Piso cerâmico + Argamassa de assentamento + Laje de concreto
Parede de bloco cerâmico de 6 furos (bloco 9 x 14 x 24 cm)	Argamassa interna + Cerâmica + Câmara de ar + Cerâmica + Argamassa
Cobertura com telha cerâmica e laje pré-moldada de concreto	Telha cerâmica + Câmara de ar + Concreto + EPS + Concreto + Argamassa
Janela	Vidro claro comum
Porta	Compensado

Fonte: Adaptado de Weber *et al.* (2017).

Tabela 3 - 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), ABNT (2005b, 2005c).

Tabela 4 - Propriedades do material translúcido

Nome	e cm	σ	ρ	α
Vidro comum	0,60	0,85	0,08	0,07

Fonte: Rivero (1986).

Além da ventilação unilateral térmica do caso base (conforme recomendações do FNDE), a sala de aula foi simulada com ventilação unilateral térmica e higiênica; com ventilação cruzada em paredes opostas, havendo janelas de peitoril elevado, com e sem ventilação higiênica; com a parede voltada para uma circulação fechada, com e sem o uso da ventilação higiênica; e também com inserção de chaminé solar. As orientações adotadas no modelo foram leste-oeste e norte-sul perfazendo um total de 16 configurações distintas no ambiente.

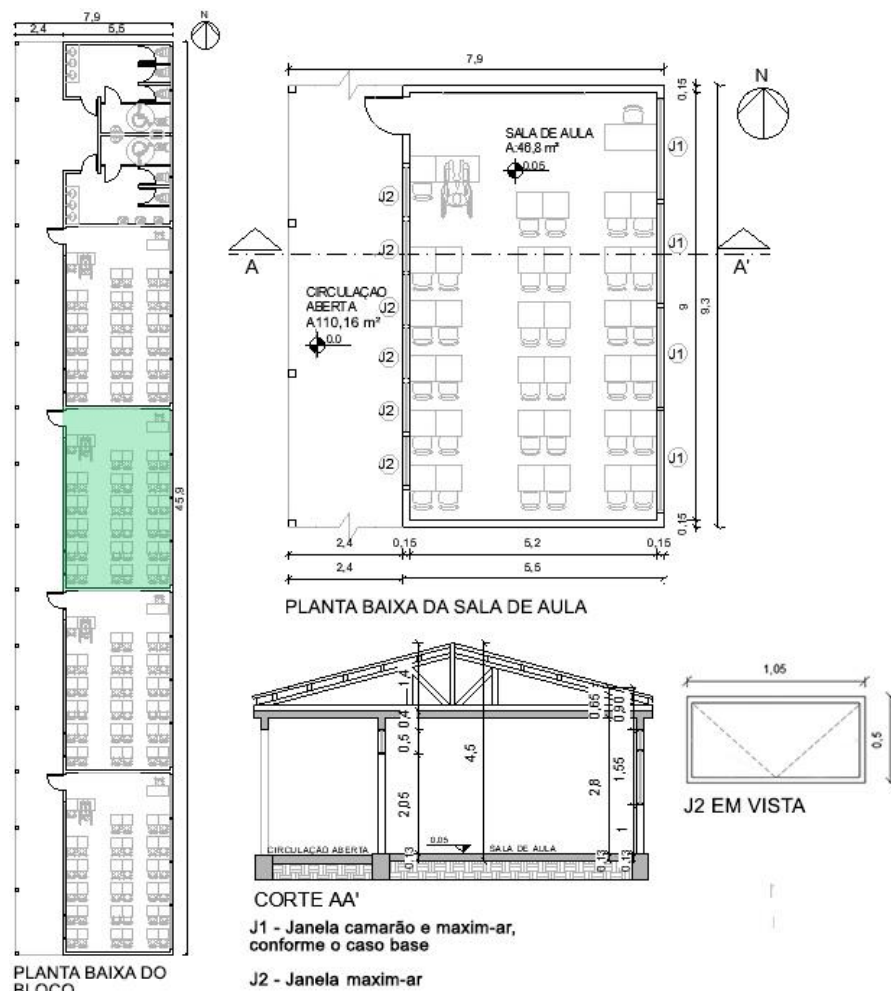
No segundo caso, foi simulada a mesma condição do caso base, entretanto, com a adoção da ventilação higiênica na parte superior das duas janelas situadas mais ao norte, em cada sala de aula. Isso porque essas janelas do ambiente

possuem maior fluxo e velocidade do ar, conforme apresentado no item 4.1. Dessa forma, todas as janelas tiveram ventilação térmica, com exceção dos sistemas superiores de duas janelas, que tiveram ventilação higiênica (permanente).

Em um terceiro caso, o bloco linear foi simulado com ventilação cruzada, com janelas de peitoril médio nas salas de aula da orientação leste e elevadas na orientação oeste, sendo a ventilação térmica em todas as janelas (Figura 13). Quanto à orientação adotada para as novas janelas, salienta-se que para que a edificação seja ventilada considerando a diferença de pressão provocada pelo vento, os ambientes devem ser atravessados transversalmente pelo fluxo de ar. A ventilação ocorre, essencialmente, devido às zonas com diferentes pressões: a zona de alta pressão, na face de incidência, e a zona de baixa pressão, na face oposta (LAMBERTS, [2017?]).

As janelas simuladas e seus posicionamentos se dão conforme a Figura 15, que apresenta a sala de aula analisada. O peitoril das janelas elevadas é de 2,10 m e a área de aberturas para ventilação em cada sala de aula é de 13,82 m². Bowen (1981) e Givoni (1976) destacam que a inserção de aberturas para a entrada de ar maiores do que as de saída possibilitam a distribuição uniforme da velocidade do ar no ambiente, ao reduzirem o fluxo de ar. Além disso, Sobin (1981) identifica que formatos horizontais de esquadrias viabilizam maior rendimento médio nos variados ângulos de incidência do vento. Dessa forma, a sensação de conforto térmico nos ambientes pode ser aprimorada.

Figura 15 - Edifício escolar com ventilação cruzada junto da sala de aula analisada (orientação leste-oeste)



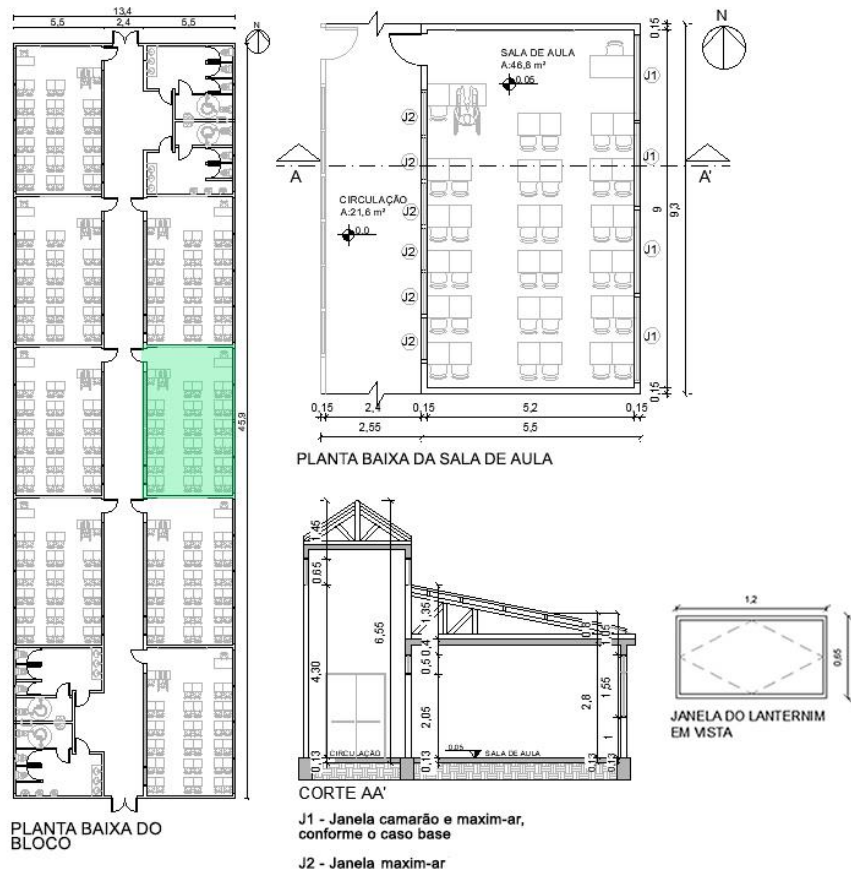
Fonte: Autora (2021).

Na quarta situação simulada, a configuração do bloco foi igual ao caso 3. Porém, a ventilação foi determinada como higiênica na parte superior das duas janelas da parede leste situadas mais ao norte, em cada sala de aula, e térmica nas demais janelas.

No quinto caso de simulação, o bloco possuiu 4 sanitários e 8 salas de aula separadas por um corredor central de largura de 2,40 m, conforme a Figura 16. A ventilação nas salas de aula foi cruzada, com janelas elevadas nas paredes entre as salas e o corredor, e janelas de peitoril médio nas paredes externas. Na circulação, houve a utilização de lanternim com 68 esquadrias pivotantes horizontais, 34 em

cada uma das laterais (orientação leste-oeste), de dimensão de 1,20 x 0,65, sendo a área de abertura para ventilação em cada sala de aula de 13,82 m² e a área de abertura do lanternim de 47,74 m².

Figura 16 – Edifício escolar com ventilação cruzada e lanternim junto da sala de aula analisada (orientação leste-oeste)



Fonte: Autora (2021).

O sexto caso simulado tem o mesmo modelo de edifício do quinto caso, porém, com adição de ventilação higiênica na parte superior das duas janelas de peitoril médio situadas mais ao norte, em cada sala de aula. A parte inferior de todas as esquadrias de peitoril médio, bem como as demais janelas, tem ventilação térmica.

No sétimo caso (Figura 17), o bloco de salas de aula foi simulado considerando a adição de dois dispositivos de chaminé solar por sala. Foram introduzidas as janelas do caso base na orientação leste do ambiente e as chaminés

solares na orientação oeste, com ventilação térmica. A área de abertura para ventilação natural na sala de aula é de 11,68 m². O formato do modelo de chaminé solar é retangular com dimensões internas de 1,00 m por 0,45 m, 4,00 m de altura total, e a conexão entre o dispositivo e o ambiente possui 0,45 m x 0,90 m. O modelo do dispositivo, constituído de placa absorvedora (composta de alumínio, isopor e chapa de aço) e vidro, faz referência ao sistema simulado por Oliveira e Carlo (2018), instalado no edifício anexo ao Departamento de Arquitetura e Urbanismo (DAU), da Universidade Federal de Viçosa. Entretanto, no modelo simulado, a chaminé solar não foi rotacionada, sendo disposta em ângulo reto. Ademais, para a configuração do modelo, também foram analisadas as dimensões internas da chaminé solar construída na Escola Lycée Charles de Gaulle, em Damasco (Síria). O projeto foi realizado pelos arquitetos da empresa Ateliers Lion em conjunto com a empresa alemã Transsolar (ELGENDY, 2010).

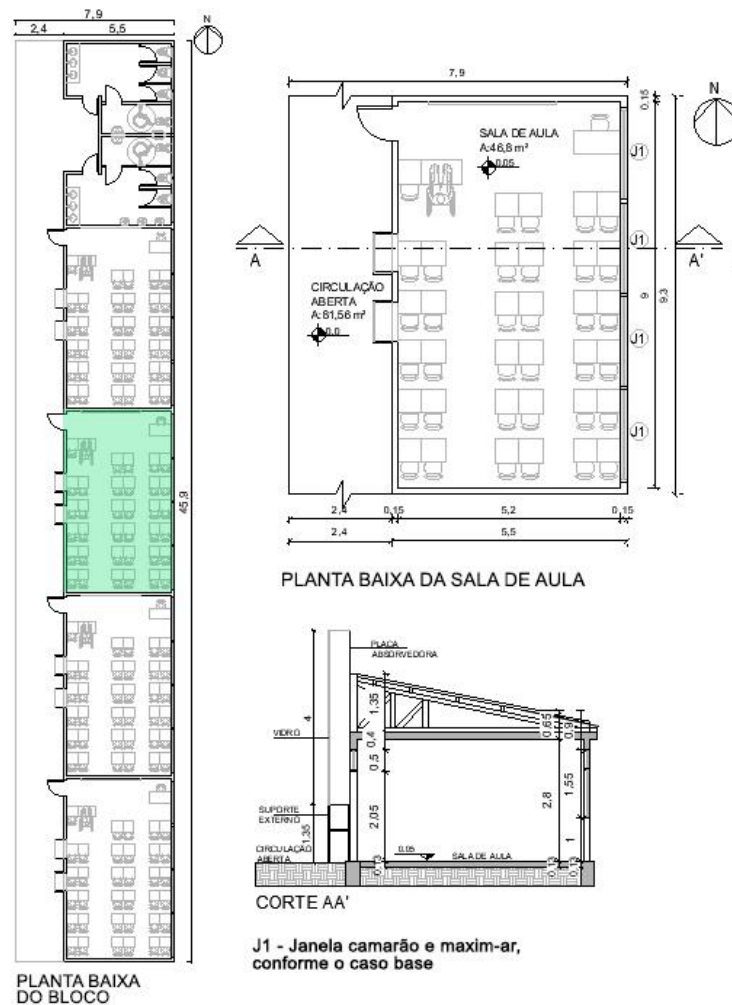
A chaminé solar foi configurada no EnergyPlus como uma chaminé térmica utilizando o modelo de cálculo *ThermalChimney*, recomendado pelo *software* para esse tipo de simulação. Na chaminé solar, a temperatura de descarga do ar no interior da chaminé é calculada com base nas informações sobre a temperatura da placa absorvedora, temperatura da cobertura de vidro e distribuição vertical da temperatura do ar, para determinar o aumento da ventilação (ENERGYPLUS, 2015). As propriedades dos materiais da chaminé estão na Tabela 5.

Tabela 5 - Propriedades dos materiais da chaminé solar

Componente construtivo	Materiais	e cm	λ W/m°C	ρ kg/m³	c kJ/kgK	Fator solar
Placa absorvedora	Alumínio	0,30	230	2.700	880	
	Isopor	2,00	0,04	25,00	1420	-
	Chapa de aço	0,30	55,00	7.800	460	-
Superfície transparente	Vidro	0,60	-	-	-	0,80

Fonte: Oliveira e Carlo (2018).

Figura 17 – Edifício escolar com chaminés solares e janelas de peitoril médio junto da sala de aula analisada (orientação leste-oeste)



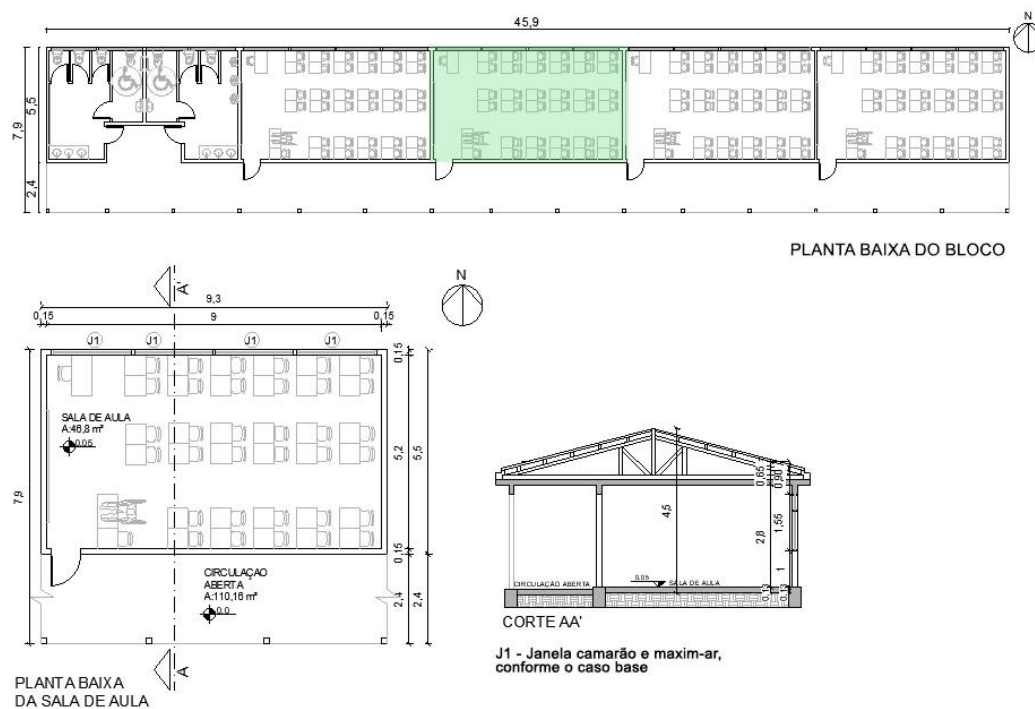
Fonte: Autora (2021).

No oitavo caso simulado, foi utilizado o mesmo bloco do caso 7 (Figura 17). Entretanto, ao invés de haver apenas ventilação térmica, foi adotada a ventilação higiênica na parte superior das duas esquadrias de orientação leste situadas mais ao norte, em cada sala de aula. A parte inferior de todas as esquadrias de orientação leste, bem como as demais janelas, tem ventilação térmica.

Para o caso 9, o bloco simulado possuiu 2 sanitários e 4 salas de aula distribuídas linearmente, sendo a sala intermediária analisada (Figura 18). Nas salas de aula, foi utilizada a ventilação unilateral térmica na orientação norte, por ser uma orientação favorável para ganhos solares em períodos frios. O modelo das 4 janelas

utilizadas, que são de abertura maxim-ar na parte superior e de camarão na parte inferior, é apresentado na Figura 14, sendo o peitoril de 1,00 m. A área de abertura total para ventilação na sala de aula, assim, é de 10,96 m². A planta baixa e o corte da sala de aula analisada no caso 9 são apresentados na Figura 17.

Figura 18 - Edifício escolar com ventilação unilateral junto da sala de aula analisada (orientação norte)



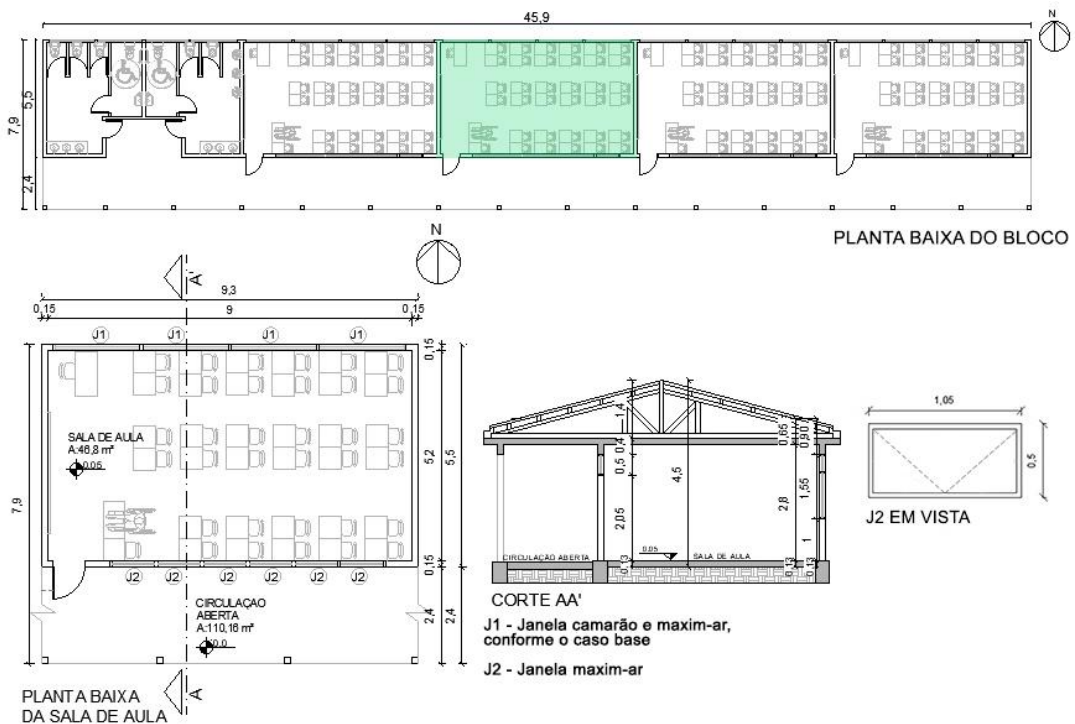
Fonte: Autora (2021).

No caso 10, foi utilizado o mesmo bloco do caso 9, apresentado na Figura 18. Porém, houve uso de ventilação higiênica nas duas aberturas superiores das janelas situadas mais a oeste, em cada sala de aula. Isso porque essas janelas possuem maior fluxo e velocidade do ar, como é apresentado no item 4.1. A parte inferior de todas as esquadrias orientação norte, bem como as demais janelas, têm ventilação térmica.

No caso 11, o bloco de salas de aula apresentou ventilação cruzada e térmica, nas orientações norte e sul (Figura 19). Na orientação norte de cada sala de aula foram inseridas 4 janelas de peitoril médio, iguais às utilizadas no caso 9, e na orientação sul foram utilizadas janelas maximar 90° (J2) de peitoril de 2,10 m. As

janelas simuladas e seus posicionamentos se deram conforme a Figura 19. A área de abertura para ventilação de cada sala de aula foi de 13,82 m².

Figura 19 - Edifício escolar com ventilação cruzada junto da sala de aula analisada (orientação norte-sul)

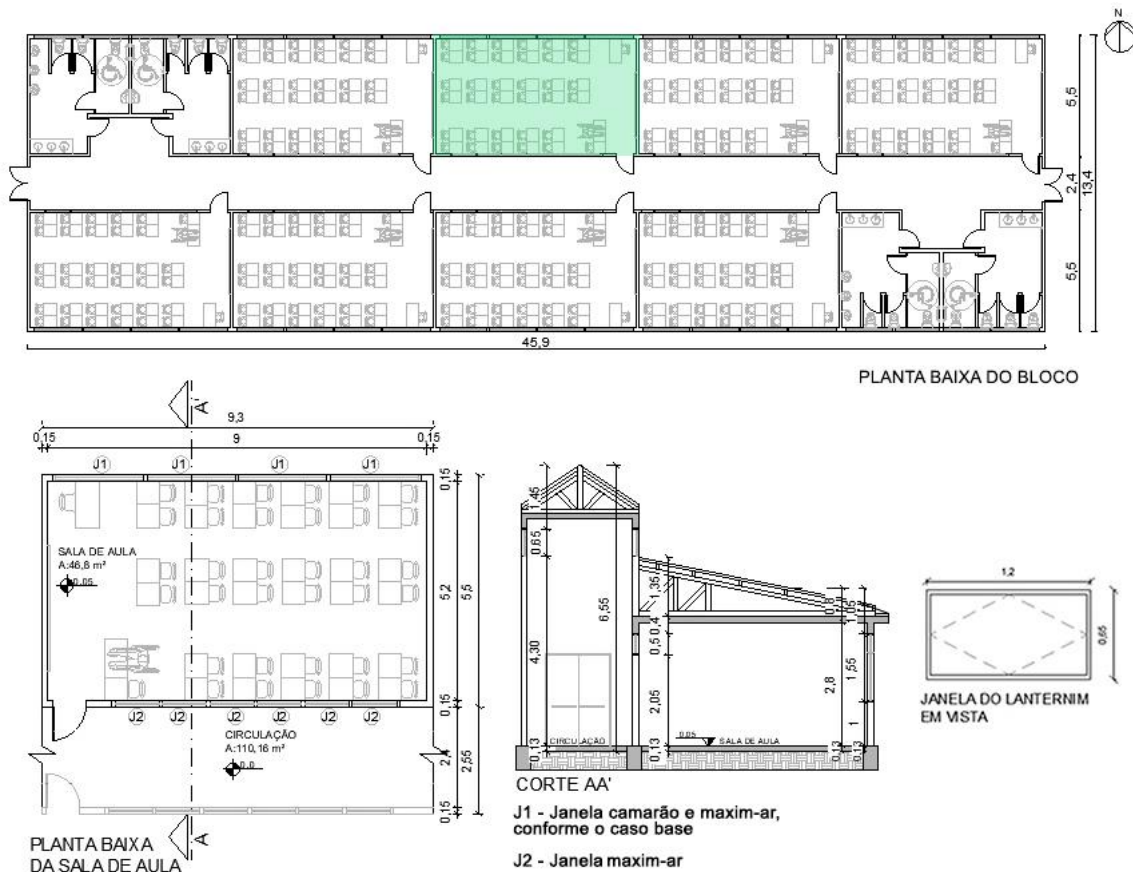


Fonte: Autora (2021).

O caso 12, por sua vez, apresentou ventilação cruzada nas orientações norte-sul das salas, conforme a Figura 19. Todavia, foi considerada a ventilação higiênica para a abertura superior das duas janelas da parede norte situadas mais ao oeste, em cada sala de aula. Os demais sistemas de janelas tem ventilação térmica.

O caso 13 apresentou ventilação cruzada térmica no bloco de salas de aula, como no caso 11, mas com conexão das aberturas para uma circulação central de largura de 2,40 m, ventilada por lanternim. O lanternim foi centralizado no bloco, ficando na área da circulação. Ele possui 68 esquadrias pivotantes horizontais, 34 em cada uma das laterais (orientações norte e sul), de 1,2 x 0,65, sendo a ventilação térmica e a área de abertura para ventilação do lanternim (área efetiva da ventilação) de 47,74 m² (Figura 20). Em cada sala de aula, a área de abertura para ventilação natural foi de 13,82 m².

Figura 20 - Edifício escolar com ventilação cruzada e lanternim junto da sala de aula analisada (orientação norte-sul)



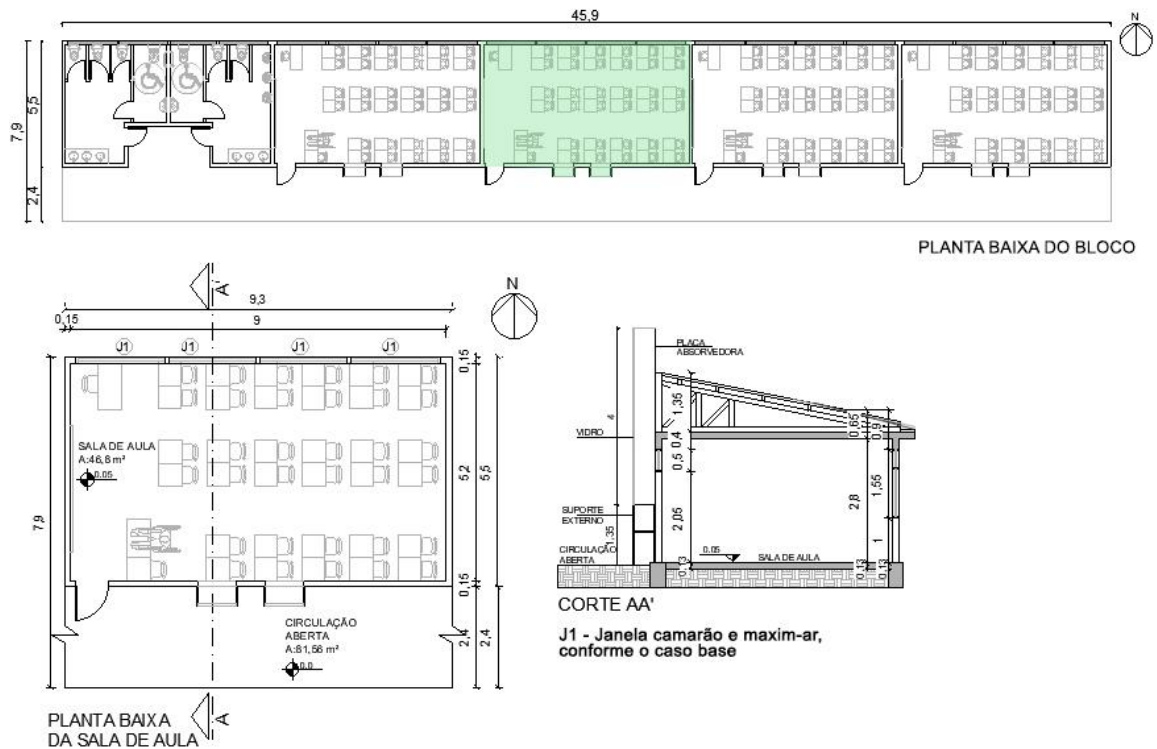
Fonte: Autora (2021).

No caso 14, o edifício foi configurado da mesma forma que o caso 13. Entretanto, as duas esquadrias da parede norte situadas mais a oeste possuíram ventilação higiênica na parte superior, em cada sala. A parte inferior das esquadrias de orientação norte, bem como as demais janelas, apresentou ventilação térmica.

No caso 15, o bloco teve ventilação térmica, com janelas de peitoril de 1,00 m na orientação norte, como ocorreu no caso 9, e 2 chaminés solares na parede oposta (sul) das salas. O formato da chaminé solar é retangular, com dimensões internas de 1,00 m por 0,45 m, e altura total de 4,00 m. A conexão entre o dispositivo e o ambiente possui 0,45 m x 0,80 m. O modelo do dispositivo, tem como referência o sistema simulado por Oliveira e Carlo (2018) e as dimensões da chaminé solar construída na Escola Lycée Charles de Gaulle (ELGENDY, 2010), possuindo os

mesmo materiais apresentados no caso 7. A área de abertura para ventilação natural em cada sala foi de 11,68 m². Na Figura 21 é apresentado o bloco simulado no caso 15 e a sala de aula analisada em planta baixa e corte.

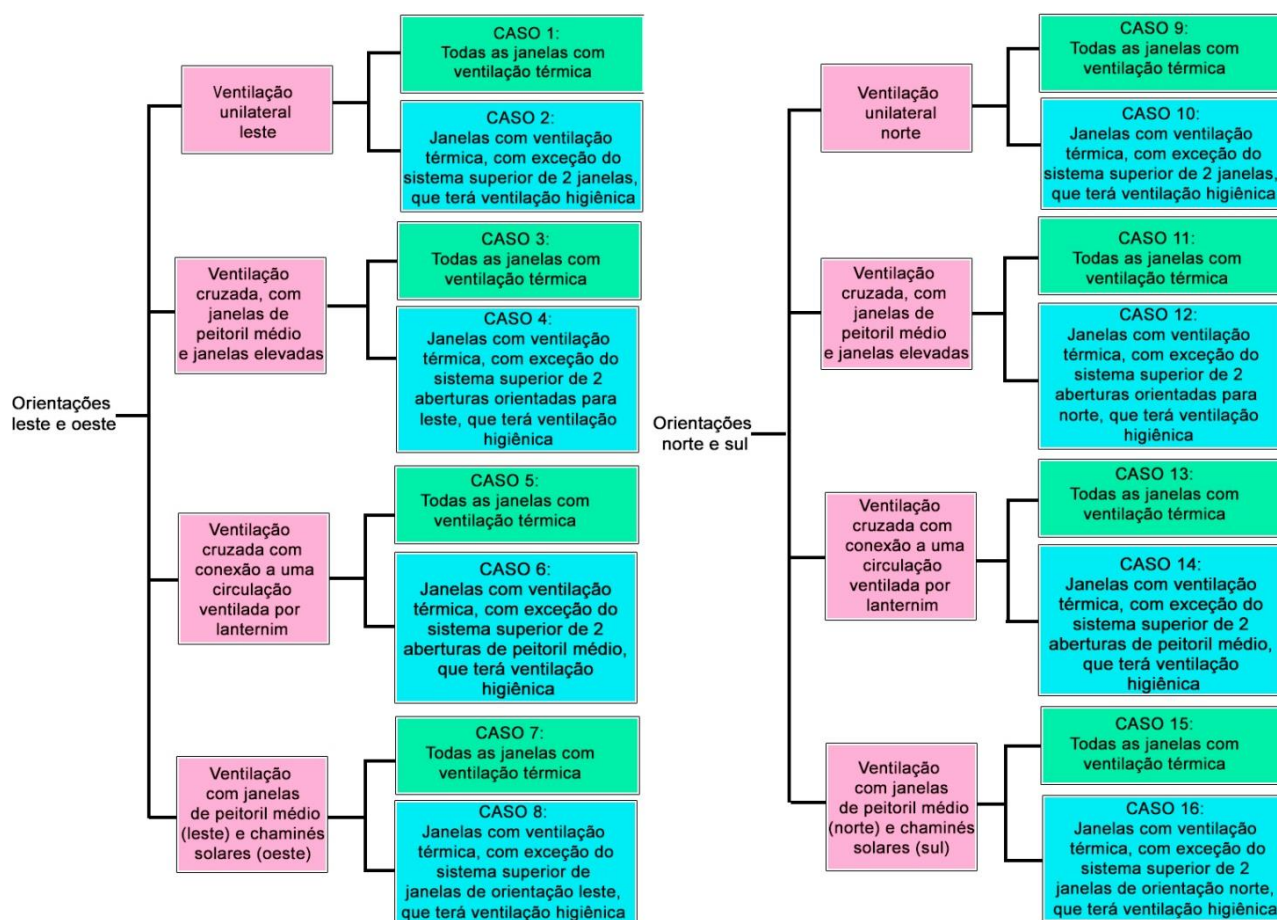
Figura 21 - Edifício escolar com chaminés solares e janelas de peitoril médio junto da sala de aula analisada (orientação norte-sul)



Fonte: Autora (2021)

No caso 16, o modelo de sala de aula foi como o apresentado na Figura 15. Porém, as duas janelas da parede norte situadas mais a oeste tiveram ventilação higiênica na parte superior, em cada sala de aula. As demais janelas e as chaminés solares tiveram ventilação térmica. As estratégias de ventilação simuladas são apresentadas na Figura 22.

Figura 22 - Organograma dos casos de ventilação natural simulados



Fonte: Autora (2021).

Através da Tabela 6 é apresentada a área de abertura para ventilação térmica e a área de abertura para ventilação higiênica, para cada caso simulado.

Tabela 6 – Área de abertura para ventilação natural na sala de aula analisada, para cada caso

(Continua)

Número dos casos	Área de abertura para ventilação térmica	Área de abertura para ventilação higiênica
1 e 9	10,96 m ²	0,00 m ²
2 e 10	9,28 m ²	1,68 m ²
3 e 11	13,82 m ²	0,00 m ²
4 e 12	12,14 m ²	1,68 m ²
5 e 13	13,82 m ²	0,00 m ²

Tabela 6 – Área de abertura para ventilação natural na sala de aula analisada, para cada caso
(Conclusão)

Número dos casos	Área de abertura para ventilação térmica	Área de abertura para ventilação higiênica
6 e 14	12,14 m ²	1,68 m ²
7 e 15	11,68 m ²	0,00 m ²
8 e 16	10,00 m ²	1,68 m ²

Fonte: Autora (2021)

A ocupação da sala de aula, em todos os casos, foi de 37 pessoas (36 alunos e 1 professor), ocorrendo em todos os dias letivos anuais, de segunda a sexta, sendo excluídos feriados e períodos de férias. O horário de ocupação, para as simulações, foi definido das 07h45min às 11h45min no turno da manhã e das 13h às 17h no turno da tarde, tendo em vista cumprir uma carga horária mínima de 800h para cada turma, exigida por lei para o ensino fundamental (BRASIL, 1996).

3.1.3. Etapa 4: Parâmetros de simulação

Foram utilizados dois *softwares* de simulação nesta pesquisa: o Ansys CFX 17.1 e o EnergyPlus 8.7.0. Cada *software* possui dados de entrada e de saída específicos para que seja possível obter variáveis como velocidade do ar, temperatura operativa interna, renovação de ar por hora e umidade relativa do ar para as estratégias analisadas. Primeiramente, ocorreu a simulação através do Ansys CFX. Os coeficientes de pressão obtidos foram inseridos como dados de entrada no EnergyPlus, que foi utilizado em seguida. Os parâmetros de cada *software* são apresentados a seguir.

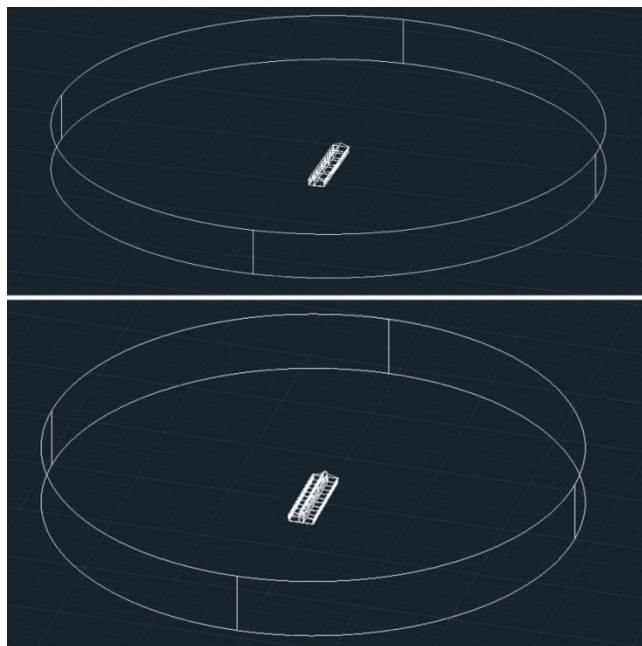
3.1.3.1. Obtenção da velocidade do ar e dos Cp no *software* Ansys CFX

No Ansys CFX, primeiramente, foram importadas as geometrias dos blocos de salas de aula de cada caso junto de seu domínio de escoamento. O modelo foi

realizado no AutoCAD 2021, sendo utilizadas ferramentas básicas para sua confecção, como *extrude*, *pressupull*, *imprint*, *subtract*, *3Dmove* e *union*. Nesse âmbito, o domínio pode ser dimensionado e configurado conforme a necessidade de cada experimento (AMARAL, 2017). O domínio em formato circular, adotado neste estudo, é frequentemente utilizado em pesquisas por permitir usar a mesma modelagem e malha para simular qualquer direção do vento (CÓSTOLA; ALUCCI, 2011).

