

ANO
2017

GABRIELA HANNA TONDO | INFLUÊNCIA DAS ESTRATÉGIAS BIOCLIMÁTICAS NO
DESEMPENHO TÉRMICO EM EDIFÍCIOS ESCOLARES



UDESC

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

INFLUÊNCIA DAS ESTRATÉGIAS BIOCLIMÁTICAS NO DESEMPENHO TÉRMICO EM EDIFÍCIOS ESCOLARES

GABRIELA HANNA TONDO

JOINVILLE, 2017

A crescente escassez de recursos energéticos e o aumento da sua demanda têm motivado o estudo da sustentabilidade das edificações e da racionalização do consumo de energia. O desempenho térmico das escolas, foco desse estudo, é de grande importância, pois as condições de conforto da edificação têm reflexo na *performance* dos usuários e na sua aprendizagem. Assim, esse trabalho visou avaliar a influência de algumas estratégias bioclimáticas no desempenho térmico de edificações escolares municipais na cidade de Joinville, por meio de modelos de referência, análise de agrupamento e simulação térmica. Os resultados foram avaliados por graus-hora e análise de sensibilidade.

Orientadora: Ana Mirthes Hackenberg

Coorientadora: Elisa Henning

Joinville, 2017

GABRIELA HANNA TONDO

**INFLUÊNCIA DAS ESTRATÉGIAS BIOCLIMÁTICAS NO DESEMPENHO
TÉRMICO EM EDIFÍCIOS ESCOLARES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, na Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Dra. Ana Mirthes Hackenberg

Co-orientadora: Dra. Elisa Henning

**JOINVILLE, SC
2017**

Ficha catalográfica elaborada pelo(a) autor(a), com
auxílio do programa de geração automática da
Biblioteca Setorial do CCT/UDESC

Hanna Tondo, Gabriela

INFLUÊNCIA DAS ESTRATÉGIAS BIOCLIMÁTICAS NO
DESEMPENHO TÉRMICO EM EDIFÍCIOS ESCOLARES / Gabriela
Hanna Tondo. - Joinville , 2017.
199 p.

Orientadora: Ana Mirthes Hackenberg

Co-orientadora: Elisa Henning

Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado
de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil,
Joinville, 2017.

1. Conforto térmico. 2. Análise de agrupamento.
3. Simulação termo-energética. 4. Análise de
sensibilidade local. I. Mirthes Hackenberg, Ana.
II. Henning, Elisa. , .III. Universidade do Estado
de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. IV.
Título.

**Influência das Estratégias Bioclimáticas no Desempenho Térmico em Edifícios
Escolares**

por

Gabriela Hanna Tondo

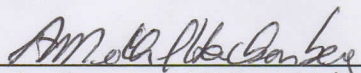
Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de

MESTRA EM ENGENHARIA CIVIL


Área de concentração em "Engenharia Urbana e da Construção Civil"
e aprovada em sua forma final pelo

CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS DA
UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA.

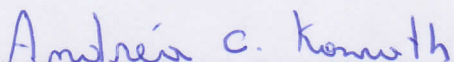
Banca Examinadora:



Profa. Dra. Ana Mirthes Hackenberg
CCT/UDESC (Orientador/Presidente)



Profa. Dra. Ana Paula Melo
UFSC



Profa. Dra. Andréa Cristina Konrath
UFSC

Joinville, SC, 27 de julho de 2017.

Dedico este estudo aos meus pais, Vítor e Rosana e aos irmãos, Mariana, João, Mateus, José e Ana Clara. Com vocês o trabalho é mais leve e as conquistas mais felizes.

AGRADECIMENTOS

A realização deste estudo foi uma longa jornada e muito há para agradecer às pessoas que durante esse tempo cruzaram a minha vida.

Aos meus pais e irmãos, pelo carinho, paciência e apoio durante todos os anos de estudos. Em especial a minha mãe Rosana, pelas correções de português durante todo o período do mestrado.

À minha orientadora, professora Ana Mirthes, por todo o incentivo, pela paciência, pelas conversas e orientações.

À minha co-orientadora, professora Elisa, por todo o empenho, pela infinita paciência, por todo o suporte e por me apresentar o novo mundo da estatística.

À Raquel, pelo empréstimo de livros, pelas dicas e por me socorrer durante as simulações.

Ao Rodrigo, pela parceria nas idas a Florianópolis, nos trabalhos e nos artigos.

A todos os colegas da H14, Laís, Talita, Adriane, Dalila e José, pelas conversas, descontração e troca de ideia nesses dois anos.

Aos membros da banca examinadora, que gentilmente se dispuseram a vir até Joinville e aceitaram participar e contribuir para a avaliação e aperfeiçoamento deste estudo.

À Promop, pelo apoio financeiro durante o desenvolvimento dessa pesquisa.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram com esse trabalho.

E acima de tudo a Deus, que me guiou, iluminou e me deu ânimo durante toda essa pesquisa.

RESUMO

A crescente escassez de recursos energéticos e o aumento da sua demanda têm motivado o estudo da sustentabilidade das edificações e da racionalização do consumo de energia elétrica. A arquitetura bioclimática, usando estratégias passivas, pode amenizar a sensação de desconforto e minimizar ou evitar o uso de dispositivos artificiais, como condicionadores de ar. A norma, no Brasil, que sugere diretrizes construtivas para o desempenho térmico da edificação, conforme a zona bioclimática, é a NBR 15220 (ABNT, 2005). Dentre os diversos edifícios públicos, as escolas, foco desse estudo, são as que possuem maior responsabilidade social. O seu desempenho é de grande importância, pois as condições de conforto e qualidade interna do ar da edificação têm reflexo na performance dos usuários e na sua aprendizagem. Assim, foi feito um levantamento em 38 escolas da rede municipal de Joinville para que se determinasse um modelo estatisticamente representativo desse estoque de edificações. Os dados levantados foram resumidos, compondo uma matriz de dados que serviu de base para análise de agrupamento. A medida de similaridade adotada foi coeficiente de Gower, que permite dados quantitativos e qualitativos na mesma matriz. O modelo de referência escolhido foi o mais próximo ao medóide do agrupamento, e foi simulado usando o programa *Energy Plus*. Comparou-se a escola base com os casos aplicando estratégias e índices recomendados na NBR 15220 (ABNT, 2005) para zona bioclimática da cidade de Joinville. Esses são: ventilação, sombreamento de aberturas, inércia térmica das paredes internas para aquecimento, paredes leves e reflexivas, cobertura leve e isolada, menores índices de absorção solar das paredes e cobertura. Os melhores resultados entre os casos simulados foram avaliados pela análise de sensibilidade local. Os resultados dessa análise indicaram que a ventilação noturna foi um dos fatores mais importantes no conforto, provocando uma melhoria nos índices, principalmente nos períodos mais quentes. As paredes internas com alta massa térmica não foram importantes para o conforto da edificação. Ao contrário do que indica a NBR 15220 (ABNT, 2005), as paredes externas com maior atraso térmico apresentaram melhores resultados do que as paredes leves. O uso de material isolante na cobertura gerou melhores resultados na análise de graus-hora para aquecimento e resfriamento e porcentagem de conforto tanto para o frio quanto para o calor. A absorção da cobertura foi um dos elementos mais significativos no conforto da edificação, diminuindo de forma considerável os graus-hora de resfriamento anuais. A absorção solar das paredes externas foi influente, mas num grau muito menor do que a da cobertura que apresenta insolação direta numa área e num período maior. Os elementos de proteção solar apresentaram pouca influência no modelo, já que o caso base possuía beirais que supriam praticamente toda a necessidade de sombreamento das aberturas. Assim, concluiu-se que os parâmetros mais influentes na edificação analisada dizem respeito à ventilação natural e à cobertura sendo que a sua absorção solar e material foram parâmetros bastante sensíveis no modelo.

Palavras Chave: Conforto térmico; análise de agrupamento; simulação termo-energética; análise de sensibilidade local.

ABSTRACT

The shortage of energy resources and its increasing demand give rise to the study of building sustainability and the reduction of electricity consumption. Bioclimatic architecture, using passive strategies, can ease the feeling of discomfort and minimize or avoid the use of artificial devices such as air conditioners. The norm in Brazil, which suggests constructive guidelines for the thermal performance of the building, according to the bioclimatic zone, is the NBR 15220 (ABNT, 2005). Among many public buildings, schools (the focus of this study) are those with the greatest social responsibility. Its performance is very important because the comfort conditions and internal air quality of the building affect student's performance and learning. Thus, a survey was conducted in 38 schools throughout the municipal network of Joinville to determine a statistically representative model of this buildings stock. The collected data were summarized, composing a data matrix that was the basis for cluster analysis. The measure of similarity used was Gower coefficient, which allows quantitative and qualitative data in the same matrix. The reference model chosen is the one closest to the cluster medoid. This was simulated using the Energy Plus program. The base case was compared with the cases applying strategies and indexes recommended in NBR 15220 (ABNT, 2005) for the bioclimatic zone of the city of Joinville. These are: ventilation, shading of openings, thermal inertia of the internal walls for heating, light and reflective walls, light and insulated roof, lower solar absorption indexes of walls and roof. The best results among the simulated cases were evaluated by the local sensitivity analysis. These analysis results indicated that the nocturnal ventilation is one of the most important factors in comfort, causing an improvement in the indices, especially in the warmer periods. The internal walls with high thermal mass are not important for the comfort of the building. On the contrary what is in NBR15220, external walls with higher thermal delays have better results than light walls. The use of insulation material in the roof provides better results for cold and heat based on the analysis of percentage of comfort hours and degrees-hour for cooling and heating. Absorption of the roof is one of the most important elements in the comfort of the building, reducing substantially the annual degrees of cooling. The solar absorptivity of the outer walls is influential, but less than the coverage that has direct insolation in a bigger area in a longer period. The elements of solar protection had little influence on the model because the base case supplies almost all the necessity of shadowing. It was concluded that the most influential parameters in the analyzed building relate to natural ventilation and the roof. The material and solar absorptivity of the roof were very sensitive parameters in the model.

Keywords: Thermal comfort; clusters analysis; thermal simulation; local sensitivity analysis.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Boxplots das temperaturas médias de Itapoá e Joinville..... | 41 |
| Figura 2 – Gráfico rosa dos ventos anual..... | 42 |
| Figura 3 - Gráfico rosa dos ventos durante o dia | 43 |
| Figura 4 - Gráfico rosa dos ventos durante a noite | 43 |
| Figura 5 - Zoneamento bioclimático brasileiro..... | 45 |
| Figura 6 - Tipos de proteção solar em edifícios..... | 49 |
| Figura 7 - Estudo do fluxo de ar em função da presença de divisórias e repartições internas..... | 50 |
| Figura 8 - Escola levantadas da Rede Municipal | 65 |
| Figura 9 – Representação graus-hora de resfriamento e aquecimento | 80 |
| Figura 10 – Quantidade de escolas levantadas por bairro | 82 |
| Figura 11- Horário de funcionamento das escolas | 83 |
| Figura 12– Número de alunos total por escola..... | 84 |
| Figura 13 – Média de alunos por sala | 85 |
| Figura 14 – Tempo de fundação das escolas..... | 85 |
| Figura 15 – Tipologia da edificação..... | 86 |
| Figura 16 – Número de pavimentos | 87 |
| Figura 17 – Área total das escolas | 88 |
| Figura 18 – Orientação da fachada principal..... | 88 |
| Figura 19 – Porcentagem de abertura na fachada | 89 |
| Figura 20 – Porcentagem de abertura de ventilação na fachada..... | 90 |
| Figura 21 – Total da área administrativa | 91 |
| Figura 22 – Total das áreas comuns | 91 |
| Figura 23 – Total da área de permanência não prolongada..... | 92 |
| Figura 24 – Área de pátio coberto | 93 |
| Figura 25 - Área total de salas de aula..... | 94 |
| Figura 26- Número de salas de aula | 95 |
| Figura 27 – Área média das salas de aula | 96 |
| Figura 28 – Número de salas de aula com orientação norte por escola | 96 |
| Figura 29 - Número de salas de aula com orientação sul por escola..... | 97 |
| Figura 30 - Número de salas de aula com orientação leste por escola..... | 97 |
| Figura 31 - Número de salas de aula com orientação oeste por escola..... | 97 |