As dimensões do domínio circular utilizado nas simulações foram feitas a partir das recomendações de Cóstola e Alucci (2011), que trabalharam com um edifício habitacional isolado. Conforme os autores, 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. Também deve ser analisada a obstrução máxima que a frente do modelo causa no perfil do domínio. Essa obstrução é chamada de blocagem, ou *blockage ratio* (AMARAL, 2017). O valor da obstrução deve ser, preferencialmente, inferior ou igual a 3% (COST, 2004). Os domínios circulares para o bloco de 4 salas e o de 8 são apresentados na Figura 23.

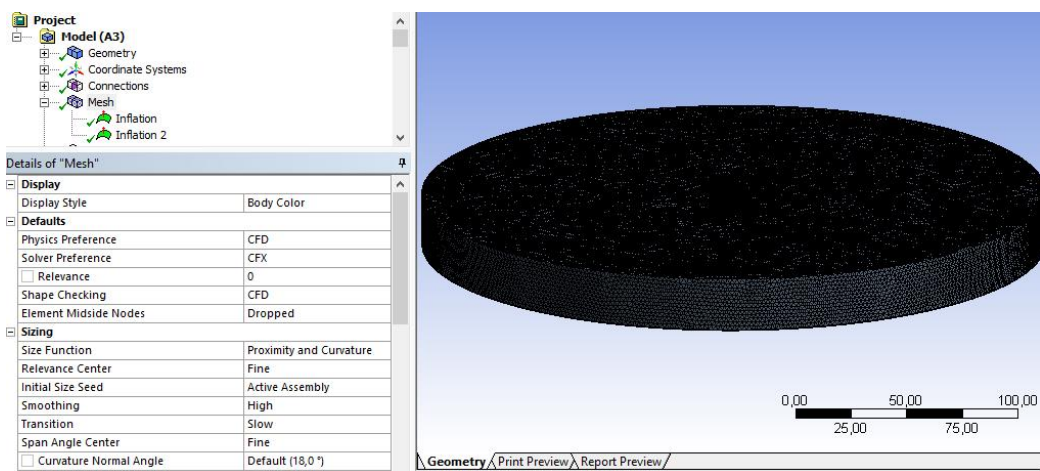
Figura 23 - Edifícios nos domínios circulares, para o bloco com 4 salas de aula (superior) e com 8 salas de aula (inferior), no AutoCAD 2021



Fonte: Autora (2021)

Depois, o modelo foi importado no no Ansys CFX, no módulo *Geometry* do *Workbench*. Para a geração da malha de cada modelo simulado, foi utilizado o módulo chamado *Mesh*. No *software*, a malha é a representação da discretização do volume a ser simulado. Sua composição se dá através de nós e elementos formados por tetraedros, hexaedros, prismas, pirâmides ou faces (AMARAL, 2017). Para gerar a malha, foram feitas configurações na aba *sizing*, conforme a Figura 24. Em *Size Function* foi adotado *Proximity and Curvature*. Na aba *Relevance Center*, para efetuar o refinamento geral da malha, foi adotado “*fine*” (que corresponde ao valor mais alto). O campo *Smoothing* destina-se a melhorar a qualidade dos elementos, movendo os nós em relação aos elementos circundantes. Foi adotado *High* para se obter uma maior resolução (ANSYS, 2016b). O campo *Transition* diz respeito à velocidade em que ocorre o crescimento dos elementos da malha da parte mais refinada para uma área de malha mais grosseira. Foi selecionado *Slow*, para ocorrerem transições suaves, em detrimento da opção *Fast*, que produz transições abruptas. O campo *Span Angle Center* define o refinamento com base na curvatura para as arestas (ELMEKAWY, 2018). Foi adotada a opção *Fine* (36° a 12°), tendo em vista viabilizar maior qualidade na malha.

Figura 24 - Configurações da malha no Ansys CFX

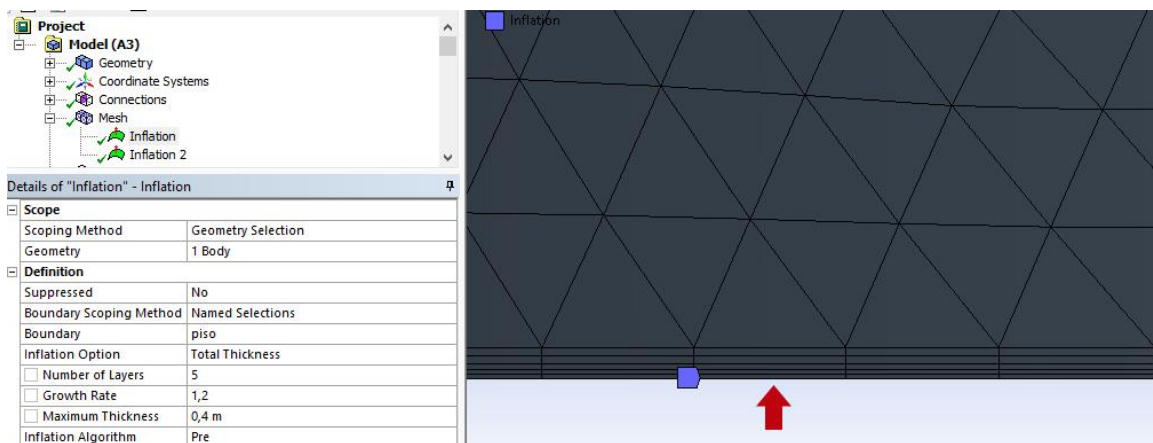


Fonte: Autora (2021)

O campo *Num Cells Across Gap* define o número mínimo de camadas de elementos a serem gerados nas lacunas, ou seja, entre duas faces paralelas. Ele é disponível quando a opção *Proximity and Curvature* ou *Proximity* forem selecionadas em *Size Function*. Esse valor é uma estimativa, podendo não ser satisfeito em todas as lacunas. Quanto maior o valor, maior será o número de elementos da malha, sendo sua configuração importante para o refinamento da malha. *Growth Rate*, por sua vez, é o fator de expansão das células contíguas, que corresponde à taxa de crescimento dos elementos a cada camada sucessiva (ANSYS, 2016b). Foi adotado o valor padrão de 1,2, devendo ser inferior a 1,3, conforme determinam 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 inseridas nas fronteiras do domínio (Figura 25). Foi configurada uma para o piso do domínio e uma para a superfície das edificações, conforme Amaral (2017). Na primeira, a espessura máxima foi definida como 0,4, e na segunda, 0,2.

Figura 25 - *Inflated boundary* para o piso do domínio no módulo *Mesh*



Fonte: Autora (2021)

Depois de gerada a malha original, é possível criar duas novas malhas, uma menos refinada e outra mais refinada. Para refinar a malha de cada caso, foi considerado a equação do fator de refinamento R , conforme Celik *et al.* (2008), através da Equação (11):

$$R = h_{coarse}/h_{fine} \quad (11)$$

Onde:

h_{coarse} = tamanho representativo da malha mais grosseira;

h_{fine} = tamanho representativo da malha mais refinada.

Sabendo-se o h (tamanho) da malha original, calcula-se o h da malha a ser gerada, multiplicando o valor por 1,3 para obter uma malha menos refinada, ou dividindo-o por 1,3 para uma malha mais refinada. A partir do valor de h da nova malha é viável definir o número de elementos a ser usado (AMARAL, 2017). O número de elementos das malhas é apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 - Número de elementos das malhas

(Continua)

	Malha menos refinada	Malha original	Malha mais refinada
Casos 1, 2, 9 e 10			
Nº de elementos	2.849.204,00	6.259.701,19	13.752.563,51
Volume do domínio (m³)	1.471.300,00	1.471.300,00	1.471.300,00
H	0,80227	0,61713	0,47472
R	1,3	1,3	1,3
Casos 3, 4, 11 e 12			
Nº de elementos	3.223.866,00	7.082.833,60	15.560.985,42
Volume do domínio (m³)	1.471.300,00	1.471.300,00	1.471.300,00
H	0,76991	0,59224	0,45556
R	1,3	1,3	1,3
Casos 5, 6, 13 e 14			
Nº de elementos	7.340.710,00	16.127.539,87	35.432.205,09
Volume do domínio (m³)	2.094.800,00	2.094.800,00	2.094.800,00
H	0,65836	0,50643	0,38956
R	1,3	1,3	1,3
Volume do domínio (m³)	1.614.900,00	1.614.900,00	1.614.900,00
H	0,92792	0,71378	0,54906
R	1,3	1,3	1,3

Tabela 8 - Número de elementos das malhas

(Conclusão)

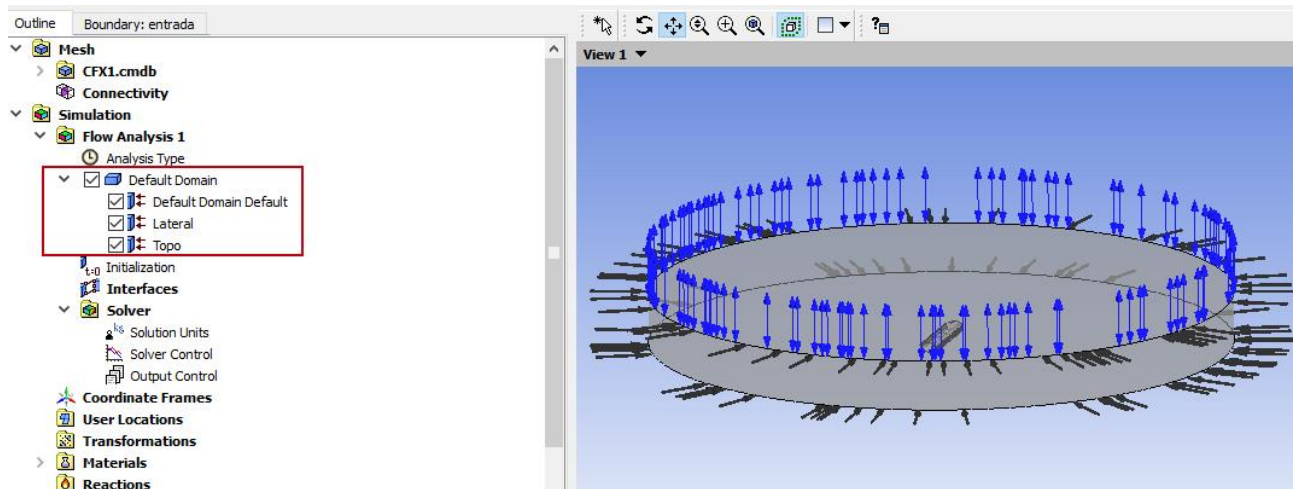
	Malha menos refinada	Malha original	Malha mais refinada
Casos 7, 8, 15 e 16			
Nº de elementos	2.021.203,00	4.440.582,99	9.755.960,83
Volume do domínio (m³)	1.614.900,00	1.614.900,00	1.614.900,00
H	0,92792	0,71378	0,54906
R	1,3	1,3	1,3

Fonte: Autora (2021)

Após a criação da malha mais refinada, foram definidas as condições de contorno, no módulo *Setup* do *Workbench*. As condições de contorno abrangem um conjunto de parâmetros aplicados às *parts* do domínio que interferem no escoamento, sendo divididas em paredes e aberturas (COST, 2004). Foram definidas como paredes a superfície da base do domínio e o edifício. Essas são classificadas como sem escorregamento (*no slip*). Tal condição estabelece que as partículas fluidas aderem à fronteira, sendo criada uma camada-limite, assim a velocidade do fluido nesse ponto corresponde a zero. As superfícies correspondentes ao piso e corpo do edifício foram definidas como lisas (*smooth*) (CÓSTOLA, 2006).

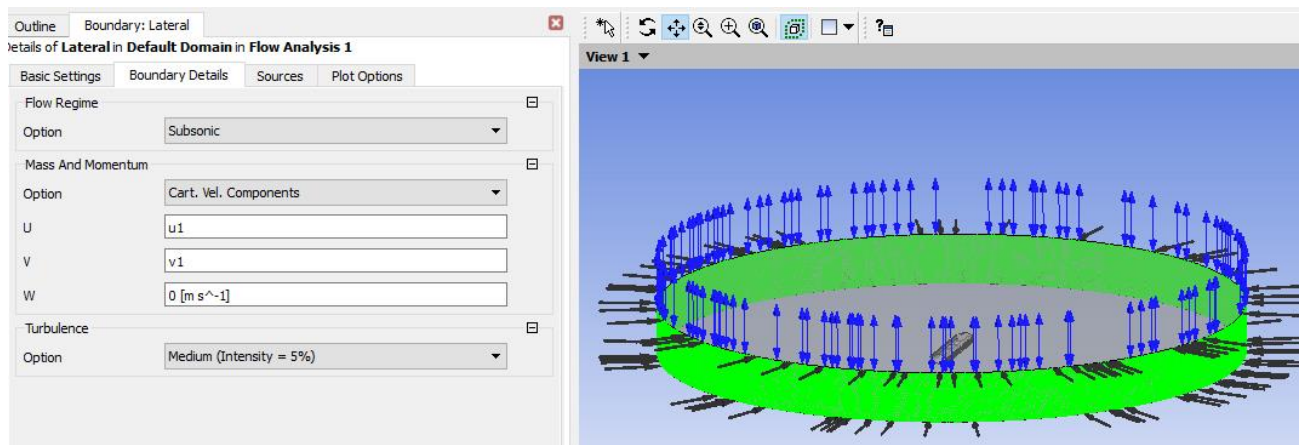
Os limites em que o fluido entra e deixa o domínio podem ser configurados em aberturas (*openings*), entradas (*inlets*) e saídas (*outlets*). As laterais do domínio foram definidas como *inlet* e o topo do domínio como *opening*, conforme a Figura 26. Nas laterais do domínio circular foi atribuída uma velocidade nas componentes cartesianas x, y e z. A velocidade na direção z é igual a zero, e as outras componentes são dadas em variáveis u_1 e v_1 (Figura 27), cujo valor é definido no arquivo externo de configuração (arquivo .ccl). Assim, é possível alterar a direção do vento através da edição do arquivo .ccl (CÓSTOLA; ALUCCI, 2011).

Figura 26 - Limites do domínio no módulo Setup



Fonte: Autora (2021)

Figura 27 - Configuração da lateral do domínio no módulo Setup



Fonte: Autora (2021)

O perfil das velocidades de vento foi inserido através do arquivo .ccl, que contém a fórmula que descreve o perfil logarítmico de velocidade do ar correspondente à Equação (12), conforme BRE (1978).

$$V = V_m \times k \times z^a \quad (12)$$

Onde:

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 padrão de 10m (m/s);

z = altura da abertura de entrada do vento;

k, a = coeficientes que variam de acordo com a rugosidade do entorno (Tabela 8).

Tabela 9 - Coeficientes de rugosidade do entorno

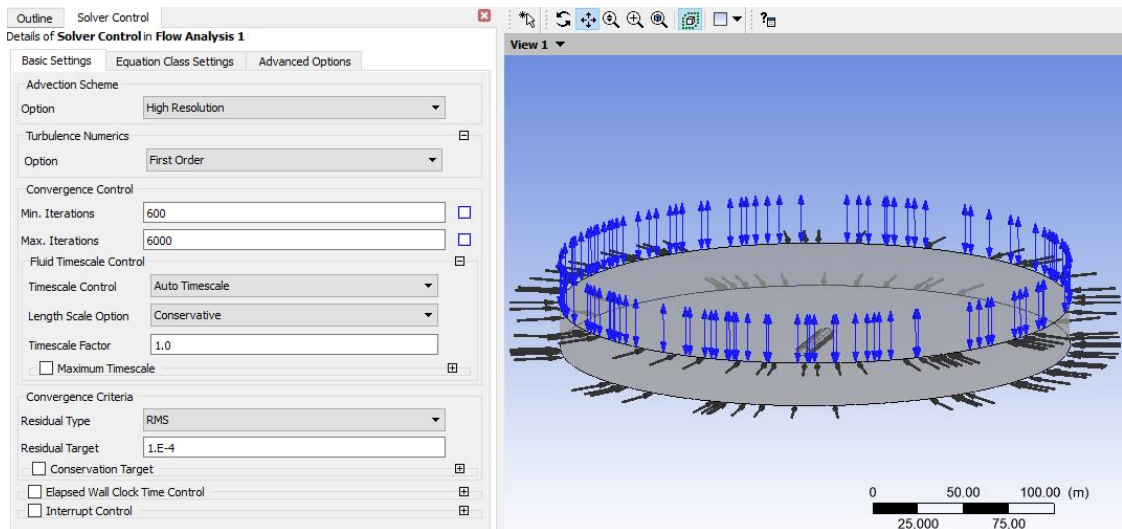
Tipo de terreno	k	a
Área aberta plana	0,68	0,17
Campo com obstáculos espaçados	0,52	0,20
Área urbana	0,35	0,25
Centro de cidade	0,21	0,33

Fonte: BRE (1978).

As direções predominantes do vento utilizadas para o município foram definidas como leste e sudeste, conforme INMET (2018, 2021). A velocidade média do vento no município é 2,20 m/s, visto as normais climatológicas do INMET (2018) referentes às direções predominantes do vento (mensal e anual). Assim, a velocidade do vento no ponto, que é a velocidade de entrada no domínio, inserida no arquivo .ccl, foi definida como 3,22 m/s, conforme a equação de perfil logarítmico de velocidade do ar. Quanto ao modelo de turbulência, foi utilizado o $k-\varepsilon$, pelo fato de viabilizar a melhor relação entre custo (tempo de processamento) e benefício (precisão), conforme Bevilaqua *et al.* (2019).

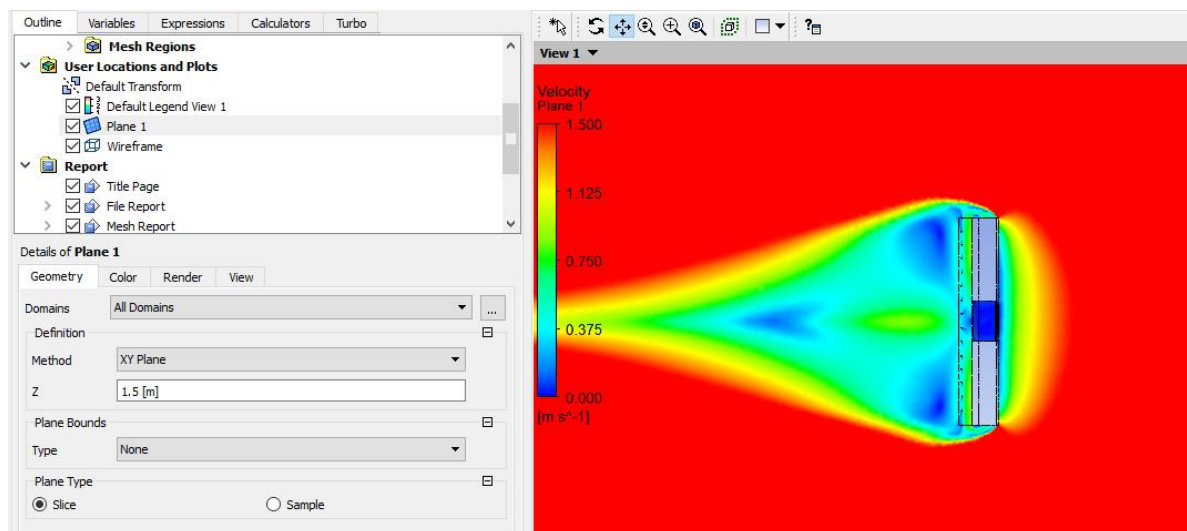
Na opção *Solver Control* (Figura 28), do módulo *Setup* do *Workbench*, foi definido o nível de convergência assim que os níveis residuais atingiram um valor máximo de 10^{-4} .

Figura 28 - Configuração do Solver Control no módulo *Setup*



Fonte: Autora (2021)

Figura 29 - Plano horizontal de velocidade do ar no módulo *Results*



Fonte: Autora (2021)

Quanto às variáveis de saída, foram consideradas a velocidade do ar (m/s) e o coeficiente de pressão (C_p) do vento nas janelas. Para o cálculo do C_p , conforme proposto na metodologia de Amaral (2017), houve a inserção da Equação (13), a seguir, no ANSYS CFX, onde são considerados os valores de pressão dinâmica na fachada do modelo e no ponto definido.

$$P_x = 0,5. \rho. C_p.V^2 \quad (13)$$

Onde:

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

ρ = densidade do fluido (ar);

C_p = coeficiente de pressão;

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

Os resultados de coeficientes de pressão foram exportados para um arquivo .csv e um valor médio foi calculado para cada abertura. Os valores resultantes foram inseridos como dados de entrada da simulação no EnergyPlus, estando disponíveis nos Apêndices A e B.

3.1.3.2. Simulação da ventilação natural no software EnergyPlus

Quanto aos dados de entrada para as simulações no *software* EnergyPlus, foram inseridas a geometria do modelo e as propriedades dos materiais, configuradas conforme o item 3.1.2. Quanto às cargas internas, elas estão vinculadas à agenda de uso e operação da edificação e seus sistemas de iluminação. Na presente pesquisa, foi adotada a ocupação de 37 pessoas (36 alunos + 1 professor) durante o período letivo, e também utilização de iluminação artificial com valor de 9,90 Watts/m², que é o valor indicado para a obtenção de classificação A de eficiência energética, conforme BRASIL (2021). No objeto de simulação, foi inserida a iluminação do tipo *surface mount* (iluminação montada na superfície do teto). Dessa forma, a fração radiante é equivalente ao valor 0,72, a fração visível é de 0,18 e a fração de retorno de ar é de zero, conforme a NBR 16401 (ABNT, 2017). Os C_p 's, para cada abertura, foram inseridos conforme os valores do Anexo B.

Com exceção da chaminé solar, configurada no EnergyPlus através do modelo de cálculo *ThermalChimney*, a simulação da ventilação natural foi realizada através do modelo multizonal *AirflowNetwork*. Dessa forma, é necessária a inserção de objetos de entrada do campo *Natural Ventilation and Duct Leakage*, no

EnergyPlus. Conforme Rackes *et al.*, (2015), no modelo *AirflowNetwork* cada ambiente é considerado um 'nó' vinculado por percursos de fluxo de ar que atua através da diferença de pressão. Um conjunto de equações é formado através de tais relações, sendo solucionado em cada *timestep* (RACKES *et al.*, 2015). Dentre os trabalhos que também utilizam este modelo estão os realizados por Oliveira, Cunha e Leitzke (2020), Schulze e Eicker, (2013) e Ferreira (2019).

O fator de abertura das esquadrias para a ventilação natural, configurado no objeto de entrada *AirflowNetwork:Multizone:Surface*, depende da porcentagem de abertura para ventilação de cada tipo de janela: as pivotantes horizontais e as do tipo camarão possuem fator de abertura de 0,9 (porcentagem de abertura para ventilação natural: 90%). Já as janelas maxim-ar (abertura 90°) possuem fator de abertura de 0,8 (porcentagem de abertura para ventilação natural: 80%), conforme PBE Edifica (2012).

Acerca do controle de abertura das esquadrias no EnergyPlus, considerando a ventilação de conforto, uma agenda habilita a ventilação através da janela, que é controlada pela temperatura de *setpoint*, sendo aberta quando a temperatura do ar interno atingir 22°C. A temperatura foi definida a partir da faixa de Conforto Adaptativo (ASHARE, 2017b) obtida através do arquivo climático TMY2 de Santa Maria - RS (BULIGON, 2021). Esse intervalo de conforto é baseado na temperatura externa de bulbo seco °C mensal do município, conforme apresentado na Figura 3 (item 2.3).

A inserção dos Cp's obtidos no Ansys CFX, para cada abertura, ocorreu no objeto *AirflowNetwork:Multizone:WindPressureCoefficientvalues*. Também foi necessária a configuração do objeto *AirflowNetwork:MultiZone:WindPressureCoefficientArray*, onde os ângulos de direção do vento foram inseridos conforme os ventos predominantes, que são leste e sudeste. Assim, para *Wind Direction 1* foi estabelecido o valor 90 (leste) e para *Wind Direction 2*, 135 (sudeste).

Para a simulação do modelo com chaminé solar, foi introduzido o objeto de entrada *Zone ThermalChimney*. Nele, foram inseridos dados como a agenda de funcionamento da chaminé solar, estabelecida através de temperaturas de *setpoint* de 22°C; a área da seção de saída do canal de ar, como 0,45 m²; o coeficiente de

descarga, que foi mantido conforme o padrão do *software* para a chaminé solar, que é 0,8; a distância do topo da chaminé até a abertura de entrada, como 2,6 m; e a área da seção de entrada do canal de ar, como sendo 0,36 m².

Nas simulações, as variáveis de saída para cada estratégia de ventilação foram a temperatura operativa da zona (°C), a temperatura externa de bulbo seco (°C), a renovação do ar por hora (h⁻¹), e umidade relativa do ar (%). Assim, foi possível estabelecer a relação entre os valores de cada variável para as diferentes situações propostas.

3.1.4. Etapa 5: Tratamento e análise dos dados

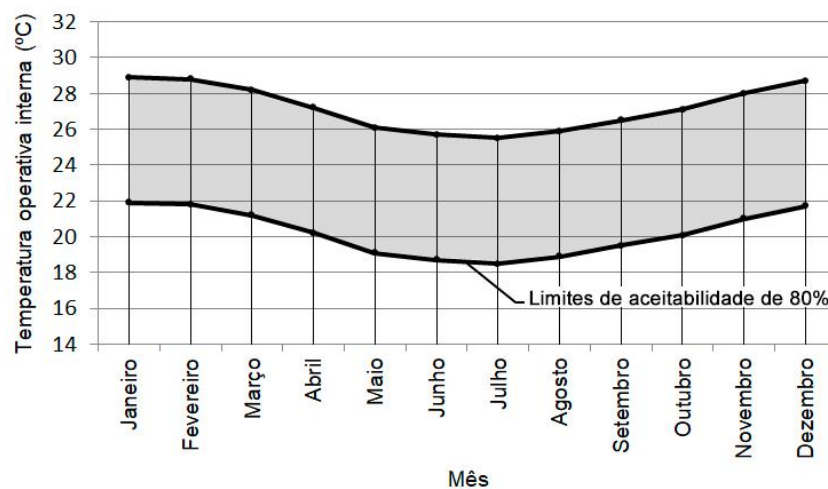
A análise e o tratamento dos dados foram realizados através de 16 configurações distintas do modelo de sala de aula. Essas resultaram em cenários que foram comparados entre si e em relação a dados obtidos em outras publicações científicas, desenvolvidas, por exemplo, por Rackes *et al.* (2015), Oliveira e Carlo (2018) e Oliveira, Cunha e Leitzke (2020). O tratamento de dados ocorreu para a velocidade do ar interno; Percentual de Horas Ocupadas em Conforto (total e por frio e calor); GH_A de desconforto por frio e calor; taxas de ventilação; renovações de ar por hora e umidade média relativa do ar.

Quanto ao tratamento dos dados de saída, a velocidade do ar, simulada no Ansys CFX 17.1, foi apresentada através de um plano horizontal, em uma altura de 1,50 m em relação ao solo, no módulo CFD - Post. Esse valor foi definido por corresponder à altura de zona de respiração humana, conforme Morais (2013). Também foi criado um plano horizontal com a velocidade do ar na altura de 0,95 m, pois corresponde a altura média de respiração das crianças quando sentadas, cujo período escolar de ensino fundamental, conforme Brasil (2006), se dá a partir de 6 anos e possui uma duração de 9 anos. A altura foi determinada a partir da média das alturas propostas por Dreyfuss (2005) para essa faixa etária. A velocidade média do ar foi obtida através da exportação dos valores de velocidade nos planos horizontais criados no CFD – Post. Para a análise da velocidade do ar, foi criado um plano vertical, para que fosse possível visualizar a variável em um corte transversal.

Para os dados de saída do EnergyPlus 8.7.0, foi verificado, para cada caso de ventilação natural simulado, o Percentual de Horas Ocupadas em Conforto Térmico (PHOCT) conforme a metodologia da INI-C. Também foram apresentados, através de uma tabela, os percentuais de horas em desconforto por frio e por calor para cada caso, considerando o horário de funcionamento das salas. A definição do PHOCT, ao ser necessária para a identificação do grau de conforto térmico experimentado pelos ocupantes das salas de aula que possuem ventilação natural em áreas de longa permanência, corresponde ao objetivo da pesquisa de avaliar estratégias de ventilação natural que promovem melhor eficiência energética sem comprometer o conforto térmico em salas de aula para a ZB2. Essa avaliação foi feita comparando os diferentes sistemas simulados.

Os limites de temperatura adotados para o cálculo do PHOCT são apresentados no gráfico da Figura 30, conforme a aceitabilidade de 80% do Modelo Adaptativo de conforto da ASHRAE 55/2017. Eles foram definidos através de simulações no EnergyPlus de temperatura externa de bulbo seco (°C) a partir do arquivo climático TMY2 para Santa Maria (RS), de formato .epw e com dados registrados pelo INMET. Para as horas ocupadas em conforto térmico foi considerado apenas o horário letivo, que foi definido das 07h45min às 11h45min e das 13h às 17h.

Figura 30 - Faixa de conforto adaptativo utilizada



Fonte: Autora (2021).

As percentagens de horas ocupadas em desconforto por frio e por calor foram analisadas a partir da comparação com os valores anuais de conforto térmico apresentados por Rackes *et al.* (2015), Oliveira e Carlo (2020), Maciel (2016) e Ferreira (2019), autores que também desenvolveram pesquisas acerca de salas de aula naturalmente ventiladas. Também foram analisadas tendo em vista a semana letiva com temperaturas mais altas e a com temperaturas mais baixas na cidade de Santa Maria (RS), conforme o arquivo climático. Dessa forma foi viável a verificação da intensidade do desconforto térmico.

Posteriormente, foi realizada a soma dos GH_A de desconforto para cada caso de ventilação natural, considerando os valores para aquecimento e resfriamento. O parâmetro GH_A corresponde à somatória da diferença da temperatura horária, quando esta se encontra superior ao limite de conforto térmico, no caso de resfriamento; ou inferior ao intervalo de temperatura de conforto térmico, para GH_A de aquecimento (SORGATO, 2009). Os valores anuais e para a semana mais quente e a mais fria do ano de cada uma das 16 situações foram apresentados através de gráficos, havendo, também, a comparação com os valores obtidos na pesquisa de Rackes *et al.* (2015).

Para o tratamento de dados, também foi realizada a verificação da taxa de ventilação estimada na sala de aula considerando cada estratégia simulada. Ademais, foram realizados histogramas das renovações de ar por hora considerando os diferentes casos e comparações com resultados obtidos por Rackes *et al.* (2015) e Oliveira e Carlo (2021), conforme seus estudos acerca de salas de aula naturalmente ventiladas. Foram considerados resultados anuais e para a semana mais fria e mais quente, conforme o arquivo climático. A apresentação dos valores foi feita através de gráficos, havendo, no eixo vertical, a frequência de ocorrência das renovações, e no eixo horizontal, os valores de renovações de ar por hora, desde 0 renovações, até valores superiores a $50 \text{ (h}^{-1}\text{)}$. Essa forma de tratamento de dados tem como referência a metodologia aplicada por Rackes *et al.* (2015), visto que tornou viável analisar qual a relação dos valores das renovações de ar com o conforto térmico. Os valores de renovação de ar também foram apresentados em tabelas, sendo comparados com os caudais recomendados pela OPAS (2021). O valor mínimo recomendado por essa organização, em ambientes não residenciais, é

de 10,00 l/s/p, que equivale a 10,16 renovações de ar por hora no ambiente. Na análise, foi considerada a média anual de renovações de ar por hora, que foi calculada conforme as equações 9 e 10, presentes no item 2.2.

A umidade relativa do ar foi simulada considerando a média mensal para cada caso de ventilação e apresentada através de gráficos. Também foram consideradas as médias para a semana mais fria e a mais quente no município. Para a análise de resultados, os valores limites da umidade do ar foram definidos conforme a faixa recomendada pela OMS (2012), que é de 60% a 80%. Dessa forma, foi viável verificar de que maneira a maior ou menor taxa de renovação de ar por hora impacta os índices de umidade relativa do ar e quais casos são mais favoráveis quanto a essa variável ambiental.

3.1.5. Etapa 6: Conclusões

Esta etapa diz respeito à definição das estratégias de ventilação natural que viabilizam eficiência energética e o conforto térmico dos usuários sem comprometer a qualidade da ventilação interna. Dessa forma, corresponde aos últimos objetivos específicos do trabalho. Também apresenta os motivos mais prováveis para os menores e maiores níveis de eficiência energética. Assim, a etapa corresponde a uma análise conclusiva dos resultados obtidos, tendo em vista responder à questão da pesquisa: Quais estratégias de ventilação natural melhor viabilizam a eficiência energética em salas de aula do ensino fundamental para a Zona Bioclimática 2, sem comprometer o conforto térmico dos usuários e a qualidade da ventilação interna?.

4 RESULTADOS

Através deste capítulo são apresentados os resultados da pesquisa, que abrangem as análises da velocidade do ar, das horas ocupadas em conforto, dos graus-hora para aquecimento e resfriamento, da quantificação das taxas de ventilação, das renovações de ar por hora e da umidade relativa do ar, visto os 16 casos avaliados, que possuem estratégias distintas de ventilação natural. Os resultados de Cp's obtidos nas janelas dos edifícios, através do Ansys CFX, são apresentados nos Apêndices A e B. Para as simulações, foram considerados os dias letivos anuais de dois turnos: manhã e tarde. Salienta-se que foi adotada carga horária letiva de 800h por turma de ensino fundamental, conforme Brasil (1996), sendo 1.600 o total de horas simuladas. A sala de aula analisada é indicada no item 3.1.2.

4.1. VELOCIDADE DO AR INTERNO

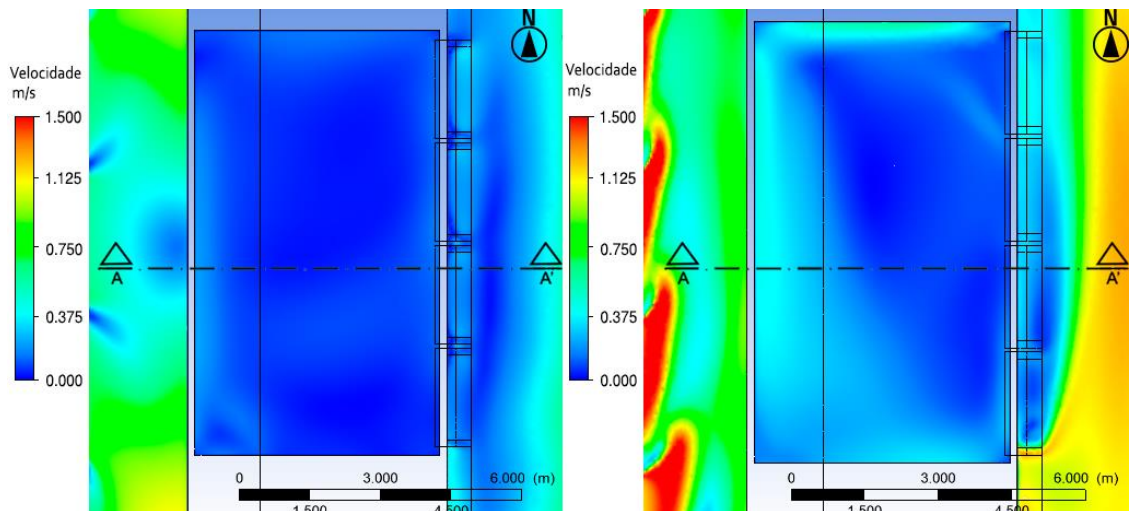
Os resultados de velocidade do ar apresentados a seguir foram obtidos tomando como referência um plano horizontal em uma altura de 1,5 metros em relação ao solo, por representar a altura de zona de respiração humana (MORAIS, 2013). Também foi criado um plano horizontal com a velocidade do ar na altura de 0,95 metros, conforme Dreyfuss (2005), pois corresponde a altura média de respiração das crianças sentadas na faixa etária do ensino fundamental. Ademais, é apresentada a velocidade do ar em um plano vertical, através de um corte transversal. A velocidade adequada, cujo valor máximo é 1,200 m/s, tem como referência Bayoumi (2021).

Nas Figuras 31, 32 e 33 é possível observar a velocidade do ar na sala de aula intermediária para o vento leste ($\theta = 90^\circ$) e sudeste ($\theta = 135^\circ$), em sequência, para os casos 1 e 2. A sala de aula possui apenas ventilação unilateral, com aberturas na orientação leste. Conforme os resultados, em planta baixa, verifica-se que o valor máximo de velocidade interna identificado é de 0,700 m/s, observado na região nordeste da sala de aula quando o vento é de origem sudeste. Nos cortes

transversais, situados na região central do ambiente, os maiores valores de velocidade ficam na parte oeste da sala, alcançando 0,400 m/s e na proximidade do sistema superior da janela, onde há saída de ventilação. Na primeira situação, onde o vento é de origem leste, a velocidade do ar é nula em praticamente todo o ambiente.

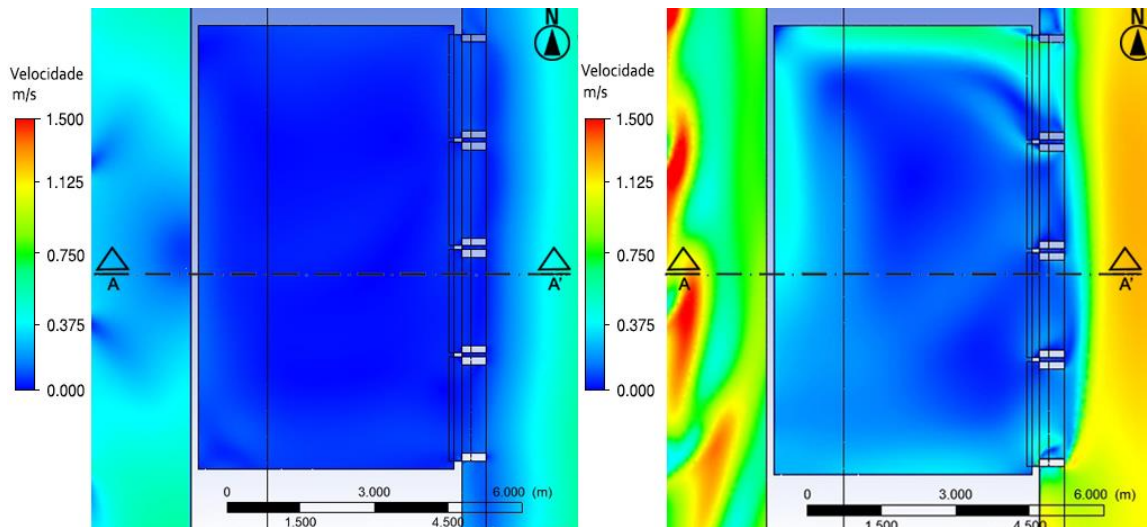
Também, por meio das figuras, é possível ver como o ar flui pela sala. Nota-se que, quando o vento atinge a fachada em ângulo de 90° , o ar praticamente fica estagnado (velocidades nulas ou abaixo de 0,375 m/s em praticamente todo o ambiente). Já para o ângulo 135° há maiores velocidades de ar no interior da sala. Nesse caso, o ar não atingiu velocidade acima de 0,375 m/s nas porções central e leste do ambiente. No ambiente, o vento em ângulo de 90° (com baixas velocidades) têm dificuldades em entrar pelas janelas, uma vez que encontra uma barreira no fluxo de ar que sai pelas mesmas aberturas. A maior parte do ar que entra, no caso de origem leste, se dá nas aberturas elevadas.

Figura 31 - Velocidade do ar na sala de aula com ventilação unilateral leste, para incidência do vento a $\theta = 90^\circ$ e 135° , em planta baixa na altura de 0,95 m



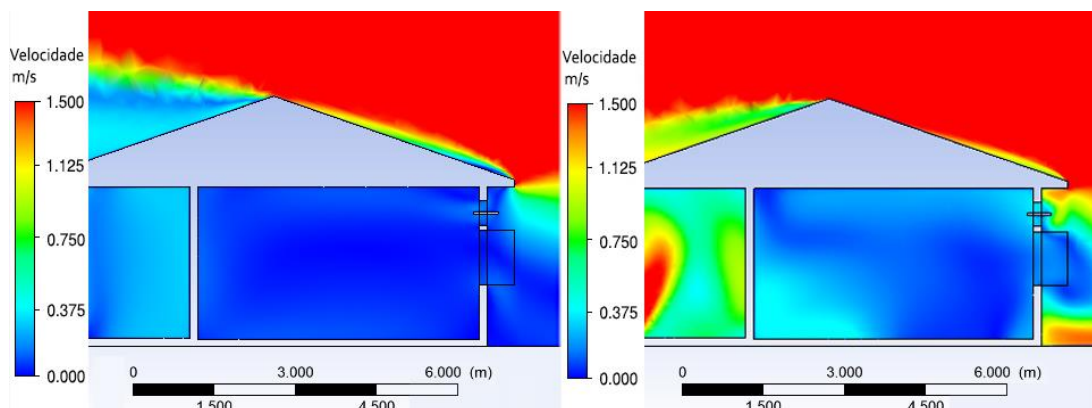
Fonte: Autora (2021)

Figura 32 - Velocidade do ar na sala de aula com ventilação unilateral leste, para incidência do vento a $\theta = 90^\circ$ e 135° , em planta baixa na altura de 1,50 m



Fonte: Autora (2021)

Figura 33 - Velocidade do ar na sala de aula com ventilação unilateral leste, em corte, $\theta = 90^\circ$ e 135°

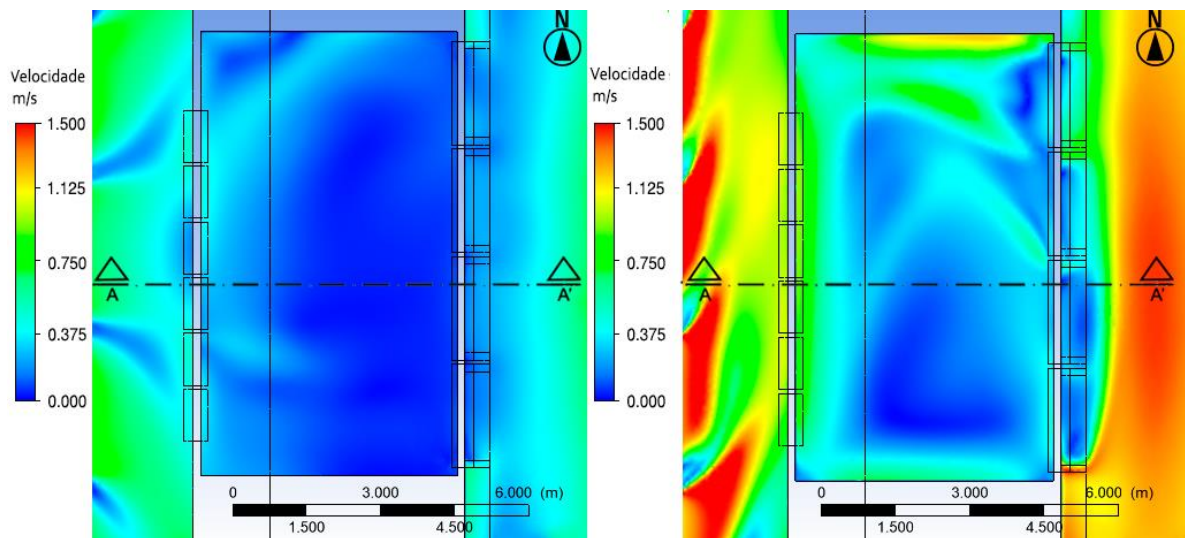


Fonte: Autora (2021)

As Figuras 34, 35 e 36 mostram a velocidade do ar na sala de aula para o vento leste e sudeste, em sequência. A sala de aula possui ventilação cruzada (casos 3 e 4), com aberturas nas orientações leste e oeste. Através dos resultados, foi possível identificar que o valor máximo de velocidade interna é de 1,150 m/s, observado, novamente, na região nordeste da sala de aula quando a orientação do vento é de 135° , em áreas próximas à lousa e à mesa do(a) professor(a). Entretanto, não ultrapassa a velocidade máxima adequada. Nessa região, a ventilação possui, majoritariamente, velocidade superior a 0,500 m/s.

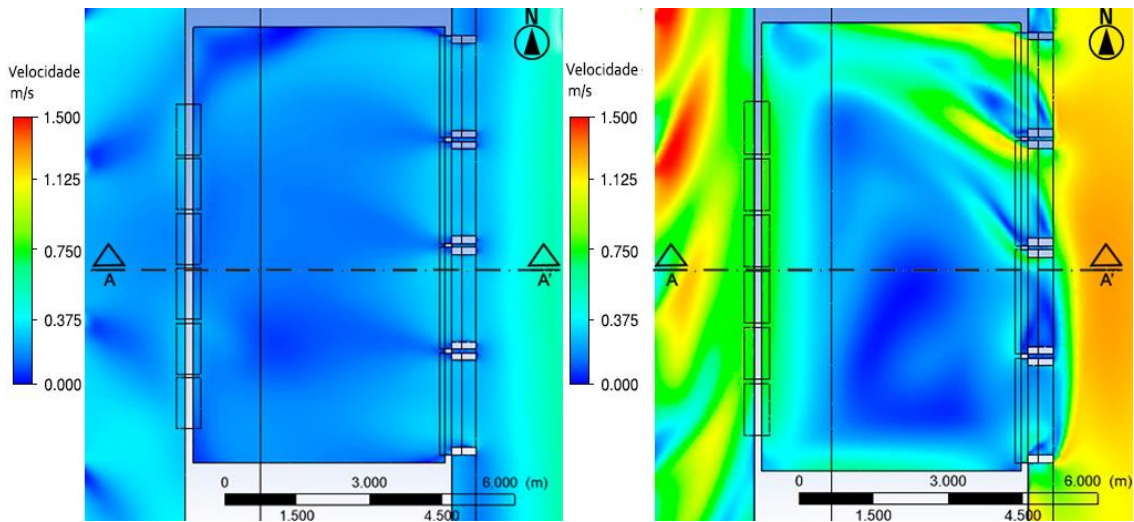
A velocidade do ar na sala de aula com ventilação cruzada é superior ao caso com ventilação unilateral em ambas as orientações do vento. Por meio dos cortes, observa-se que, quando o vento é de origem leste, as maiores velocidades são identificadas a partir de 1,00 m de altura, estando o fluxo do vento direcionado à esquadria orientada para oeste. Tal altura é superior a altura média de respiração das crianças sentadas, mas poderá atingir alguns usuários da sala, como os professores em pé. Entretanto, percebe-se que essa velocidade do ar alcança até 0,375 m/s, assim, não prejudicará o bem-estar dos usuários, conforme Bayoumi (2021). Quando o vento é de origem sudeste, o corte mostra que os maiores valores são observados na região oeste do ambiente. Aqui há um fluxo ascendente em direção à esquadria elevada, para a saída do ar. Na esquadria da região leste ocorre a entrada de ar.

Figura 34 - Velocidade do ar na sala de aula com ventilação cruzada leste-oeste, $\theta = 90^\circ$ e 135° , em planta baixa na altura de 0,95 m



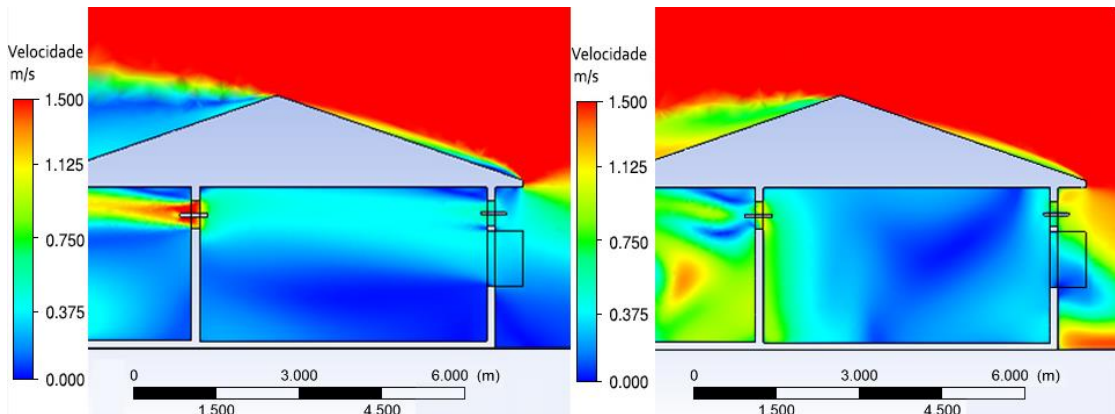
Fonte: Autora (2021)

Figura 35 - Velocidade do ar na sala de aula com ventilação cruzada leste-oeste, $\theta = 90^\circ$ e 135° , em planta baixa na altura de 1,50 m



Fonte: Autora (2021).

Figura 36 - Velocidade do ar na sala de aula ventilação cruzada leste-oeste, em corte, $\theta = 90^\circ$ e 135°



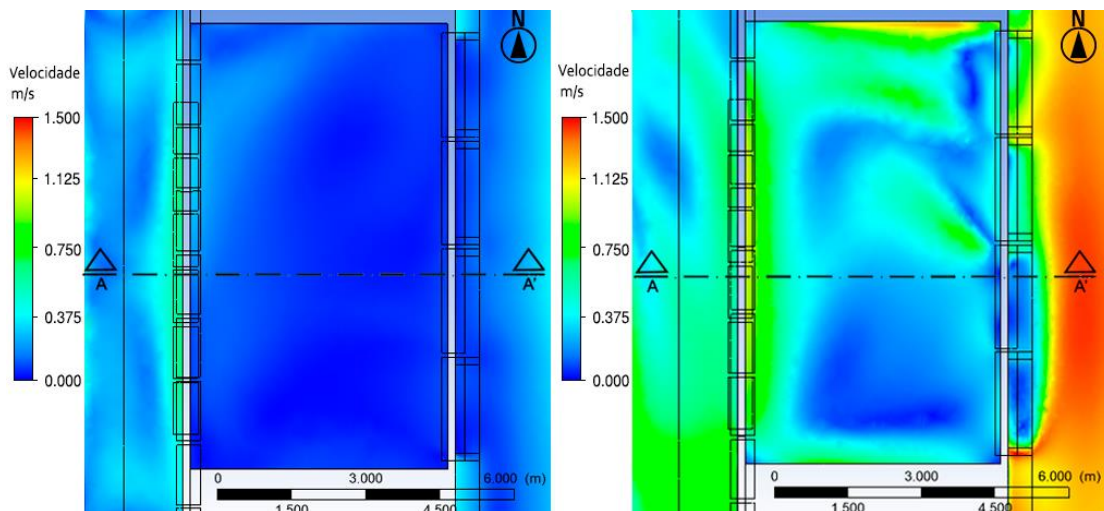
Fonte: Autora (2021)

Conforme as Figuras 37, 38 e 39, o bloco com salas de aula conectadas a um corredor central com lanternim (casos 5 e 6) é o que possui maiores velocidades de ar na sala de aula analisada, principalmente na área nordeste do ambiente, que alcança 1,500 m/s quando a ventilação é de origem sudeste, conforme as plantas baixas. A maior velocidade, em relação à situação anterior, possivelmente se dá em função da ventilação concentrada no corredor, que entra para a sala analisada através das janelas da orientação oeste, somando-se à ventilação que advém das

esquadrias da fachada leste. Observa-se que a velocidade do ar é mais elevada na altura de respiração de 1,50 m, enquanto que na altura de 0,95 m há maiores porções com velocidades inferiores a 0,100 m/s

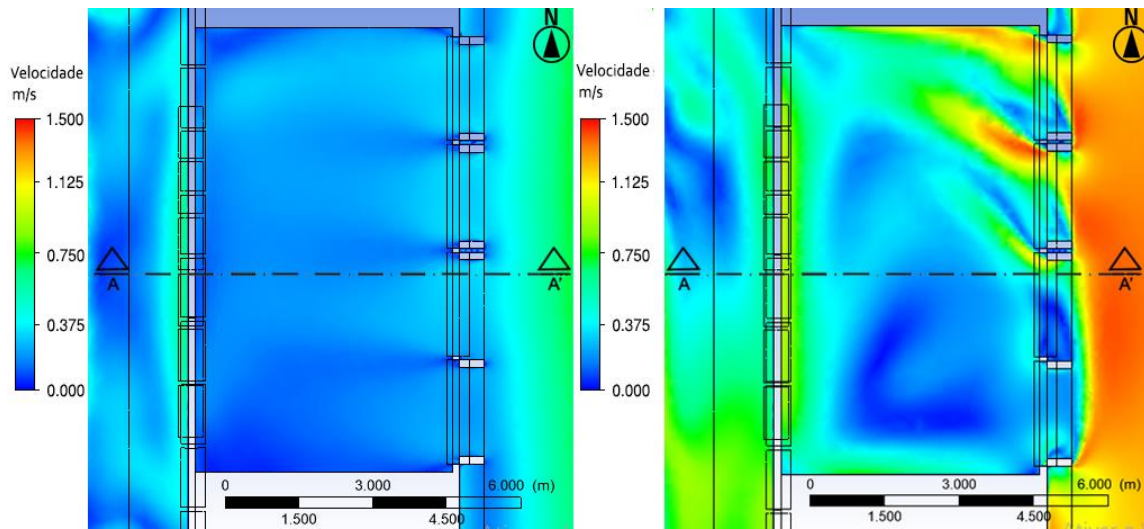
Através dos cortes (Figura 39) observa-se que, quando o vento é de origem leste, assim como identificado na situação anterior, até a altura de 1,00 m a velocidade é praticamente nula. Quando o vento é de origem sudeste, são identificados valores superiores a 0,750 m/s nas áreas próximas das esquadrias. Nessa segunda situação, o fluxo de ar que entra é de origem leste e descendente, enquanto que na região oeste ele é ascendente e sai em direção à abertura elevada.

Figura 37 - Velocidade do ar na sala de aula com ventilação cruzada e conectada a uma circulação fechada na orientação oeste, $\theta = 90^\circ$ e 135° , em planta baixa na altura de 0,95 m



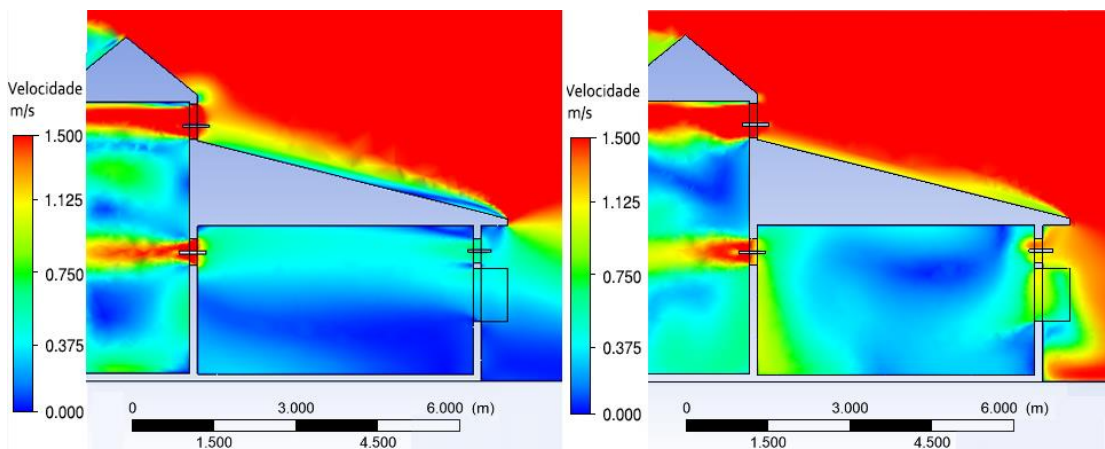
Fonte: Autora (2021)

Figura 38 - Velocidade do ar na sala de aula com ventilação cruzada e conectada a uma circulação fechada na orientação oeste, $\theta = 90^\circ$ e 135° , em planta baixa na altura de 1,5 m



Fonte: Autora (2021)

Figura 39 - Velocidade do ar na sala de aula com ventilação cruzada e conectada a uma circulação fechada na orientação oeste, em corte, $\theta = 90^\circ$ e 135°



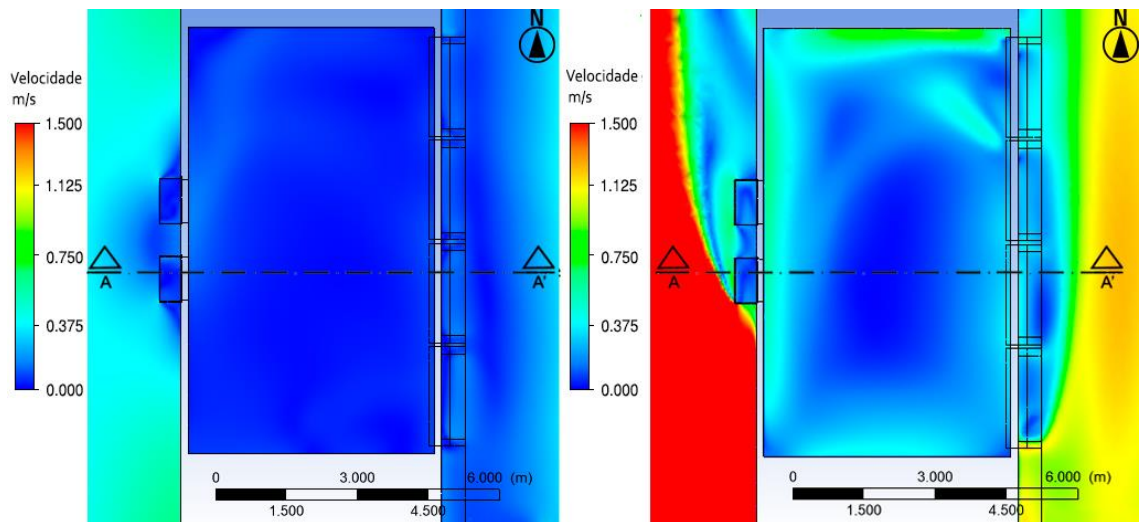
Fonte: Autora (2021).

A velocidade interna do ar no bloco com ventilação através de janelas de peitoril médio (altura de 1,00 m) na orientação leste e chaminés solares na orientação oeste (casos 7 e 8) é identificada nas Figuras 40, 41 e 42, para os ventos de origem leste e sudeste, em sequência. Quando o vento é de origem leste, a velocidade é inferior a 0,380 m/s em toda a sala de aula analisada, sendo os valores mais baixos identificados ao sul e na região central do ambiente. Já no caso com

vento de origem sudeste, as velocidades são mais altas, alcançando 0,800 m/s, na parte nordeste da sala de aula analisada.

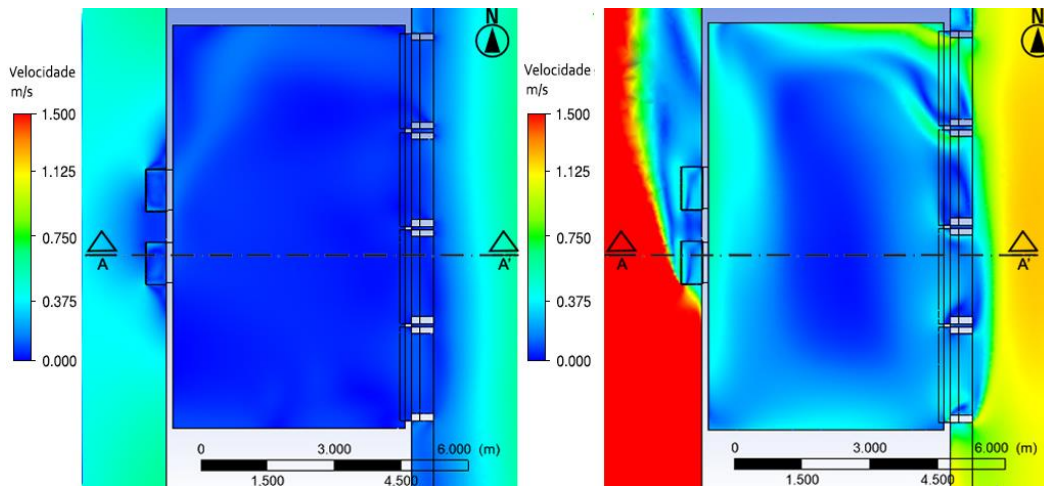
Através do corte transversal (Figura 42) verifica-se que, na primeira situação, os valores superiores estão na parte mais elevada da sala, nas proximidades da conexão da chaminé solar (alcançando 0,600 m/s) e das aberturas de peitoril elevado (atingindo 0,300 m/s). Na segunda situação, os valores superiores a 0,400 m/s acontecem majoritariamente perto da conexão da chaminé solar, onde ocorre a maior parte da saída do fluxo de ar. Em nenhuma das condições a velocidade na sala ultrapassou o valor máximo recomendado por Bayoumi (2021) e Daniels (2003), que equivale a 1,200 m/s.

Figura 40 - Velocidade do ar na sala de com janelas de peitoril médio na orientação leste e chaminés solares na orientação oeste, $\theta = 90^\circ$ e 135° , em planta baixa na altura de 0,95 m



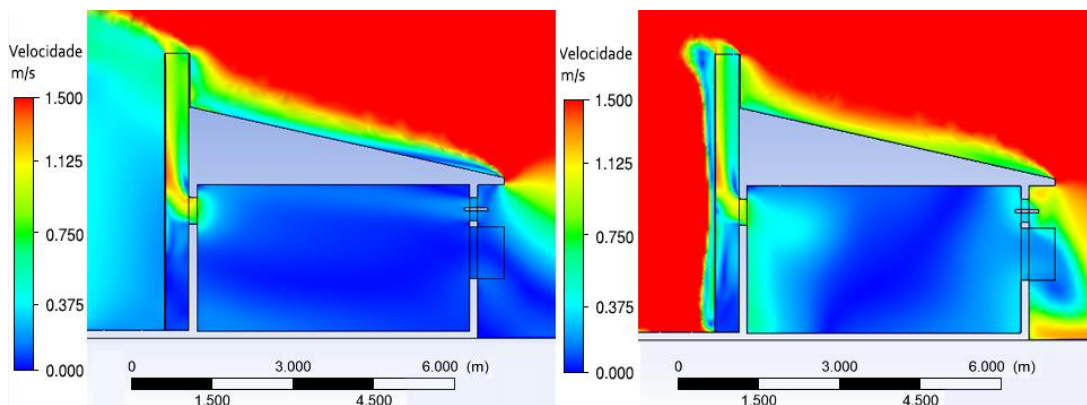
Fonte: Autora (2021)

Figura 41 - Velocidade do ar na sala de com janelas de peitoril médio na orientação leste e chaminés solares na orientação oeste, $\theta = 90^\circ$ e 135° , em planta baixa na altura de 1,5 m



Fonte: Autora (2021)

Figura 42 - Velocidade do ar na sala de com janelas de peitoril médio na orientação leste e chaminés solares na orientação oeste, em corte, $\theta = 90^\circ$ e 135°



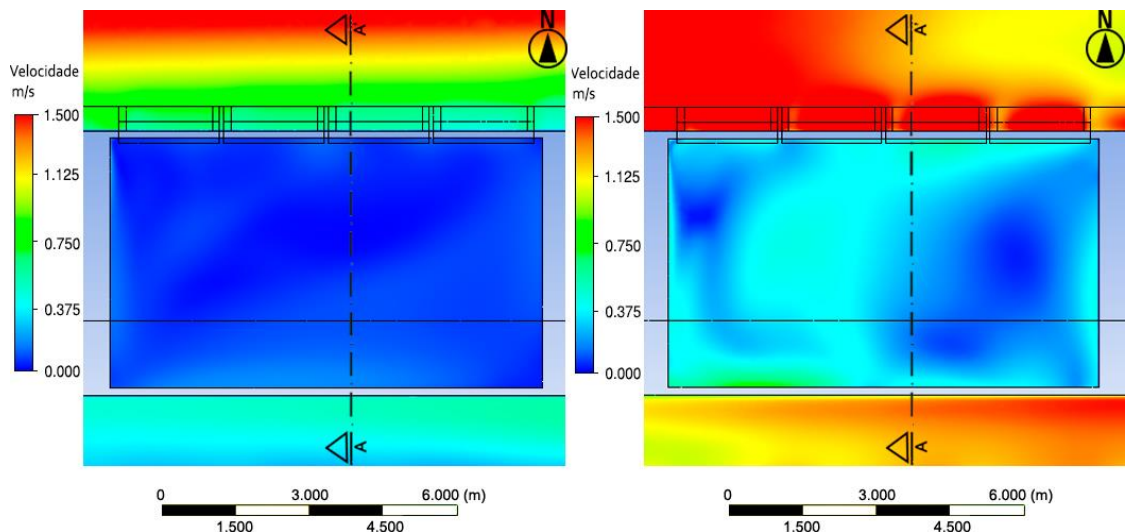
Fonte: Autora (2021)

Nas Figuras 43, 44 e 45 é apresentada a velocidade do ar nos casos 9 e 10, quando a sala de aula analisada possui ventilação unilateral através de janelas de orientação norte. Para o caso com vento de origem leste, conforme as plantas baixas, a velocidade é praticamente nula na maior parte do ambiente, sendo os maiores valores encontrados na área perto das janelas e na parte noroeste da sala, onde são verificadas pequenas regiões com 0,375 m/s na altura de 1,50 m. No caso

com vento de origem sudeste, a região central e a leste da sala analisada possuem os menores valores de velocidade, sendo que a maior parte do ambiente possui velocidade de 0,100 m/s a 0,350 m/s. Nas partes norte e oeste do ambiente há áreas pequenas em que a velocidade do ar é superior a 0,600 m/s, quando a altura é de 1,50 m.

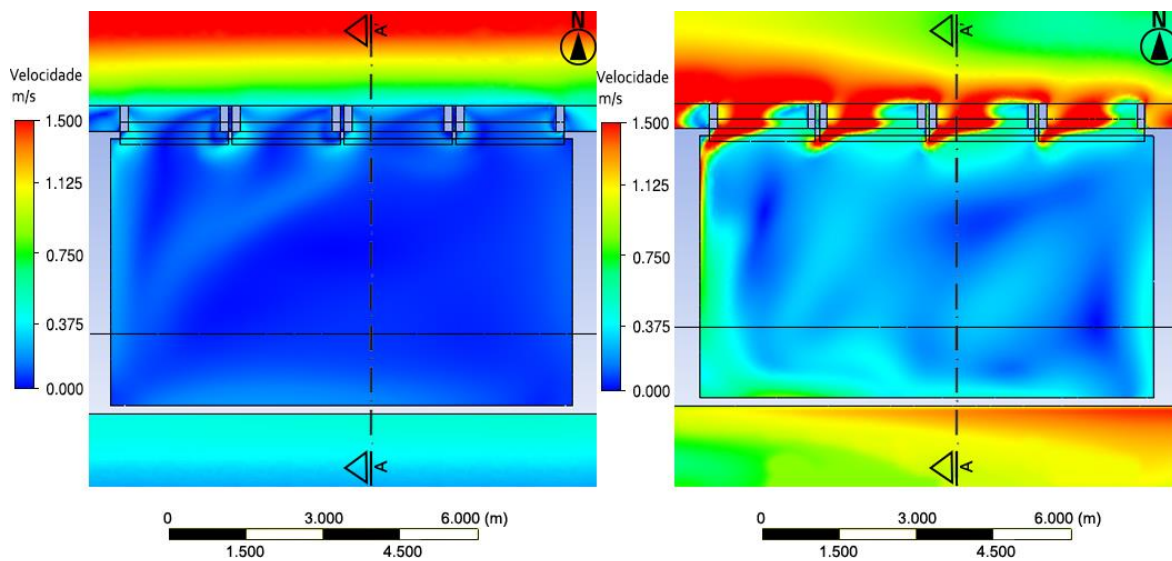
Através dos cortes é possível identificar que, quando o vento é de origem leste, a velocidade do ar aumenta na área próxima da esquadria e na região sul do espaço, sendo que as velocidades mais altas alcançam apenas 0,300 m/s. Quando o vento é de origem sudeste as velocidades mais altas (superiores a 0,700 m/s) são identificadas, principalmente, abaixo de 0,95 m de altura e acima de 2,10 m, sendo que a maior parte do fluxo de ar entra pelas aberturas inferiores, circula o ambiente, e sai pelas janelas elevadas. No caso de vento leste, percebe-se uma maior dificuldade no fluxo de ar em entrar pelas aberturas inferiores na região nordeste do ambiente, em virtude do fluxo de ar que tenta sair da sala de aula. O ar é eliminado através das aberturas elevadas.

Figura 43 - Velocidade do ar na sala de aula com ventilação unilateral norte, $\theta = 90^\circ$ e 135° , em planta baixa na altura de 0,95 m



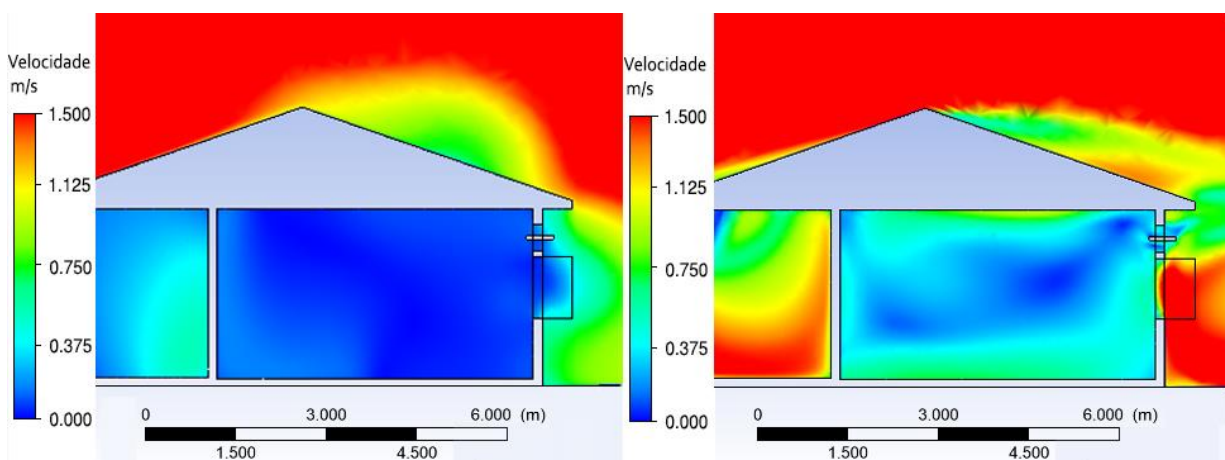
Fonte: Autora (2021).

Figura 44 - Velocidade do ar na sala de aula com ventilação unilateral norte, $\theta = 90^\circ$ e 135° , em planta baixa na altura de 1,50 m



Fonte: Autora (2021).

Figura 45 - Velocidade do ar na sala de aula com ventilação unilateral norte, em corte, $\theta = 90^\circ$ e 135°



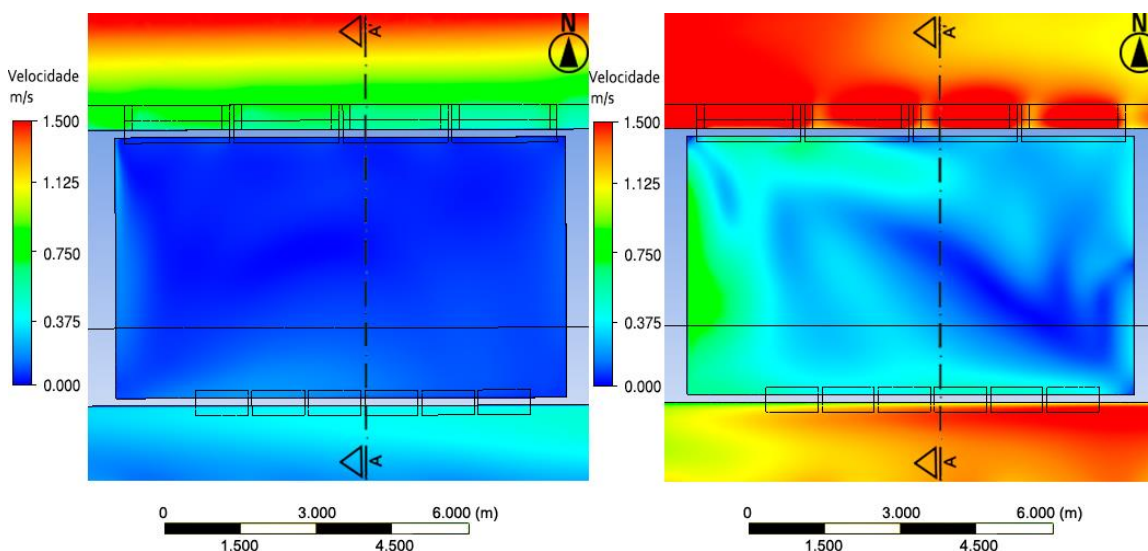
Fonte: Autora (2021)

A velocidade interna do ar no bloco com ventilação através de janelas de peitoril médio na orientação norte e janelas de peitoril elevado ao sul (casos 11 e 12) é identificada nas Figura 46, 47 e 48, para os ventos de origem leste e sudeste, em sequência. De acordo com as plantas baixas, para o vento de origem leste, a velocidade é inferior a 0,500 m/s, sendo os valores mais baixos identificados na regiões central, sul e leste do ambiente, principalmente na altura de 0,95 m. Já no

caso com vento de origem sudeste, na altura de 1,50 m aproximadamente 15% da sala de aula possui mais de 0,700 m/s, identificados, principalmente, na orientação noroeste do ambiente, conforme a Figura 47. Verifica-se que a alguns usuários situados na região central do ambiente poderão perceber maiores velocidades do ar do que no caso anterior, com valores superiores a 0,375 m/s.