| | |
|---|-----|
| Figura 32 – Altura do pé-direito | 99 |
| Figura 33 – Dimensão da circulação | 100 |
| Figura 34 – Possui bloco administrativo separado | 100 |
| Figura 35 – Salas de aula com ventilação cruzada | 101 |
| Figura 36- Salas administrativas com ventilação cruzada | 102 |
| Figura 37 – Existência de brises | 102 |
| Figura 38 – Tipo de esquadria | 103 |
| Figura 39 – Tipo de telha | 104 |
| Figura 40 – Laje x Forro..... | 104 |
| Figura 41 – Material das janelas..... | 105 |
| Figura 42 – Cor das portas | 105 |
| Figura 43 – Tipo de piso geral | 106 |
| Figura 44 – Tipo de piso da circulação | 106 |
| Figura 45 – Cores da fachada | 107 |
| Figura 46 – Cores da circulação | 108 |
| Figura 47 – Espessura das paredes externas | 108 |
| Figura 48 – Espessura das paredes internas | 109 |
| Figura 49 – Porcentagem de salas administrativas com ar-condicionado | 110 |
| Figura 50 – Porcentagem de área total condicionada | 111 |
| Figura 51 – Boxplot número total de alunos | 115 |
| Figura 52 – Boxplot número de pavimentos | 115 |
| Figura 53 - Boxplot porcentagem de abertura na fachada..... | 115 |
| Figura 54 - Boxplot porcentagem de abertura de ventilação na fachada..... | 115 |
| Figura 55 – Boxplot total da área administrativa | 116 |
| Figura 56 – Boxplot total das áreas comuns..... | 116 |
| Figura 57 - Boxplot total da área de permanência não prolongada | 116 |
| Figura 58 – Boxplot total da área de pátio coberto | 117 |
| Figura 59 – Boxplot número de salas de aula..... | 117 |
| Figura 60 – Boxplot área média das salas de aula | 117 |
| Figura 61 – Boxplot porcentagem de salas de aula com ventilação cruzada | 118 |
| Figura 62 – Boxplot porcentagem de salas administ. com ventilação cruzada | 118 |
| Figura 63 – Boxplot número de salas de aula com orientação norte | 119 |
| Figura 64 – Boxplot número de salas de aula com orientação sul..... | 119 |
| Figura 65 – Boxplot número de salas de aula com orientação leste..... | 119 |

| | |
|--|-----|
| Figura 66 – Boxplot número de salas de aula com orientação oeste | 119 |
| Figura 67 – Boxplot espessura das paredes internas | 120 |
| Figura 68 – Boxplot espessura das paredes externas | 120 |
| Figura 69 – Dendograma da análise de agrupamento hierárquico com Ward | 121 |
| Figura 70 – Análise de agrupamentos não hierárquico | 122 |
| Figura 71 - Configuração do modelo de referência do agrupamento 01 – térreo | 129 |
| Figura 72 - Configuração do modelo de referência do agrupamento 01 – primeiro pavimento..... | 130 |
| Figura 73 – Corte esquemático materiais modelo de referência 01 | 131 |
| Figura 74 - Configuração do modelo de referência do agrupamento 02 – térreo | 132 |
| Figura 75 - Configuração do modelo de referência do agrupamento 02 – primeiro pavimento..... | 133 |
| Figura 76 - Corte esquemático materiais modelo de referência 02 | 134 |
| Figura 77 - Modelo para simulação | 135 |
| Figura 78 – Esquema zonas térmicas térreo..... | 137 |
| Figura 79 - Esquema zonas térmicas 1º andar | 137 |
| Figura 80 – Parede de tijolos cerâmicos deitados..... | 139 |
| Figura 81 – Tamanho e abertura das Janelas..... | 140 |
| Figura 82 -Valores de temperatura horária do ar para o dia 3 de março..... | 141 |
| Figura 83 - Valores de temperatura horária do ar para o dia 17 de junho | 142 |
| Figura 84 – Trocas de ar x velocidade do vento no dia 03 de março nas salas de aula do térreo | 143 |
| Figura 85 - Trocas de ar x velocidade do vento no dia 03 de março nas salas de aula do primeiro pavimento | 144 |
| Figura 86 - Trocas de ar x velocidade do vento no dia 17 de junho nas salas de aula do térreo | 145 |
| Figura 87 - Trocas de ar x velocidade do vento no dia 17 de junho nas salas de aula do primeiro pavimento | 146 |
| Figura 88 – Proposta 1 | 147 |
| Figura 89 – Proposta 2..... | 148 |
| Figura 90 – Parede tijolo maciço | 149 |
| Figura 91 – Cobertura telha cerâmica e laje 12cm..... | 150 |
| Figura 92 – Cobertura fibrocimento e forro de PVC | 150 |
| Figura 93 – Cobertura telha cerâmica, forro de madeira e lã de vidro | 151 |

| | |
|---|-----|
| Figura 94 – Máscara de sombra fachada noroeste | 152 |
| Figura 95 – Máscara de sombra fachada sudoeste | 152 |
| Figura 96 - Máscara de sombra fachada nordeste | 152 |
| Figura 97 - Máscara de sombra fachada sudeste..... | 152 |
| Figura 98 – Maquete com brises | 153 |
| Figura 99 – Análise de sensibilidade zona térmica 08..... | 166 |
| Figura 100 – Análise de sensibilidade zona térmica 17 | 167 |
| Figura 101– Análise de sensibilidade zona térmica 21 | 168 |
| Figura 102 - Análise de sensibilidade zona térmica 20..... | 169 |
| Figura 103 - Análise de sensibilidade zona térmica 24..... | 170 |
| Figura 104 - Análise de sensibilidade zona térmica 26..... | 171 |
| Figura 105 - Análise de sensibilidade zona térmica 29..... | 171 |
| Figura 106 - Análise de sensibilidade zona térmica 32..... | 172 |
| Figura 107 - Análise de sensibilidade Zona térmica 47 | 173 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|-----|
| Quadro 1 - Testes de hipótese utilizados para verificação quanto à adequação dos agrupamentos formados | 73 |
| Quadro 2 – Parâmetros e objetos da simulação | 76 |
| Quadro 3 – Variáveis consideradas na análise de agrupamento | 113 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 1 – Ocorrência do vento por orientação solar..... | 44 |
| Tabela 2 – Ocorrência do vento por velocidade | 44 |
| Tabela 3 - Valores de taxa metabólica por atividade..... | 75 |
| Tabela 4 – Resumo das variáveis estatísticas do número de alunos total das escolas | 84 |
| Tabela 5 - Resumo das variáveis estatísticas da média de alunos por sala das escolas | 84 |
| Tabela 6 - Resumo das variáveis estatísticas da idade das escolas..... | 86 |
| Tabela 7 - Resumo das variáveis estatísticas sobre a área total das escolas..... | 87 |
| Tabela 8 - Resumo das variáveis estatísticas sobre a porcentagem de abertura na fachada | 89 |
| Tabela 9 - Resumo das variáveis estatísticas sobre a porcentagem de abertura de ventilação na fachada | 90 |
| Tabela 10 - Resumo das variáveis estatísticas sobre a área administrativa total | 91 |
| Tabela 11 - Resumo das variáveis estatísticas sobre o total das áreas comuns | 92 |
| Tabela 12 - Resumo das variáveis estatísticas sobre a área de permanência não prolongada | 93 |
| Tabela 13 - Resumo das variáveis estatísticas sobre a área de pátio coberto..... | 93 |
| Tabela 14 - Resumo das variáveis estatísticas sobre a área total de salas de aula . | 94 |
| Tabela 15 - Resumo das variáveis estatísticas sobre o número de salas de aula em cada escola | 95 |
| Tabela 16 - Resumo das variáveis estatísticas sobre a área média de salas de aula | 95 |
| Tabela 17 - Resumo das variáveis estatísticas relativas à orientação das salas de aula | 98 |
| Tabela 18 - Resumo das variáveis estatísticas sobre a altura do pé-direito das edificações | 99 |
| Tabela 19 - Resumo das variáveis estatísticas sobre a dimensão das circulações .. | 99 |
| Tabela 20 - Resumo das variáveis estatísticas sobre a porcentagem de salas de aula com ventilação cruzada..... | 101 |
| Tabela 21 - Resumo das variáveis estatísticas sobre a porcentagem de salas administrativas com ventilação cruzada..... | 102 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 22 - Resumo das variáveis estatísticas sobre a porcentagem de salas administrativas com ar-condicionado | 110 |
| Tabela 23 - Resumo das variáveis estatísticas sobre a porcentagem de área total condicionada na edificação | 110 |
| Tabela 24 - Identificação de potenciais objetos atípicos com a medida D ² de Mahalanobis | 114 |
| Tabela 25 - Comparação das médias das variáveis quantitativas dos agrupamentos por meio do teste de Wilcoxon (nível de significância $p < 0,05$) | 123 |
| Tabela 26 - Comparação das médias das variáveis qualitativas dos agrupamentos por meio do teste Qui-quadrado (nível de significância $p < 0,05$). | 123 |
| Tabela 27 - Perfil dos agrupamentos ao longo das variáveis quantitativas envolvidas na análise de agrupamentos (Continua) | 125 |
| Tabela 28 - Perfil dos agrupamentos ao longo das variáveis qualitativas envolvidas na análise de agrupamentos..... | 128 |
| Tabela 29 – Descrição das zonas térmicas | 136 |
| Tabela 30 – Descrição do caso base..... | 138 |
| Tabela 31 – Absortância solar do caso base | 139 |
| Tabela 32 – Valores para as paredes externas | 147 |
| Tabela 33 – Valores para as paredes internas | 149 |
| Tabela 34 - Valores para cobertura | 150 |
| Tabela 35 – Resumo das alternativas de simulação | 154 |
| Tabela 36 – Resultado das simulações para graus-hora de resfriamento | 156 |
| Tabela 37 - Resultado da simulações para graus-hora de aquecimento | 158 |
| Tabela 38 - Resultado da simulações com a somatória dos graus-hora | 161 |
| Tabela 39 – Porcentagem de horas anuais em conforto | 163 |
| Tabela 40 – Graus-hora de resfriamento nas zonas térmicas da orientação sudeste | 191 |
| Tabela 41- Graus-hora de aquecimento nas zonas térmicas da orientação sudeste | 192 |
| Tabela 42 – Somatória de graus-hora nas zonas térmicas da orientação sudeste | 193 |
| Tabela 43 – Porcentagem de horas anuais em conforto nas zonas térmicas da orientação sudeste | 194 |
| Tabela 44 - Graus-hora de resfriamento nas zonas térmicas da orientação nordeste | 195 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 45 - Graus-hora de aquecimento nas zonas térmicas da orientação nordeste | 196 |
| Tabela 46 – Somatória de graus-hora nas zonas térmicas da orientação nordeste | 197 |
| Tabela 47 - Porcentagem de horas anuais em conforto nas zonas térmicas da orientação nordeste..... | 198 |

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|----------|--|
| AS | Análise de Sensibilidade |
| CBECS | <i>Commercial Buildings Energy Consumption Survey</i> |
| EPAGRI | Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina S.A |
| EPBD | <i>Energy Performance of Buildings Directive</i> |
| INFRAERO | Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária |
| INMET | Instituto Nacional de Meteorologia |
| INMETRO | Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia |
| IPPUJ | Instituto de Planejamento Urbano de Joinville |
| LabEEE | Laboratório de Eficiência Energética |
| NE | Nordeste |
| NO | Noroeste |
| RECS | <i>Residential Energy Consumption Survey</i> |
| RTQ-C | Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas |
| SE | Sudeste |
| SO | Sudoeste |
| SE | Sudeste |
| IS | Índice de Sensibilidade |
| SO | Sudoeste |
| UDESC | Universidade do Estado de Santa Catarina |
| UFPR | Universidade Federal do Paraná |
| UFSC | Universidade Federal de Santa Catarina |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 29 |
| 1.1 | JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO ESTUDO PROPOSTO | 29 |
| 1.2 | OBJETIVOS..... | 33 |
| 1.2.1 | Objetivo geral..... | 33 |
| 1.2.2 | Objetivos específicos | 33 |
| 1.3 | ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO..... | 33 |
| 2 | REVISÃO..... | 35 |
| 2.1 | EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NAS EDIFICAÇÕES..... | 35 |
| 2.2 | SIMULAÇÃO TERMO-ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES..... | 37 |
| 2.3 | DADOS CLIMÁTICOS | 39 |
| 2.3.1 | Diretrizes para desempenho térmico em Joinville | 44 |
| 2.4 | ESTRATÉGIAS BIOCLIMÁTICAS RECOMENDADAS PARA O CLIMA DE JOINVILLE..... | 47 |
| 2.4.1 | Sombreamento de aberturas..... | 48 |
| 2.4.2 | Ventilação natural..... | 49 |
| 2.4.3 | Inércia térmica para aquecimento | 51 |
| 2.4.4 | Paredes externas leves e refletoras | 51 |
| 2.4.5 | Cobertura leve e isolada | 52 |
| 2.5 | MODELO DE REFERÊNCIA | 52 |
| 2.5.1 | Metodologia de obtenção de modelos de referência | 54 |
| 2.5.2 | Estudos envolvendo modelos de referência | 56 |
| 2.6 | ANÁLISE DE AGRUPAMENTO..... | 57 |
| 2.7 | ANÁLISE DE SENSIBILIDADE..... | 60 |
| 2.8 | CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 62 |
| 3 | METODOLOGIA..... | 64 |
| 3.1 | COLETA DE DADOS..... | 64 |
| 3.1.1 | Análise dos projetos | 66 |
| 3.1.2 | Pesquisa de campo | 66 |
| 3.1.3 | Seleção, organização e registro do material coletado | 67 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 3.2 | DEFINIÇÃO DO MODELO DE REFERÊNCIA | 68 |
| 3.3 | MODELAGEM DO PROTÓTIPO..... | 74 |
| 3.4 | APLICAÇÃO DE ESTRATÉGIAS BIOCLIMÁTICAS | 77 |
| 3.5 | ANÁLISE DOS RESULTADOS | 78 |
| 3.6 | ANÁLISE DE SENSIBILIDADE | 80 |
| 4 | RESULTADOS..... | 82 |
| 4.1 | LEVANTAMENTO DE DADOS | 82 |
| 4.1.1 | Delimitação do objeto de estudo..... | 82 |
| 4.1.2 | Análise da Amostra | 83 |
| 4.2 | DETERMINAÇÃO DO MODELO DE REFERÊNCIA..... | 111 |
| 4.2.1 | Identificação de <i>Outliers</i> | 113 |
| 4.2.2 | Formação dos <i>Clusters</i> (análise de agrupamento)..... | 120 |
| 4.2.3 | Análise dos agrupamentos formados..... | 122 |
| 4.3 | SIMULAÇÃO DO MODELO DE REFERÊNCIA | 135 |
| 4.3.1 | Temperatura do ar | 141 |
| 4.3.2 | Ventilação..... | 143 |
| 4.4 | APLICAÇÃO DAS ESTRATÉGIAS BIOCLIMÁTICAS | 146 |
| 4.4.1 | Ventilação..... | 146 |
| 4.4.2 | Paredes externas | 147 |
| 4.4.3 | Paredes internas..... | 148 |
| 4.4.4 | Cobertura..... | 149 |
| 4.4.5 | Sombreamento de aberturas | 151 |
| 4.4.6 | Resumo das simulações paramétricas..... | 153 |
| 4.5 | RESULTADOS DA SIMULAÇÃO | 154 |
| 4.5.1 | Graus-hora de resfriamento..... | 155 |
| 4.5.2 | Graus-hora de aquecimento | 157 |
| 4.5.3 | Graus-hora total..... | 160 |
| 4.5.4 | Horas em conforto..... | 162 |
| 4.6 | ANÁLISE DE SENSIBILIDADE COM OS MELHORES RESULTADOS | 165 |
| 5 | CONCLUSÃO | 174 |
| 5.1 | LIMITAÇÕES DO TRABALHO | 178 |