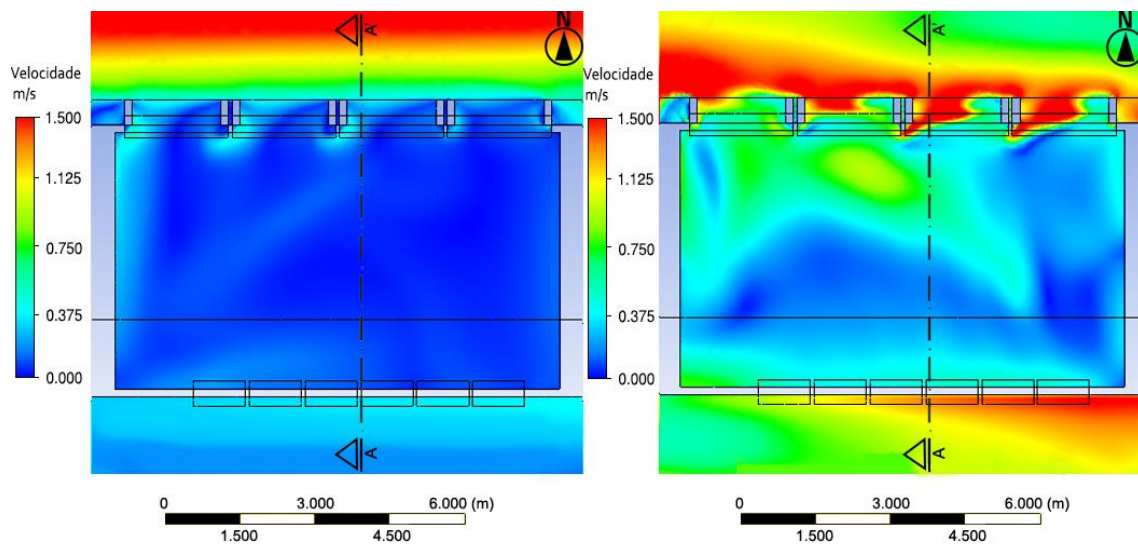
Através dos cortes é possível identificar que, quando o vento é de origem leste, as velocidades são levemente superiores nas proximidades das esquadrias. Quando o vento é de origem sudeste os valores mais altos estão nas regiões mais elevadas da sala de aula e na esquadria orientada para sul, onde ocorre entrada de ar no ambiente.

Figura 46 - Velocidade do ar na sala de aula com ventilação cruzada norte-sul, $\theta = 90^\circ$ e 135° , em planta baixa na altura de 0,95 m



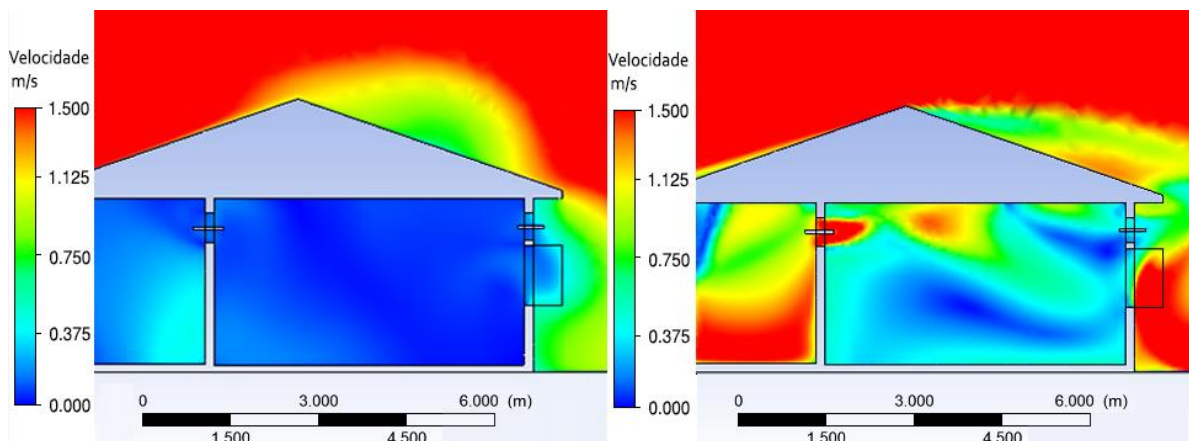
Fonte: Autora (2021)

Figura 47 - Velocidade do ar na sala de aula com ventilação cruzada norte-sul, $\theta = 90^\circ$ e 135° , em planta baixa na altura de 1,50 m



Fonte: Autora (2021)

Figura 48 - Velocidade do ar na sala de aula com ventilação cruzada norte-sul, em corte, $\theta = 90^\circ$ e 135°

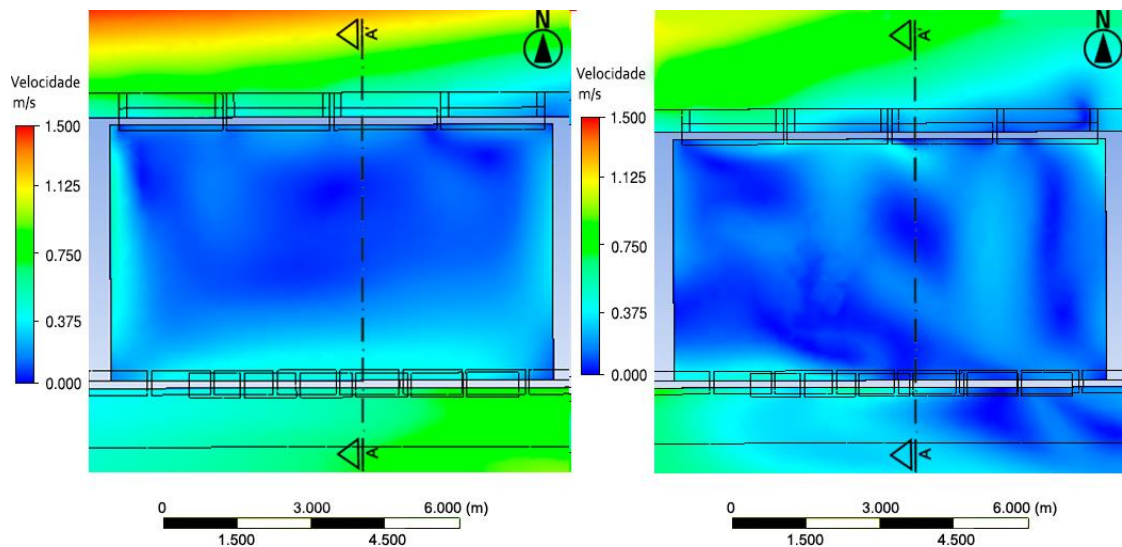


Fonte: Autora (2021)

Nas Figuras 49, 50 e 51 é apresentada a velocidade do ar na sala de aula analisada quando o bloco possui salas de aula conectadas a um corredor central com lanternim (casos 13 e 14), sendo que o edifício possui janelas nas orientações norte e sul. Conforme as plantas baixas, quando o vento é de origem leste na sala de aula, a maiores velocidades do ar (superiores a 0,300 m/s) estão nas

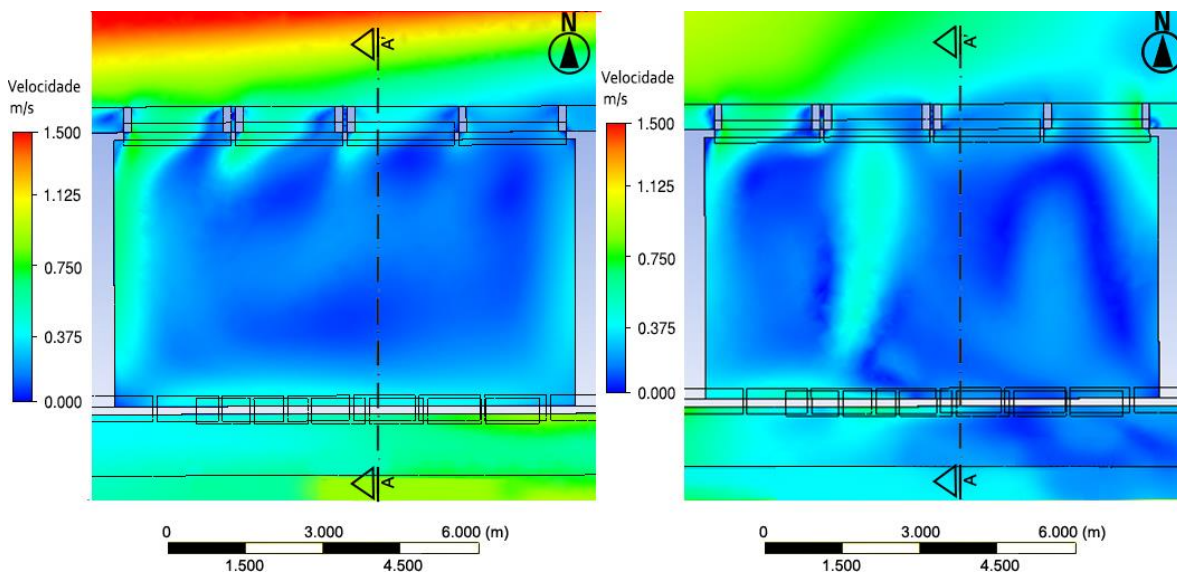
proximidades das paredes e das aberturas e, assim como visto nas demais situações, os menores valores estão principalmente na área central da sala. Já quando o vento é de origem sudeste, para a altura de 1,50 m, as maiores velocidades estão presentes, também, na região central do ambiente, mesmo que esses valores sejam baixos (inferiores a 0,600 m/s). Através dos cortes, observa-se que na primeira situação as maiores velocidades estão concentradas nas proximidades da janela elevada da orientação sul, onde há um grande fluxo de saída de ar. Quando o vento é de origem sudeste os valores mais altos (superiores a 0,750 m/s) ficam na área mais elevada da sala. Nessa área, há um grande fluxo de ar que entra através das janelas de orientação sul e sai através das janelas elevadas de orientação norte.

Figura 49 - Velocidade do ar na sala de aula com ventilação cruzada, conectada a uma circulação fechada na orientação sul, $\theta = 90^\circ$ e 135° , em planta baixa na altura de 0,95 m



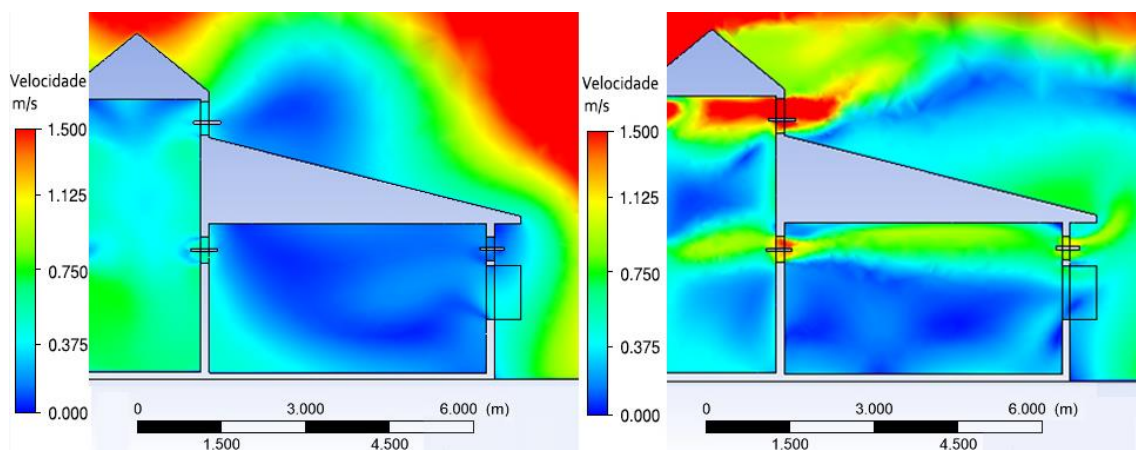
Fonte: Autora (2021)

Figura 50 - Velocidade do ar na sala de aula com ventilação cruzada, conectada a uma circulação fechada na orientação sul, $\theta = 90^\circ$ e 135° , em planta baixa na altura de 1,50 m



Fonte: Autora (2021)

Figura 51 - Velocidade do ar na sala de aula conectada a uma circulação fechada na orientação sul, em corte, $\theta = 90^\circ$ e 135°



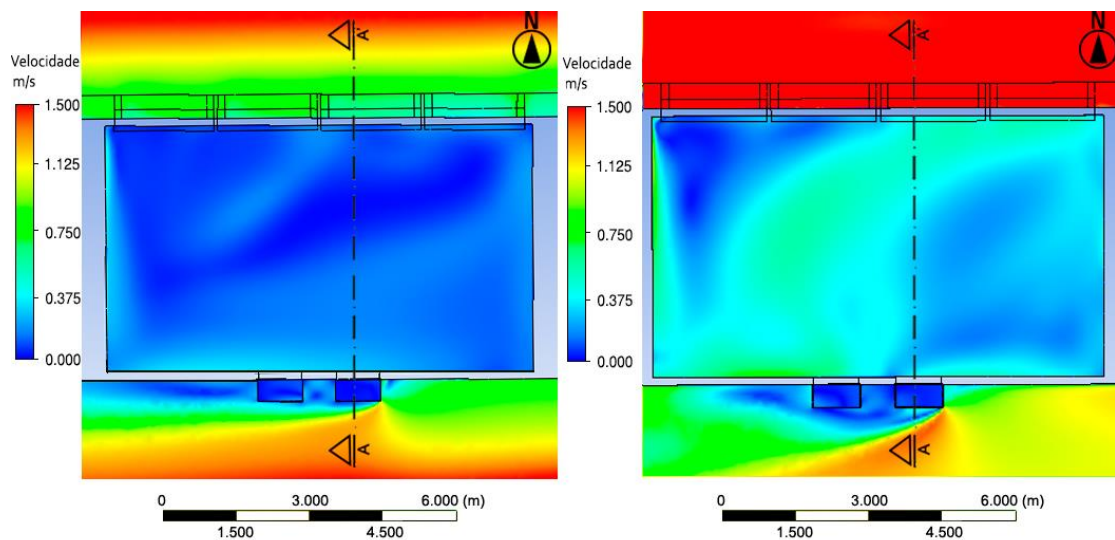
Fonte: Autora (2021)

Através das Figuras 52, 53 e 54 é apresentada a velocidade do ar na sala de aula analisada quando o bloco possui chaminés solares na orientação sul e ventilação através de janelas de peitoril médio na orientação norte (casos 15 e 16). Quando o vento é de origem leste na sala, a maiores velocidades do ar estão na região noroeste do ambiente, atingindo 0,400 m/s. Quando o vento é de origem

sudeste, na altura de 1,50 (Figura 53) a velocidade do ar no ambiente alcança 1,400 m/s perto das esquadrias da orientação norte, onde há entrada de ar. De acordo com os cortes (Figura 54), na primeira situação as maiores velocidades são identificadas no interior da chaminé solar, onde há saída de ventilação. A entrada do ar acontece na parte inferior da esquadria de peitoril médio.

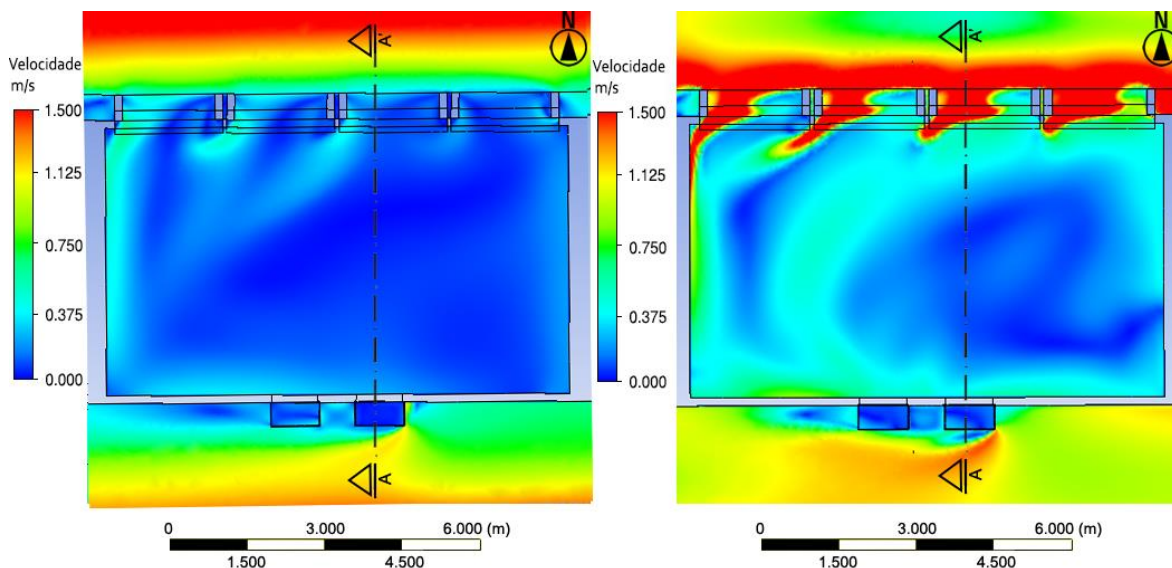
Conforme os cortes, a velocidade do ar na sala de aula é menor do que 0,400 m/s. Na segunda situação, as maiores velocidade no ambiente ocorrem nas áreas mais altas da sala e nas proximidades da janela. Nas regiões altas do ambiente há um fluxo de saída de ar em direção à chaminé solar. Nas proximidades da janela de orientação norte há um menor fluxo de saída de ar, que ocorre, principalmente, em direção ao sistema superior da janela. Na altura de respiração humana de 1,50 m é identificada menor velocidade do ar do que na altura de respiração das crianças (0,95 m). Entretanto, os valores levantados são inferiores a 0,800 m/s na região ocupada pelos alunos.

Figura 52 - Velocidade do ar na sala de aula com janelas de peitoril médio na orientação norte e chaminés solares na orientação sul, $\theta = 90^\circ$ e 135° , em planta baixa na altura de 0,95 m



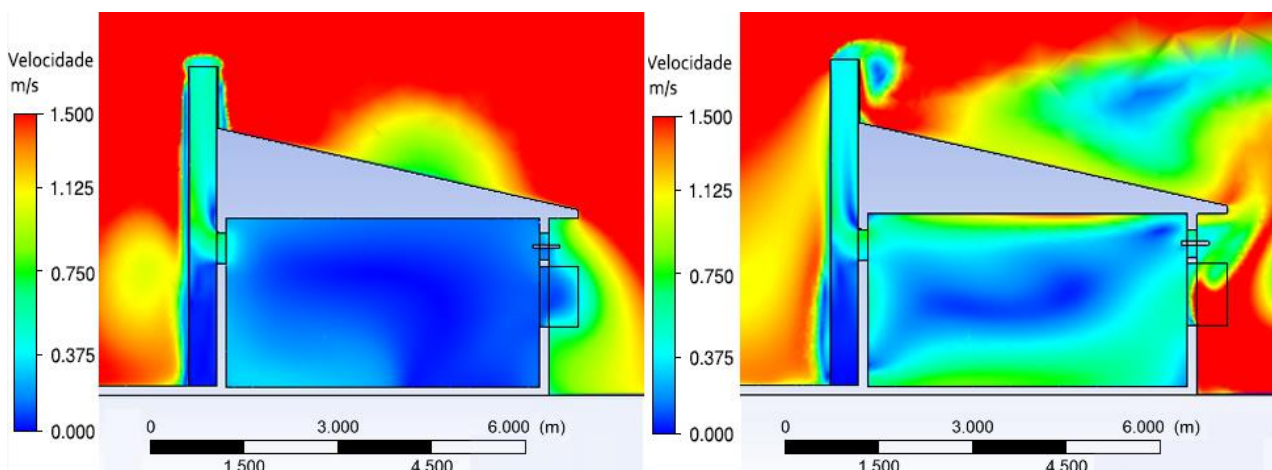
Fonte: Autora (2021)

Figura 53 - Velocidade do ar na sala de aula com janelas de peitoril médio na orientação norte e chaminés solares na orientação sul, $\theta = 90^\circ$ e 135° , em planta baixa na altura de 1,50 m



Fonte: Autora (2021)

Figura 54 - Velocidade do ar na sala de aula com janelas de peitoril médio na orientação norte e chaminés solares na orientação sul, em corte, $\theta = 90^\circ$ e 135°



Fonte: Autora (2021)

Através da Tabela 9 é apresentado um comparativo geral da velocidade do ar. Foram consideradas a altura de respiração humana, proposta por Moraes (2013), e a altura de respiração das crianças sentadas, conforme a faixa etária de Brasil (2006) e as medidas correspondentes propostas Dreyfuss (2005).

Tabela 10 - Velocidade média do ar para cada caso na sala de aula analisada

Casos	Velocidade média do ar			
	Altura de respiração humana: 1,5 m		Altura de respiração de crianças sentadas: 0,95 m	
	Vento leste	Vento sudeste	Vento leste	Vento sudeste
1 e 2	0,028 m/s	0,125 m/s	0,032 m/s	0,155 m/s
3 e 4	0,154 m/s	0,226 m/s	0,083 m/s	0,201 m/s
5 e 6	0,198 m/s	0,415 m/s	0,104 m/s	0,305 m/s
7 e 8	0,068 m/s	0,176 m/s	0,050 m/s	0,167 m/s
9 e 10	0,091 m/s	0,225 m/s	0,041 m/s	0,181 m/s
11 e 12	0,098 m/s	0,311 m/s	0,057 m/s	0,272 m/s
13 e 14	0,347 m/s	0,185 m/s	0,167 m/s	0,155 m/s
15 e 16	0,130 m/s	0,210 m/s	0,113 m/s	0,402 m/s

Fonte: Autora (2021)

Observa-se que os casos 5 e 6 (ventilação cruzada leste-oeste, com conexão a uma circulação ventilada por lanternim), 13 e 14 (ventilação cruzada norte-sul, com conexão a uma circulação ventilada por lanternim) e 15 e 16 (janelas de peitoril médio na orientação norte e duas chaminés solares na orientação sul) apresentaram as maiores velocidades nas alturas de respiração. De maneira geral, foram encontrados vários valores inferiores a 0,100 m/s quando o vento foi de origem leste. Foi evidente a tendência à maior velocidade do ar quando o ângulo do vento foi oblíquo às janelas, o que pode ser comparado nos casos de 1 a 8, para o vento leste (90°) e sudeste (135°). Nesse contexto, segundo a pesquisa de Bayoumi (2021) em salas de aula com ventilação natural, quando a velocidade do ar é muito baixa, como nos casos inferiores a 0,05 m/s, nenhuma mudança significativa é observada na sensação térmica dos usuários da sala de aula. A partir de 0,100 m/s a velocidade favorece de maneira mais notável a sensação térmica no ambiente. Ainda conforme o autor, melhores resultados nesse quesito foram obtidos quando a velocidade do ar foi moderada (0,860 m/s) do que quando ela foi mais alta (1,640 m/s).

Salienta-se que os valores aceitáveis de velocidade do ar têm sido constantemente tema de estudo científico, sendo que as velocidades recomendadas para ambientes de atividades sedentárias variam, conforme diferentes autores, de

0,500 e 2,500 m/s (LAMBERTS, 2011). Além de situações como o vôo de papéis, esses valores baseiam-se, também, na satisfação dos usuários com a qualidade do ar e com o conforto térmico. Inúmeras pesquisas apontam que, em temperaturas altas, a movimentação do ar é desejada. Dentre esses autores estão Ding, Zhang e Bluysen (2021), Oliveira e Carlo (2021) e ASHRAE (2017b). Portanto, nos casos de maior velocidade da Tabela 9, a probabilidade é de menor desconforto nos dias quentes, especialmente para a ventilação térmica. Nos casos de ventilação unilateral, o desconforto nas épocas de altas temperaturas tende a ser maior, visto que as velocidades foram, majoritariamente, inferiores a 0,200 m/s.

De maneira geral, há pouca diferença entre os casos estudados. Os que se destacam com maiores velocidades de ar são os em que há ventilação cruzada e quando houve janelas de peitoril de 1,00 m na orientação norte e duas chaminés solares na orientação sul. A velocidade média máxima atingida ocorreu nos casos de ventilação cruzada leste-oeste, com conexão a uma circulação ventilada por lanternim (5 e 6), para a orientação sudeste, alcançando 0,415 m/s na altura de 1,50 m. A distribuição da velocidade do ar ficou melhor quando o vento atingiu as aberturas de maneira oblíqua. Também foi observada uma distribuição mais favorável quando houve janelas em mais de uma parede.

4.2. PERCENTUAL DE HORAS OCUPADAS EM CONFORTO TÉRMICO (PHOCT)

Através do EnergyPlus foi simulada a temperatura operativa (°C) horária para cada caso. Para a definição do PHOCT (Tabela 10), as temperaturas médias mensais externas de bulbo seco (°C) foram inseridas no modelo de conforto adaptativo de ASHRAE 55/2017 para determinar o intervalo de temperatura de conforto. O PHOCT é apresentado considerando um limite de aceitabilidade de 80%.

Tabela 11 - PHOCT da sala de aula analisada considerando os 16 casos simulados

Nº do caso	PHOCT
1	80,07%
2	72,39%
3	73,93%
4	70,42%
5	74,07%
6	71,57%
7	78,19%
8	71,63%
9	79,19%
10	71,00%
11	74,57%
12	70,63%
13	76,94%
14	73,82%
15	77,76%
16	72,01%

Fonte: Autora (2021)

Conforme os resultados apresentados na Tabela 10, a estratégia 1 foi a que apresentou PHOCT mais elevado (80,07%). A mesma possui ventilação unilateral térmica, na orientação leste. As estratégias com melhores resultados foram as em que houve apenas ventilação térmica. A situação menos satisfatória foi identificada no caso 4 (70,42%), onde há ventilação cruzada nas orientações leste e oeste, com ventilação permanente em duas aberturas elevadas da orientação leste. Em relação ao PHOCT, o caso 14 é o mais favorável dentre os que detêm ventilação higiênica. Nele, a sala de aula analisada possui ventilação cruzada (norte-sul) conectada a um corredor ventilado por lanternim. A ventilação higiênica ocorre no sistema superior de duas janelas situadas na parede norte, as demais janelas possuem ventilação térmica.

Observa-se que o PHOCT está relacionado à presença de ventilação higiênica e à área efetiva de ventilação natural na sala de aula. Os casos com maiores áreas de abertura para ventilação (com janelas voltadas ao ambiente

externo) e ventilação higiênica evidenciaram maior tendência ao desconforto térmico. Isso se deve, principalmente, ao desconforto por frio, que ocorre de maio até agosto. Os meses integralmente letivos em que houve maior PHOCT foram março, abril e outubro.

Quanto à relação do PHOCT com a velocidade do ar, nos casos com PHOCT mais elevado (1, 9, 7 e 15, em sequência) a maior parte da sala de aula, tanto quando o vento é de origem leste como de origem sudeste, possui velocidade de ar entre 0 e 0,500 m/s, sendo que nos casos 1 e 9 a média é inferior a 0,300 m/s nas alturas de respiração investigadas. Nesse âmbito cabe destacar que resultados de uma análise no banco de dados do RP-884 (ASHRAE, 2010) evidenciam que os usuários tendem a indicar preferência por maior movimento do ar em ambientes onde a ventilação natural é a principal estratégia de condicionamento do ar, sendo que a velocidade média identificada nesse banco de dados foi de 0,300 m/s (ZHANG *et al.*, 2007). Entretanto, em climas com temperaturas baixas ou moderadas, o mesmo movimento do ar que é considerado como extremamente bem-vindo pelos usuários de climas quentes pode ser tornar termicamente desconfortável (CANDIDO *et al.*, 2010).

Na Tabela 11 são apresentadas as percentagens de horas em desconforto por frio e por calor em cada um dos casos, visto as estratégias de ventilação natural adotadas.

Tabela 12 - Percentagens de horas ocupadas em desconforto por frio e calor

(Continua)

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%

Tabela 11 - Percentagens de horas ocupadas em desconforto por frio e calor

(Conclusão)

Nº do caso	Percentagem de horas ocupadas desconfortável	Percentagem de horas ocupadas desconfortável	Percentagem total de horas ocupadas em desconforto
	por frio	por calor	
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%

Fonte: Autora (2021)

O caso com menor quantidade de horas anuais em desconforto por frio foi o 1, com 250h (15,62% das horas ocupadas). O caso com maior quantidade de horas em desconforto por frio foi o caso 10, que totalizou 404h (25,25% das horas ocupadas). O caso 4, que é o menos confortável, somou 394h em desconforto por frio (24,64% das horas ocupadas) e 79 horas em desconforto por calor (4,94% das horas ocupadas). O desconforto por calor foi inferior a 6% em todos casos, sendo a quantidade máxima de desconforto equivalente a 81h anuais (5,06% das horas ocupadas), identificada no caso 6. A estratégia do caso 13 apresentou o menor valor de desconforto anual por calor, somando 42 horas (2,62% das horas ocupadas), seguida da estratégia do caso 14 (2,81% das horas ocupadas).

Na pesquisa de Maciel (2016) são desenvolvidas simulações de ventilação natural de uma sala de aula escolar de 89,25 m² através do *software* EnergyPlus (versão 8.0) em Viçosa (MG), cidade da ZB3. Nesse trabalho, quando houve o uso de 3 elementos de brise-chaminé-solar, o desconforto anual por frio teve 40,05% quando eles foram inseridos na fachada oeste e 45,17% quando situados na fachada sul. Através da comparação de diferentes números de dispositivos de brise-chaminé-solar e distintas orientações solares, as estratégias passivas simuladas por Maciel (2016) tiveram menos de 10% de diferença de conforto térmico. Além disso, o

desconforto por calor foi menor do que 1% em todas as situações. Conforme a autora, o brise-chaminé-solar, ao aumentar a taxa de ventilação do ambiente, reduziu a temperatura da sala de aula. Consequentemente, considerando que no ambiente analisado o desconforto por calor era baixo sem a introdução desses elementos, houve um aumento das horas em desconforto por frio.

Na pesquisa de Ferreira (2019), foram realizadas simulações termoenergéticas através do *software* EnergyPlus (versão 8.7), com auxílio do plugin Euclid (0.9.3). Foram simuladas diferentes estratégias de climatização natural em uma edificação de salas de aula do Campus da Universidade Federal de Santa Maria (Cachoeira do Sul). As estratégias envolvem ventilação cruzada junto de diferentes dispositivos e técnicas, que englobam, por exemplo, estantes de luz, brises solares, parede de trombe, dutos subterrâneos e chaminé solar. Os resultados comparativos mostraram que as diferenças de conforto térmico entre as estratégias, semelhante ao identificado na presente pesquisa, foram de menos de 12%.

Oliveira, Cunha e Leitzke (2020) calcularam o POC (Percentual de horas Ocupadas em Conforto) em salas de aula naturalmente ventiladas situadas na Zona Bioclimática 2. Nas 10 escolas avaliadas, a classificação de eficiência energética variou de A a C em relação ao POC. Conforme os autores, em todos os casos, foram encontradas maiores diferenças nos níveis de desconforto por frio, o que vai ao encontro dos dados climáticos representados pelo SWERA. Os autores também relacionam os resultados do POC com o sistema construtivo das edificações naturalmente ventiladas: foi verificado um fraco desempenho dos projetos com paredes de alta transmitância térmica, como painéis de concreto maciço de pouca espessura. Porém, nas construções de alvenaria os resultados obtidos foram mais satisfatórios (OLIVEIRA; CUNHA; LEITZKE, 2020)

É possível, também, comparar os resultados desta pesquisa com os da publicação de Rackes *et al.* (2015), baseados em simulações em uma escola rural naturalmente ventilada, inserida nas Zonas Bioclimáticas 1, 3 e 8. Os autores, por sua vez, consideraram a ventilação cruzada no objeto simulado, que adotou dois parâmetros construtivos distintos. As horas em desconforto por frio no modelo utilizado nesta pesquisa foram consideravelmente mais altas em relação ao parâmetro 1 utilizado por Rackes *et al.* (2015), que tem esse nome por possuir

sistemas construtivos onde foram previstos impactos positivos sobre a temperatura interna. Em relação ao parâmetro 2 utilizado por Rackes *et al.* (2015), que é assim denominado por adotar condições e sistemas construtivos mais simples (com ausência de ventilador, maior absorvância solar das paredes, menor massa térmica das vedações e menor porcentagem de abertura das janelas), as horas em desconforto por calor foram maiores para todas as Zonas bioclimáticas quando comparadas ao presente estudo, alcançado 14% na ZB1, 22% na ZB3 e 64% na ZB8. Já as horas em desconforto por frio foram de no máximo 6% no trabalho dos autores.

Mesmo sabendo-se que a diferença entre os resultados de Rackes *et al.* (2015) em relação a esta pesquisa se deu pelo fato de os autores não analisarem a mesma cidade, outros aspectos também devem ser considerados, como: a adoção de arquivos climáticos do tipo *.TRY; *softwares* utilizados (Energyplus versão 8.3 e Autodesk Ecotect Analysis 2011); utilização, na sala de aula, de equipamentos como computadores; maior densidade de iluminação na sala (13,0 W/m); menor número de usuários no ambiente (27 alunos); período de ocupação da sala de aula (7h às 18h); haver 4 janelas de peitoril médio na sala de aula simulada, com menor área de abertura para ventilação, e não ser identificado o uso de ventilação higiênica. Todavia, em semelhança ao presente estudo, na pesquisa de Rackes *et al.* (2015) o parâmetro 1 teve 30% a mais de porcentagem de abertura das esquadrias em relação ao 2, o que colaborou para ocasionar maior desconforto por frio nas Zonas Bioclimáticas 1 e 3.

Neste trabalho, quanto aos casos em que houve uso de chaminé solar (7,8,15 e 16), é possível comparar os resultados aos apresentados na publicação de Oliveira e Carlo (2021), que também utilizaram esses dispositivos em um modelo de sala de aula e um de escritório. Ambos os ambientes possuem a mesma geometria (sendo a área de 49,7m²), entretanto, o primeiro detém alta carga térmica (103,0 w/m²) e o segundo baixa (59,6 w/m²). Em tal pesquisa, foi investigada a inserção dos modelos nas 8 zonas bioclimáticas brasileiras. Foram avaliados parâmetros como altura, quantidade de dispositivos por ambiente e orientação solar, tendo em vista viabilizar renovação de ar e mais horas confortáveis. Como critério de avaliação foi utilizado o intervalo de conforto adaptativo da ASHRAE 55 para a definição do POC. Nas

simulações da Zona Bioclimática 2, os autores consideraram a ventilação unilateral, com uso de 8 brises-chaminé-solar orientados para norte, de dimensões internas de 0,90 m por 0,20 m e 5,80 m de altura total. Quanto ao POC, para a cidade de Santa Maria (ZB2), os resultados foram de 79% para o ambiente de alta carga térmica e 73% para o de baixa carga térmica.

Em relação ao percentual de horas em desconforto por frio e calor, a publicação de Oliveira e Carlo (2021) evidenciou, em Santa Maria (RS), desconforto por calor de 21% e por frio 1% para altas cargas térmicas e desconforto por calor de 16% e por frio 21% para baixas cargas térmicas.

É possível verificar certa distinção dos resultados de desconforto por frio na sala de aula da pesquisa de Oliveira e Carlo (2021) em relação ao presente estudo. Observa-se que isso se deve, dentre outros aspectos, à geometria da sala, que é de 7,05 m x 7,05 m, 49,7 m², com pé-direito de 2,90 m; ao fato de o ambiente não ter contato com o solo; à menor área de abertura para janelas (10,3 m²) no modelo dos autores; ao uso de ventilação unilateral; ao horário de ocupação (8h até 18h); ao uso de equipamentos como computador e projetor; aos materiais do modelo e propriedades térmicas; além de não ser identificado o uso da ventilação higiênica.

Retomando a discussão dos resultados para o estudo de salas de aula padrão FNDE, em Santa Maria, RS, para a semana letiva mais fria, conforme o arquivo climático, de 21 a 25 de agosto, e a mais quente de 20 a 24 de novembro, os percentuais de desconforto por frio e por calor são apresentados para esses dias críticos, na Tabela 12. Para determinar os percentuais, foram consideradas 45h de aula para a semana mais fria e mais quente, cada uma.