| | | |
|-----|---|------------|
| 5.2 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 179 |
| | REFERÊNCIAS | 180 |
| | APÊNDICES | 189 |
| | APÊNDICE A- FICHA USADA NO LEVANTAMENTO DAS ESCOLAS. | 189 |
| | APÊNDICE B - TABELA COM O RESULTADO DAS ZONAS TÉRMICAS NA MESMA ORIENTAÇÃO..... | 191 |
| | APÊNDICE C – CÁLCULO DA ÁREA DAS JANELAS DAS SALAS DE AULA EM RELAÇÃO À ÁREA DO PISO | 199 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO ESTUDO PROPOSTO

O uso intensivo e crescente de energia após a Revolução Industrial começou a deixar as suas marcas no século XXI. Os recursos energéticos tornaram-se escassos, o que poderia limitar o desenvolvimento da sociedade moderna. Assim, fez-se necessário pensar na sustentabilidade do modelo de sociedade em que se está inserido e consequentemente na racionalização do consumo de energia elétrica.

Segundo o Balanço Energético Nacional (MME, 2016), as edificações (setores residencial, comercial e público) são responsáveis por 12,5% do consumo total de energia. Nesse contexto, torna-se fundamental que os edifícios funcionem sem desperdício de energia, o que pode ser influenciado por algumas decisões de projeto que mantêm o conforto térmico e mitigam o consumo energético. A arquitetura bioclimática contribui para um melhor desempenho da edificação considerando fatores como a especificação dos materiais, uso de elementos de proteção solar, tipologia arquitetônica, orientação solar, disposição das aberturas, entorno e elementos paisagísticos (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

Dessa forma, a adequação da arquitetura ao clima local propicia ao homem as condições de conforto térmico necessário para que ele realize suas tarefas do cotidiano sem esforço excessivo e desnecessário (FROTA; SCHIFFER, 2001). Para que isso ocorra, é imprescindível o conhecimento do comportamento dos materiais e das estratégias de conforto a serem utilizadas no clima local. A arquitetura pode amenizar a sensação de desconforto causada pelos extremos climáticos, visando minimizar e/ou evitar o uso de dispositivos artificiais, como condicionadores de ar.

Dentre as diversas edificações, as escolas são as que possuem maior responsabilidade social. A *performance* energética desse tipo de edificação é de grande importância, pois possui uma grande representatividade, atinge diferentes classes sociais e uma grande gama de pessoas, considerando os estudantes e suas famílias (PEREIRA *et al.*, 2014). Conforme estudos de Brandão (2009), as condições de conforto e qualidade interna do ar da edificação têm reflexo no desempenho dos usuários, sendo que em escolas, os impactos são maiores do que em outras edificações, pois a aprendizagem pode ser prejudicada pela ausência de condições

necessárias, com consequências a curto e longo prazo. De acordo com Kowaltowski (2011, p.11), “o ambiente físico escolar é, por essência, o local do desenvolvimento do processo de ensino e aprendizagem”.

No Brasil, o ambiente físico construído de escolas públicas apresenta, no geral, qualidade arquitetônica pouco expressiva, níveis de conforto mínimo, superlotação das salas e a impossibilidade de criar diferentes arranjos internos, conforme eventuais necessidades e diferentes atividades. Apesar disso, as intervenções de melhoria são possíveis, no caso de conforto ambiental, encontrando-se soluções simples, na maioria dos casos (KOWALTOWSKI, 2011). Como exemplo, pode-se citar mudança da cor das edificações, implantação de ventilação cruzada, uso de elementos de proteção solar e orientação Norte-Sul.

A energia consumida por essas edificações também representa uma considerável despesa para os cofres públicos (PEREIRA *et al.*, 2014). Portanto, é necessário discutir sobre essas edificações do ponto de vista do seu desempenho térmico.

No entanto, não há referências e normas que indiquem diretrizes construtivas para as edificações escolares e nem um *benchmark* para o clima em estudo. Uma das normas mais abrangente que indica estratégias para edificações conforme a zona bioclimática é a NBR 15220 (ABNT, 2005). Essa foi desenvolvida para edificações de interesse social, porém na falta de uma norma específica para escolas, adotaram-se as diretrizes da NBR 15220 (ABNT, 2005), apesar das diferenças de tipologia e uso da edificação. Essa auxilia na aplicação de estratégias para o estudo do comportamento termo-energético de edificações.

Esse estudo é multifacetado e envolve diversas variáveis, podendo ser realizado por meio de programas de simulação computacionais. Esse recurso é largamente utilizado por pesquisadores do mundo inteiro, tanto pela sua praticidade, quanto pela sua proximidade com a realidade. Os programas funcionam a partir da introdução de dados de entrada, tais como modelagem da geometria da edificação, forma de ocupação e operação, equipamentos, variáveis climáticas e outros. São simuladas, então, trocas térmicas entre a edificação e o meio externo, permitindo que se reconheçam os fatores capazes de influir no consumo de energia e conforto térmico (U.S DEPARTMENT OF ENERGY, 2016).

Simulações, como essas, geram dados de saída, que podem ser analisados de forma a medir o desempenho da edificação. Um dos métodos utilizados para tal é

a análise de graus-hora de aquecimento e resfriamento. Esse indicador mostra o quanto a edificação está fora da faixa de conforto pré-determinada, demonstrando a eficácia das estratégias utilizadas, a fim de melhorar o desempenho térmico da edificação.

Outro indicador para medir o desempenho térmico da edificação é a análise de sensibilidade local. Essa avalia o quanto cada estratégia está influenciando em relação ao caso base, apontando quais são as variáveis mais importantes da edificação.

As simulações podem ser realizadas com dados de edificações reais. No entanto, quando se deseja analisar um estoque de determinado tipo de edificações, torna-se inviável simular caso a caso, pois há exigência de um grande investimento de tempo e capacidade computacional. Assim, uma possibilidade é utilizar modelos de referência, que são uma representação de todo um estoque a partir de análises estatísticas, o que reduz de forma considerável a quantidade de simulações realizadas (SCHAEFER; GHISI, 2016).

Esses modelos de referência não são normatizados. De modo geral, inicialmente, delimita-se um objeto de estudo (tipo de edificação, função, região climática), então se levanta quais as variáveis relevantes para o seu desempenho (como forma, materiais, operação, equipamento). Essas variáveis são levantadas das edificações reais que se vão estudar ou então de bancos de dados existentes. As características levantadas são tratadas de forma a se determinar um ou mais modelos de referência que vão representar ou resumir essas edificações, com as propriedades recorrentes. Os modelos podem ser edifícios reais ou fictícios (BALLARINI; CORGNATI; CORRADO, 2014).

Um dos mais extensos banco de dados com modelos de referência para uso em estudos de desempenho termo-energéticos pertence ao Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE). Esses são divididos em tipologia, região climática onde estão inseridos e consumo energético. Os dados encontram-se disponíveis on-line, na sua página na internet (U.S DEPARTMENT OF ENERGY, 2016).

A criação de banco de dados na Europa foi impulsionada pelas exigências da diretiva EPBD *recast* 2010/31/EU para a criação de requisitos mínimos de desempenho. Surgiram, então, diversos estudos envolvendo modelos de referência. Destacam-se dois projetos: o TABULA e o ASIEPI os quais têm o intuito de criar um

banco de dados sobre as edificações residenciais em toda a Europa. Esse banco de dados com modelos de referência tem se tornado imprescindível para os estudos de desempenho termo-energético em grande escala devido à existência de um grande estoque edificado (CORGNATI *et al.*, 2012).

No Brasil, o estudo sobre *benchmark* e modelos de referência se configura como inicial se comparado com países mais desenvolvidos, como os norte-americanos e europeus. Na área de *benchmark* há uma plataforma com dados de diversas cidades brasileiras, desenvolvida por Lamberts e Borgstein (2014), disponível no site <<http://www.cbcs.org.br/website/benchmarking-plataforma/>>. E sobre modelos de referência, pode-se citar o estudo de Schaefer e Ghisi (2016), Carlo (2008), Santana (2006) e Brandão (2003), o que ainda se configura como uma lacuna no estudo de desempenho termo-energético das edificações, visto o tamanho, a quantidade e a diversidade de edificações existentes no nosso país.

Dessa forma, na busca de modelos de referência, uma alternativa é aplicar a análise de agrupamentos. Essa se caracteriza como uma técnica multivariada cujo objetivo é agregar objetos com base nas suas características. A técnica classifica objetos de modo que esses sejam similares dentro do agrupamento. Assim, os agrupamentos devem apresentar homogeneidade interna e heterogeneidade externa (HAIR *et al.*, 2009). Os agrupamentos partem de variáveis previamente definidas como influentes, e a partir de cada agrupamento é possível determinar um objeto que represente todos os objetos desse grupo (BORGSTEIN; LAMBERTS; HENSEN, 2016).

A aplicação dos modelos de referência na análise do desempenho térmico permite a utilização de estratégias bioclimáticas em um único modelo, facilitando o estudo de um estoque de edificações. Assim, o modelo de referência é simulado e analisado de acordo com o seu desempenho, permitindo que sejam testadas diversas soluções e estratégias a fim de melhorar a *performance* e eficiência energética da edificação.

Em síntese, a análise de agrupamentos propõe modelos de referência com base nas características mais representativas da população. Esses modelos permitem uma melhor representação de um estoque de edificações e possibilitam estudos mais ágeis, podendo ser empregados em simulações. As simulações são uma ferramenta para auxiliar na aplicação de estratégias bioclimáticas nas edificações. Por fim, a aplicação apropriada dessas estratégias, conforme a região

em estudo, pode tornar as edificações mais eficientes e termicamente confortáveis. Desse modo, visando contribuir com a busca de soluções que nasçam na concepção do projeto no que se refere ao desempenho térmico, levanta-se o questionamento sobre que influência as estratégias bioclimáticas exercem no desempenho térmico dos edifícios escolares.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

A dissertação proposta tem como objetivo principal avaliar a influência de algumas estratégias bioclimáticas no desempenho térmico de edificações escolares municipais na cidade de Joinville.

1.2.2 Objetivos específicos

Dentre os objetivos específicos, citam-se:

- Desenvolver base de dados de características tipológicas de edificações escolares;
- Determinar um modelo de referência;
- Simular o modelo de referência, aplicando as estratégias bioclimáticas recomendadas na NBR 15220 (ABNT, 2005);
- Selecionar qualitativamente os indicadores das soluções simuladas que melhor promovam o desempenho térmico.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho foi dividido em cinco capítulos. Nesse primeiro capítulo, apresenta-se a importância do estudo proposto e os conceitos gerais em que se baseia. Contextualizou-se a situação energética das edificações, em especial das escolas no Brasil. Propuseram-se os modelos de referência e as simulações computacionais como ferramentas para estudos em conforto térmico e eficiência energética. Os objetivos, geral e específicos, foram definidos.

No segundo capítulo, apresenta-se uma revisão de literatura sobre os assuntos mais relevantes à pesquisa e estudos que identificam quais variáveis exercem influência no desempenho termo-energético de edificações. Demonstra-se a importância das simulações no estudo de eficiência energética das edificações e dos dados climáticos empregados nessas simulações. Aborda-se, ainda, a temática do clima da região e das principais estratégias bioclimáticas indicadas para esse clima. Em seguida, trata-se do conceito de modelo de referência e de estudos termo-energéticos que utilizam esses modelos. Apresenta-se, também a análise de agrupamentos como uma técnica facilitadora para o estudo de um estoque de edificações, assim como estudos envolvendo essa técnica. Por fim, expõe-se o conceito de análise de sensibilidade e estudos termo-energéticos que utilizaram esse método.

O capítulo três propõe a metodologia deste estudo. São ao todo quatro etapas: levantamento de dados, determinação do modelo de referência, simulações termo-energéticas do modelo encontrado e análise de sensibilidade. São demonstrados como foram realizados os levantamentos, o tratamento estatístico dos dados e de que forma foram configuradas as simulações.

No capítulo quatro, exibem-se os resultados atingidos neste estudo, desde os dados levantados, os modelos determinados a partir deles e os resultados das simulações computacionais e da análise de sensibilidade. Discute-se a aplicação dos modelos e a implicação do uso destes em estudos de desempenho termo-energético de edificações escolares. Além disso, discutem-se quais as melhores estratégias para melhorar o conforto térmico das escolas, assim como o grau de influência dessas.

Por fim, no capítulo cinco, são registradas as conclusões obtidas neste estudo. Expõem-se ainda, as limitações e sugestões para estudos futuros relacionados ao tema.

2 REVISÃO

Esta seção apresenta uma revisão sobre os principais assuntos que norteiam esse estudo. Primeiramente foi elaborado um breve panorama sobre eficiência energética das edificações evidenciando as variáveis que influenciam seu desempenho. Expuseram-se, ainda, as possibilidades e limitações relativas à simulação termo-energética em edificações. Mostraram-se, de forma sucinta, os dados climáticos utilizados, o clima da região em estudo e as estratégias bioclimáticas indicadas para esse local. Por fim, apresentaram-se os conceitos de modelo de referência, análise de agrupamento e análise térmica e de sensibilidade, além de estudos que envolvem a aplicação desses conceitos.

2.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NAS EDIFICAÇÕES

A crescente escassez dos recursos naturais tem como consequência uma maior preocupação com relação à racionalização do consumo de energia, pois segundo Carlo (2008), esta além de representar uma economia para o consumidor também evita impactos ambientais e maior investimento do governo na ampliação da oferta de energia. Assim, a eficiência energética torna-se mais uma condicionante a ser considerada no projeto das edificações, sendo que a qualidade do edifício é mensurada tanto pela estética e funcionalidade quanto pelo uso racional dos recursos energéticos, do conforto térmico e lumínico.

Para se alcançar um edifício energeticamente eficiente devem ser ponderados fatores desde a envoltória, o uso da edificação até a eficiência dos equipamentos e sistemas instalados. O consumo de energia da edificação é resultante da troca energética da envoltória com o meio ambiente juntamente com a forma de sua ocupação, o uso de equipamentos e da iluminação artificial. Todas essas variáveis determinam o grau de intensidade do uso de sistema de condicionamento de ar, que compensam os ganhos ou perdas energéticas e são um dos principais responsáveis pelo gasto de energia elétrica das edificações não-residenciais (CARLO, 2008).

Existem várias estratégias e fatores capazes de reduzir o consumo de energia e os impactos ambientais de edificações. Como exemplo, pode-se citar a utilização de materiais construtivos adequados na envoltória, avaliando a transmitância e

capacidade térmica. Isso é salientado pelo trabalho de Pereira e Ghisi (2011) e Sorgato (2009) que a partir de medições e simulações concluíram que esses interferem de forma considerável no desempenho da edificação. Acabamentos, como a cor das paredes, influem significativamente na redução do gasto energético, conforme orientação do RTQ-C (Brasil, 2010). A orientação solar, o número de paredes externas, o tamanho e forma da edificação, assim como o uso de recuos e saliências influem na sua eficiência energética, conforme estudos de Matos *et al.* (2014).

Segundo Fonseca *et al.* (2010), a correta localização das janelas e posicionamento dos elementos de proteção solar, bem como vidros com desempenho apropriado que configurem uma iluminação adequada representam um dos fatores mais preponderantes no consumo energético. Destaca-se, desses fatores o uso de brises, que foram objeto de estudo de Lopes (2016) e Atem e Basso (2005) os quais avaliam a eficiência e funcionalidade desses elementos.

Outro fator capaz de reduzir o consumo de energia é o aproveitamento eficiente da ventilação natural que diminui a taxa de desconforto por calor, incrementando as perdas por convecção e corrigindo o excesso de umidade, o que é demonstrado no estudo de Versage (2009).

É importante ainda mencionar que há outros fatores, que não são objeto desse estudo, mas que certamente influenciam na economia de energia: o uso de energias renováveis, como aquecimento solar da água e energia fotovoltaica; a escolha de eletrodomésticos eficientes energeticamente e o uso de equipamentos de refrigeração e calefação bem dimensionados. Isto é comprovado pelos estudos de Santana (2006) que indicam que um ar-condicionado menos eficiente pode despende até 25% a mais de energia. O RTQ-C (BRASIL, 2010) também indica a importância do sistema de condicionamento de ar, visto que ele é um dos requisitos avaliados na edificação para a obtenção do nível de eficiência energética A.

Observando essas condicionantes para a melhoria da eficiência energética da edificação, nota-se que algumas delas configuram um projeto bioclimático, que é aquele que considera o clima local, utilizando as estratégias adequadas ao lugar no qual a edificação está inserida, fazendo com que a arquitetura responda diferentemente conforme a região, buscando o conforto e a satisfação dos usuários aliada à diminuição do consumo de energia (CAIXA, 2010).

Frente a essa conjuntura, percebe-se que o profissional que projeta tem a obrigação ética de adequar a forma arquitetônica e especificar corretamente os materiais. Griego, Krarti e Hernández-Guerrero (2012) destacam a importância de analisar o desempenho da edificação como um todo, levando em consideração economia de energia, de custos e melhoria do conforto térmico.

2.2 SIMULAÇÃO TERMO-ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES

O uso de programas de simulação para edificação tem sido amplamente utilizado em trabalhos acadêmicos e se configura como uma ferramenta valiosa para conhecer o desempenho térmico e energético dos prédios e orientar as decisões de projeto de modo que a edificação possa ser mais eficiente (BURATTI *et al.*, 2012). Através das simulações, é possível prever o comportamento dos parâmetros construtivos e também abordar de forma integrada os sistemas passivos e artificiais de condicionamento de ar e iluminação, de forma que esses se ajustem adequadamente ao clima e ao funcionamento do edifício (LIU; LIU, 2011).

As simulações em edificações conseguem sintetizar questões amplas que envolvem fatores multidisciplinares, sendo capazes de fornecer uma solução aproximada de um modelo realista de grande complexidade no mundo real (BORGSTEIN; LAMBERTS; HENSEN, 2016). A simulação pode ser aplicada para muitas finalidades, como projeto de iluminação, fluxo de ar, conforto, projeto de ar-condicionado, predição e avaliação de desempenho em projeto de edifícios eficientes. As simulações são geralmente empregadas em novas edificações, no entanto essas também têm sido cada vez mais utilizadas no estágio operacional, para monitoramento e verificação ou avaliação de desempenho através da simulação calibrada. Sem essa ferramenta, o estudo do desempenho em edificações seria muito mais lento, menos preciso e abrangente, inviabilizando por questões de tempo e financeiras a criação de tantos *benchmarks* como os que temos hoje.

Os modelos simulados, podem, no entanto apresentar discrepâncias em relação a realidade ou desempenho medido, o que é chamado de “Gap de Desempenho”. Para a simulação ser efetiva como ferramenta de construção e previsão de desempenho, ela deve provar ser robusta. Os problemas atuais nas simulações incluem a falta de padrões, a despesa de criar modelos precisos e uma

integração fraca entre pacotes de modelagem 3D e programas de simulação (BORGSTEIN; LAMBERTS; HENSEN, 2016).

Atualmente, para simulações de desempenho térmico, existem vários softwares disponíveis no mercado, como o IESVE, AecoSIM, EQuest, EnergyPlus e outros. O EnergyPlus, programa adotado para esse trabalho, é gratuito e distribuído pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos. Ele foi desenvolvido pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) e combina dois programas de simulação termo-energética: DOE-2 e BLAST (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2016).

O programa é composto por módulos que permitem estimar o consumo de energia para aquecimento e resfriamento de um edifício considerando trocas térmicas com o exterior. Para tal, o programa se baseia na caracterização geométrica da edificação, seus componentes construtivos, cargas elétricas instaladas, sistema de condicionamento de ar e padrões de uso e ocupação do modelo e as condições ambientais a que ele está submetido, através do uso de um arquivo climático (LOPES, 2015).

O EnergyPlus permite que o usuário solicite relatórios por intervalo de tempo dos mais diversos parâmetros, como temperatura interna da zona térmica, consumo de energia, carga térmica de aquecimento e resfriamento e outros. Em suma, o programa desenvolve e organiza módulos que possam trabalhar de forma individual ou integrada e possam oferecer um resultado mais preciso e realista (CRAWLEY *et al.*, 2008).

Para a aplicação de novas ferramentas de análise é necessário garantir que o programa utilizado forneça resultados confiáveis, assim faz-se a sua validação. Essa ocorre por meio da aplicação do BESTEST (*Building Energy Simulation Test*), desenvolvida pelo IEA, e adotado pela ASHRAE para validação de softwares (ASHRAE, 2011). O teste ajuda na detecção de diferenças de previsão, dados de entrada errôneos, diferença entre algoritmos utilizados, códigos defeituosos e limitações de modelagem (BORGSTEIN; LAMBERTS; HENSEN, 2016).

As simulações termo-energéticas utilizam dados climáticos do local que se deseja avaliar. Assim, são elaborados projetos capazes de responder à demanda do clima local com aplicação de estratégias específicas que possam garantir a eficiência energética e o desempenho térmico dos edifícios. A seguir é apresentado

o arquivo climático utilizado nas simulações desse estudo e o clima da região de Joinville.

2.3 DADOS CLIMÁTICOS

A maioria dos programas computacionais para análise termo-energética de edificações necessita de arquivos com dados climáticos horários para representar a influência do ambiente externo sobre a edificação. Esses arquivos são obtidos através de dados medidos em estações meteorológicas e necessitam de tratamento para adaptá-los ao formato do programa de simulação desejado. O custo de obtenção desses dados pode ser elevado e o seu tratamento exige um grande investimento de tempo e conhecimento (SANTANA, 2006).

Existem diversos tipos de arquivos climáticos que podem ser utilizados em programas de simulação computacional, entre eles são utilizados no Brasil: Test Reference Year (TRY), Typical Meteorological Year (TMY), Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA), International Weather for Energy Calculations (IWECC); INMET (dados medidos nas estações automáticas do INMET, com extensão .epw) (SCHELLER *et al.*, 2015).

A disponibilidade de dados climáticos e a criação desses arquivos é uma das dificuldades encontradas na área de simulação. Muitas das estações climáticas encontram-se em aeroportos ou locais isolados e não registram os efeitos da cidade no microclima. Além disso, há muitos dados faltantes ou errôneos devido a defeitos nos equipamentos, mudança de lugar das estações ou interrupção na medição (SCHELLER *et al.*, 2015). Todos esses fatores comprometem a qualidade dos arquivos e por sua vez a precisão da simulação.

Para realizar um estudo do desempenho térmico de edificações é necessária a obtenção dos dados climáticos da localidade específica que se deseja avaliar. As informações meteorológicas disponíveis dizem respeito a um número limitado das cidades brasileiras. Além disso, quando estes dados existem e são disponibilizados, algumas vezes são incompletos e a acurácia é questionável (GRUNBERG, 2014).

Grunberg (2014) desenvolveu um arquivo climático TRY para Joinville, com base nos dados disponíveis da estação meteorológica instalada no campus da Universidade da Região de Joinville (Univille). Essa estação é manual e possui apenas três medições diárias. No entanto, essa estação mudou diversas vezes de

lugar e por esse motivo não há uma medição em sequência com representatividade estatística. Além disso, Grunberg (2014) afirma que há um grande número de dados faltantes, o que diminui a confiabilidade dos dados. Conforme Roriz (2012), os dados obtidos a partir de longos períodos de registro tendem a ser mais consistentes.