Tabela 13 - Percentagens de horas ocupadas em desconforto por frio e calor para a semana mais fria e a mais quente

(Continua)

Nº do caso	Percentagem de horas ocupadas desconfortável por frio (semana letiva mais fria)	Percentagem de horas ocupadas desconfortável por calor (semana letiva mais quente)
1	66,67%	42,22%
2	82,22%	44,44%
3	77,78%	42,22%

Tabela 12 - Percentagens de horas ocupadas em desconforto por frio e calor para a semana mais fria e a mais quente

(Conclusão)

Nº do caso	Percentagem de horas ocupadas desconfortável por frio (semana letiva mais fria)	Percentagem de horas ocupadas desconfortável por calor (semana letiva mais quente)
4	84,44%	42,22%
5	80,00%	37,78%
6	82,22%	44,44%
7	68,89%	42,22%
8	84,44%	44,44%
9	68,89%	26,67%
10	80,00%	28,89%
11	75,55%	26,67%
12	82,22%	28,89%
13	73,33%	20,00%
14	77,78%	22,22%
15	71,11%	26,67%
16	82,22%	26,67%

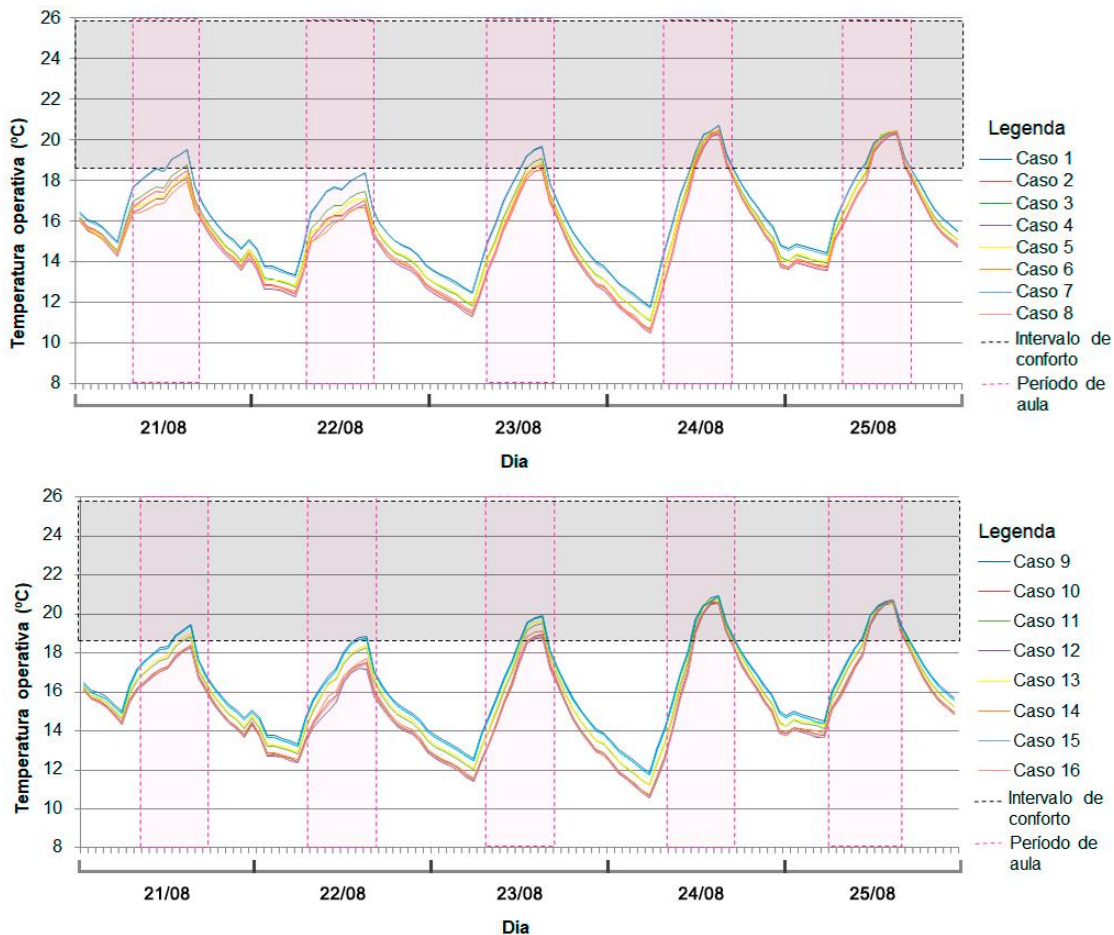
Fonte: Autora (2021).

Através dos dados apresentados na Tabela 12, observa-se que o caso mais favorável, considerando as duas semanas extremas, são 13 e 9, sendo que ambos possuem apenas ventilação térmica, onde o primeiro possui ventilação cruzada norte-sul com conexão a uma circulação ventilada por lanternim o segundo ventilação unilateral norte. O caso 13 se destacou nesta análise, principalmente, em virtude do baixo índice de desconforto por calor em relação aos demais casos. As estratégias 13 e 9 apresentam o PHOCT (anual) superior a 75%, conforme a Tabela 10. As piores situações, tendo em vista essas semanas críticas, ocorrem nos casos 8 e 4, em sequência, principalmente em virtude do alto desconforto na semana mais fria. O caso 8 detém ventilação com janelas de peitoril médio na orientação leste e duas chaminés solares na orientação oeste, e o caso 4 possui ventilação cruzada leste-oeste. Ambos possuem ventilação higiênica no sistema superior de duas janelas de orientação leste. Observa-se que esses casos apresentaram um PHOCT inferior a 72%. Os valores da Tabela 12 também mostram que as estratégias de

orientação norte-sul se sobressaíram, com menos valores de desconforto especialmente na semana letiva mais quente.

As variações de temperatura na semana letiva mais fria e na mais quente do ano são observadas nas Figuras 55 e 56, tendo em vista o intervalo de temperatura de conforto térmico, conforme o Modelo Adaptativo da ASHRAE 55/2017. Apesar de ser analisada uma situação extrema, na semana mais fria, verifica-se que as horas ocupadas estão majoritariamente em desconforto. Os melhores resultados são identificados próximo às 17h (final do período de aula), nos casos 1, 7 e 9. O caso 1 apresenta 15 horas em conforto térmico, e o 7 e o 9 possuem 14 horas cada.

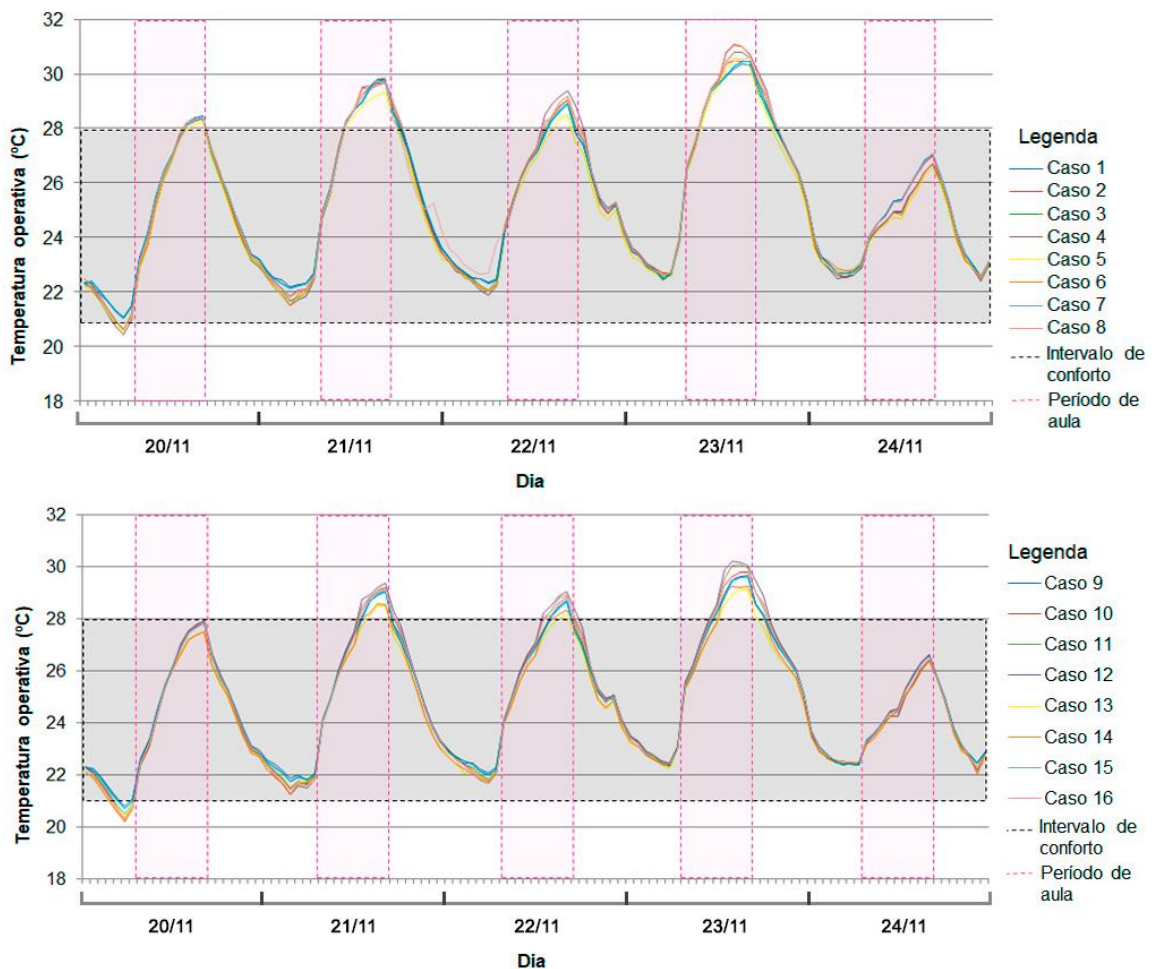
Figura 55 - Temperatura operativa na sala analisada ao longo da semana letiva mais fria, para os casos de orientação leste-oeste e norte-sul, em sequência



Fonte: Autora (2021)

Na semana letiva mais quente (conforme a Figura 56), a maior parte das horas ocupadas está dentro do intervalo de conforto térmico. Os resultados mais favoráveis são identificados até as 11 horas (considerando o período de aula). Os casos 13 e 14 foram os mais favoráveis no município, o primeiro com 36 horas em conforto térmico e o segundo com 35 horas. Ambos possuem ventilação cruzada (norte-sul) com conexão da sala de aula a uma circulação ventilada por lanternim, sendo que na estratégia 13 há apenas ventilação térmica e na 14 há uso de ventilação térmica e higiênica.

Figura 56 - Temperatura operativa na sala analisada ao longo da semana letiva mais quente, para os casos de orientação leste-oeste e norte-sul, em sequência



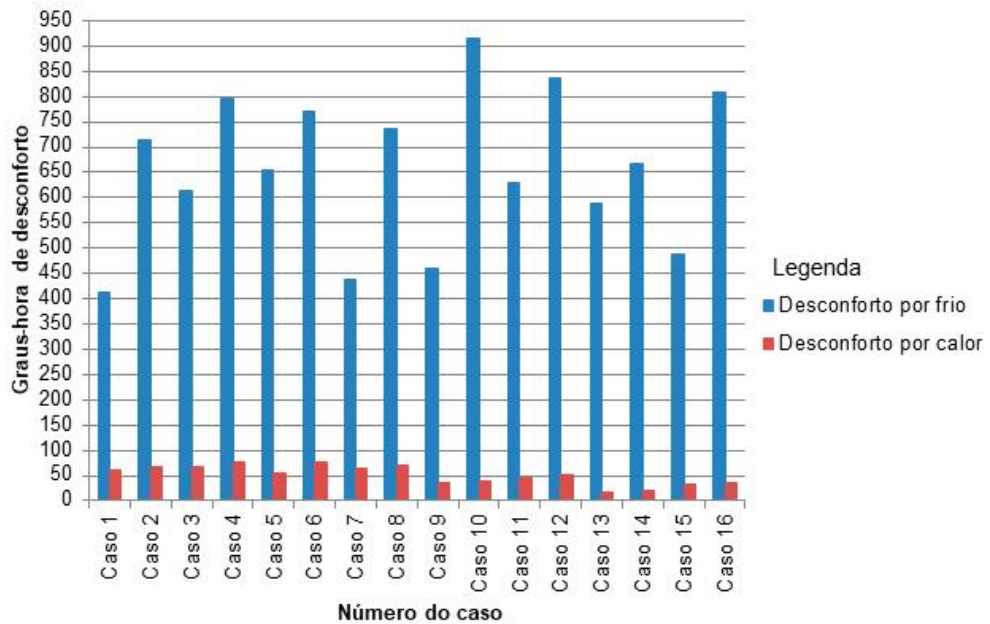
Fonte: Autora (2021)

Em resumo, os resultados mostram que os casos com ventilação unilateral térmica evidenciaram resultados mais satisfatórios de conforto térmico, tanto anuais como nas semanas letivas mais quente e mais fria. O caso em que houve janela de peitoril médio na orientação leste e uso de suas chaminés solares na orientação oeste, sendo a ventilação térmica em todas as janelas, também apresentou valores de conforto favoráveis. A maior diferença de POCHT foi de 9,65%, sendo identificadas situações críticas apenas na semana letiva mais fria, onde o desconforto por frio no modelo foi superior a 60% nas diferentes estratégias.

Em relação ao desconforto térmico sentido na semana letiva mais fria, também deve-se considerar que a roupa promove isolamento térmico por viabilizar resistência à transferência de calor entre o corpo e o ambiente. A magnitude da resistência térmica da roupa depende de seu tecido e do modelo de fabricação (RUAS, 1999). A variação do isolamento térmico varia consideravelmente conforme a roupa do usuário: enquanto que uma camiseta sem manga composta de poliéster e algodão oferece 0,13 clo (massa = 117g) um casaco de poliéster e algodão, acima do joelho, com capuz, proporciona 0,79 clo (massa = 1440g) (ISO, 2007). Para tanto, o desconforto térmico pode ser parcialmente atenuado através da vestimenta.

4.3. GRAUS-HORA PARA AQUECIMENTO E RESFRIAMENTO

As temperaturas operativas horárias de cada caso também foram analisadas através da quantificação de GHA de desconforto. Foram considerados os limites de aceitabilidade de 80% do modelo de conforto adaptativo da ASHRAE 55/2017. Os resultados anuais obtidos são apresentados através do gráfico da Figura 57.

Figura 57 - GHA para cada caso simulado

Fonte: Autora (2021)

Verifica-se que o caso 1, que possui ventilação térmica unilateral leste, foi o que apresentou menor GHA de desconforto por frio, com um valor de 408,37. Esse caso também somou a menor quantidade total de GHA de desconforto, com 468,67. O caso 13, onde a sala de aula possui ventilação térmica cruzada norte-sul com conexão a uma circulação ventilada por lanternim, quantificou o menor valor de GHA de desconforto por calor, equivalente a 42,00. Na maioria dos casos, quando houve apenas ventilação térmica o desconforto por calor foi levemente inferior do que quando houve uso de ventilação térmica e de higiênica. Entretanto, quanto ao desconforto por frio, em todos os casos em que houve apenas ventilação térmica, o desconforto térmico por frio foi consideravelmente menor.

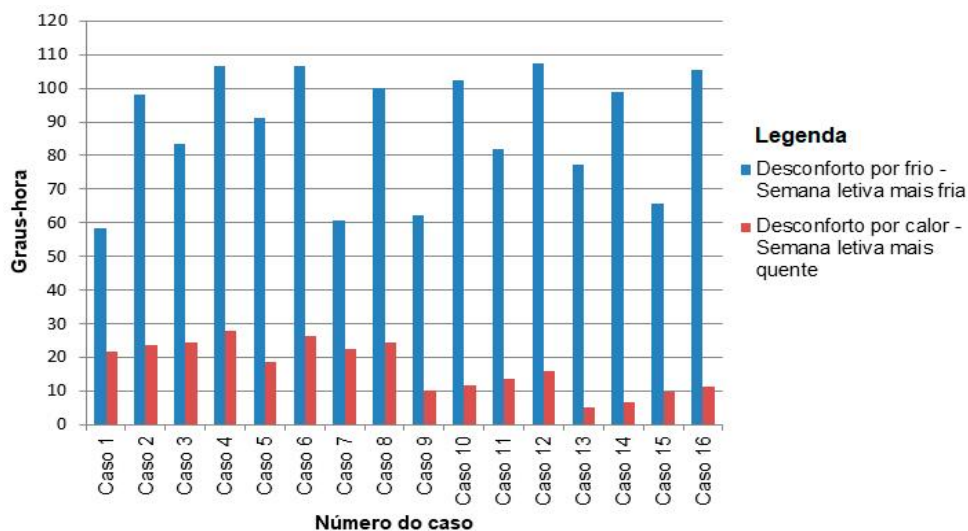
O mês (letivo) que evidenciou maiores valores de GH de desconforto por frio foi agosto para a maioria das situações, atingindo 437,3 para o caso 10. Os maiores valores de GH de desconforto por calor ocorreram no mês de novembro, sendo o valor máximo de 55,85, para o 6º caso. O mês integralmente letivo com menor quantidade de GH foi março, seguido de outubro. Isso mostra que a intensidade do nível de desconforto por calor é consideravelmente menor do que por frio nas 16

situações simuladas. Os meses de janeiro e julho não foram contabilizados como letivos. O mês de fevereiro teve apenas 3 dias letivos e o mês de dezembro 10 dias.

Visto que a semana letiva mais fria, conforme o arquivo climático, é de 21 a 25 de agosto e a mais quente de 20 a 24 de novembro, os GH_A de desconforto por frio e por calor são apresentados para esses períodos, considerando cada caso simulado, através do histograma da Figura 58. Conforme o histograma, o caso mais favorável na semana mais fria é o caso 1, que evidenciou 58,45 GH de desconforto, seguido do caso 7, que teve 60,65. Já a situação mais crítica aconteceu no caso 12, que teve 107,56 GH.

Para a semana mais quente, o caso mais confortável foi o caso 13, com 5,12 GH de desconforto, enquanto que o menos satisfatório foi o 4, apresentado 27,87 GH. Destaca-se que situação mais confortável, tanto para a semana mais fria como para a mais quente, apresenta apenas o uso de ventilação térmica.

Figura 58 - GH_A para cada caso simulado considerando a semana letiva mais quente e a mais fria



Fonte: Autora (2021)

Observa-se que os GH de desconforto por calor foram pouco significativos nos diferentes casos de ventilação natural simulados, principalmente no período anual. Nesse âmbito, os resultados mais satisfatórios ocorreram quando a ventilação foi norte-sul, com destaque para os casos 13 e 14, em que há ventilação cruzada com conexão, na orientação sul, a uma circulação ventilada por lanternim. Já os GH

de desconforto por frio foram consideravelmente elevados na semana letiva mais fria, alcançando 107,56 no caso em que a sala de aula teve ventilação cruzada norte-sul, sendo térmica em todas as janelas, com exceção de duas aberturas elevadas situadas na orientação norte. Isso mostra que, na semana mais fria, devem ser consideradas estratégias de aquecimento no ambiente analisado. As estratégias passivas recomendadas para a ZB2, no frio, são aquecimento solar e vedações internas pesadas, conforme a ABNT (2005c), que trata de desempenho térmico.

4.4. TAXA DE VENTILAÇÃO E RENOVAÇÕES DE AR POR HORA

Na presente pesquisa, foi estimada a taxa de ventilação (l/s/p) considerando cada estratégia simulada na sala de aula analisada, conforme a Equação (8) do item 2.2 (OPAS, 2021). Considerando que a recomendação da OPAS (2021) para ambientes não residenciais é de, no mínimo, 10 l/s/p, os casos com ventilação unilateral possuem uma taxa de ventilação consideravelmente abaixo do desejável. Para as situações com ventilação unilateral simuladas, assim, segundo a OPAS (2021), recomenda-se considerar o aumento da área de abertura, viabilizar a ventilação cruzada ou manter a porta da sala aberta. Outras recomendações são inserir um ventilador de coluna próximo a uma janela, utilizar extratores de ar ou exaustores eólicos. Se nenhuma dessas alternativas forem viáveis, sugere-se o uso de um purificador de ar independente com filtro MERV 14/F8.

Tabela 14 - Taxa de ventilação estimada na sala de aula analisada

Casos	Taxa de ventilação estimada (l/s/p)
Ventilação unilateral: 1, 2, 9 e 10	2,97
Ventilação cruzada: 3 ao 6 e 11 ao 14	38,73
Uso de chaminé solar, com ventilação cruzada: 7,8,15 e 16	13,28

Fonte: Autora (2021)

Posteriormente foram determinadas as médias anuais de renovações de ar por hora na sala de aula analisada. Visto que a recomendação da OPAS (2021) de 10,00 l/s/p equivale a 10,16 renovações de ar por hora para o ambiente analisado (segundo as Equações 9 e 10 do item 2.2), as médias anuais são apresentadas na Tabela 14, para cada caso. Os valores de renovações foram obtidos através de simulações no *software* EnergyPlus

Tabela 15 - Renovações de ar por hora anuais para cada caso

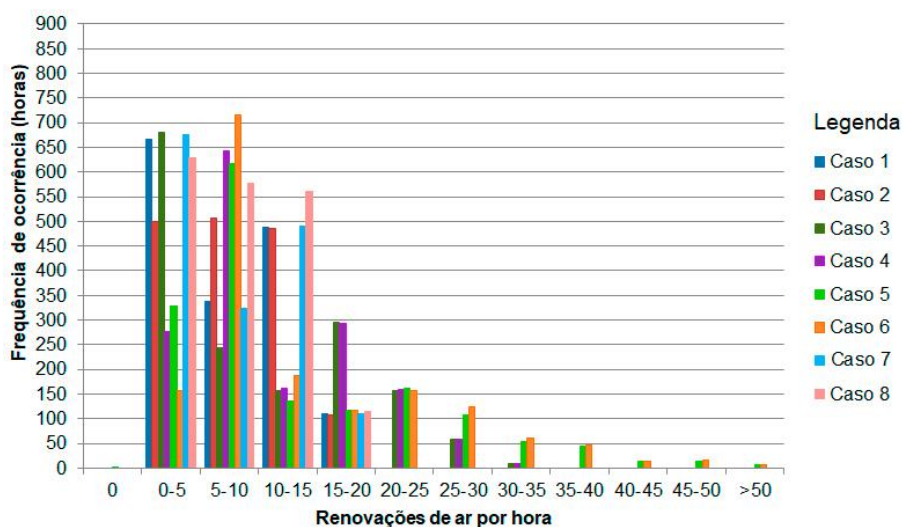
Caso	Média anual de renovações de ar por hora
1	7,65
2	8,19
3	10,56
4	11,00
5	12,84
6	13,95
7	7,68
8	7,98
9	7,65
10	8,16
11	9,44
12	10,29
13	8,53
14	8,82
15	7,81
16	8,34

Fonte: Autora (2021).

Observa-se que a maioria dos casos (69% dos casos avaliados) detém média anual de renovações de ar por hora inferior ao calculado como ideal, diferente do que foi observado nas taxas estimadas da Tabela 13. As situações em que o valor mínimo foi atingido possuem ventilação cruzada, sendo os maiores valores identificados nos casos que há ventilação higiênica. Isso revela a importância da ventilação cruzada para garantir a qualidade do ar interno em ambientes escolares.

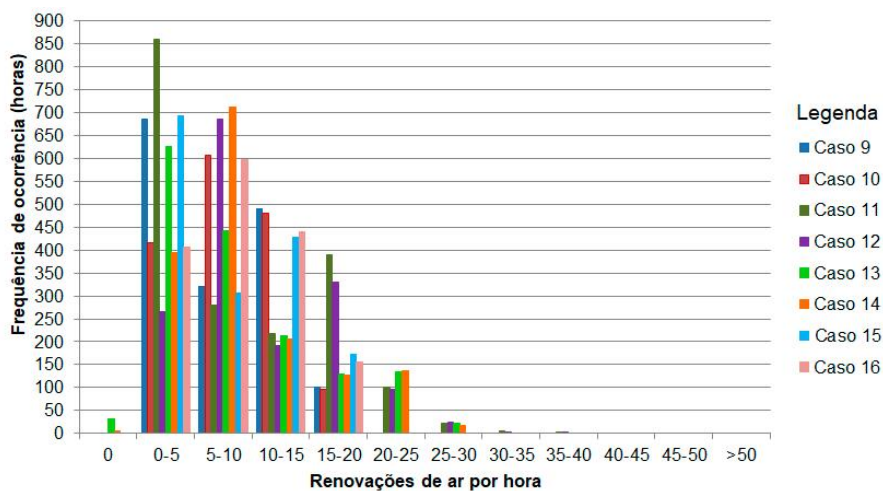
No tratamento de dados das renovações de ar por hora em função da frequência de ocorrência, foram definidos 12 intervalos de valores, conforme os histogramas das Figuras 59 e 60, segundo a metodologia de Rackes *et al.* (2015). No primeiro histograma, são apresentados os resultados anuais dos casos de orientação leste e oeste, e no segundo, os de orientação norte e sul.

Figura 59 – Histograma anual da renovação de ar das horas ocupadas para os casos de orientação leste e oeste (1 a 8)



Fonte: Autora (2021).

Figura 60 – Histograma anual da renovação de ar das horas ocupadas para os casos de orientação norte e sul (9 a 16)



Fonte: Autora (2021).

Quanto às renovações de ar por hora, a maior frequência de ocorrência total se deu no intervalo de 0-5 renov./hora, com 8.259 horas, seguido do intervalo de 5-10 renov./hora, que somou 7.916 horas. Esses intervalos de maior ocorrência também foram verificados na publicação de Rackes *et al.* (2015), para as zonas bioclimáticas 1 e 3. Observa-se que tais intervalos compreendem renovações de ar abaixo do recomendado por hora, que equivale a 10,16 para a sala de aula analisada.

O fator que mais influencia no maior número de renovações de ar por hora é a fração de horas que a abertura das janelas é desejável (RACKES *et al.*, 2015). No presente trabalho, é evidente que a presença de ventilação higiênica e a maior área de abertura para ventilação fez com que as estratégias apresentassem maiores renovações de ar. O caso 6 foi o que apresentou maior média anual de renovações de ar por hora, com 13,95 renovações.

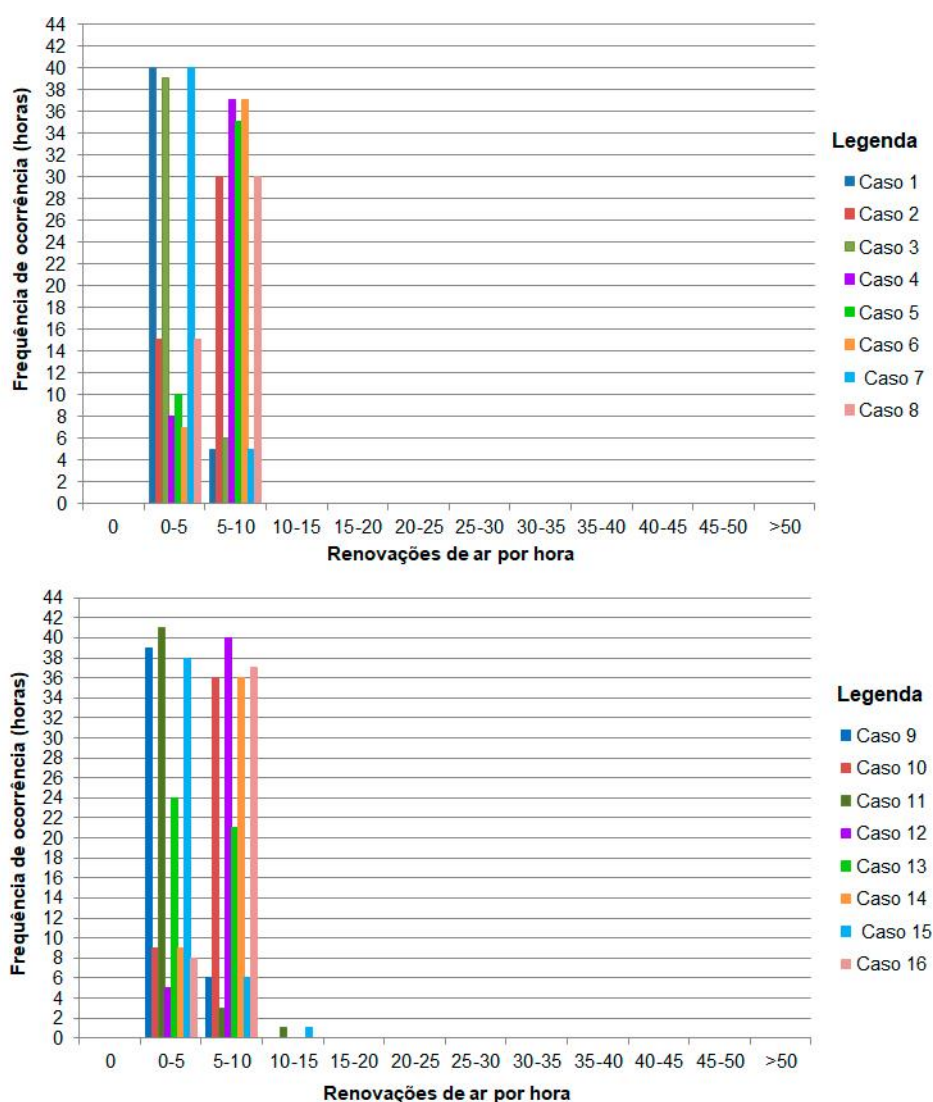
A menor média anual de renovações foi identificada nos casos 1 e 9, que tiveram 7,65 renovações de ar por hora. Ambos possuem ventilação térmica e unilateral. Porém, eles detêm PHOCT elevado, sendo superior a 78%. Observa-se que os casos 4 e 12, que possuíram os menores PHOCT's, tiveram uma maior frequência de renovações no intervalo 5-10 (642 e 686 horas, sequencialmente). Já os casos com PHOCT mais elevado, que foram 1 e 13, apresentaram maior frequência no intervalo de 0-5 (666 e 627 horas, em sequência).

A pesquisa de Oliveira e Carlo (2021), em que foram avaliados o conforto térmico e renovação de ar em ambientes com chaminés solares, apresentou a distribuição das renovações de ar por hora para 2 zonas bioclimáticas distintas (ZB1 e ZB8). Considerando que a sala de aula avaliada possui ventilação unilateral com chaminés solares, na ZB1, o valor máximo de renovações de ar por hora encontrado pelos autores foi de 5,3 renovações, quando houve o uso de 4 dispositivos de chaminé solar, e 12,4, quando houve 8 dispositivos. Para os casos simulados na ZB1, a maior frequência ocorreu entre 0 e 5 renovações por hora.

As renovações de ar por hora também são comparadas, para cada caso simulado, tendo em vista a semana letiva mais quente (20 a 24 de novembro) e a mais fria (21 a 25 de agosto) conforme o arquivo climático. Os dados são apresentados nas Figuras 61 e 62. Conforme a Figura 61, para a semana letiva mais

fria, a maior frequência ocorreu no intervalo de 5-10 renovações. A maior média de renovações por hora, nesses dias, é identificada no caso 6, com 7,13 renovações por hora. A menor média se deu no caso 1, com 3,63 renovações por hora. O caso 6, apesar de apresentar uma taxa de ventilação dentro do recomendado em período anual segundo a OPAS (2021), ou seja, 13,95 renovações por hora, apresenta uma média inferior a 10,16 renovações por hora na semana letiva mais fria. Isso porque a abertura das esquadrias, considerando que a temperatura de *setpoint* é 22°C, se torna menos frequente.

Figura 61 - Histograma da renovação de ar na semana letiva mais fria, para os casos de orientação leste-oeste e norte-sul, em sequência

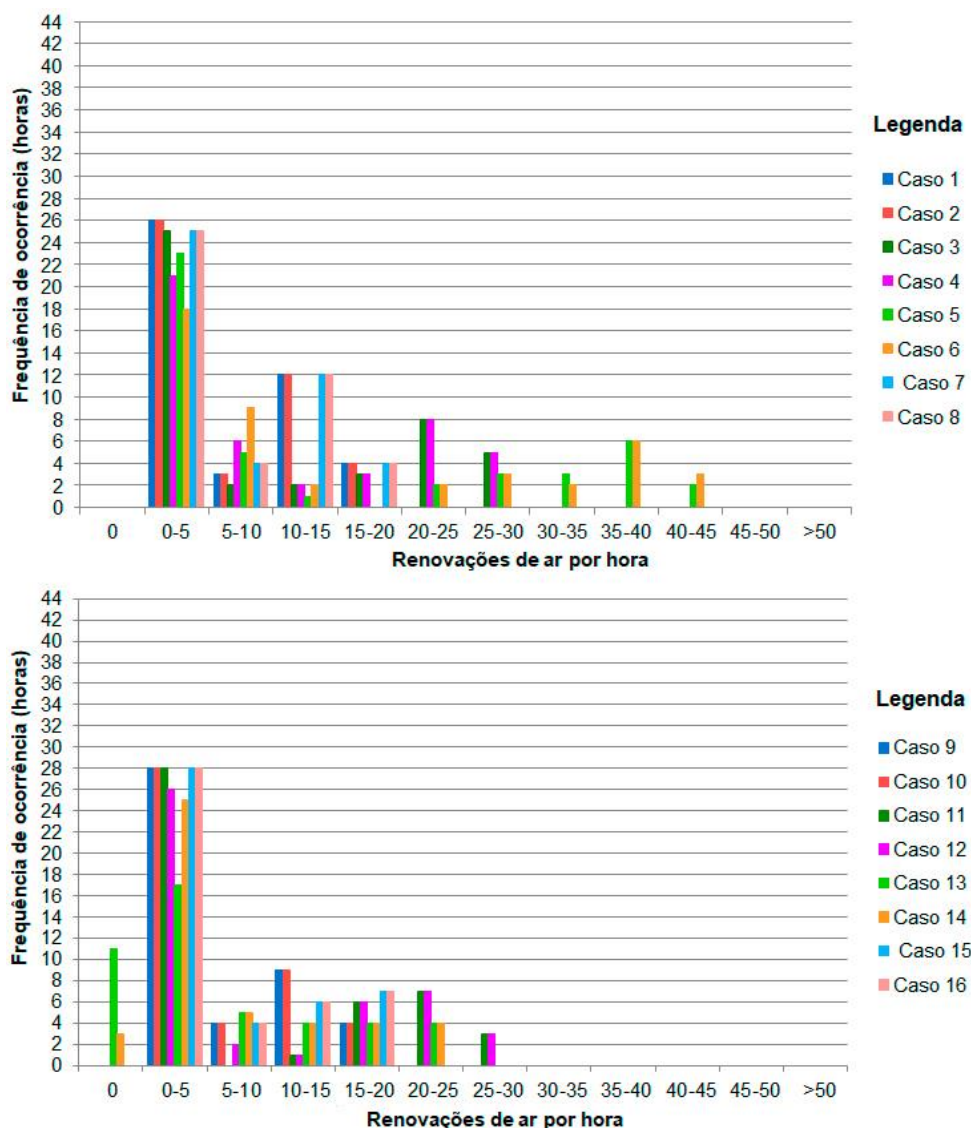


Fonte: Autora (2021).

Ainda conforme a Figura 61, Os casos 1 e 9, que possuem ventilação unilateral térmica, apresentaram uma média inferior a 4,00 renovações de ar na semana letiva mais fria. Entretanto, a situação foi mais favorável para os casos 2 e 10, que adotaram a ventilação unilateral com o uso de ventilação higiênica no sistema superior das janelas. Esses casos tiveram uma média de renovação de ar de 6,20 e 5,60, em sequência.

De acordo com a Figura 62, que apresenta as renovações de ar por hora para semana letiva mais quente, a maior concentração de renovações de ar se deu no intervalo de 0-5. Diferente do que ocorreu na semana mais fria, as renovações de ar estiveram distribuídas de maneira mais equilibrada entre os intervalos do histograma. Como resultado, a maior média de renovações por hora na semana mais quente foi de 15,35 renovações de ar por hora, que ocorreu no caso 6. A menor média, conforme a Figura 62, se deu no caso 9, equivalendo a 5,82. Nesse âmbito, o caso 9 detém um média de renovações de ar por hora, na semana mais quente, inferior à proposta pela OPAS (2021), apesar de possuir um PHOCT de 79,19% (Tabela 10), que é 7,62% maior do que o do caso 6.