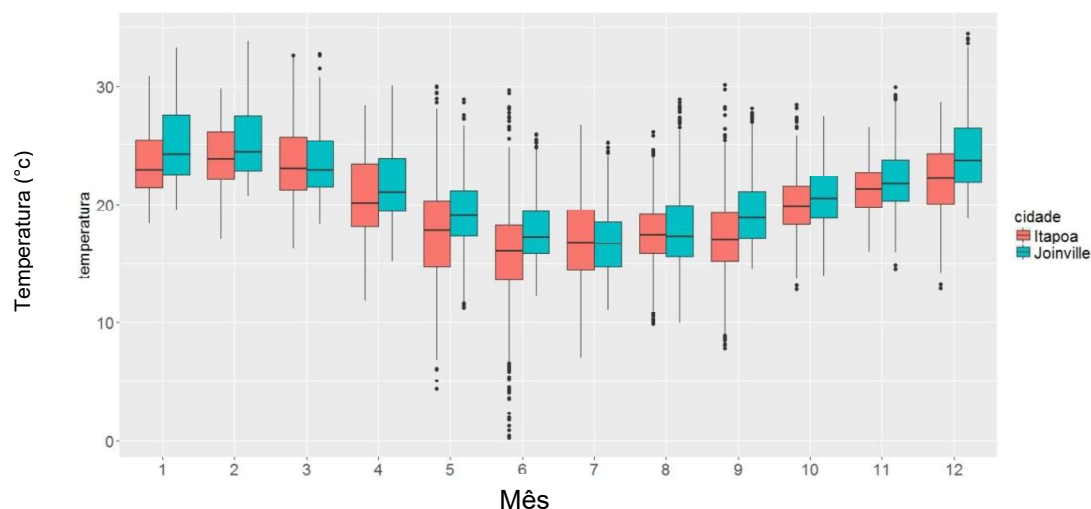
A única estação automática de Joinville, localiza-se no aeroporto Aeroporto Lauro Carneiro de Loyola, pertencente à Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária (INFRAERO). Conforme Grunberg (2014), essa estação conta com medições minuto a minuto de variáveis como temperatura do ar, umidade relativa, temperatura de ponto de orvalho, velocidade e direção do vento. Os dados fornecidos por esses equipamentos possuem uma boa acurácia, tanto por serem automatizados quanto pela importância dessas informações para a aviação. No entanto, não puderam ser utilizados nesse estudo, já que as instituições que os solicitaram: UDESC (Universidade do Estado de Santa Catarina) e UFPR (Universidade Federal do Paraná) não dispunham do montante estipulado pela INFRAERO, que não os cede gratuitamente, nem mesmo para fins científicos.

Diante dessa indisponibilidade, a recomendação da norma NBR 15.575 (ABNT, 2013) é que se empregue o arquivo climático disponível mais próximo em distância e latitude da cidade de Joinville. Nesse caso, foi utilizado o arquivo climático da cidade de Itapoá, zona bioclimática (ZB) 5, o mais próximo. Esse foi desenvolvido pelo Prof. Maurício Roriz (2012) com a base de dados do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) que possui uma estação meteorológica automática. Os dados encontram-se disponíveis *on-line* no site do LabEEE (<www.labee.com.br>), o que facilita a sua aplicação para pesquisas acadêmicas. Os arquivos com extensão epw foram gerados pela primeira vez para simulação do desempenho energético de edificações no programa EnergyPlus (CARLO, 2005). Dentre as variáveis presentes no arquivo climático estão: temperatura do ar, umidade relativa, temperatura do ponto de orvalho, pressão atmosférica, velocidade e direção do vento, pluviosidade e irradiância global sobre o plano horizontal.

Para verificar se os dados de temperatura de Itapoá eram similares aos de Joinville, Cechinel, Henning e Hackenberg (2017) fizeram um estudo comparando a temperatura média de bulbo seco de Itapoá-SC, ZB 5, com a base de dados do INMET registrado por RORIZ (2012) aos dados da estação meteorológica da EPAGRI em Joinville, ZB 5 (ISOPPO, 2016). Os resultados mostram que os dados apresentam comportamentos similares, sendo que em Itapoá as temperaturas

tendem a ser um pouco mais baixas que em Joinville, principalmente nos meses de inverno (Figura 1). Esse fator é atribuído em parte à localização geográfica (litorânea) de Itapoá que permite uma maior incidência de ventos e uma menor amplitude de temperatura.

Figura 1 – Boxplots das temperaturas médias de Itapoá e Joinville



Fonte: Cechinel, Henning e Hackenberg (2017).

Assim, é possível utilizar o arquivo climático de Itapoá pela semelhança dos dados climáticos entre as duas cidades que estão na mesma zona bioclimática, a cinco.

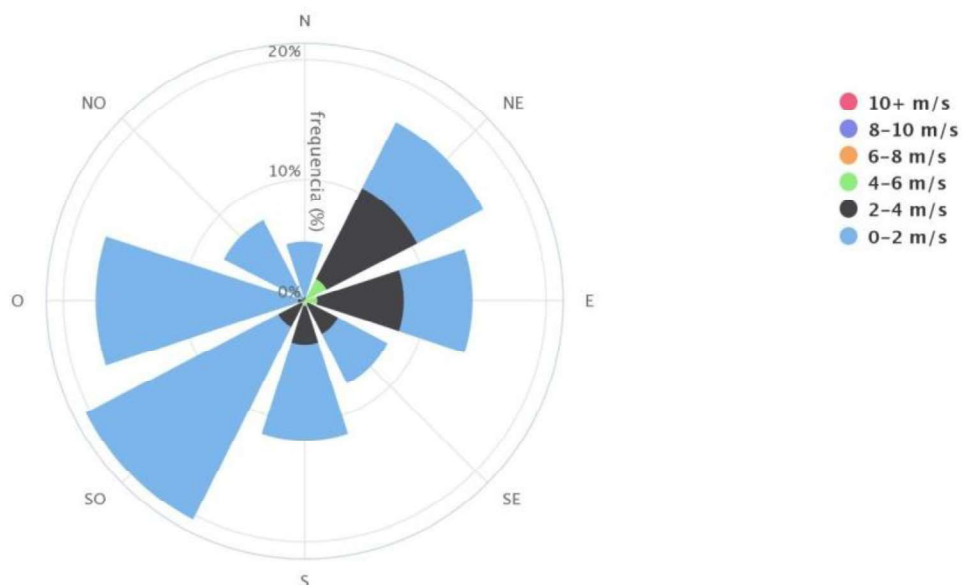
Conforme estudos de Grunberg (2014), Joinville apresenta um clima heterogêneo e estações do ano bem definidas. A carta bioclimática mostra uma taxa de conforto significativa ao longo do ano, mas que sofre variações, sendo o verão o período com a maior taxa de desconforto. De maio a outubro se tem os maiores índices de conforto. O uso de condicionamento mecânico de ar, como estratégia de conforto, fica restrito a apenas 6,77% dos períodos do ano. Assim, na maior parte do ano é possível usar estratégias passivas para aumentar o conforto térmico nas edificações.

As estratégias recomendadas para a maior parte do ano, na região de Joinville, são uso de alta inércia térmica, ventilação natural e sombreamento, sendo que a primeira é recomendada num total de 42,26% do período anual, a segunda em 33,88% e a terceira em 13,49%.

Como a ventilação se configura em uma importante estratégia, é importante estudar a origem dos ventos para o melhor aproveitamento do seu potencial e adequação da orientação das aberturas. Observa-se pela rosa dos ventos de Itapoá (arquivo climático utilizado) uma maior ocorrência de ventos sudoeste, oeste, nordeste respectivamente (Figura 2). A velocidade dos ventos mais alta encontra-se nas orientações nordeste e leste. Ressalta-se ainda, uma clara diferença na orientação dos ventos entre o dia e a noite, sendo que durante o dia os ventos sopram na direção nordeste e leste (Figura 3), chegando a velocidades maiores, entre 2 a 4m/s, e durante a noite os ventos têm origem nas direções sudoeste e oeste com velocidades menores, entre 0 a 2m/s (Figura 4).

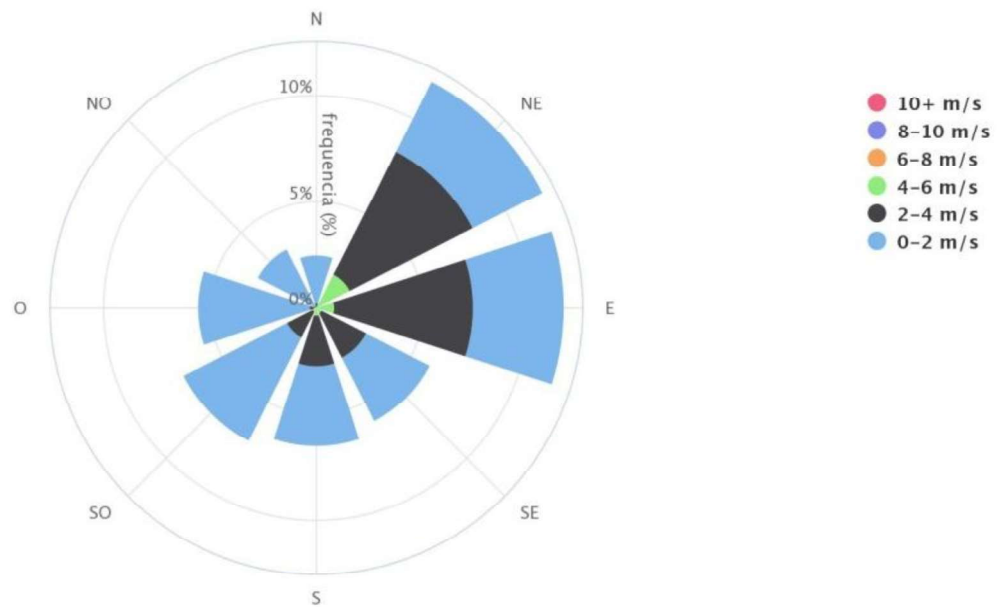
Os ventos provenientes do arquivo climático possuem maior ocorrência na orientação Oeste e menor ocorrência na orientação Norte em todas as estações do ano, exceto na primavera, onde a maior ocorrência de ventos é no Leste (Tabela 1). Não há diferenças expressivas na direção do vento durante o ano.

Figura 2 – Gráfico rosa dos ventos anual



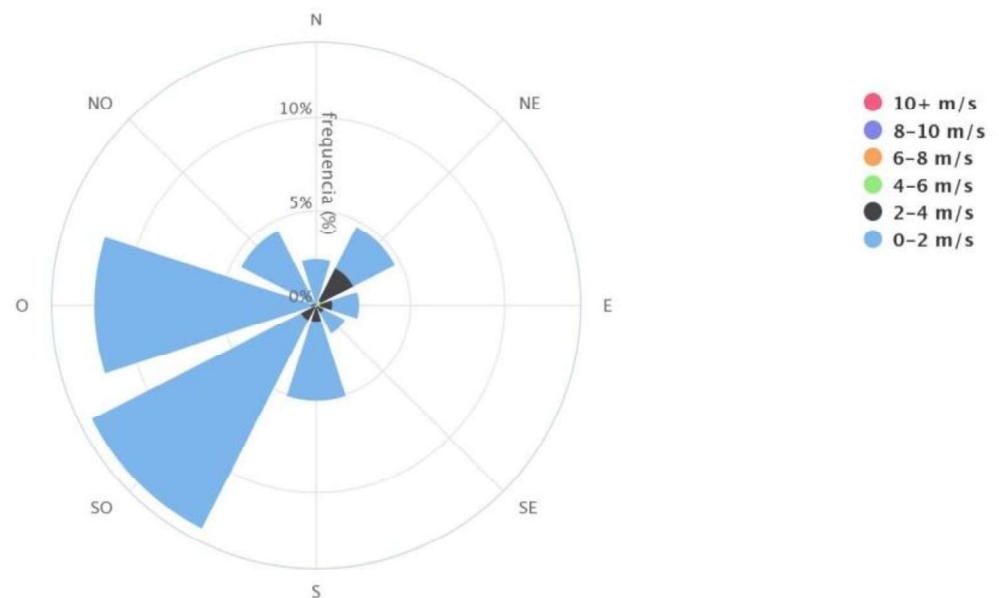
Fonte: <http://150.162.76.139/graficos/vn/11/> (2017).

Figura 3 - Gráfico rosa dos ventos durante o dia



Fonte: <http://150.162.76.139/graficos/vn/11/> (2017).

Figura 4 - Gráfico rosa dos ventos durante a noite



Fonte: <http://150.162.76.139/graficos/vn/11/> (2017)

Tabela 1 – Ocorrência do vento por orientação solar

| | Verão | Outono | Inverno | Primavera |
|--------------|--------|--------|---------|-----------|
| Norte | 6,1% | 4,79% | 6,50% | 8,75% |
| Sul | 27,34% | 28,81% | 30,82% | 25,87% |
| Leste | 31,88% | 19,13% | 23,12% | 40,48% |
| Oeste | 34,48% | 41,80% | 34,05% | 21,47% |

Fonte: Autora (2017).