Figura 62 - Histograma da renovação de ar na semana letiva mais quente, para os casos de orientação leste-oeste e norte-sul, em sequência



Fonte: Autora (2021)

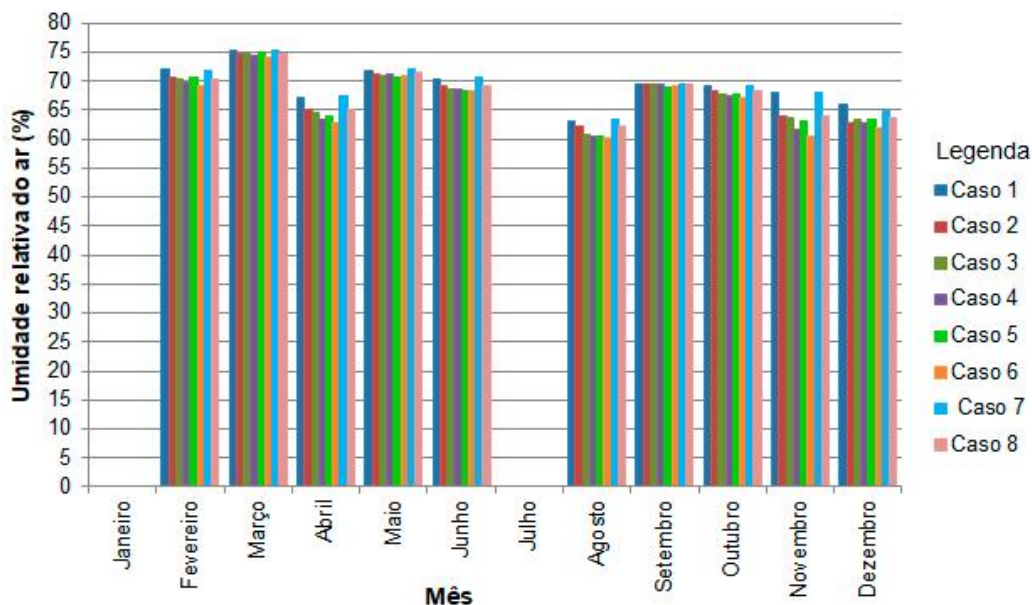
Em síntese, as taxas de ventilação e as renovações de ar por hora obtidas mostram que as estratégias com ventilação cruzada viabilizaram os melhores resultados se forem consideradas as orientações da OPAS (2021). Os resultados foram mais bem distribuídos na semana letiva mais quente do que na semana mais fria, já que na primeira situação a abertura das janelas se mantém por um período mais longo, visto que a temperatura de *setpoint* é 22°C. Melhores resultados de taxas de ventilação e de renovações de ar por hora podem ser viabilizados, por

exemplo, através do uso de uma maior área de abertura para ventilação, janelas em paredes distintas e ventilação higiênica, no ambiente analisado.

4.5. UMIDADE RELATIVA DO AR

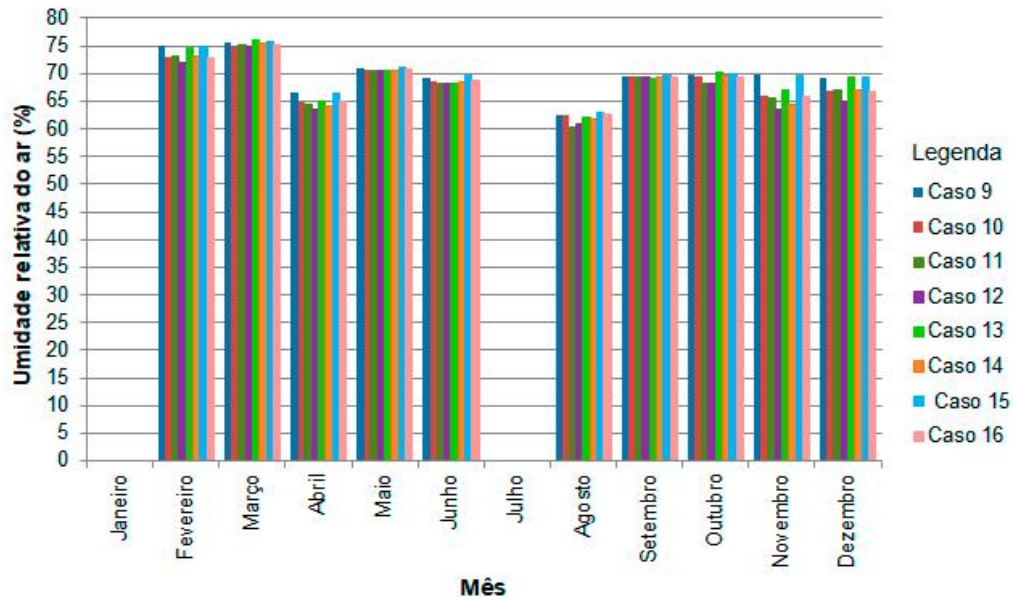
Por último, foram realizadas simulações da umidade relativa do ar mensal para cada uma das 16 configurações da sala de aula. Como ocorreu nos demais tratamentos de dados, foram consideradas apenas as horas ocupadas no ambiente, assim, os meses de janeiro e julho, que são de férias, não foram contabilizados. Já fevereiro e dezembro são parcialmente letivos. Nas Figuras 63 e 64 são apresentados dois gráficos com as distribuições mensais de temperatura relativa do ar.

Figura 63 – Umidade média relativa do ar mensal para os casos de orientação leste-oeste



Fonte: Autora (2021).

Figura 64 - Umidade média relativa do ar mensal para os casos de orientação norte-sul



Fonte: Autora (2021).

Tendo em vista a faixa de umidade do ar recomendada pela OMS (2012), que abrange 60% até 80%, quanto ao valor médio mensal, nenhum caso esteve fora do intervalo recomendado. Os casos em que houve a introdução de ventilação higiênica apresentaram menores valores de umidade do ar em relação àqueles em que houve apenas ventilação térmica, o que era esperado, já que a ventilação higiênica remove o ar acumulado junto ao teto dos ambientes, onde há o maior acúmulo dos vapores e gases desprendidos pela respiração das pessoas e eventuais equipamentos em uso. O valor médio mínimo de umidade relativa do ar anual foi equivalente a 66,40%, para o caso 6, e o máximo de 69,93%, para o caso 15.

Também foi observada uma relação inversa entre a umidade relativa do ar e a renovação de ar por hora. Os casos onde as médias anuais de renovações de ar por hora foram superiores ao valor mínimo (10,16 renovações), conforme a Tabela 14, foram os que tiveram a média anual da umidade relativa do inferior 67,50%.

A umidade relativa do ar, para cada caso simulado, também é apresentada conforme a semana letiva mais fria e a mais quente, segundo o arquivo climático utilizado. Os dados são identificados na Tabela 15. A partir dos resultados, verifica-se que, na semana letiva mais fria, a umidade média relativa do ar está abaixo do

recomendado em todos os casos, sendo o valor mais alto 57,46%, no caso 6. Na semana letiva mais quente, a umidade média relativa do ar foi inferior ao que propõe a OMS (2012) apenas no caso 6. Esse se caracteriza por possuir a sala de aula conectada, na orientação oeste, a uma circulação ventilada por lanternim, onde todas as janelas possuem ventilação térmica, com exceção da parte superior de duas janelas de orientação leste da sala.

Tabela 16 - Umidade média relativa do ar mensal para a semana letiva mais fria e para a mais quente

Nº do caso	Umidade média relativa do ar na semana letiva mais fria (%)	Umidade média relativa do ar na semana letiva mais quente (%)
1	57,00	73,55
2	57,25	65,86
3	56,80	64,73
4	57,23	60,32
5	57,19	64,04
6	57,47	59,05
7	57,22	73,32
8	57,33	65,77
9	56,32	75,51
10	56,98	68,44
11	56,30	67,58
12	57,00	63,72
13	55,93	68,07
14	57,06	64,11
15	56,33	75,45
16	57,12	68,27

Fonte: Autora (2021)

Na semana letiva mais fria a estratégia com a maior quantidade de horas dentro da faixa ideal de umidade é identificada no caso 14 (ventilação térmica e higiênica cruzada, nas orientações norte-sul, com conexão a um corredor ventilado por lanternim), que apresentou 14 horas ocupadas com valores de umidade relativa do ar recomendados pela OMS (2012). O caso menos satisfatório foi o 15

(ventilação térmica cruzada, nas orientações norte-sul, com conexão a um corredor ventilado por lanternim) com 8h dentro do limite ideal de umidade relativa do ar.

Na semana letiva mais quente, é identificado um maior número de horas ocupadas dentro da faixa de umidade relativa do ar recomendada pela OMS. Nesse âmbito, o caso mais favorável foi o 11 (sala com ventilação térmica cruzada norte-sul), que apresentou 22h ocupadas no intervalo ideal. Os casos menos satisfatório foram o 15 (sala com ventilação térmica, havendo janelas de peitoril médio na orientação norte e duas chaminés solares na orientação sul), e o 9 (sala com ventilação unilateral térmica na orientação norte) que tiveram 14h. O caso 6 teve 15h dentro do intervalo de umidade relativa do ar recomendado pela OMS (2012).

4.6. SÍNTESE DOS RESULTADOS ALCANÇADOS

Nas Tabelas 16 e 17 foram estabelecidos os panoramas dos valores de cada estratégia simulada, conforme os critérios de avaliação referenciados. Na primeira Tabela, foram apresentados os dados anuais e na segunda para a semana letiva mais fria (SLF) e a mais quente (SLQ). Os dados que atendem aos critérios foram destacados em verde e os que não atendem, em vermelho.

Tabela 17 - Panorama anual dos valores de cada caso simulado, conforme os critérios de avaliação

Casos	Critérios de avaliação					
	Velocidade média do ar na altura de respiração da criança sentada ² (BAYOUMI, 2021; DANIELS, 2003)		PHOCT ³ (BRASIL, 2021)	Taxa de ventilação estimada (OPAS, 2021)	Renovações de ar por hora (OPAS, 2021)	Umidade relativa do ar (OMS, 2012)
	Vento leste	Vento sudeste				
1	0,032 m/s	0,165 m/s	80,07%	2,97	7,65	69,25
2	0,032 m/s	0,165 m/s	72,39%	2,97	8,19	67,86
3	0,083 m/s	0,226 m/s	73,93%	38,73	10,56	67,05
4	0,083 m/s	0,226 m/s	70,42%	38,73	11,00	66,92
5	0,104 m/s	0,305 m/s	74,07%	38,73	12,84	67,21
6	0,104 m/s	0,305 m/s	71,57%	38,73	13,95	66,40
7	0,050 m/s	0,077 m/s	78,19%	13,28	7,68	69,23
8	0,050 m/s	0,077 m/s	71,63%	13,28	7,98	67,49
9	0,041 m/s	0,181 m/s	79,19%	2,97	7,65	69,87
10	0,041 m/s	0,181 m/s	71,00%	2,97	8,16	68,64
11	0,057 m/s	0,272 m/s	74,57%	38,73	9,44	68,19
12	0,057 m/s	0,272 m/s	70,63%	38,73	10,29	67,59
13	0,167 m/s	0,155 m/s	76,94%	38,73	8,53	69,22
14	0,167 m/s	0,155 m/s	73,82%	38,73	8,82	68,35
15	0,113 m/s	0,402 m/s	77,76%	13,28	7,81	69,93
16	0,113 m/s	0,402 m/s	72,01%	13,28	8,34	68,65

Fonte: Autora (2021)

² A velocidade do ar interno foi obtida considerando todas as janelas abertas, através do ANSYS CFX.

³ 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. Nenhum dos casos teve fração de horas excedentes por calor superior a 10%, apenas por frio.

Tabela 18 – Panorama das semanas letivas extremas dos valores de cada caso simulado conforme os critérios de avaliação

Casos	Critérios de avaliação					
	PHOCT ⁴ (BRASIL, 2021)		Renovações de ar por hora (OPAS, 2021)		Umidade relativa do ar (OMS, 2012)	
	SLF	SLQ	SLF	SLQ	SLF	SLQ
1	33,33%	57,78%	3,63	6,37	57,00	73,55
2	17,78%	55,56%	5,20	7,00	57,25	65,86
3	22,22%	57,78%	4,59	10,66	56,80	64,73
4	15,56%	57,78%	5,63	11,36	57,23	60,32
5	20,00%	62,22%	6,02	14,04	57,19	64,04
6	17,78%	55,56%	7,13	15,35	57,47	59,05
7	31,11%	57,78%	3,61	6,49	57,22	73,32
8	15,56%	55,56%	5,19	7,08	57,33	65,77
9	31,11%	73,33%	3,97	5,82	56,32	75,51
10	20,00%	71,11%	5,60	6,18	56,98	68,44
11	24,45%	73,33%	4,72	9,44	56,30	67,58
12	17,78%	71,11%	5,98	9,86	57,00	63,72
13	26,67%	80,00%	5,09	5,79	55,93	68,07
14	22,22%	77,78%	5,88	6,07	57,06	64,11
15	28,89%	73,33%	3,97	6,08	56,33	75,45
16	17,78%	73,33%	5,63	6,60	57,12	68,27

Fonte: Autora (2021)

Os resultados das tabelas tornam evidente que o panorama anual é mais favorável do que o das semanas letivas mais quente e mais fria. Os dados menos satisfatórios dizem respeito à qualidade da ventilação interna, visto que as renovações de ar por hora estão, em várias situações, abaixo do ideal. Quanto a esse critério, os melhores valores ocorrem quando a ventilação na sala de aula é cruzada e leste-oeste. Entretanto, quando a sala de aula teve ventilação nas orientações norte-sul, e quando a ventilação foi unilateral térmica, os resultados de conforto térmico foram, na maioria dos casos, mais altos. Os resultados de PHOCT

⁴ Para o cálculo do PHOCT foram consideradas 45 horas para a semana letiva mais fria e mais quente, cada.

não foram avaliados como positivos ou negativos na Tabela 17, uma vez que foram consideradas apenas as semanas extremas. A INI-C, ademais, não estabelece uma classificação para o PHOCT. Para a visualização dos resultados obtidos, também foi realizado um infográfico, disponibilizado no Apêndice C.

5 CONCLUSÕES

A obtenção de um desempenho ambiental satisfatório, tanto em salas de aula escolares como em outros tipos de ambientes, depende do adequado planejamento arquitetônico, sendo envolvidas diferentes condições climáticas que influenciarão as condições térmicas, como vento e temperatura (OCHOA; ARAÚJO; SATTLER, 2012). Nesse âmbito, destaca-se a importância da aplicação coerente de estratégias de condicionamento passivo do ambiente, como a ventilação natural, que conforme a Lamberts, Dutra e Pereira (2014) é a segunda estratégia mais indicada para Zona Bioclimática 2, contexto desta pesquisa.

Através da análise de trabalhos com foco semelhante ao da pesquisa, foi possível identificar estratégias e dispositivos de ventilação natural que se mostraram mais eficientes, em diferentes climas. A ventilação cruzada com aberturas em alturas distintas, por exemplo, é indicada por autores como Bowen (1981) e Givoni (1976), tendo em vista, por exemplo, a capacidade de viabilizar um maior número de renovações de ar por hora em relação à ventilação unilateral. Já a viabilidade de eficiência energética da chaminé solar é identificada em trabalhos como o de Oliveira e Carlo (2021) e o de Ferreira (2019), o primeiro aplicado em todas as Zonas Bioclimáticas Brasileiras, e o segundo na Zona Bioclimática 2, conforme a ABNT (2005c).

Com base nas fundamentações teóricas, tendo em vista a lacuna de pesquisa referente ao contexto de aplicação do trabalho, que engloba salas de aula do ensino fundamental da Zona Bioclimática 2, foi definido como objetivo geral estabelecer estratégias de ventilação natural que viabilizam eficiência energética nesses espaços, sem comprometer o conforto térmico e a qualidade da ventilação interna. Na pesquisa, através da metodologia quantitativa, buscou-se fazer o levantamento de estratégias passivas de ventilação aplicáveis em salas de aula do ensino fundamental, bem como as suas avaliações, conforme os critérios do INI-C, do modelo adaptativo de conforto térmico da ASHRAE 55/2017, das recomendações da OMS quanto à umidade relativa do ar, e do que determina a OPAS (2021) acerca das taxas mínimas de ventilação frente contexto da COVID-19.

Os resultados apresentados neste trabalho mostraram que, na ZB2, a introdução de estratégias de ventilação natural na sala de aula analisada é eficiente para a minimização do desconforto por calor, mas deve ser realizada atentando-se também ao desconforto por frio. Os casos com ventilação higiênica evidenciaram um maior desconforto por frio nas simulações. Entretanto, a ventilação cruzada e constante é definida como uma exigência em salas de aula escolares situadas no Rio Grande do Sul, desde agosto de 2021, em virtude da necessidade de garantir boa qualidade do ar em ambientes fechados. Além disso, os casos com ventilação térmica unilateral, apesar de terem apresentado bons resultados quanto ao PHOCT se comparados às outras estratégias simuladas, não garantem nem metade da taxa de ventilação mínima (l/s/p) recomendada pela OPAS (2021), que é de 10 l/s/p. Já os casos com ventilação cruzada, onde a sala de aula escolar é conectada a uma circulação aberta coberta e há uso de ventilação higiênica nos sistemas superiores de duas esquadrias de peitoril médio, apesar de possuírem menores valores de PHOCT (entre 70 e 75%), proporcionam a taxa de ventilação recomendada.

As maiores velocidades de ar na altura de respiração humana foram identificadas nos casos com ventilação cruzada (leste-oeste) e conectados, na orientação oeste, a uma circulação ventilada por lanternim. Nesses casos a velocidade média ficou de 0,104 m/s a 0,305 m/s na altura de respiração da criança sentada, considerando os ventos predominantes. Essa estratégia teve PHOCT de 74,07% quando houve o uso de apenas ventilação térmica (caso 5), e de 71,57% quando houve o uso de ventilação higiênica no sistema superior de duas janelas de peitoril médio (caso 6). Já na estratégia com ventilação unilateral leste, que teve velocidade do ar praticamente nula na altura da respiração humana em grande parte da sala de aula, teve um PHOCT de 80,07% quando houve apenas o uso de ventilação térmica (caso 1). Todos os casos simulados tiveram velocidade do ar inferior ao limite máximo proposto por Byoumi (2021) e Daniels (2003), que é 1,20 m/s.

Sabe-se que as situações com maiores PHOCT's proporcionam maiores níveis de eficiência energética, conforme a INI-C (BRASIL, 2021), sendo que há menor necessidade de climatização artificial nesses espaços. A estratégia com PHOCT mais alto foi a presente no caso 1. Entretanto, frente ao contexto

pandêmico, ambientes com ventilação unilateral não podem ser ocupados em Santa Maria (RS), assim como nas outras cidades do RS, para a garantia de biossegurança, conforme decreto estadual (RIO GRANDE DO SUL, 2021). Conforme os resultados deste trabalho, a estratégia que atende a todos os critérios de avaliação (Tabela 17), em período anual, e possui o PHOCT mais alto é a ventilação térmica cruzada leste-oeste com conexão, na orientação oeste, a um corredor ventilado por lanternim (caso 5). Se forem considerados apenas os casos em que há introdução de ventilação higiênica o caso 6, que possui a mesma configuração do caso 5, exceto pelo fato de possuir ventilação permanente em duas aberturas, é o mais satisfatório. Ele apresenta taxas de ventilação adequadas conforme a OPAS (2021), umidade relativa do ar anual dentro do intervalo ideal, segundo a OMS (2012), e PHOCT de 71,57%.

Se analisada a semana letiva mais fria do ano, entretanto, há de se considerar que a umidade relativa do ar ficou abaixo do ideal em todas as situações, apesar de não serem identificadas situações de alerta, conforme o que dispõe a OMS (2012). Quanto à semana letiva mais fria, de acordo com o arquivo climático, observa-se um elevado desconforto por frio em todas as estratégias (principalmente no turno da manhã), sendo que o caso 1, que teve PHOCT (anual) mais alto, apresentou a menor porcentagem de desconforto. Tendo em vista a soma do panorama da semana letiva mais fria e da mais quente, a estratégia em que a sala teve ventilação térmica cruzada norte-sul com conexão a uma circulação ventilada por lanternim (caso 13) foi a menos desconfortável, principalmente em virtude do baixo desconforto por calor. Se forem consideradas apenas as estratégias em que há uso de ventilação higiênica, o caso 14 foi o mais confortável. Nele, há ventilação térmica e higiênica (em duas aberturas), sendo cruzada norte-sul, com conexão a uma circulação ventilada por lanternim.

Portanto, as estratégias em que a sala de aula analisada possui ventilação cruzada e conexão a uma circulação ventilada por lanternim se destacaram, sendo os casos de orientação leste-oeste (casos 5 e 6) os mais favoráveis em período anual, por vibilizarem eficiência energética, conforto térmico e qualidade de ventilação interna. As estratégias em que há ventilação unilateral térmica (casos 1 e 9), entretanto, apresentaram os maiores valores de conforto térmico e eficiência

energética, enquanto que os casos com ventilação cruzada leste e oeste (casos 3 a 6), junto do caso com ventilação cruzada térmica e higiênica norte-sul (caso 12), foram as situações que possibilitaram qualidade de ventilação natural aceitável para a média anual, conforme os critérios avaliados.

Finalizando o presente estudo, são sugeridos possíveis caminhos de continuidade da pesquisa, a saber: utilização de geometrias diferentes de salas de aula e aplicação de outras estratégias de ventilação, como as que envolvem janelas em paredes adjacentes, dutos de ventilação, e dispositivos distintos de chaminés solares. Apesar de o estudo ter sido bastante explorado no âmbito de conforto térmico, eficiência energética e qualidade da ventilação interna, a análise de novas configurações no modelo poderá enriquecer ainda mais a pesquisa.

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 15220-1**: Desempenho térmico de edificações Parte 1. Rio de Janeiro, 2005a.

_____. **NBR 15220-2**: Desempenho térmico de edificações Parte 2. Rio de Janeiro, 2005b.

_____. **NBR 15220-3**: Desempenho térmico de edificações Parte 3. Rio de Janeiro, 2005c.

_____. **NBR 15575-1**: Edificações Habitacionais - Desempenho Parte 1. Rio de Janeiro, 2021.

_____. **NBR 16401-2**: Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários. Rio de Janeiro, 2017. 3º Projeto Revisão.

AGUIAR, Victor Martins de; BUENO-BARTHOLOMEI, Carolina Lotufo. Arquitetura escolar: avaliação dos níveis de iluminância e simulação da implantação ideal em escolas públicas de Álvares Machado - SP. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO – ENCAC, 12.; ENCONTRO LATINOAMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO - ELACAC, 8., 2013, Presidente Prudente. **Anais** [...]. Brasília: ANTAC, 2013. p. 1-10.

ALLARD, Francis; SANTAMOURIS, Mat. **Natural ventilation in building**: a design handbook. London: James & James, 1998. 368p

AMARAL, Daniel de Oliveira. **Avaliação das metodologias de ventilação natural da normalização brasileira de desempenho térmico e eficiência energética de edificações habitacionais**. 2017. 152 f. Dissertação (Mestrado em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

AMORIM, Diogo; SILVA, Sandra; ALMEIDA, Manuela. Definição de estratégias de ventilação natural para assegurar a qualidade do ar interior de um edifício. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE PATOLOGIA DA CONSTRUÇÃO, TECNOLOGIA DA REABILITAÇÃO E GESTÃO DO PATRIMÔNIO - RÉHABEND, 5., 2014, [S. l.]. **Anais** [...]. Santander: UC, 2014, p. 1231-1238.

ANGELOPOULOS, Charalampos; COOK, Malcolm J.; IDDON, Christopher R.; PORRITT, Stephen M.. Evaluation of Thermal Comfort in Naturally Ventilated School Classrooms during the heating season using CFD. In: CONFERENCE OF INTERNATIONAL BUILDING PERFORMANCE SIMULATION ASSOCIATION, 15., 2017, São Francisco. **Proceedings** [...]. São Francisco: Ibpsa, 2017. p. 1-9.

ANSYS. **ANSYS Fluent Theory Guide**. ANSYS, Inc: Canonsburg, 2016a.

ANSYS. **ANSYS Meshing User's Guide**. ANSYS, Inc: Canonsburg, 2016b.

ANVISA. **RESOLUÇÃO - RE N° 176**: 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. Brasília, DF, 2000.

ARUNDEL, A V; STERLING, E M; BIGGIN, J H; STERLING, T D. Indirect health effects of relative humidity in indoor environments. **Environmental Health Perspectives**, [S. l.], v. 65, p. 351-361, mar. 1986.

ASHRAE. **ANSI/ASHRAE Standard 140-2011**: standard method of test for the evaluation of building energy analysis computer programs. Atlanta: ASHRAE, 2017a.

_____. **ANSI/ASHRAE Standard 55**: thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta, 2017b.

_____. **ASHRAE Handbook**: Fundamentals. Atlanta: Inch-pound, 2017c.

_____. **ASHRAE RP-884 Adaptive Model Project**: Data Downloader. 2010. The University of Sydney.

AZEVEDO, Giselle Arteiro Nielsen; BASTOS, Leopoldo Eurico Gonçalves; BLOWER, Hélide Steenhagen. Escolas de ontem, educação hoje: é possível atualizar usos em projetos padronizados? In: SEMINÁRIO PROJETAR, 3., 2007, Rio de Janeiro. **Anais** [...]. Porto Alegre: [s. n.], 2007.

BARRETT, Peter; DAVIES, Fay; ZHANG, Yufan; BARRET, Lucinda. The impact of classroom design on pupil's learning: Final results of a holistic, multi-level analysis. **Building and Environment**, [S. l.], v. 89, p. 118 - 133, 2015.

BAYOUMI, Mohannad. Improving Indoor Air Quality in Classrooms via Wind-Induced Natural Ventilation. **Modelling and Simulation in Engineering**, [S. l.], n. 5, p.1-14, jun. 2021.

BEVILAQUA, Camila Pizaia; BRESSIANINI, Bianca; AZUMA, Mauricio Hidemi; LUKIANTCHUKI, Marieli Azoia. Análise da ventilação natural. **Parc Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, v. 10, p. 190221-1902213, maio 2019.

BOWEN, Arthur. Classification of Air Motion Systems and Patterns. In: INTERNATIONAL PASSIVE AND HYBRID COOLING CONFERENCE, 1981, Newark. **Proceedings** [...]. Newark: American Section of ISES, 1981.

BRASIL. **Instrução Normativa nº 2, de 4 de junho de 2014**. Dispõe sobre regras para a aquisição ou locação de máquinas e aparelhos consumidores de energia pela

Administração Pública Federal direta, autárquica e fundacional, e uso da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE), 2014.

_____. Lei n. 10295, de 17 de outubro de 2001. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia. **Lex:** Diário Oficial da União, Brasília, 2001. Disponível em: www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/L10295.htm. Acesso em: 24 abr. 2020.

_____. 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 05 de maio de 2021.

_____. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Eficiência energética: guia para etiquetagem de edifícios**. Brasília: MMA, 2015. 71 p. v. 2.

_____. **Projeto de Lei N.º 3.501, de 2012**. Acrescenta o Art. 177-A à Consolidação das Leis do Trabalho – CLT. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=538305>. Acesso em: 29 set. 2020.

_____. **Lei n. 9.394, de 20 de dezembro de 1996**. Estabelece as diretrizes e bases da educação nacional. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9394compilado.htm. Acesso em: 25 jan. 2021.

_____. **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/l11274.htm. Acesso em: 06 dez. 2021.

BRE. **Principles of natural ventilation**. Watford: BRE, 1978.

BRITO, Adriana Camargo de. **Contribuição da inércia térmica na eficiência energética de edifícios de escritórios na cidade de São Paulo**. 2015. 241 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

BULIGON, Liliane. **Comportamento higrotérmico e energético de painéis de vedação vertical externa em madeira para a zona bioclimática 2**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2021.

CANDIDO, Christhina; LAMBERTS, Roberto; BITTENCOURT, Leonardo; DEAR, Richard de. Aplicabilidade dos limites da velocidade do ar para efeito de conforto térmico em climas quentes e úmidos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 10, n. 4, p. 59-68, dez. 2010.

CARLO, Joyce Correna; LAMBERTS, Roberto. Parâmetros e métodos adotados no regulamento de etiquetagem da eficiência energética de edifícios: parte 2. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 10, n. 2, p. 27-40, jun. 2010.

CELIK, Ismail; GHIA, Urmila; ROACHE, Patrick J.; FREITAS, Christopher J.; COLEMAN, Hugh; RAAD, Peter E.. Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications. **Journal Of Fluids Engineering**, [S. l.], v. 130, n. 7, p. 0780011-0780014, 2008.

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

CERQUEIRA, Rodrigo M.; PEREIRA, Iraci M. Análise do conforto térmico por meio de simulação computacional em projeto de escola padrão do estado de Minas Gerais. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO – ENCAC, 12.; ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO - ELACAC, 8., 2013, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Brasília: ANTAC, 2013. p. 1-10.

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

CÓSTOLA, Daniel; ALUCCI, Márcia Peinado. Aplicação de CFD para o cálculo de coeficientes de pressão externos nas aberturas de um edifício. **Revista Ambiente Construído**, v. 11, n. 1, p. 145-158, jan./mar. 2011.

CÓSTOLA, Daniel. **Ventilação por ação do vento no edifício**: procedimentos para quantificação. 2006. Dissertação (Mestrado em Tecnologia da Construção) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

CUNHA, Eduardo Grala da. Brise-soleil: da estética à eficiência energética. **Arquitextos**, São Paulo, v. 11, n. 131.07, Vitruvius, abr. 2011. Disponível em: <https://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/11.131/3844%20>. Acesso em: 01 abr. 2020.

DANIELS, Klaus. **Advanced Building Systems**: A Technical Guide for Architects and Engineers. Brasília: Birkhäuser, 2003.

DEAR, Richard De; KIM, Jungsoo; CANDIDO, Christhina; DEUBLE, Max. Adaptive thermal comfort in australian school classrooms. **Building Research and Information**, v. 43, n. 3, p. 383–398, 2015.

DELIBERADOR, Marcella Savioli; KOWALTOWSKI, Doris Catharine Cornélie Knatz. Os elementos de conforto no processo de projeto escolar no estado de São Paulo. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO -

ENCAC; ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO - ELACAC, 11., 7., 2011, Campinas. **Anais [...]**. Búzios: ANTAC, 2011. p. 1-10.

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

ELMEKAWY, Ahmed Nagib. **Introduction to ANSYS Meshing: Module 3 Global Mesh Controls**, 2018. 95 slides. Material didático. Disponível em: https://drahmednagib.com/CAD_2018/Lecture_3_Meshing_2.pdf. Acesso em: 08 out. 2021.

ELGENDY, Karim. **A Damascus School Revives Traditional Cooling Techniques**. 2010. Disponível em: <http://www.carboun.com/sustainable-design/a-damascus-school-revives-traditional-cooling-techniques/>. Acesso em: 24 jan. 2021.

ENERGYPLUS. **EnergyPlus documentation: Engineering Reference - the reference to EnergyPlus calculation**. US Department of Energy, 2015.

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

FERREIRA, Daniele Gomes; ASSIS Eleonora Sad de; FERREIRA, Clara Maíra Oliveira. Verificação da alteração dos padrões de vento devido à ocupação urbana na cidade de Belo Horizonte, MG. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 10.; ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 6., 2009, Natal. **Anais [...]**. Natal: ANTAC, 2009.

FLORES, Michelle Gomes. **Geração da base climática de Santa Maria – RS- Para análise de desempenho térmico e eficiência energética de edificações**. 2014. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

FINGER, Felipe; GOEDERT, Gabriela; MELO, Natália R. Avaliação das condições de conforto térmico em sala de estudos: aplicabilidade dos modelos estático e adaptativo comparados aos dados comportamentais do usuário. ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16., 2016, Florianópolis. **Anais [...]**. São Paulo, 2016

FNDE. **Manual de orientações técnicas: elaboração de projetos de edificações escolares - Ensino Fundamental**. [S. l.]: Ministério da Educação, 2017. 191 p.

FRANCO, Andrei Leandro Morsch; ANGELONI, Jorge Luiz. Aproveitamento e eficiência energética. **Revista Técnico Científica (IFSC)**, Florianópolis, v. 3, n. 1, p.33-34, jan. 2012.

FROTA, Anésia Barros; SCHIFFER, Sueli Ramos. **Manual do conforto térmico**. 6.ed. São Paulo: Studio Nobel, 2003.

FUNARI, Teresa Borsoi Soares; KOWALTOWSKI, Doris Catharine Cornelie Knatz. Arquitetura escolar e avaliação pós-ocupação. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO – ENCAC, 8.; ENCONTRO LATINOAMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO - ELACAC, 6., 2005, Campinas. **Anais** [...]. Maceió: ANTAC, 2005. p. 2255 - 2257.

GIVONI, Baruch. **Comfort, climate analysis and building design guidelines**. In Energy and Building, v. 18, p.11-23. 1992

GIVONI, Baruch. **Man, climate and architecture**. 2.ed. Londres: Applied Science Publisher, 1976. 483 p.

GONÇALVES, Rosana Bacicheti; VANDERLEI, Paula Sardeiro Silva; SOARES, Paulo Fernando. Iluminação e ventilação em salas de aula: um estudo sobre a utilização de brise e o cruzamento de ventilação em aberturas. In: SIMPÓSIO DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA - SIMPGEU, 3., 2012, Maringá. **Anais** [...]. Maringá: [s. n.], 2012. p. 1-11.

GRIGOLETTI, Giane de Campos; FLORES, Michelle Gomes; SANTOS, Joaquim Cesar Pizzutti dos. Tratamento de dados climáticos de Santa Maria, RS, para análise de desempenho térmico de edificações. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, n. 1, p. 123-141, jan. 2016.

GU, Lixing. Airflow network modeling in EnergyPlus. In: BUILDING SIMULATION 2007. **Proceedings** [...]. Pequim: IBPSA. 2007

HARRIES, Alan. **Notas de aula**. In: WORKSHOP: CFX – FAU/USP. São Paulo, 2005.

HELDWEIN, Arno Bernardo; BURIOL, Galileo Adeli; STRECK, Nereu Augusto. A história natural de Santa Maria: o clima de Santa Maria. **Revista Ciência & Ambiente**, Santa Maria, n. 38, p. 43-58, jan. 2009.

IBGE. **Santa Maria**. 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/rs/santa-maria.html>. Acesso em: 14 jan. 2021.

IIDA, Itiro. **Ergonomia: Projeto e Produção**. 2. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2005.

INMET. **Dados históricos anuais**. 2021. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>. Acesso em: 12 jul. 2021.

INMET. **Normais Climatológicas do Brasil**. 2018. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/normais>. Acesso em: 10 jun. 2021.

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. **Requisitos Técnicos de Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos**. [S. l.]: Eletrobrás, 2010.

ISO. **ISO 9920**: Ergonomics of the thermal environment - Estimation of thermal insulation and water vapour resistance of a clothing ensemble. 2. ed. Geneva: ISO, 2007.

KAMARUZZAMAN, Khadijah; TAZILAN, Azimin Samsul Bin Mohd. Thermal Comfort Assessment of a Classroom in Tropical Climate Conditions. In: ZAHARIM, Azami; PANAGOPOULOS, Thomas; ZHANG, Yang; BARBU, Cristina; POPESCU, Madalina Xenia Calbureanu (ed.). **Recent Advances in Energy, Environment and Development**. Cambridge: WSEAS, 2013. p. 87-91.

KATAFYGIOTOU, Martha C.; SERGHIDES, Despina K.. Thermal comfort of a typical secondary school building in Cyprus. **Sustainable Cities And Society**, Amsterdã, v. 13, p. 303-312, out. 2014.

KOUHIROSTAMI, Maryam. **Natural Ventilation Through Windows in a Classroom (CFD Analysis Cross-Ventilation of Asymmetric Openings: Impact of Wind Direction and Louvers Design)**. 2018. 56 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Texas Tech University, Lubbock, 2018.

KOWALTOWSKI, Doris Catharine Cornélie Knatz. **Arquitetura escolar: o projeto do ambiente de ensino**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

KUNDU, Pijush K.; COHEN, Ira M.; HU, Howard H. **Fluid Mechanics**. Orlando: Academic Press, 2002.

LABEEE. **Arquivos Climáticos**. 2018. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos>. Acesso em: 18 jan. 2021.

LABEEE. **NBR 15575-2020**: desempenho térmico. 2020. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/node/948>. Acesso em: 19 jan. 2021.

LAMBERTS, Roberto. **Conforto e stress térmico**. Florianópolis: LabEEE, 2011. Apostila didática apresentada na Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Departamento de Engenharia Civil.

LAMBERTS, Roberto. **Desempenho Térmico de edificações**. Florianópolis: LabEEE, 2016. Apostila didática apresentada na Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Departamento de Engenharia Civil.

LAMBERTS, Roberto. **Desempenho Térmico de edificações**: ventilação natural, [2017?]. 54 slides. Material didático apresentado na Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.

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

LAZAROTTO, Gerusa. **Variáveis de ocupação do solo e microclimas urbanos no período noturno - Bairro Camobi, Santa Maria - RS**. 2015. 194 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

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

MARCONDES, M.; UMAKOSI, E. Ferramentas computacionais para avaliação ambiental de áreas urbanas: estudo de caso em São Paulo. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 9., 2007. **Anais [...]**. Ouro Preto: [s. n.], 2007.

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003. 311 p.

MCNEEL, S. V.; KREUTZER, R. A.. Fungi and indoor air quality. **Health & Environment Digest**, [S. l.], v. 10, n. 2, p. 9-12, 1996.

MONNA, Sameh; BABA, Mutasim; JUAIDI, Adel; BARLET, Aline; BRUNEAU, Denis. Improving thermal environment for school buildings in Palestine, the role of passive design. **Journal Of Physics: Conference Series**, [S. l.], v. 1343, p. 1-6, nov. 2019.