A velocidade do vento é mais baixa durante todo o ano, entre 0 e 2 m/s. No verão e na primavera há uma maior ocorrência de ventos com um pouco mais de velocidade, entre 2 e 4 m/s (Tabela 2).

Tabela 2 – Ocorrência do vento por velocidade

| Velocidade do vento (m/s) | Verão | Outono | Inverno | Primavera |
|----------------------------------|--------|--------|---------|-----------|
| 0 a 2 | 62,16% | 80,73% | 81,09% | 59,11% |
| 2 a 4 | 33,30% | 18,15% | 16,80% | 33,01% |
| 4 a 6 | 4,45% | 1,08% | 2,02% | 7,60% |
| 6 a 8 | 0% | 0% | 0% | 0,18% |
| 8 a 10 | 0% | 0% | 0% | 0,05% |

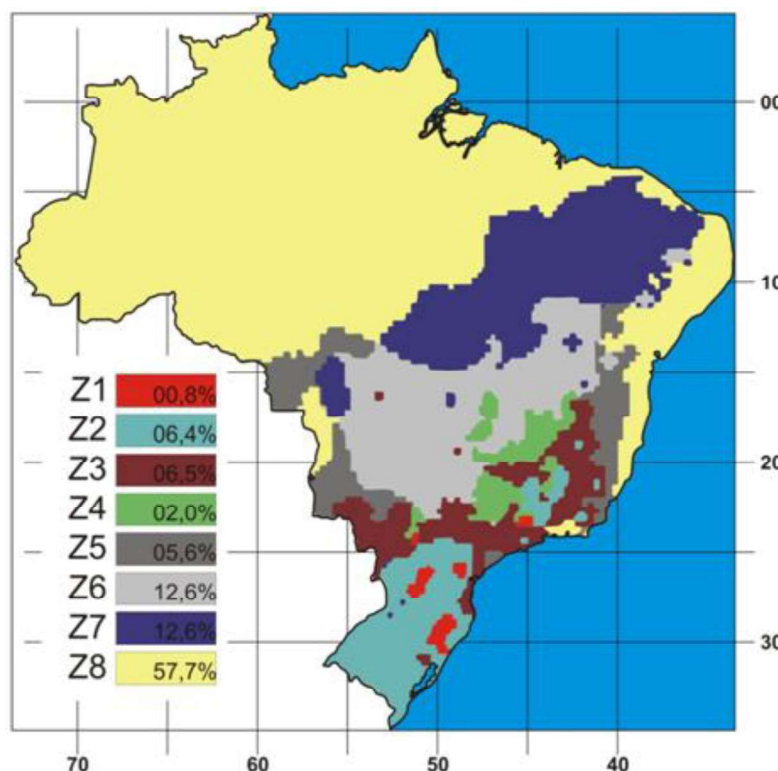
Fonte: Autora (2017).

2.3.1 Diretrizes para desempenho térmico em Joinville

A primeira norma brasileira de desempenho foi a NBR 15220 (ABNT, 2005), tendo como intuito a avaliação de habitações unifamiliares de interesse social com até três pavimentos.

A partir dessa norma foi instituída a classificação das zonas bioclimáticas brasileiras, criada a partir da carta de Givoni (1992). Os dados climáticos das localidades (médias mensais de temperaturas máximas e mínimas e de umidade relativa) foram tratados e se delinearam oito zonas bioclimáticas relativamente homogêneas, graficamente distribuídas no mapa conforme Figura 5.

Figura 5 - Zoneamento bioclimático brasileiro



Fonte: NBR 15220 (ABNT, 2005).

Embora esse zoneamento seja adotado pela norma, há controvérsias em relação à homogeneidade dessas zonas, sendo que academicamente se discutem outras propostas que abrangem mais zonas bioclimáticas.

A cidade de Joinville, foco deste estudo, não consta na relação de cidades apresentada na norma, nem na revisão do zoneamento elaborada por Roriz (2012). No entanto, Grunberg (2014) em seu estudo determina Joinville como pertencente à zona bioclimática cinco. No programa de Zoneamento Bioclimático Brasileiro (ZZBR), desenvolvido por Roriz (2004), foi realizado um estudo com dados climáticos de 330 cidades brasileiras buscando identificar a zona bioclimática de cada cidade de acordo com a NBR 15220 (ABNT, 2005). Por meio da interpolação desses dados foi possível expandir a determinação do zoneamento bioclimático para 5231 cidades, entre elas Joinville. Assim, estima-se por interpolação dos dados, elaborada por Roriz (2004), que a referida localidade pertença à zona bioclimática cinco, especificada pela NBR 15220 (ABNT, 2005).

Para essa zona as diretrizes recomendadas são:

- Aberturas médias para ventilação;
- Sombreamento de aberturas;
- Vedação externa leve e refletora;
- Cobertura leve e isolada;
- Ventilação cruzada no verão;
- Vedações internas pesadas para inverno (inércia térmica).

Outra norma que avalia o desempenho térmico de edificações no Brasil é a NBR 15575 – Edifícios habitacionais: desempenho (ABNT, 2013). Essa norma é aplicada para edificações residenciais de até cinco pavimentos, é uma norma abrangente que compreende diversos aspectos entre eles o desempenho térmico. A NBR 15575 (ABNT, 2013), assim como a NBR 15220 (ABNT, 2005), aborda o desempenho térmico de paredes e cobertura de acordo com a zona bioclimática, estabelecendo valores limite de capacidade térmica para as paredes e valores limite de transmitância térmica conforme a absorptância solar para as paredes e cobertura. Ferreira, Souza e Assis (2017) avaliam os valores-limite da transmitância térmica da envoltória e constataam que os valores da NBR 15220 (ABNT, 2005) são mais restritivos do que os da NBR 15575 (ABNT, 2013). A norma de desempenho também indica a otimização da ventilação natural e sombreamento das fachadas caso os índices de desempenho estipulados não sejam atendidos no verão.

Nesse mesmo contexto, também há o Procel Edifica (Programa Nacional para Eficiência Energética em Edificações), que promove a etiquetagem das edificações conforme o nível de eficiência energética. É controlado pelo Regulamento Técnico de Qualidade para Eficiência Energética em Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C) (Brasil, 2010) que certifica a qualidade e a eficiência energética das edificações comerciais de serviço e públicas.

O RTQ-C (Brasil, 2010) estabelece condições para classificar o grau de eficiência energética da edificação para obter a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE). Essa etiqueta varia de “A” até “E”, sendo o “A” o mais eficiente e o “E” o menos eficiente. Avalia três requisitos: envoltória, iluminação e ar-condicionado, sendo que pode haver etiquetagens parciais. A análise da envoltória avalia itens como transmitância térmica e absorptância solar das paredes e coberturas, porcentagem de abertura das fachadas, altura e forma da edificação,

tipo de vidro e elementos de sombreamento das aberturas. O regulamento é baseado na NBR15220 (ABNT, 2005), citada anteriormente. Tanto o RTQ-C quanto a NBR15220 são legislações indicativas e não obrigatórias.

Dentre essas três diretrizes esse trabalho optou por abordar a NBR 15220 (ABNT, 2005) por conter valores mais restritivos do que a NBR 15575 (ABNT, 2005). Conforme Bogo (2016), a norma de desempenho também se apresenta mais limitada no quesito de ventilação natural, não exigindo ventilação cruzada. Como o objetivo desse trabalho não é a etiquetagem das edificações, o RTQ-C (Brasil, 2010) foi utilizado como meio comparativo e indicativo dos fatores influentes na edificação e não como diretriz.

2.4 ESTRATÉGIAS BIOCLIMÁTICAS RECOMENDADAS PARA O CLIMA DE JOINVILLE

Conforme visto na seção anterior, há algumas diretrizes recomendadas pela NBR15220 (ABNT, 2005) que se configuram como estratégias bioclimáticas a serem aplicadas no projeto e na construção de edificações a fim de melhorar o desempenho térmico das mesmas. Essas são indicadas na norma para habitações de interesse social, no entanto não há nenhuma legislação específica para edifícios escolares ou institucionais.

Assim, na ausência de outra diretriz para o clima da região de estudo, foi feito um levantamento das estratégias bioclimáticas passivas recomendadas para zona bioclimática 5, zona da região em estudo. As estratégias utilizadas nesse estudo, em Joinville, são: sombreamento de aberturas, ventilação natural (ventilação cruzada, aberturas médias para ventilação e uso de ventilação durante 24h), inércia térmica para aquecimento, utilização de paredes leves e refletoras e cobertura leve e refletora. Além disso, foi ainda analisada a absorvância solar das paredes e coberturas.

A NBR 15220 (ABNT, 2005) foi aplicada apesar da forma de uso e da tipologia das escolas serem diferentes da preconizada nessa norma, que foi formatada para uso residencial. As escolas funcionam geralmente em horário comercial, enquanto em residências a ocupação ocorre mais no período noturno.

2.4.1 Sombreamento de aberturas

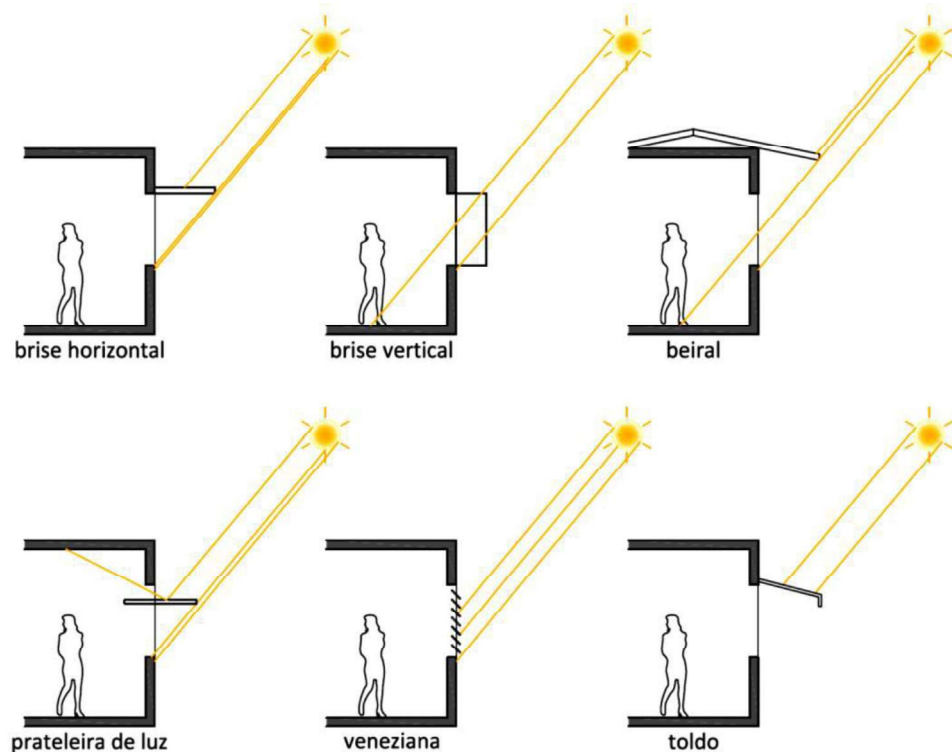
O sombreamento é uma das principais estratégias bioclimáticas para o Brasil, pois o país apresenta clima quente na maior parte do seu território. Os elementos de proteção solar reduzem os ganhos de calor da envoltória da edificação pela radiação solar. O sombreamento, desse modo, evita o aumento da temperatura interna, o que consequentemente reduz o consumo de energia. (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

Os dispositivos de proteção solar também podem diminuir ou evitar o ofuscamento pela incidência solar direta em determinados períodos do ano. Esses podem impedir a entrada de iluminação em horários desejados, prejudicando o aproveitamento de luz natural no ambiente e levando ao aumento do consumo energético pela iluminação artificial. Faz-se, assim, necessário estudar a geometria solar do terreno em questão, de forma que os elementos de proteção solar sejam corretamente projetados em relação à sua orientação, dimensão e aplicação (FROTA; SCHIFFER, 2001).

Nesses estudos de insolação, as cartas solares são importantes ferramentas para o dimensionamento dos brises. Elas mostram o percurso solar durante o ano de acordo com a latitude. Também é possível criar as máscaras de sombra de forma a estudar a melhor orientação, angulação e forma para barrar os raios solares indesejados. Na definição do tipo de proteção solar mais adequado, aspectos como eficiência, privacidade, durabilidade e manutenção devem ser considerados (BITTENCOURT, 2015).

Os elementos de proteção solar em edifícios têm variadas formas e tamanhos podendo ser brises verticais ou horizontais, beirais, prateleiras de luz, venezianas e toldos, de acordo com esquema da Figura 06.

Figura 6 - Tipos de proteção solar em edifícios



Fonte: Lopes (2016)

2.4.2 Ventilação natural

A ventilação natural tem sido empregada em edificações desde os tempos antigos. Com o advento do condicionamento artificial de ar essa estratégia foi por algum tempo negligenciada. Recentemente, com a preocupação em mitigar o consumo energético a ventilação tem-se mostrado uma alternativa para diminuição dos impactos ambientais e socioeconômicos das edificações.

Em climas quentes e úmidos, a ventilação se configura como uma estratégia eficaz de resfriamento, fazendo com que a temperatura interna acompanhe a externa. Essa estratégia é aplicável até um limite de 32°C, visto que acima desse valor os ganhos térmicos por convecção tornam essa estratégia indesejável (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). Desse modo, é preciso ter janelas operáveis para controlar a entrada de ar no ambiente interno.

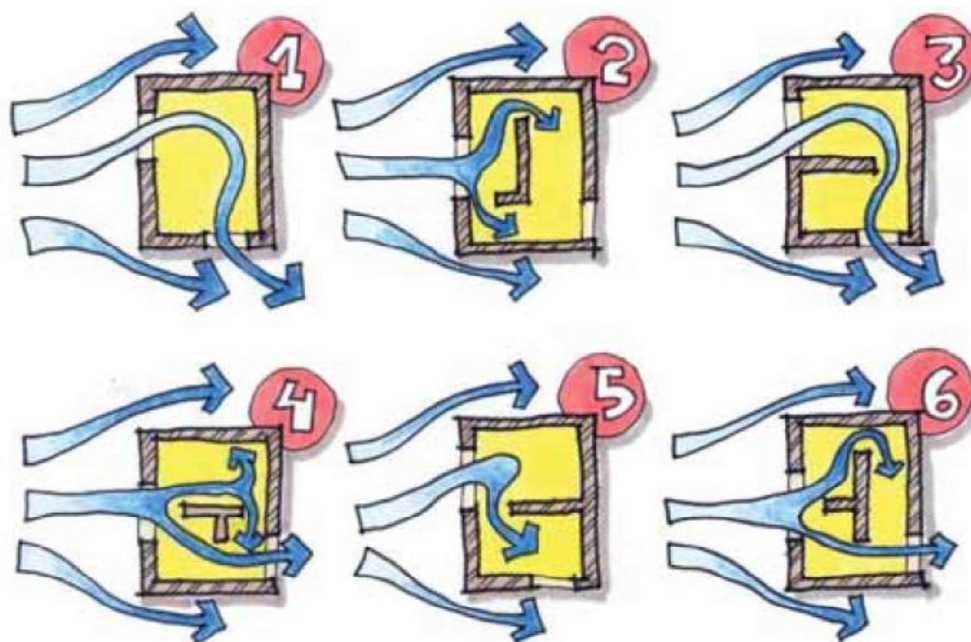
A ventilação cruzada é uma estratégia muito simples, pois exige apenas duas aberturas em faces diferentes e o conhecimento da orientação dos ventos que se deseja captar nos períodos quentes. Fonseca *et al.* (2010) ainda afirma que além do correto tamanho e posicionamento das aberturas deve-se escolher esquadrias

capazes de direcionar o fluxo de ar, seja por retirada de ar quente da camada mais alta do ambiente com direcionamento de fluxo para o usuário, ou somente visando à ventilação higiênica.

A ventilação pode ser influenciada por obstruções no entorno, que podem mudar o seu direcionamento ou criar diferentes sombras de vento. Assim, quando a fachada com maior porcentagem de abertura e o vento predominante estão em orientações diferentes, o uso de elementos direcionadores do fluxo do ar para o interior da edificação pode ser uma opção (CAIXA, 2010). Ambientes fluidos permitem que a brisa percorra o maior número de espaços da edificação, conforme Figura 7.

A NBR 15220 (ABNT, 2005) recomenda no quesito de ventilação natural que as aberturas sejam de tamanho médio e que se aplique a ventilação cruzada no verão. Ressalta-se dentre essas diretrizes que essa norma foi criada para habitações residenciais, onde o período mais intenso de uso é o noturno. As edificações em estudo, institucionais, possuem período de ocupação comercial, diurno.

Figura 7 - Estudo do fluxo de ar em função da presença de divisórias e repartições internas



Fonte: Lamberts; Dutra; Pereira (2014).

2.4.3 Inércia térmica para aquecimento

A inércia térmica pode compensar as baixas temperaturas pelo atraso térmico. As paredes absorvem o calor durante o dia e devolvem à edificação geralmente no período da noite quando as temperaturas são mais baixas (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

Para gerar esse fenômeno é necessário que a parede possua uma alta capacidade térmica que é gerada pela sobreposição das camadas da parede. Cada material afeta o comportamento térmico desse componente. A capacidade térmica do material e seu respectivo atraso térmico são propriedades importantes na escolha do material a ser selecionado para os componentes do envelope, de acordo com suas respectivas orientações solares e a resposta térmica desejada (PAPST, 1999).

No caso do clima na região em estudo, a NBR15220 (ABNT, 2005) recomenda inércia térmica nas paredes internas, para que essas não provoquem um efeito indesejado no verão, acumulando o calor durante o dia e liberando no período noturno, que ainda é quente em regiões úmidas. Cabe ressaltar, que essa norma foi desenvolvida para residências, onde o período de maior permanência é o noturno, o que pode invalidar essa estratégia.

2.4.4 Paredes externas leves e refletoras

As paredes consideradas leves na NBR15220 (ABNT, 2005) possuem um atraso térmico igual ou inferior a 4,3 horas. Embora essa seja a recomendação para Joinville, estudos indicam que as paredes pesadas apresentam maiores índices de conforto nessa zona bioclimática (FERREIRA, SOUZA, ASSIS, 2017). O mesmo ocorreu em Florianópolis-SC, que possui a mesma indicação para as paredes externas e no estudo de Matos (2007), as paredes com maior atraso térmico e baixa transmitância apresentaram melhor desempenho térmico.

As paredes refletoras, de cores mais claras, evitam a absorção de calor por radiação solar e são indicadas para essa região (BRASIL, 2010). Não há exigência específica na NBR15220 (ABNT, 2005) em relação à absortância, ela consta apenas indiretamente no Fator Solar. No entanto, a absortância solar das paredes externas se configura como um dos fatores mais influentes do desempenho térmico da envoltória, conforme estudos de Ferreira, Souza e Assis (2017) e Almeida (2014).

2.4.5 Cobertura leve e isolada

A recomendação da cobertura categorizada como leve e isolada é de um valor de transmitância térmica menor ou igual a $2 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ (ABNT, 2005). Esse valor, segundo BOGO (2016), é considerado alto para algumas zonas bioclimáticas, pois aplicando Método das Tabelas de Mahoney (MAHONEY, 1971) foi verificado um rigor climático de calor em cidades onde a recomendação é de transmitância térmica menor ou igual a $2 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Observa-se, ainda, que com o uso de um elemento de isolamento térmico do tipo radiativo (lâmina de alumínio) ou do tipo resistivo (lã de vidro), o valor de U diminui para cerca de 1,18 a $0,62 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, o que é apresentado no anexo D da NBR 15220 (ABNT, 2005).

Outro tópico abordado nesse trabalho no quesito da cobertura é a absorvância solar da mesma. Essa embora conste na norma apenas como parte do fator solar da cobertura é um dos quatro fatores mais influentes no desempenho térmico da edificação, conforme estudo de Almeida (2014). Na cobertura o melhor desempenho desse elemento é com cores claras, pois predomina o desconforto por calor na somatória de graus-hora de resfriamento e aquecimento (MATOS, 2007).

Diversos trabalhos acadêmicos avaliam o comportamento dos parâmetros construtivos utilizando simulações paramétricas, ou seja, variando esses parâmetros. Para as simulações, além do estudo das estratégias e parâmetros que se deseja alterar, é necessário um modelo simplificado que represente a realidade da tipologia que se deseja analisar e seja o caso base. Quanto mais adequado à realidade for esse modelo, mais precisos serão os resultados gerados pela simulação.

2.5 MODELO DE REFERÊNCIA

Pensando na obtenção da redução do consumo de energia é necessário definir requisitos mínimos de desempenho energético de componentes da edificação para alcançar níveis de custo-ótimo usando uma metodologia comparativa. Como não é possível calcular essa otimização para cada edifício é necessário definir modelos de referência (CORGNATI *et al.*, 2012).

Esses representam um banco de dados de um determinado tipo de edificação de uma determinada região. Esse tipo de modelo pode ser utilizado para uma

avaliação preliminar no balanço termo-energético de uma edificação, pois esses representam as características do consumo energético de todo um estoque (CORGNATI *et al.*, 2012).

Para Dascalaki *et al.* (2011), modelo de referência descreve uma classificação dos edifícios de acordo com algumas características específicas, que, no caso, estão relacionadas ao seu desempenho termo-energético. Conforme o Anexo III da diretiva EPBD recast 2010/31/EU (European Union, 2010), as edificações referência buscam representar uma edificação típica, a média das edificações do estoque, de acordo com as características climáticas da região, e a funcionalidade do edifício.

Os modelos de referência têm sido pontos chave das pesquisas, pois é a maneira mais efetiva de reduzir significativamente o consumo de energia no dos edifícios existentes e avaliar com clareza o desempenho energético real dessas edificações para que se possam aplicar as medidas de adaptação adequadas do ponto de vista tecnológico e econômico. Assim, os modelos de referência estão sendo amplamente empregados (BALLARINI; CORGNATI; CORRADO, 2014).

Não há normas ou regras para obtenção dos modelos de referência. As metodologias mais conhecidas e consolidadas de obtenção de dados para elaboração dos modelos de referência são as bases de dados de edificações dos EUA, o *Residential Energy Consumption Survey – RECS* e o *Commercial Buildings Energy Consumption Survey – CBECS* (CORGNATI *et al.*, 2012). Essa extensa fonte de dados tornou-se bastante utilizada em pesquisas para definição de modelos representativos para diversos fins.

O CBECS coletou informações de edificações comerciais nas quais pelo menos 50% da área é destinada à atividade comercial. O banco de dados de 2012 possui 6.700 edificações, divididas em 16 atividades incluindo áreas como educação, saúde e culto religioso. A pesquisa apresenta as edificações com suas localizações, dimensões, ocupações, usos de equipamentos, usos de energias e áreas de aquecimento e resfriamento (CBECS, 2016).

A coleta dos dados para o CBECS, assim como o RECS, foi dividida em duas etapas. Primeiro, foi realizado o levantamento das características da edificação e os padrões de uso de energia, através de questionários conduzidos para os responsáveis das edificações da amostra. A segunda etapa foi o levantamento de consumo total de energia obtido diretamente com a concessionária e a comparação

com os dados das entrevistas. Esse banco de dados pode ser consultado por proprietários e gestores (benchmarking), por consultores e pesquisadores que trabalham com modelagem termo-energética (previsão), desenvolvedores de produto (avaliar o potencial do mercado), líderes do governo (formular políticas), *Energy Star* (como base para as metas de ranqueamento das edificações) (CBECS, 2016).

Na Europa, o governo tem promovido projetos que fazem parte do “*Intelligent Energy Europe*”(IEE): TABULA e ASIEPI, com o intuito de criar um banco de dados de edificações residenciais. Esses projetos fazem parte do *Energy Performance of Buildings Directive - EPBD recast*, 2010/31/EU (European Union, 2010), que determina que cada estado participante defina requisitos mínimos de desempenho energético de edificações. Como não é possível calcular o desempenho energético de cada edificação faz-se necessário o uso dos modelos de referência regionais ou nacionais. Essa demanda aumentou a popularidade da sua aplicação na Europa (BALLARINI; CORGNATI; CORRADO, 2014).

Os bancos de dados e os modelos de referência permitem que se estabeleçam índices de consumos máximos de energia e se crie medidas a ser implementadas a fim de mitigar o consumo energético e ter edifícios com melhor desempenho. Esses bancos de dados devem ser adotados a fim de criar modelos de referência que facilitam o estudo de um determinado estoque de edificações de uma região. O Brasil não possui banco de dados de edificações escolares, o que está atualmente em desenvolvimento, e sem os quais o estudo sobre desempenho das edificações escolares fica limitado.

2.5.1 Metodologia de obtenção de modelos de referência

Embora não exista uma norma única que regule o processo para determinação de modelos de referência, as metodologias encontradas na literatura são similares. Primeiro, define-se uma determinada zona climática e uma tipologia de edificação conforme a sua função (comercial, residencial, educacional e etc.). Em seguida, levantam-se as variáveis que influem no desempenho energético e no conforto térmico da edificação; essas são obtidas in loco ou em bancos de dados existentes. Finalmente, os dados são tratados de forma a determinar as

características mais frequentes, a partir das quais se gera o modelo de referência (ROSA, 2014).