MORAIS, Juliana Magna da Silva. **Ventilação natural em edifícios multifamiliares do programa “Minha Casa Minha Vida”**. 2013. 211 f. Tese (Doutorado em Arquitetura, Tecnologia e Cidade) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

NOZU, Tsuyoshi; TAMURA, Tetsuro; OKUDA, Yasuo; SANADA, Satoshi. LES of the flow and building wall pressures in the center of Tokyo. **Journal Of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics**, [S. l.], v. 96, n. 10-11, p. 1762-1773, out. 2008.

OCHOA, Juliana Herlemann; ARAÚJO, Daniel Lima; SATTLER, Miguel Aloysio. Análise do conforto ambiental em salas de aula: comparação entre dados técnicos e a percepção do usuário. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 12, n. 1, p. 91-114, mar. 2012.

OLGYAY, Victor. **Clima y arquitectura en Colombia**. Cali: Universidad del Valle, 1968.

OLIVEIRA, Matheus Menezes; CARLO, Joyce Correna. 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, Matheus Menezes; CARLO, Joyce Correna. 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. 2021.

OLIVEIRA, Wagner Costa; CUNHA, Eduardo Grala da; LEITZKE, Rodrigo Karini. 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. Universidade Estadual de Campinas.

OMS. **Actas Oficiales de La OMS**. n°2, 2012. Disponível em: <http://www.who.int/library/collections/historical/es>. Acesso em: 02 fev. 2021.

O'NEILL, Zheng; EISENHOWER, Bryan; YUAN, Shui; BAILEY, Trevor; NARAYANAN, Satish; FONOBEROV, Vladimir. Modelling and calibration of energy models for a dod building. In: 2011 ASHRAE ANNUAL CONFERENCE, 2011. **Proceedings** [...]. Montreal: ASHRAE Transactions, 2011.

OPAS. **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: 09 out. 2021.

PAES, Rosângela F. S.; BASTOS, Leoplodo E. G. Qualidade ambiental na edificação: o caso das escolas públicas da cidade do Rio de Janeiro. **Paranoá**, Brasília, n. 12, p. 131-140, 2014.

PAGNOSSIN, Elaine Medianeira; BURIOL, Galileo Adeli; GRACIOLLI, Michele de Araujo. Influência dos elementos meteorológicos no conforto térmico humano: bases biofísicas. **Disciplinarum Scientia**. Série: Ciên. Biol. e da Saúde, Santa Maria, v. 2, n. 1, p. 149-161, 2001.

PBE EDIFICA. **Diretrizes para Obtenção de Classificação Nível A para Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas**. [S. l.]: Eletrobras/Procel, 2014. 48 p.

PBE EDIFICA. **Manual para a aplicação do RTQ-C**. [S. l.]: Eletrobras/Procel, 2017. 213 p.

PBE EDIFICA. **Manual para a aplicação do RTQ-R**. [S. l.]: Eletrobras/Procel, 2012. 202 p.

PEREIRA, Fernando Oscar Ruttkay. Luz solar direta: tecnologia para melhoria do ambiente lumínico e melhoria da energia na edificação. In: ENCONTRO NACIONAL

DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO-ENCAC, 2., 1993. **Anais** [...]. Florianópolis: Antac. 1993. p. 257-267.

PEREIRA, Helena A. da C.; MELO, Ana Paula; VERSAGE, Rogério; SORGATO, Márcio; LAMBERTS, Roberto. **Manual de simulação computacional de edifícios naturalmente ventilados no programa EnergyPlus – versão 8.0**. Florianópolis: LabEEE, 2013. 56 p.

PEREIRA, Luísa Dias; RAIMONDO, Daniela; CORGNATI, Dtefano Paolo; SILVA, Manuel Gameiro da. Energy consumption in schools: a review paper. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 40, p.911-922, dez. 2014.

PRATA-SHIMOMURA, Alessandra R. O Uso do Software Wasp: caracterização da rugosidade para a cidade de Campinas, SP/Brasil. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGINIERIA DEL VIENTO, 2., La Plata, 2012. **Proceedings** [...]. La Plata: [s. n.], 2012.

PROCEL. **Ventilação natural em edificações**. Rio de Janeiro: Ufal, 2010. 101 p.

PROJETEEE. **Efeito chaminé**. [20--?]. Disponível em: <http://projeteee.mma.gov.br/implementacao/efeito-chamine/>. Acesso em: 09 dez. 2020.

QUADROS, Bianca Milani de; MIZGIER, Martin Ordenes. Conforto térmico em ambientes de internação hospitalar naturalmente ventilados. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 20, n. 2, p. 113-134, jun. 2020.

RACKES, Adams; FONSECA, Raphaela Walger da; BECK, Elisa de Oliveira; SCALCO, Veridiana Atanasio; PALLADINI, Gustavo Daou; LAMBERTS, Roberto. Avaliação do potencial de conforto térmico em escolas naturalmente ventiladas. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO – ENCAC, 13.; ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO - ELACAC, 9., 2015, Florianópolis. **Anais** [...]. Campinas: ANTAC, 2015. p. 1-10.

RAMPONI, R.; COSTOLA, D.; ANGELOTTI, A.; BLOCKEN, B. J. E.; HENSEN, J. L. M. Evaluation of wind-driven ventilation in building energy simulation: Sensitivity to pressure coefficients. In: CLEANTECH FOR SUSTAINABLE BUILDINGS CONFERENCE – CISBAT, 2011, Lausanne. **Proceedings** [...]. Lausanne: EPFL, 2011, p. 949-954.

RAMPONI, R.; BLOCKEN, B. CFD simulation of cross-ventilation for a generic isolated building: Impact of computational parameters. **Building and Environment**, v. 53, p. 34-48, 2012.

REN, P.; JANKUN, T. M.; BELANGER, K.; BRACKEN, M. B.; LEADERER, B. P.. The relation between fungal propagules in indoor air and home characteristics. **Allergy**, [S. l.], v. 56, n. 5, p. 419-424, maio 2001.

RIO GRANDE DO SUL. Decreto nº 56.025, de 9 de agosto de 2021. Altera o Decreto nº 55.882, de 15 de maio de 2021. **Lex:** Diário Oficial, n. 159, 2. ed., Porto Alegre, 2021. Disponível em: <https://coronavirus-admin.rs.gov.br/upload/arquivos/202108/10085518-56025.pdf>. Acesso em: 14 nov. 2021.

RIVERO, Roberto. **Arquitetura e clima:** acondicionamento térmico e natural. Porto Alegre: DC Luzzatto, 1986.

ROSA, Telissa Frenzel da; SEDREZ, Michele de Moraes; SATTLER, Miguel Aloysio. Conforto ambiental em um contexto de sustentabilidade: o Protótipo Alvorada. **Ciência & Ambiente**, Santa Maria, v. 12, n. 22, p. 91-106, jan. 2001.

RUAS, Álvaro César. **Conforto Térmico nos Ambientes de Trabalho.** São Paulo: FUNDACENTRO, 1999.

RUPP, Ricardo Forgiarini; VÁSQUEZ, Natalia Giraldo; LAMBERTS, Roberto. A review of human thermal comfort in the built environment. **Energy and Buildings**, [S. l.], v. 105, p. 178–205, 2015.

SANTOS, Renan Valeiro dos; GRAÇA, Valéria Azzi Collet da. A importância da ventilação nos ambientes construídos e o uso de modelo para sua visualização em salas de aula. **Sinergia**, São Paulo, v. 15, n. 3, p. 177–184, jul. 2014.

SARTORI, Maria da Graça Barros. **O clima de Santa Maria:** do regional ao urbano. 1979. 163f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1979.

SCHULZE, Tobias; EICKER, Ursula. Controlled natural ventilation for energy efficient buildings. **Energy and Buildings**, [S. l.], v. 56, p. 221–232, jan. 2013.

SILVA, Cristiano Vitorino da. **Introdução ao Ansys CFX.** Erechim: URI, 2019. Apostila didática apresentada à Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões - URI, elaborada com auxílio do GEAPI (Grupo de Engenharia Aplicada a Processos Industriais) e LABSIM (Laboratório de Simulação Numérica).

SILVA, Jordana Teixeira da; OITICICA, Maria Lúcia Gondim da Rosa. Avaliação comparativa do desempenho acústico, térmico e energético das envoltórias de escolas públicas em Maceió-AL. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO – ENCAC, 12.; ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO - ELACAC, 8., 2013, Maceió. **Anais** [...]. Brasília: ANTAC, 2013. p. 1-10.

SILVA, Luiz Gustavo Oliveira da; NASCIMENTO, Vinicius Silva; BITTENCOURT, Leonardo. Estudo preliminar de uma escola modelo do UNICEF a ser implantada em Coribe - BA. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO- ENCAC; ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO

AMBIENTE CONSTRUÍDO-ELACAC, 13., 9., 2015, Maceió. **Anais** [...]. Campinas: ANTAC, 2015. p. 1-10.

SOBIN, Harris. Window Design for Passive Ventilation. In: INTERNATIONAL PASSIVE AND HYBRID COOLING CONFERENCE, 1981. Bowen, A., Clark, G., Labs, K. (ed)., Newark. **Proceedings** [...]. Newark: American Section of ISES, 1981.

SORGATO, Márcio José. **Desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares ventiladas naturalmente**. 2009. 216 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

SOUZA, Henor Artur de; ROCHA, Luiz Joaquim Cardoso. Análise da ventilação natural cruzada e unilateral. In: CONGRESSO LIBEROAMERICANO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 8., 2007. **Anais** [...]. Cusco: [s. n.], 2007. p. 1-8.

TANABE, S. **Thermal Comfort Requirements in Japan**. Tese (Doutorado) – Waseda University. Waseda, 1988.

TELI, Despoina; JENTSCH, Mark F.; JAMES, Patrick A.B.. The role of a building's thermal properties on pupils' thermal comfort in junior school classrooms as determined in field studies. **Building And Environment**, [S. l.], v. 82, p. 640-654, dez. 2014.

TOMINAGA, Yoshihide; MOCHIDA, Akashi; YOSHIE, Ryuichiro; KATAOKA, Hiroto; NOZU, Tsuyoshi; YOSHIKAWA, Masaru; SHIRASAWA, Taichi. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. **Journal Of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics**, [S. l.], v. 96, n. 10-11, p. 1749-1761, out. 2008.

TRINDADE, Sileno Cirne; PEDRINI, Aldomar; DUARTE, Raimundo Nonato Calazans. Métodos de aplicação da simulação computacional em edifícios naturalmente ventilados no clima quente e úmido. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 10, n. 4, p. 37-58, dez. 2010.

US DOE. 2014. Disponível em:

<https://www.energy.gov/eere/buildings/downloads/energyplus-0>. Acesso em: 07 mar. 2022.

VAREJÃO-SILVA, Mário Adelmo. **Meteorologia e climatologia**. 2 ed. Recife: [s. n.], 2006.

VASCONCELLOS, Arnulfo Barroso de; LAMBERT, José Antônio; SILVA, Luciana Oliveira da; ANABUKI, Erika Tiemi; NOVELO, Fernando; FONSECA, André Luiz Amorim da. Análise da Eficiência Energética em uma Edificação Climatizada Através de um Sistema de Resfriamento Evaporativo Versus Condicionadores de Ar Convencionais Utilizando o Software Energyplus. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - SBSE, 4., 2012, Goiás. **Anais** [...]. Goiás: ANTAC, 2012. p. 1-6

VIANA, Simone Scatolon Menotti; AMORIM, Margarete Cristiane de Costa Trindade. O conforto térmico nas escolas estaduais de Presidente Prudente/sp. **Revista Formação**, Presidente Prudente, v. 2, n. 20, p. 100-139, dez. 2013. Disponível em: <https://revista.fct.unesp.br/index.php/formacao/article/view/2147/2402>. Acesso em: 20 abr. 2020.

VIEIRA, Cintia Cristina. **Conforto térmico e iluminação natural no edifício administrativo da Escola de Engenharia de São Carlos/USP-Bloco E1**. 2008. 187 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

ZHANG, Hui; ARENS, Edward; FARD, Sahar Abbaszadeh; HUIZENGA, Charlie; PALIAGA, Gwelen; BRAGER, Gail; ZAGREUS, Leah. Air Movement Preferences Observed in Office Buildings. **International Journal of Biometeorology**, v. 51, n. 5, p. 349–360, jan. 2007.

WEBER, Fernando da Silva; MELO, Ana Paula; MARINOSKI, Deivis; LAMBERTS, Roberto. **Elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos brasileiros para o uso no programa EnergyPlus**. Florianópolis: LabEEE, 2017. 52 p. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/node/714>. Acesso em: 18 nov. 2020.

WYON, David. **Predicting the effects of individual control on productivity**. [S. l.]: White paper 960130, 1996.

Apêndice A

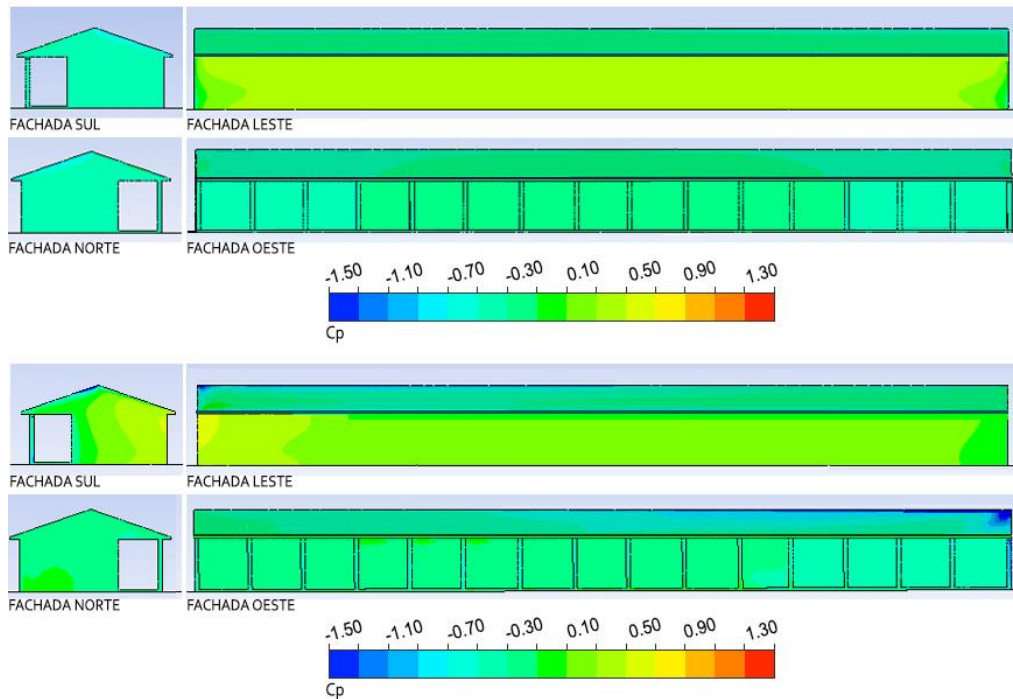
MAPAS E ANÁLISE DOS COEFICIENTES DE PRESSÃO DO VENTO

Os C_p 's do vento correspondem ao resultado da razão entre a pressão dinâmica medida em um ponto da superfície do modelo e a pressão dinâmica em um ponto do fluxo de ar não perturbado (AMARAL, 2017). Os C_p 's foram obtidos através de simulações no Ansys CFX considerando os ventos predominantes, que são de origem leste e sudeste (INMET, 2018, 2021).

Os valores dos C_p 's foram apresentados através de tabelas no Apêndice B, para cada abertura dos modelos simulados. Os mapas dos C_p 's das fachadas dos edifícios, para cada caso, foram gerados através do CFX – Post. As condições de contorno utilizadas são especificadas no item 3.1.3.1, sendo a velocidade do vento de entrada do domínio equivalente a 3,22 m/s.

Na Figura 65 são apresentados os blocos de salas de aula dos casos 1 a 4 com mapas de cores que indicam os valores dos C_p 's nas fachadas. Os casos 1 e 2 apresentam a mesma volumetria dos casos 3 e 4, com a diferença de que nos dois últimos há aberturas na parede oeste. Conforme Amaral (2017), a visualização da distribuição dos C_p 's nas fachadas torna possível verificar como as diferentes geometrias podem impactar o escoamento e as pressões de vento sobre a edificação.

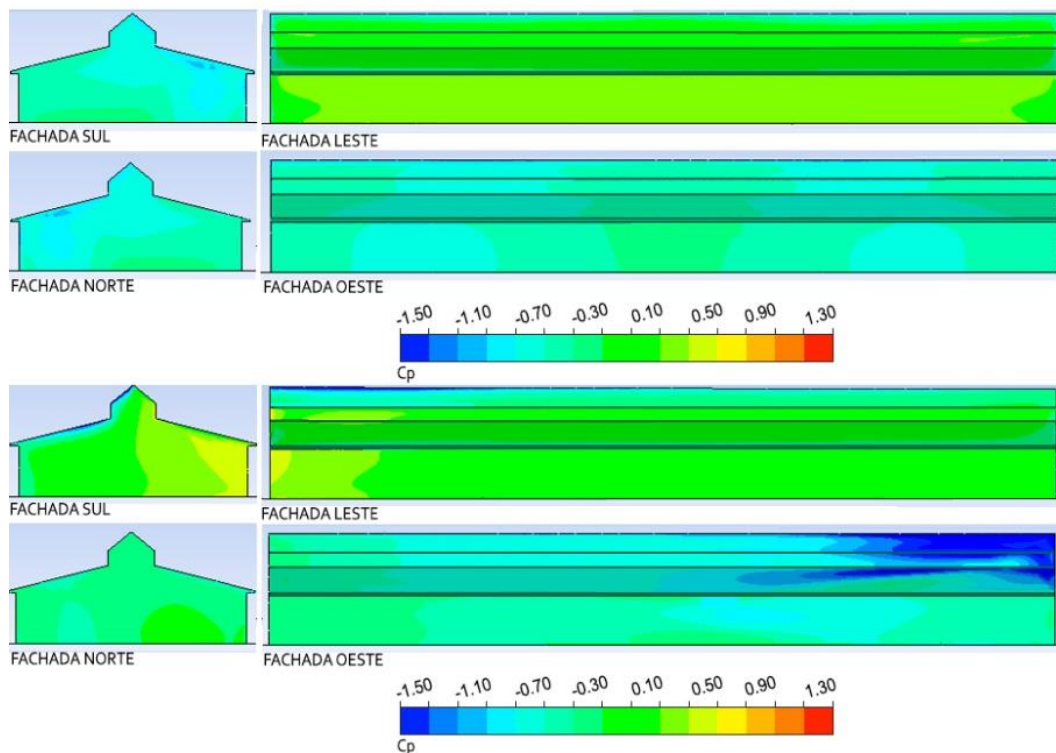
Figura 65 - Mapas de C_p 's nas fachadas dos casos 1 e 2 (salas de aula com ventilação unilateral na orientação leste) e 3 e 4 (salas de aula com ventilação cruzada leste-oeste), para o vento leste ($\theta = 90^\circ$) e sudeste ($\theta = 135^\circ$), em sequência



Fonte: Autora (2021)

Como estabelecido no item 3.1.2., nos casos 5 e 6 o edifício possui uma circulação central, que conecta 8 salas de aula. Este recebe ventilação natural nas orientações leste e oeste, sendo, na Figura 66, apresentados os mapas dos C_p 's nas fachadas do edifício. Em comparação aos casos anteriores, percebe-se que as faces voltadas para oeste possuem valores mais baixos de C_p , em virtude do edifício ter um comprimento de 7,9 m a mais nas fachadas norte e sul, o que interfere no escoamento. A janela externa com menor valor de C_p , para o vento leste, é a Janela 98 (parte inferior) com -0,42, e para o vento sudeste é a Janela 87 (parte inferior), com -0,58, conforme o Apêndice B.

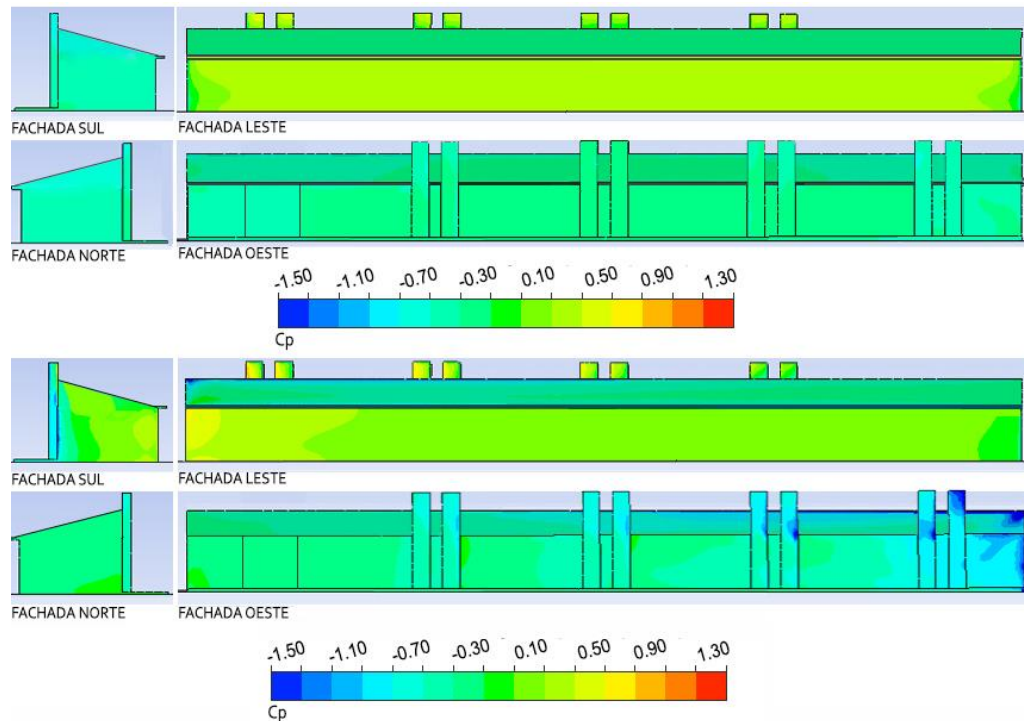
Figura 66 - Mapas de C_p 's nas fachadas dos casos 5 e 6 (salas de aula com ventilação cruzada leste-oeste conectadas a uma circulação ventilada por lanternim), para o vento leste ($\theta = 90^\circ$) e sudeste ($\theta = 135^\circ$), em sequência



Fonte: Autora (2021)

Os casos 7 e 8 englobam um edifício de 4 salas de aula e dois sanitários, apresentando 8 chaminés solares inseridas na orientação oeste. Na parede de orientação leste, conforme a Figura 67, os valores são os mesmos dos identificados na Figura 65. As variações ocorrem apenas nas paredes de orientação oeste, entretanto, nessas fachadas não há janelas.

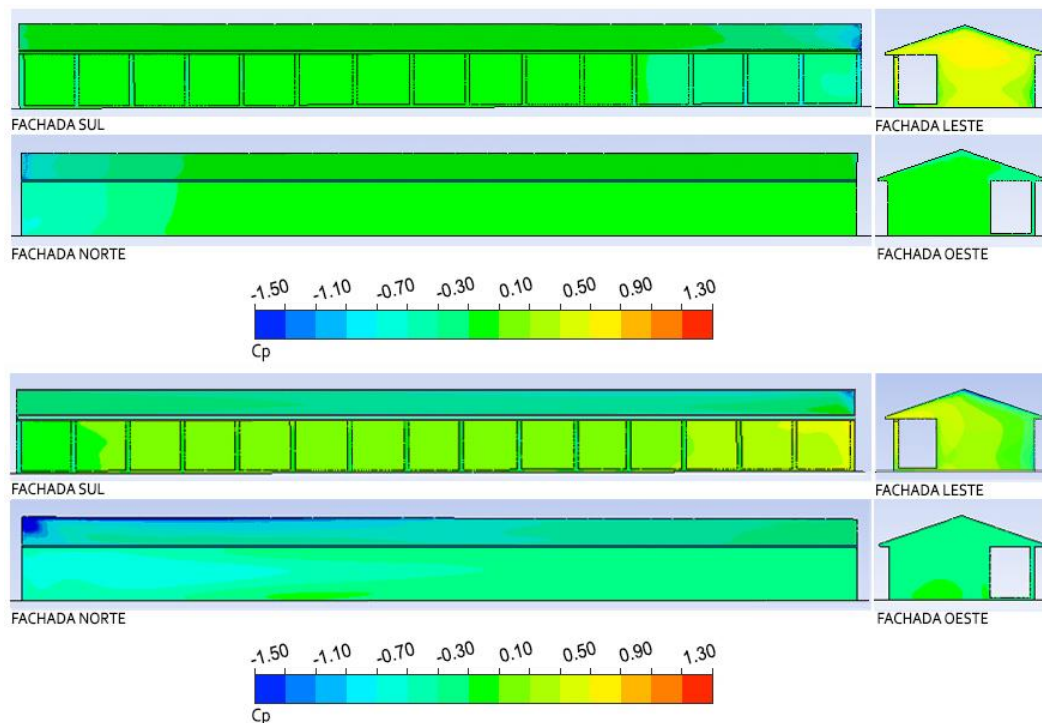
Figura 67 - Mapas de Cp's nas fachadas dos casos 7 e 8 (ventilação natural na orientação leste com adição de chaminés solares na orientação oeste), para o vento leste ($\theta = 90^\circ$) e sudeste ($\theta = 135^\circ$), em sequência



Fonte: Autora (2021)

Na Figura 68, são apresentadas as distribuições de Cp's nas fachadas dos blocos dos casos 9, 10, 11 e 12, que apresentam a mesma geometria. Na primeira situação (vento de origem leste), com exceção da face perpendicular ao vento, as fachadas possuem, majoritariamente, coeficientes de pressão inferiores a 0, sendo que todas as janelas possuem valores médios de Cp negativos. Na segunda situação (vento de origem sudeste) os valores de Cp são menores do que 0,70 em todas as fachadas. Na orientação norte existe apenas coeficientes negativos. O valor médio mais alto para os casos 9 e 10 é identificado na Janela 19 (-0,11), e para os casos 11 e 12 é apresentado na Janela 21 (0,56) conforme o Apêndice B.

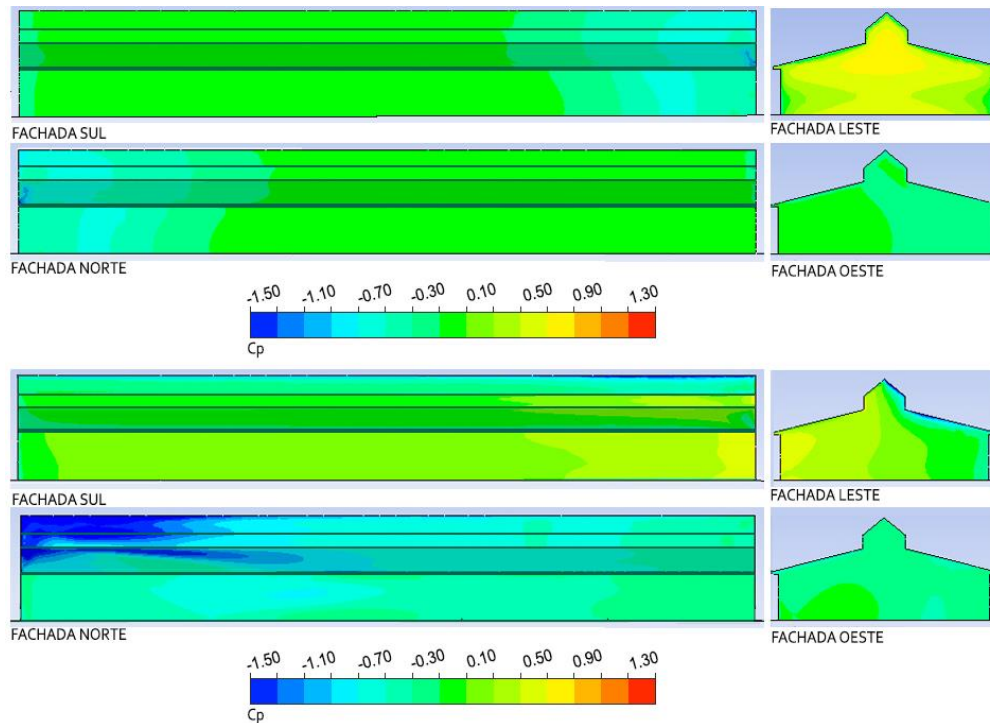
Figura 68 - Mapas de C_p 's nas fachadas dos casos 9 e 10 (salas de aula com ventilação unilateral na orientação norte) e 11 e 12 (salas de aula com ventilação cruzada norte-sul) para o vento leste ($\theta = 90^\circ$) e sudeste ($\theta = 135^\circ$), em sequência



Fonte: Autora (2021)

Nos casos 13 e 14 o bloco possui uma circulação central, que conecta 8 salas de aula, havendo, no edifício, ventilação natural nas orientações norte e sul. Na Figura 69 são apresentados os mapas dos C_p nas fachadas, para o vento de origem leste e sudeste. Na primeira situação, os maiores valores de C_p são identificados na fachada perpendicular ao vento, em que não há janelas, sendo que, nas demais faces há majoritariamente valores negativos (inferiores a $-0,02$). Na segunda situação, os menores valores são identificados na fachada norte (inferiores a $-0,20$) e os mais altos na sul (onde o valor máximo é $0,63$), sendo que ambas possuem esquadrias de peitoril médio conforme apresentado no item 3.1.2.

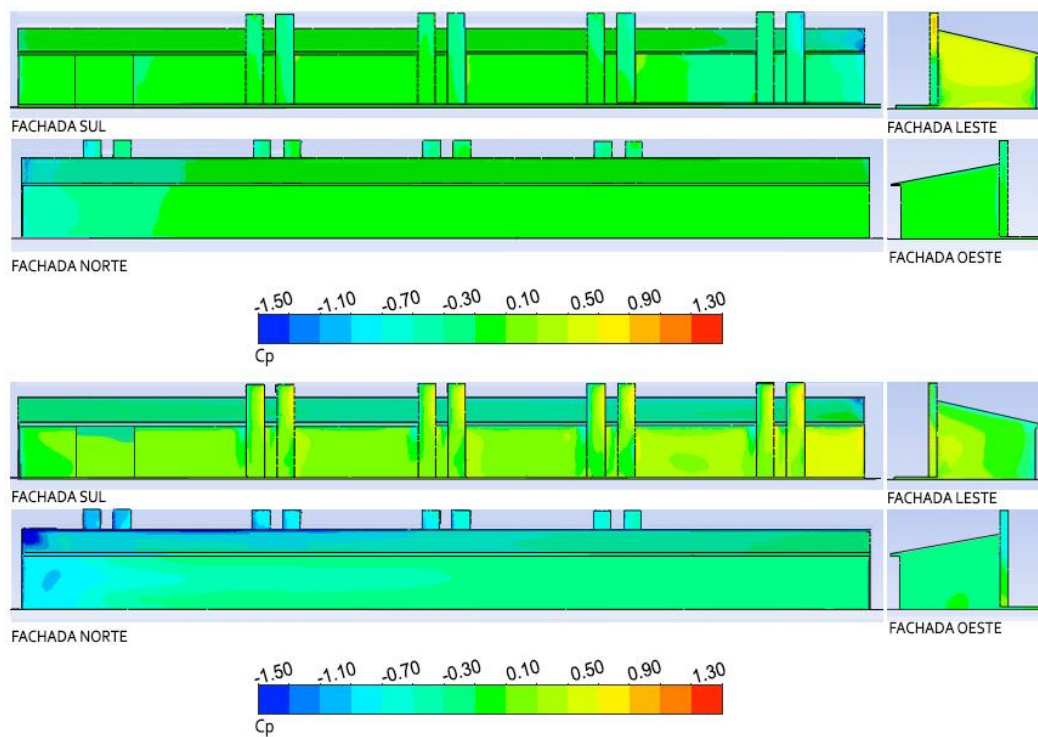
Figura 69 - Mapas de C_p 's nas fachadas dos casos 13 e 14 (salas de aula com ventilação cruzada norte-sul conectadas a uma circulação ventilada por lanternim), para o vento leste ($\theta = 90^\circ$) e sudeste ($\theta = 135^\circ$), em sequência



Fonte: Autora (2021)

Na Figura 70 é apresentada a distribuição de C_p 's nas fachadas dos edifícios dos casos 15 e 16, onde há chaminés solares na orientação sul. Na primeira situação, valores superiores a 0,50 são identificados apenas na face leste. Nas demais fachadas os valores máximos de C_p alcançam 0,12. A abertura com valor médio mais alto de C_p , conforme o Apêndice B, é a janela 9 (sistema inferior), com -0,01. Na segunda situação, quando o vento é de origem sudeste, os valores mais baixos são identificados na fachada norte, onde há esquadrias de peitoril médio. Para essa fachada, a abertura com o valor médio mais alto de C_p é a Janela 20, com -0,13, conforme o Apêndice B.

Figura 70 - Mapas de C_p 's nas fachadas dos casos 15 e 16 (ventilação natural na orientação norte com adição de chaminés solares na orientação sul), para o vento leste ($\theta = 90^\circ$) e sudeste ($\theta = 135^\circ$), em sequência



Fonte: Autora (2021)

Apêndice B

VALORES DOS COEFICIENTES DE PRESSÃO DO VENTO NAS ABERTURAS

Tabela 19 – Cp's das aberturas dos casos 1 e 2 considerando o vento de origem leste, $\theta = 90^\circ$

(Continua)

Abertura	Cp médio
Janela 1 parte inferior	0,2787
Janela 1 parte superior	0,3925
Janela 2 parte inferior	0,3626
Janela 2 parte superior	0,4198
Janela 3 parte inferior	0,3741
Janela 3 parte superior	0,4055
Janela 4 parte inferior	0,3764
Janela 4 parte superior	0,3937
Janela 5 parte inferior	0,3802
Janela 5 parte superior	0,3920
Janela 6 parte inferior	0,3826
Janela 6 parte superior	0,3944
Janela 7 parte inferior	0,3841
Janela 7 parte superior	0,3950
Janela 8 parte inferior	0,3800
Janela 8 parte superior	0,3900
Janela 9 parte inferior	0,3799
Janela 9 parte superior	0,3818
Janela 10 parte inferior	0,3817
Janela 10 parte superior	0,3815
Janela 11 parte inferior	0,3797
Janela 11 parte superior	0,3817
Janela 12 parte inferior	0,3799
Janela 12 parte superior	0,3813
Janela 13 parte inferior	0,3815
Janela 13 parte superior	0,3888
Janela 14 parte inferior	0,3852
Janela 14 parte superior	0,3962
Janela 15 parte inferior	0,3861
Janela 15 parte superior	0,3996
Janela 16 parte inferior	0,3833

Tabela 19 – Cp's das aberturas dos casos 1 e 2 considerando o vento de origem leste, $\theta = 90^\circ$

(Conclusão)

Abertura	Cp médio
Janela 16 parte superior	0,3994
Janela 17	0,3986
Janela 18	0,4029
Janela 19	0,4145
Janela 20	0,3860

Fonte: Autora (2021)

Tabela 20 – Cp's das aberturas dos casos 1 e 2 considerando o vento de origem sudeste, $\theta = 135^\circ$

(Continua)

Abertura	Cp médio
Janela 1 parte inferior	0,4602
Janela 1 parte superior	0,4921
Janela 2 parte inferior	0,3542
Janela 2 parte superior	0,3692
Janela 3 parte inferior	0,2935
Janela 3 parte superior	0,3118
Janela 4 parte inferior	0,2485
Janela 4 parte superior	0,2718
Janela 5 parte inferior	0,2088
Janela 5 parte superior	0,2340
Janela 6 parte inferior	0,1873
Janela 6 parte superior	0,2152
Janela 7 parte inferior	0,1722
Janela 7 parte superior	0,2037
Janela 8 parte inferior	0,1914
Janela 8 parte superior	0,1962
Janela 9 parte inferior	0,1551
Janela 9 parte superior	0,1786
Janela 10 parte inferior	0,1542
Janela 10 parte superior	0,1750
Janela 11 parte inferior	0,1567
Janela 11 parte superior	0,1742
Janela 12 parte inferior	0,1612
Janela 12 parte superior	0,1754
Janela 13 parte inferior	0,1673
Janela 13 parte superior	0,1779
Janela 14 parte inferior	0,1722

Tabela 20 - Cp's das aberturas dos casos 1 e 2 considerando o vento de origem sudeste, $\theta = 135^\circ$

(Conclusão)

Abertura	Cp médio
Janela 14 parte superior	0,1801
Janela 15 parte inferior	0,1679
Janela 15 parte superior	0,1706
Janela 16 parte inferior	0,1664
Janela 16 parte superior	0,1683
Janela 17	0,1639
Janela 18	0,1555
Janela 19	0,1380
Janela 20	0,0776

Fonte: Autora (2021)

Tabela 21 – Cp's das aberturas elevadas dos casos 3 e 4 considerando o vento de origem leste, $\theta = 90^\circ$ ⁵

(Continua)

Abertura	Cp médio
Janela 21	-0,3229
Janela 22	-0,3251
Janela 23	-0,3265
Janela 24	-0,3262
Janela 25	-0,3240
Janela 26	-0,3180
Janela 27	-0,2884
Janela 28	-0,2777
Janela 29	-0,2656
Janela 30	-0,2533
Janela 31	-0,2406
Janela 32	-0,2270
Janela 33	-0,1780
Janela 34	-0,1634
Janela 35	-0,1474
Janela 36	-0,1406
Janela 37	-0,1495
Janela 38	-0,1677
Janela 39	-0,2183
Janela 40	-0,2321

⁵ Nos casos 3 e 4, os Cp's das janelas de orientação leste são os mesmos dos apresentados nos casos 1 e 2 considerando os ventos de origem leste e sudeste.

Tabela 21 – Cp's das aberturas elevadas dos casos 3 e 4 considerando o vento de origem leste, $\theta = 90^\circ$

(Conclusão)

Abertura	Cp médio
Janela 41	-0,2452
Janela 42	-0,2563
Janela 43	-0,2672
Janela 44	-0,2780

Fonte: Autora (2021)

Tabela 22 – Cp's das aberturas elevadas dos casos 3 e 4 considerando o vento de origem sudeste, $\theta = 135^\circ$

Abertura	Cp médio
Janela 21	-0,4650
Janela 22	-0,4736
Janela 23	-0,4703
Janela 24	-0,4411
Janela 25	-0,4003
Janela 26	-0,3941
Janela 27	-0,3472
Janela 28	-0,3538
Janela 29	-0,2948
Janela 30	-0,2687
Janela 31	-0,2626
Janela 32	-0,2127
Janela 33	-0,1521
Janela 34	-0,1332
Janela 35	-0,1354
Janela 36	-0,1336
Janela 37	-0,1275
Janela 38	-0,1201
Janela 39	-0,1154
Janela 40	-0,1110
Janela 41	-0,1130
Janela 42	-0,1118
Janela 43	-0,1099
Janela 44	-0,1113

Fonte: Autora (2021)

Tabela 23 – Cp's das aberturas dos casos 5 e 6 considerando o vento de origem leste, $\theta = 90^\circ$ -⁶

(Continua)

Abertura	Cp médio
Janela 21	-0,4791
Janela 22	-0,4797
Janela 23	-0,4800
Janela 24	-0,4801
Janela 25	-0,4801
Janela 26	-0,4801
Janela 27	-0,4801
Janela 28	-0,4801
Janela 29	-0,4801
Janela 30	-0,4801
Janela 31	-0,4801
Janela 32	-0,4801
Janela 33	-0,4802
Janela 34	-0,4802
Janela 35	-0,4802
Janela 36	-0,4803
Janela 37	-0,4803
Janela 38	-0,4804
Janela 39	-0,4806
Janela 40	-0,4807
Janela 41	-0,4808
Janela 42	-0,4808
Janela 43	-0,4809
Janela 44	-0,4809
Janela 57	-0,4801
Janela 58	-0,4801
Janela 59	-0,4801
Janela 60	-0,4801
Janela 61	-0,4801
Janela 62	-0,4801
Janela 63	-0,4802
Janela 64	-0,4802
Janela 65	-0,4802
Janela 66	-0,4803
Janela 67	-0,4803
Janela 68	-0,4804

⁶ Nos casos 5 e 6 os Cp's das janelas de peitoril médio situadas à leste são o mesmos dos apresentados nos casos 1 e 2. As janelas enumeradas a partir de 101 são as localizadas no lanternim.

Tabela 23 – Cp's das aberturas dos casos 5 e 6 considerando o vento de origem leste, $\theta = 90^\circ$

(Continuação)

Abertura	Cp médio
Janela 69	-0,4806
Janela 70	-0,4807
Janela 71	-0,4808
Janela 72	-0,4808
Janela 73	-0,4809
Janela 74	-0,4809
Janela 75	-0,4811
Janela 76	-0,4811
Janela 77	-0,4811
Janela 78	-0,4812
Janela 79	-0,4812
Janela 80	-0,4812
Janela 81	-0,3667
Janela 82	-0,4004
Janela 83	-0,4084
Janela 84	-0,4075
Janela 85 parte inferior	-0,4048
Janela 85 parte superior	-0,3986
Janela 86 parte inferior	-0,3911
Janela 86 parte superior	-0,3831
Janela 87 parte inferior	-0,3689
Janela 87 parte superior	-0,3586
Janela 88 parte inferior	-0,3368
Janela 88 parte superior	-0,3240
Janela 89 parte inferior	-0,2844
Janela 89 parte superior	-0,2703
Janela 90 parte inferior	-0,2495
Janela 90 parte superior	-0,2348
Janela 91 parte inferior	-0,2560
Janela 91 parte superior	-0,2410
Janela 92 parte inferior	-0,2964
Janela 92 parte superior	-0,2813
Janela 93 parte inferior	-0,3447
Janela 93 parte superior	-0,3322
Janela 94 parte inferior	-0,3744
Janela 94 parte superior	-0,3643
Janela 95 parte inferior	-0,3952
Janela 95 parte superior	-0,3874
Janela 96 parte inferior	-0,4079
Janela 96 parte superior	-0,4020
Janela 97 parte inferior	-0,4147

Tabela 23 – Cp's das aberturas dos casos 5 e 6 considerando o vento de origem leste, $\theta = 90^\circ$

(Continuação)

Abertura	Cp médio
Janela 97 parte superior	-0,4101
Janela 98 parte inferior	-0,4149
Janela 98 parte superior	-0,4113
Janela 99 parte inferior	-0,4055
Janela 99 parte superior	-0,4043
Janela 100 parte inferior	-0,3673
Janela 100 parte superior	-0,3718
Janela 101	0,2412
Janela 102	0,2845
Janela 103	0,2998
Janela 104	0,3052
Janela 105	0,3053
Janela 106	0,3067
Janela 107	0,3068
Janela 108	0,3033
Janela 109	0,3026
Janela 110	0,3017
Janela 111	0,3017
Janela 112	0,3005
Janela 113	0,2995
Janela 114	0,3002
Janela 115	0,3026
Janela 116	0,3048
Janela 117	0,3015
Janela 118	0,3004
Janela 119	0,2982
Janela 120	0,2987
Janela 121	0,3009
Janela 122	0,3002
Janela 123	0,2977
Janela 124	0,2983
Janela 125	0,3011
Janela 126	0,3031
Janela 127	0,3038
Janela 128	0,3037
Janela 129	0,3040
Janela 130	0,3061
Janela 131	0,3046
Janela 132	0,3039
Janela 133	0,2959
Janela 134	0,2638

Tabela 23 – Cp's das aberturas dos casos 5 e 6 considerando o vento de origem leste, $\theta = 90^\circ$

(Conclusão)

Abertura	Cp médio
Janela 135	-0,3909
Janela 136	-0,3928
Janela 137	-0,3956
Janela 138	-0,3985
Janela 139	-0,4019
Janela 140	-0,4055
Janela 141	-0,4087
Janela 142	-0,4106
Janela 143	-0,4103
Janela 144	-0,4069
Janela 145	-0,3998
Janela 146	-0,3888
Janela 147	-0,3748
Janela 148	-0,3599
Janela 149	-0,3458
Janela 150	-0,3353
Janela 151	-0,3298
Janela 152	-0,3305
Janela 153	-0,3374
Janela 154	-0,3494
Janela 155	-0,3641
Janela 156	-0,3794
Janela 157	-0,3937
Janela 158	-0,4050
Janela 159	-0,4048
Janela 160	-0,4122
Janela 161	-0,4150
Janela 162	-0,4125
Janela 163	-0,4091
Janela 164	-0,4058
Janela 165	-0,4026
Janela 166	-0,3996
Janela 167	-0,3967
Janela 168	-0,3944

Fonte: Autora (2021)

Tabela 24 - Cp's das aberturas dos casos 5 e 6 considerando o vento de origem sudeste, $\theta = 135^\circ$

(Continua)

Abertura	Cp médio
Janela 21	-0,9436
Janela 22	-0,9435
Janela 23	-0,9436
Janela 24	-0,9436
Janela 25	-0,9437
Janela 26	-0,9437
Janela 27	-0,9436
Janela 28	-0,9437
Janela 29	-0,9436
Janela 30	-0,9435
Janela 31	-0,9434
Janela 32	-0,9434
Janela 33	-0,9435
Janela 34	-0,9435
Janela 35	-0,9435
Janela 36	-0,9435
Janela 37	-0,9435
Janela 38	-0,9435
Janela 39	-0,9435
Janela 40	-0,9435
Janela 41	-0,9435
Janela 42	-0,9435
Janela 43	-0,9435
Janela 44	-0,9434
Janela 57	-0,9438
Janela 58	-0,9437
Janela 59	-0,9437
Janela 60	-0,9437
Janela 61	-0,9436
Janela 62	-0,9434
Janela 63	-0,9435
Janela 64	-0,9435
Janela 65	-0,9435
Janela 66	-0,9435
Janela 67	-0,9435
Janela 68	-0,9435
Janela 69	-0,9435
Janela 70	-0,9435
Janela 71	-0,9435
Janela 72	-0,9435
Janela 73	-0,9435
Janela 74	-0,9434

Tabela 24 – Cp's das aberturas dos casos 5 e 6 considerando o vento de origem sudeste, $\theta = 135^\circ$

(Continuação)

Abertura	Cp médio
Janela 75	-0,9434
Janela 76	-0,9434
Janela 77	-0,9434
Janela 78	-0,9434
Janela 79	-0,9434
Janela 80	-0,9435
Janela 81	-0,3184
Janela 82	-0,3705
Janela 83	-0,3994
Janela 84	-0,4468
Janela 85 parte inferior	-0,5143
Janela 85 parte superior	-0,5040
Janela 86 parte inferior	-0,5500
Janela 86 parte superior	-0,5267
Janela 87 parte inferior	-0,5834
Janela 87 parte superior	-0,5300
Janela 88 parte inferior	-0,6324
Janela 88 parte superior	-0,5301
Janela 89 parte inferior	-0,6486
Janela 89 parte superior	-0,4956
Janela 90 parte inferior	-0,5425
Janela 90 parte superior	-0,3936
Janela 91 parte inferior	-0,4407
Janela 91 parte superior	-0,3283
Janela 92 parte inferior	-0,4131
Janela 92 parte superior	-0,3363
Janela 93 parte inferior	-0,3986
Janela 93 parte superior	-0,3500
Janela 94 parte inferior	-0,3759
Janela 94 parte superior	-0,3425
Janela 95 parte inferior	-0,3511
Janela 95 parte superior	-0,3278
Janela 96 parte inferior	-0,3300
Janela 96 parte superior	-0,3147
Janela 97 parte inferior	-0,3047
Janela 97 parte superior	-0,2949
Janela 98 parte inferior	-0,2764
Janela 98 parte superior	-0,2682
Janela 99 parte inferior	-0,2384
Janela 99 parte superior	-0,2295
Janela 100 parte inferior	-0,1904
Janela 100 parte superior	-0,1986

Tabela 24 – Cp's das aberturas dos casos 5 e 6 considerando o vento de origem sudeste, $\theta = 135^\circ$

(Continuação)

Abertura	Cp médio
Janela 101	0,2342
Janela 102	0,3232
Janela 103	0,3507
Janela 104	0,3188
Janela 105	0,2836
Janela 106	0,2431
Janela 107	0,2077
Janela 108	0,1761
Janela 109	0,1510
Janela 110	0,1307
Janela 111	0,1157
Janela 112	0,1047
Janela 113	0,0960
Janela 114	0,0898
Janela 115	0,0871
Janela 116	0,0895
Janela 117	0,0858
Janela 118	0,0849
Janela 119	0,0834
Janela 120	0,0805
Janela 121	0,0764
Janela 122	0,0719
Janela 123	0,0678
Janela 124	0,0647
Janela 125	0,0609
Janela 126	0,0557
Janela 127	0,0507
Janela 128	0,0483
Janela 129	0,0484
Janela 130	0,0489
Janela 131	0,0479
Janela 132	0,0421
Janela 133	0,0273
Janela 134	0,0022
Janela 135	-1,1419
Janela 136	-1,1005
Janela 137	-1,2710
Janela 138	-1,2355
Janela 139	-1,1771
Janela 140	-1,1357
Janela 141	-1,0601
Janela 142	-0,9557

Tabela 24 – Cp's das aberturas dos casos 5 e 6 considerando o vento de origem sudeste, $\theta = 135^\circ$

(Conclusão)

Abertura	Cp médio
Janela 143	-0,8489
Janela 144	-0,7614
Janela 145	-0,7085
Janela 146	-0,6929
Janela 147	-0,6864
Janela 148	-0,6729
Janela 149	-0,6524
Janela 150	-0,6318
Janela 151	-0,6124
Janela 152	-0,5938
Janela 153	-0,5747
Janela 154	-0,5553
Janela 155	-0,5456
Janela 156	-0,5696
Janela 157	-0,6290
Janela 158	-0,6533
Janela 159	-0,5939
Janela 160	-0,5076
Janela 161	-0,5180
Janela 162	-0,5198
Janela 163	-0,5047
Janela 164	-0,4800
Janela 165	-0,4490
Janela 166	-0,4090
Janela 167	-0,3560
Janela 168	-0,3034

Fonte: Autora (2021)

Tabela 25 – Cp's das aberturas dos casos 9 e 10 considerando o vento de origem leste, $\theta = 90^\circ$

(Continua)

Abertura	Cp médio
Janela 1 parte inferior	-0,4624
Janela 1 parte superior	-0,4124
Janela 2 parte inferior	-0,3775
Janela 2 parte superior	-0,3693
Janela 3 parte inferior	-0,2315
Janela 3 parte superior	-0,2337
Janela 4 parte inferior	-0,1185
Janela 4 parte superior	-0,1236
Janela 5 parte inferior	-0,0519

Tabela 25 - Cp's das aberturas dos casos 9 e 10 considerando o vento de origem leste, $\theta = 90^\circ$

(Conclusão)

Abertura	Cp médio
Janela 5 parte superior	-0,0566
Janela 6 parte inferior	-0,0291
Janela 6 parte superior	-0,0328
Janela 7 parte inferior	-0,0196
Janela 7 parte superior	-0,0226
Janela 8 parte inferior	-0,0156
Janela 8 parte superior	-0,0180
Janela 9 parte inferior	-0,0137
Janela 9 parte superior	-0,0156
Janela 10 parte inferior	-0,0132
Janela 10 parte superior	-0,0148
Janela 11 parte inferior	-0,0130
Janela 11 parte superior	-0,0144
Janela 12 parte inferior	-0,0131
Janela 12 parte superior	-0,0143
Janela 13 parte inferior	-0,0134
Janela 13 parte superior	-0,0145
Janela 14 parte inferior	-0,0139
Janela 14 parte superior	-0,0149
Janela 15 parte inferior	-0,0148
Janela 15 parte superior	-0,0158
Janela 16 parte inferior	-0,0163
Janela 16 parte superior	-0,0173
Janela 17	-0,0201
Janela 18	-0,0236
Janela 19	-0,0288
Janela 20	-0,0394

Fonte: Autora (2021)

Tabela 26 – Cp's das aberturas dos casos 9 e 10 considerando o vento de origem leste, $\theta = 90^\circ$

(Continua)

Abertura	Cp médio
Janela 1 parte inferior	-0,5885
Janela 1 parte superior	-0,5501
Janela 2 parte inferior	-0,6155
Janela 2 parte superior	-0,5630

Tabela 26 – Cp's das aberturas dos casos 9 e 10 considerando o vento de origem leste, $\theta = 90^\circ$

(Continuação)

Abertura	Cp médio
Janela 3 parte inferior	-0,6434
Janela 3 parte superior	-0,5226
Janela 4 parte inferior	-0,6215
Janela 4 parte superior	-0,4719
Janela 5 parte inferior	-0,5708
Janela 5 parte superior	-0,3829
Janela 6 parte inferior	-0,5148
Janela 6 parte superior	-0,3066
Janela 7 parte inferior	-0,4552
Janela 7 parte superior	-0,2463
Janela 8 parte inferior	-0,4021
Janela 8 parte superior	-0,2075
Janela 9 parte inferior	-0,3535
Janela 9 parte superior	-0,1879
Janela 10 parte inferior	-0,3188
Janela 10 parte superior	-0,1798
Janela 11 parte inferior	-0,2884
Janela 11 parte superior	-0,1743
Janela 12 parte inferior	-0,2625
Janela 12 parte superior	-0,1690
Janela 13 parte inferior	-0,2305
Janela 13 parte superior	-0,1590
Janela 14 parte inferior	-0,2013
Janela 14 parte superior	-0,1432
Janela 15 parte inferior	-0,1739
Janela 15 parte superior	-0,1268
Janela 16 parte inferior	-0,1544
Janela 16 parte superior	-0,1207
Janela 17	-0,1195
Janela 18	-0,1178
Janela 19	-0,1163
Janela 20	-0,1337
Janela 21	-0,3133
Janela 22	-0,3295
Janela 23	-0,2951
Janela 24	-0,2435
Janela 25	-0,1942
Janela 26	-0,1627
Janela 27	-0,1030

Tabela 26 – Cp's das aberturas dos casos 11 e 12 considerando o vento de origem leste, $\theta = 90^\circ$ ⁷

(Conclusão)

Abertura	Cp médio
Janela 28	-0,0881
Janela 29	-0,0748
Janela 30	-0,0639
Janela 31	-0,0552
Janela 32	-0,0485
Janela 33	-0,0361
Janela 34	-0,0342
Janela 35	-0,0323
Janela 36	-0,0307
Janela 37	-0,0296
Janela 38	-0,0287
Janela 39	-0,0266
Janela 40	-0,0261
Janela 41	-0,0263
Janela 42	-0,0261
Janela 43	-0,0264
Janela 44	-0,0271

Fonte: Autora (2021)

Tabela 27 – Cp's das aberturas dos casos 11 e 12 considerando o vento de origem sudeste, $\theta = 135^\circ$

(Continua)

Abertura	Cp médio
Janela 21	0,5652
Janela 22	0,5316
Janela 23	0,5109
Janela 24	0,4676
Janela 25	0,4125
Janela 26	0,3632
Janela 27	0,2752
Janela 28	0,2567
Janela 29	0,2313
Janela 30	0,2152
Janela 31	0,1969
Janela 32	0,1815
Janela 33	0,1561
Janela 34	0,1556

⁷ Nos casos 11 e 12, os Cp's das janelas de orientação norte são o mesmos dos apresentados nos casos 9 e 10 considerando os ventos de origem leste e sudeste.

Tabela 27 – Cp's das aberturas dos casos 11 e 12 considerando o vento de origem sudeste, $\theta = 135^\circ$
(Conclusão)

Abertura	Cp médio
Janela 35	0,1552
Janela 36	0,1566
Janela 37	0,1570
Janela 38	0,1561
Janela 39	0,1596
Janela 40	0,1611
Janela 41	0,1619
Janela 42	0,1640
Janela 43	0,1624
Janela 44	0,1447

Fonte: Autora (2021)

Tabela 28 – Cp's das aberturas dos casos 13 e 14 considerando o vento de origem leste, $\theta = 90^\circ$
(Continua)

Abertura	Cp médio
Janela 1 parte inferior	-0,3525
Janela 1 parte superior	-0,3555
Janela 2 parte inferior	-0,4923
Janela 2 parte superior	-0,4822
Janela 3 parte inferior	-0,5651
Janela 3 parte superior	-0,5814
Janela 4 parte inferior	-0,4361
Janela 4 parte superior	-0,4671
Janela 5 parte inferior	-0,2089
Janela 5 parte superior	-0,2304
Janela 6 parte inferior	-0,1099
Janela 6 parte superior	-0,1215
Janela 7 parte inferior	-0,0592
Janela 7 parte superior	-0,0652
Janela 8 parte inferior	-0,0338
Janela 8 parte superior	-0,0369
Janela 9 parte inferior	-0,0180
Janela 9 parte superior	-0,0202
Janela 10 parte inferior	-0,0125
Janela 10 parte superior	-0,0140
Janela 11 parte inferior	-0,0104
Janela 11 parte superior	-0,0119
Janela 12 parte inferior	-0,0103

Tabela 28 – Cp's das aberturas dos casos 13 e 14 considerando o vento de origem leste, $\theta = 90^\circ$

(Continuação)

Abertura	Cp médio
Janela 12 parte superior	-0,0118
Janela 13 parte inferior	-0,0138
Janela 13 parte superior	-0,0151
Janela 14 parte inferior	-0,0161
Janela 14 parte superior	-0,0172
Janela 15 parte inferior	-0,0199
Janela 15 parte superior	-0,0210
Janela 16 parte inferior	-0,0246
Janela 16 parte superior	-0,0258
Janela 17	-0,0334
Janela 18	-0,0420
Janela 19	-0,0545
Janela 20	-0,0782
Janela 21	-0,5233
Janela 22	-0,5234
Janela 23	-0,5233
Janela 24	-0,5232
Janela 25	-0,5230
Janela 26	-0,5230
Janela 27	-0,5229
Janela 28	-0,5229
Janela 29	-0,5229
Janela 30	-0,5229
Janela 31	-0,5229
Janela 32	-0,5229
Janela 33	-0,5229
Janela 34	-0,5229
Janela 35	-0,5228
Janela 36	-0,5228
Janela 37	-0,5228
Janela 38	-0,5228
Janela 39	-0,5228
Janela 40	-0,5228
Janela 41	-0,5228
Janela 42	-0,5228
Janela 43	-0,5228
Janela 44	-0,5228
Janela 57	-0,5229
Janela 58	-0,5229
Janela 59	-0,5229
Janela 60	-0,5229

Tabela 28 – Cp's das aberturas dos casos 13 e 14 considerando o vento de origem leste, $\theta = 90^\circ$

(Continuação)

Abertura	Cp médio
Janela 61	-0,5229
Janela 62	-0,5229
Janela 63	-0,5229
Janela 64	-0,5229
Janela 65	-0,5228
Janela 66	-0,5228
Janela 67	-0,5228
Janela 68	-0,5228
Janela 69	-0,5228
Janela 70	-0,5228
Janela 71	-0,5228
Janela 72	-0,5228
Janela 73	-0,5228
Janela 74	-0,5228
Janela 75	-0,5228
Janela 76	-0,5228
Janela 77	-0,5228
Janela 78	-0,5228
Janela 79	-0,5228
Janela 80	-0,5228
Janela 81	-0,3537
Janela 82	-0,4826
Janela 83	-0,5807
Janela 84	-0,4683
Janela 85 parte inferior	-0,2057
Janela 85 parte superior	-0,2288
Janela 86 parte inferior	-0,1090
Janela 86 parte superior	-0,1206
Janela 87 parte inferior	-0,0597
Janela 87 parte superior	-0,0655
Janela 88 parte inferior	-0,0348
Janela 88 parte superior	-0,0378
Janela 89 parte inferior	-0,0191
Janela 89 parte superior	-0,0214
Janela 90 parte inferior	-0,0138
Janela 90 parte superior	-0,0153
Janela 91 parte inferior	-0,0128
Janela 91 parte superior	-0,0128
Janela 92 parte inferior	-0,0113
Janela 92 parte superior	-0,0126
Janela 93 parte inferior	-0,0129

Tabela 28 - Cp's das aberturas dos casos 13 e 14 considerando o vento de origem leste, $\theta = 90^\circ$

(Continuação)

Abertura	Cp médio
Janela 93 parte superior	-0,0141
Janela 94 parte inferior	-0,0152
Janela 94 parte superior	-0,0164
Janela 95 parte inferior	-0,0185
Janela 95 parte superior	-0,0197
Janela 96 parte inferior	-0,0224
Janela 96 parte superior	-0,0237
Janela 97 parte inferior	-0,0291
Janela 97 parte superior	-0,0302
Janela 98 parte inferior	-0,0363
Janela 98 parte superior	-0,0375
Janela 99 parte inferior	-0,0466
Janela 99 parte superior	-0,0478
Janela 100 parte inferior	-0,0644
Janela 100 parte superior	-0,0675
Janela 101	-0,4898
Janela 102	-0,5555
Janela 103	-0,5682
Janela 104	-0,5473
Janela 105	-0,5092
Janela 106	-0,4595
Janela 107	-0,3991
Janela 108	-0,3322
Janela 109	-0,2638
Janela 110	-0,2001
Janela 111	-0,1450
Janela 112	-0,1006
Janela 113	-0,0674
Janela 114	-0,0437
Janela 115	-0,0277
Janela 116	-0,0176
Janela 117	-0,0116
Janela 118	-0,0084
Janela 119	-0,0072
Janela 120	-0,0075
Janela 121	-0,0085
Janela 122	-0,0102
Janela 123	-0,0125
Janela 124	-0,0151
Janela 125	-0,0181
Janela 126	-0,0214

Tabela 28 – Cp's das aberturas dos casos 13 e 14 considerando o vento de origem leste, $\theta = 90^\circ$

(Continuação)

Abertura	Cp médio
Janela 127	-0,0203
Janela 128	-0,0295
Janela 129	-0,0344
Janela 130	-0,0402
Janela 131	-0,0470
Janela 132	-0,0552
Janela 133	-0,0649
Janela 134	-0,0756
Janela 135	-0,5127
Janela 136	-0,5508
Janela 137	-0,5201
Janela 138	-0,5076
Janela 139	-0,4696
Janela 140	-0,4215
Janela 141	-0,3619
Janela 142	-0,2978
Janela 143	-0,2338
Janela 144	-0,1764
Janela 145	-0,1286
Janela 146	-0,0904
Janela 147	-0,0624
Janela 148	-0,0426
Janela 149	-0,0293
Janela 150	-0,0207
Janela 151	-0,0156
Janela 152	-0,0129
Janela 153	-0,0119
Janela 154	-0,0121
Janela 155	-0,0132
Janela 156	-0,0149
Janela 157	-0,0169
Janela 158	-0,0195
Janela 159	-0,0224
Janela 160	-0,0258
Janela 161	-0,0297
Janela 162	-0,0342
Janela 163	-0,0396
Janela 164	-0,0460
Janela 165	-0,0538
Janela 166	-0,0636
Janela 167	-0,0762

Tabela 28 – Cp's das aberturas dos casos 13 e 14 considerando o vento de origem leste, $\theta = 90^\circ$

(Conclusão)

Abertura	Cp médio
Janela 168	-0,0918

Fonte: Autora (2021)

Tabela 29 – Cp's das aberturas dos casos 13 e 14 considerando o vento de origem sudeste, $\theta = 135^\circ$

(Continua)

Abertura	Cp médio
Janela 1 parte inferior	-0,3859
Janela 1 parte superior	-0,3684
Janela 2 parte inferior	-0,4771
Janela 2 parte superior	-0,4598
Janela 3 parte inferior	-0,4589
Janela 3 parte superior	-0,4467
Janela 4 parte inferior	-0,5196
Janela 4 parte superior	-0,4947
Janela 5 parte inferior	-0,6198
Janela 5 parte superior	-0,5737
Janela 6 parte inferior	-0,6537
Janela 6 parte superior	-0,5895
Janela 7 parte inferior	-0,6891
Janela 7 parte superior	-0,5785
Janela 8 parte inferior	-0,7236
Janela 8 parte superior	-0,5602
Janela 9 parte inferior	-0,6606
Janela 9 parte superior	-0,4913
Janela 10 parte inferior	-0,5610
Janela 10 parte superior	-0,4249
Janela 11 parte inferior	-0,4995
Janela 11 parte superior	-0,4054
Janela 12 parte inferior	-0,4596
Janela 12 parte superior	-0,4309
Janela 13 parte inferior	-0,4270
Janela 13 parte superior	-0,3885
Janela 14 parte inferior	-0,4032
Janela 14 parte superior	-0,3715
Janela 15 parte inferior	-0,3848
Janela 15 parte superior	-0,3651
Janela 16 parte inferior	-0,3570
Janela 16 parte superior	-0,3404
Janela 17	-0,3034
Janela 18	-0,2688
Janela 19	-0,2346

Tabela 29 – Cp's das aberturas dos casos 13 e 14 considerando o vento de origem sudeste, $\theta = 135^\circ$

(Continuação)

Abertura	Cp médio
Janela 20	-0,2105
Janela 21	0,4146
Janela 22	0,4146
Janela 23	0,4145
Janela 24	0,4145
Janela 25	0,4145
Janela 26	0,4146
Janela 27	0,4147
Janela 28	0,4147
Janela 29	0,4148
Janela 30	0,4149
Janela 31	0,4149
Janela 32	0,4149
Janela 33	0,4149
Janela 34	0,4149
Janela 35	0,4149
Janela 36	0,4149
Janela 37	0,4149
Janela 38	0,4149
Janela 39	0,4149
Janela 40	0,4149
Janela 41	0,4149
Janela 42	0,4149
Janela 43	0,4149
Janela 44	0,4149
Janela 57	0,4147
Janela 58	0,4147
Janela 59	0,4148
Janela 60	0,4148
Janela 61	0,4149
Janela 62	0,4149
Janela 63	0,4149
Janela 64	0,4149
Janela 65	0,4149
Janela 66	0,4149
Janela 67	0,4149
Janela 68	0,4149
Janela 69	0,4149
Janela 70	0,4149
Janela 71	0,4149
Janela 72	0,4149

Tabela 29 – Cp's das aberturas dos casos 13 e 14 considerando o vento de origem sudeste, $\theta = 135^\circ$

(Continuação)

Abertura	Cp médio
Janela 73	0,4149
Janela 74	0,4149
Janela 75	0,4149
Janela 76	0,4149
Janela 77	0,4149
Janela 78	0,4149
Janela 79	0,4149
Janela 80	0,4149
Janela 81	0,6280
Janela 82	0,5070
Janela 83	0,4496
Janela 84	0,4077
Janela 85 parte inferior	0,3446
Janela 85 parte superior	0,3666
Janela 86 parte inferior	0,3152
Janela 86 parte superior	0,3390
Janela 87 parte inferior	0,2923
Janela 87 parte superior	0,3157
Janela 88 parte inferior	0,2748
Janela 88 parte superior	0,2974
Janela 89 parte inferior	0,2583
Janela 89 parte superior	0,2802
Janela 90 parte inferior	0,2500
Janela 90 parte superior	0,2701
Janela 91 parte inferior	0,2444
Janela 91 parte superior	0,2632
Janela 92 parte inferior	0,2404
Janela 92 parte superior	0,2576
Janela 93 parte inferior	0,2330
Janela 93 parte superior	0,2489
Janela 94 parte inferior	0,2270
Janela 94 parte superior	0,2403
Janela 95 parte inferior	0,2209
Janela 95 parte superior	0,2323
Janela 96 parte inferior	0,2138
Janela 96 parte superior	0,2237
Janela 97 parte inferior	0,1987
Janela 97 parte superior	0,2085
Janela 98 parte inferior	0,1782
Janela 98 parte superior	0,1886
Janela 99 parte inferior	0,1415

Tabela 29 – Cp's das aberturas dos casos 13 e 14 considerando o vento de origem sudeste, $\theta = 135^\circ$

(Continuação)

Abertura	Cp médio
Janela 99 parte superior	0,1553
Janela 100 parte inferior	0,0441
Janela 100 parte superior	0,0688
Janela 101	-1,2337
Janela 102	-1,3065
Janela 103	-1,3839
Janela 104	-1,3080
Janela 105	-1,2335
Janela 106	-1,1376
Janela 107	-1,0304
Janela 108	-0,9502
Janela 109	-0,9184
Janela 110	-0,8754
Janela 111	-0,8274
Janela 112	-0,7810
Janela 113	-0,7399
Janela 114	-0,7025
Janela 115	-0,6706
Janela 116	-0,6470
Janela 117	-0,6318
Janela 118	-0,6222
Janela 119	-0,6137
Janela 120	-0,6009
Janela 121	-0,5764
Janela 122	-0,5334
Janela 123	-0,5082
Janela 124	-0,5489
Janela 125	-0,5762
Janela 126	-0,5828
Janela 127	-0,5852
Janela 128	-0,5778
Janela 129	-0,5522
Janela 130	-0,5115
Janela 131	-0,4635
Janela 132	-0,4089
Janela 133	-0,3597
Janela 134	-0,3535
Janela 135	0,2212
Janela 136	0,3156
Janela 137	0,3104
Janela 138	0,3221

Tabela 29 - Cp das aberturas dos casos 13 e 14 considerando o vento de origem sudeste, $\theta = 135^\circ$

(Conclusão)

Abertura	Cp médio
Janela 139	0,2862
Janela 140	0,2375
Janela 141	0,1965
Janela 142	0,1630
Janela 143	0,1350
Janela 144	0,1150
Janela 145	0,1010
Janela 146	0,0859
Janela 147	0,0814
Janela 148	0,0736
Janela 149	0,0748
Janela 150	0,0751
Janela 151	0,0751
Janela 152	0,0757
Janela 153	0,0760
Janela 154	0,0753
Janela 155	0,0746
Janela 156	0,0735
Janela 157	0,0732
Janela 158	0,0712
Janela 159	0,0670
Janela 160	0,0622
Janela 161	0,0581
Janela 162	0,0534
Janela 163	0,0476
Janela 164	0,0409
Janela 165	0,0333
Janela 166	0,0226
Janela 167	0,0056
Janela 168	-0,0233

Fonte: Autora (2021)

Tabela 30 – Cp's das aberturas dos casos 15 e 16 considerando o vento de origem leste, $\theta = 90^\circ$

(Continua)

Abertura	Cp médio
Janela 1 parte inferior	-0,3743
Janela 1 parte superior	-0,3807
Janela 2 parte inferior	-0,2749
Janela 2 parte superior	-0,2600
Janela 3 parte inferior	-0,1841

Tabela 30 – Cp's das aberturas dos casos 15 e 16 considerando o vento de origem leste, $\theta = 90^\circ$

(Conclusão)

Abertura	Cp médio
Janela 3 parte superior	-0,1956
Janela 4 parte inferior	-0,0846
Janela 4 parte superior	-0,0980
Janela 5 parte inferior	-0,0301
Janela 5 parte superior	-0,0397
Janela 6 parte inferior	-0,0168
Janela 6 parte superior	-0,0229
Janela 7 parte inferior	-0,0125
Janela 7 parte superior	-0,0165
Janela 8 parte inferior	-0,0109
Janela 8 parte superior	-0,0136
Janela 9 parte inferior	-0,0104
Janela 9 parte superior	-0,0123
Janela 10 parte inferior	-0,0106
Janela 10 parte superior	-0,0121
Janela 11 parte inferior	-0,0110
Janela 11 parte superior	-0,0123
Janela 12 parte inferior	-0,0115
Janela 12 parte superior	-0,0125
Janela 13 parte inferior	-0,0123
Janela 13 parte superior	-0,0131
Janela 14 parte inferior	-0,0139
Janela 14 parte superior	-0,0135
Janela 15 parte inferior	-0,0143
Janela 15 parte superior	-0,0149
Janela 16 parte inferior	-0,0163
Janela 16 parte superior	-0,0158
Janela 17	-0,0192
Janela 18	-0,0223
Janela 19	-0,0279
Janela 20	-0,0422

Fonte: Autora (2021)

Tabela 31 – Cp's das aberturas dos casos 13 e 14 considerando o vento de origem sudeste, $\theta = 135^\circ$

(Continua)

Abertura	Cp médio
Janela 1 parte inferior	-0,8712
Janela 1 parte superior	-0,8207
Janela 2 parte inferior	-0,7633
Janela 2 parte superior	-0,6748

Tabela 31 – Cp's das aberturas dos casos 13 e 14 considerando o vento de origem sudeste, $\theta = 135^\circ$

(Conclusão)

Abertura	Cp médio
Janela 3 parte inferior	-0,5981
Janela 3 parte superior	-0,4487
Janela 4 parte inferior	-0,5002
Janela 4 parte superior	-0,3338
Janela 5 parte inferior	-0,4174
Janela 5 parte superior	-0,2815
Janela 6 parte inferior	-0,3998
Janela 6 parte superior	-0,2743
Janela 7 parte inferior	-0,3985
Janela 7 parte superior	-0,2708
Janela 8 parte inferior	-0,3749
Janela 8 parte superior	-0,2658
Janela 9 parte inferior	-0,3468
Janela 9 parte superior	-0,2719
Janela 10 parte inferior	-0,3167
Janela 10 parte superior	-0,2570
Janela 11 parte inferior	-0,2690
Janela 11 parte superior	-0,2184
Janela 12 parte inferior	-0,2379
Janela 12 parte superior	-0,2005
Janela 13 parte inferior	-0,2244
Janela 13 parte superior	-0,1998
Janela 14 parte inferior	-0,2139
Janela 14 parte superior	-0,1926
Janela 15 parte inferior	-0,2008
Janela 15 parte superior	-0,1837
Janela 16 parte inferior	-0,1882
Janela 16 parte superior	-0,1751
Janela 17	-0,1663
Janela 18	-0,1498
Janela 19	-0,1319
Janela 20	-0,1307

Fonte: Autora (2021)

Apêndice C

INFOGRÁFICO DOS RESULTADOS OBTIDOS



Fonte: Autora (2022).