Conforme descrito por Torcellini *et al.* (2008), o *Department of Energy of United States* (DOE) utiliza uma metodologia de organização dos dados bastante consolidada no decorrer dos anos. Essa metodologia divide os dados coletados em quatro categorias: forma, materiais, equipamentos e operação. Os dados de cada uma destas categorias formam um subconjunto das características da edificação. A categoria geometria trata da tipologia do edifício de acordo com sua função (residencial, comercial, institucional, etc.), distribuição espacial, tamanho e geometria. A segunda categoria corresponde a materiais e sistemas construtivos e descreve as propriedades termofísicas da envoltória do edifício por onde ocorrem as trocas de calor com o meio externo. A categoria equipamentos refere-se aos sistemas instalados na edificação, tais como aquecimento de água, condicionamento artificial, ventilação mecânica, iluminação e outros. Por fim, a categoria de operação trata da forma de uso da edificação, como abertura de portas e janelas, operação dos sistemas de resfriamento e aquecimento, o uso de equipamentos, o uso de iluminação artificial entre outras.

Os dados coletados tanto em campo quanto em banco de dados devem ser organizados de forma que eles representem as características das edificações. As diretrizes do *EPBD recast* (European Union, 2010) sugerem três metodologias para a determinação dos modelos a partir dos dados levantados: edifício exemplo, edifício real e edifício teórico.

O edifício exemplo é quando o pesquisador não tem dados de levantamento e utiliza dados encontrados na literatura, como manuais, normas e de conhecimentos de especialistas na área. É um edifício que não existe na realidade, mas supõe-se que possua as características recorrentes do estoque em estudo.

O edifício real é um edifício existente que é determinado a partir de um conjunto de dados levantado pelo pesquisador. Esses dados são tratados gerando as características mais encontradas naquele estoque de edificações. Assim, uma edificação é selecionada na mostra por ser estatisticamente a mais representativa do grupo.

O edifício teórico é fictício. Assim como o edifício real ele é definido a partir de uma amostra estatisticamente tratada, do qual surgem as características mais

frequentes nas edificações. No entanto, a edificação teórica é uma combinação de diversas características que formam uma nova edificação que não existe.

O modelo de referência pode ser determinado pela composição entre os métodos conforme os objetivos da pesquisa e os dados disponíveis. Pode-se adotar, por exemplo, a forma de um edifício real, os materiais de um edifício teórico e o modo de operação de um edifício exemplo encontrado na literatura (ROSA, 2014).

Corgnati *et al.* (2012) e Ballarini, Corgnati e Corrado (2014) descrevem os três métodos citados para obtenção dos modelos sugeridos no EPBD *recast*. Eles dividem o processo em três etapas: levantamento ou aquisição dos dados, processamento dos dados através de análise estatística e, por fim, definição dos modelos de referência.

O principal objetivo de se determinar modelos de referência é utilizar esses modelos como ponto de partida para o estudo de eficiência energética e conforto térmico. Os modelos de referência simplificam os dados de entrada em simulações termo-energéticas. Assim, é possível testar os diferentes parâmetros construtivos e estratégias bioclimáticas de forma a sugerir diretrizes construtivas e aprimorar ou desenvolver normas. A seguir são tratados alguns estudos que aplicam os modelos de referência.

2.5.2 Estudos envolvendo modelos de referência

Criar protótipos se tornou essencial para estudos termo-energéticos de larga escala. Diversos estudos têm sido desenvolvidos nessa área como Dascalaki *et al.* (2011), Fracastoro e Serraino (2011) e Ravetz (2008).

Dascalaki *et al.* (2011) desenvolveu modelos de referência para edificações helênicas na Grécia e realizou estudos de desempenho termoenergético dessas edificações mostrando o potencial para economia de energia. O estudo está integrado com o programa europeu TABULA, anteriormente citado.

Fracastoro e Serraino (2011) desenvolveram uma metodologia chamada E-SDOB (Distribuição Estatística da área de piso das Edificações de acordo com a demanda de energia primária para aquecimento). Tal metodologia analisa um estoque de edificações a partir de dados obtidos de diversas fontes como o censo, literatura e levantamentos que foram estatisticamente tratados. A validação da metodologia permite que os dados sejam usados como parâmetros para

etiquetagem de edificações e políticas de incentivo à economia de energia. Essa validação ocorreu com dados da região de Piemonte e Lombardia.

Ravetz (2008) faz uma revisão do estoque das edificações no Reino Unido com foco na melhoria do desempenho energético. O trabalho, no entanto, abrange os mais diversos aspectos desde socioeconômicos até tipológicos, apontando os gargalos para se alcançar as metas impostas pelo governo na economia de energia.

No Brasil, existem alguns estudos nessa área desenvolvidos por Carlo (2008), Santana (2006), Brandão (2003) e Schaefer e Ghisi (2016).

Santana (2006) pesquisou a influência de alguns parâmetros construtivos no consumo de energia em edifícios de escritórios em Florianópolis. O estudo foi a partir de uma amostra de 35 edificações utilizando frequência de ocorrência. Brandão (2003) coletou dados de mais de 3000 edificações residenciais em todo o Brasil entre os anos de 1998 e 2000, a partir dos quais determinou uma tipologia predominante para residências. Carlo (2008) levantou dados sobre consumo de energia de edificações comerciais e institucionais de cinco cidades brasileiras para a criação de um modelo de referência comercial e institucional que pudesse ser empregado em estudos de eficiência energética de edificações. Schaefer e Ghisi (2016) levantaram 120 residências unifamiliares de baixo padrão para criar modelos de referência por meio de análise de agrupamento.

2.6 ANÁLISE DE AGRUPAMENTO

A criação de modelos de referência tem sido bastante usada em estudos de eficiência energética. Logo, esses modelos se configuram como um elemento chave para o estudo de um estoque de edificações. E, para a determinação desses modelos, faz-se necessário uma técnica estatística para o tratamento dos dados, uma dessas técnicas é a de análise de agrupamento.

A análise de agrupamento pode ser utilizada nas mais diversas áreas do conhecimento e tem como finalidade agregar objetos com base nas suas características. Ela busca agregar variáveis com base na distância (proximidade), onde cada objeto possui uma distância centróide ou do centro do agrupamento. Os agrupamentos devem ser similares internamente e bastante diferentes ou distantes externamente. Assim, quando representados graficamente, os objetos estarão

próximos dentro do agrupamento se forem semelhantes, e distantes se forem diferentes (SANTAMOURIS *et al.*, 2007).

Nessa técnica, a variável estatística, que é a característica usada para comparar objetos, é determinada pelo pesquisador. Portanto, a definição das variáveis é um elemento chave na análise e deve possuir embasamento teórico e prático. Logo, essas não devem ser incluídas indiscriminadamente, pois cada variável acrescentada pode afetar substancialmente o resultado final. A seleção das variáveis pode ser realizada por diversas abordagens, como por exemplo, baseando-se na literatura, por análise de sensibilidade, por regressão *stepwise*, por regressão linear múltipla (GAO; MALKAWI, 2014).

Na análise de agrupamento, o primeiro passo é encontrar e calcular a similaridade entre os objetos a serem agrupados. As medidas de similaridade mais empregadas são as distâncias, pois elas representam melhor o conceito de proximidade. A maior parte das características utilizadas nessas análises são métricas (HAIR *et al.*, 2009). Entre as medidas de distância há a distância euclidiana, a distância euclidiana quadrada (ou absoluta), a distância city-block (de Manhattan), a distância de Chebychev, a distância de Mahalanobis (D^2), o coeficiente de Gower entre outros.

Observações consideradas atípicas devem ser avaliadas e caso não sejam representativas devem ser eliminadas. Essa eliminação deve ser realizada com cautela para não distorcer os dados (HAIR *et al.*, 2009).

Sempre que possível é interessante padronizar as variáveis para que não haja distorção nos resultados por diferença de escala entre as mesmas.

Deve-se ainda, analisar as variáveis de entrada em relação à multicolinearidade. Se essa for encontrada, devem-se reduzir as variáveis a número iguais em cada conjunto de medidas correlacionadas ou usar uma medida de distância que compense a correlação, como a distância de Mahalanobis (HAIR *et al.*, 2009).

A próxima etapa nessa análise é definir um método de partição a ser aplicado. Esses podem ser hierárquicos, não hierárquicos ou uma combinação dos dois métodos. O método hierárquico envolve uma série de $n-1$ decisões de agrupamento (sendo n o número de observações) que combinam observações em uma estrutura de hierarquia ou do tipo árvore. Dentre os métodos hierárquicos há os aglomerativos e os divisivos. No método aglomerativo cada observação forma um grupo. A partir

da aplicação da medida de similaridade os grupos existentes vão sendo combinados em novos grupos. O processo é repetido $n-1$ vezes até que todas as observações estejam em um único agrupamento. Esse processo pode ser representado por um dendograma ou gráfico em árvore (HAIR *et al.*, 2009).

Para medir a similaridade entre os membros de cada agrupamento são utilizados algoritmos de agrupamento. Os algoritmos aglomerativos mais populares são ligação individual, ligação completa, ligação média, método centroide e método de Ward.

Os métodos não hierárquicos consistem na partição n observações em k clusters em que cada observação pertence a um cluster exclusivo com o centroide mais próximo (média). O número de agrupamentos formados precisa ser previamente definido e assim será oferecida a melhor solução para aquele número de agregados. O processo ocorre em duas etapas principais, a primeira é a especificação do centroide k para cada agrupamento. O próximo passo é tomar cada ponto pertencente a um determinado conjunto de dados e associá-lo ao centroide mais próximo (GAO; MALKAWI, 2014).

Uma abordagem comumente usada é designar as sementes de agrupamento por meio de um método hierárquico, assim é possível obter o número de agregados e as características dos agrupamentos. Após a definição da quantidade de pontos semente se escolhe um algoritmo de agrupamento, k -médoide ou k -médias.

No final do processo de análise de dados por clusters ou análise de agrupamento, é identificado o caso mais próximo do centro do agrupamento e esse é escolhido como modelo de referência. Esse processo é muito interessante de ser aplicado principalmente no que se refere à forma da edificação, visto que não é necessário definir outras características para o modelo, além daquelas em estudo.

Apesar da classificação em agrupamentos ser uma característica inerente ao ser humano, essa tarefa torna-se mais complexa por meio desta técnica multivariada. A solução final pode ser considerada subjetiva, já que exige muito julgamento do pesquisador (HAIR *et al.*, 2009).

A análise de agrupamento ou clusters tem sido amplamente empregada em pesquisas de desempenho energético de edificações como no trabalho de Lara *et al.* (2015). Nessa pesquisa foram levantadas 85 escolas na província de Treviso na Itália, das quais se selecionou uma amostra de 60. A partir desses dados foram aplicadas técnicas de regressão linear múltipla para determinar quais parâmetros

são os mais relevantes para o desempenho energético das escolas. Foi utilizada uma partição não hierárquica, na qual foi selecionado o método K centroides de acordo com o número desejado de grupos. Os pontos semente são atribuídos ao centroide mais próximo de acordo com a distância Euclidiana quadrado. Assim foram determinados cinco edifícios referenciais para representar essas escolas.

Outro trabalho semelhante é o de Gaitani *et al.* (2010). Foram coletados dados de consumo de energia, aquecimento e iluminação de 1100 escolas na Grécia para designar uma edificação de referência e uma ferramenta que pudesse medir o consumo de energia. Para a pesquisa ele utilizou a técnica de análise de agrupamento a partir de sete variáveis consideradas influentes no consumo de energia. Nessa pesquisa, também foi empregado um método de partição não hierárquico, bastante semelhante com a pesquisa de Lara *et al.* (2015). Foi aplicado o algoritmo *K-means* que começa com um ponto centroide K e atribui a cada ponto de dados o centroide mais próximo. Esse processo vai sendo repetido até que o centroide dos grupos permaneça inalterado. Assim, o algoritmo *K-means* determinou K grupos com a maior distinção possível entre eles. Foram formados cinco agrupamentos distintos.

No trabalho de Santamouris *et al.* (2007), também na Grécia, foram coletados dados do consumo energético de 320 escolas. Foi utilizada a técnica de *fuzzy clusters* e as escolas foram classificadas em cinco classes de energia, cada classe com um modelo representante. Também foi feita uma comparação entre a técnica de *fuzzy clusters* e de frequência acumulativa, mostrando a robustez da técnica de clusters. A partir desses modelos foram desenvolvidos estudos sobre como melhorar o desempenho térmico dessas escolas.

2.7 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Além da análise de agrupamento que auxilia no estudo termo-energético das edificações, outra técnica amplamente empregada por pesquisadores dessa área é a análise de sensibilidade. Essa desempenha um papel importante na análise energética das edificações, podendo ser empregada para identificar as variáveis chave que afetam o desempenho térmico dos edifícios tanto nos modelos de simulação termo-energética quanto no estudo observacional (TIAN, 2013).

Os termos "sensíveis", "importante", "mais influentes", "grande contribuinte", "eficaz", ou "correlacionados" de forma intercambiável são usados por diversos autores, quando se referem ao grau em que um parâmetro de entrada afeta a saída do modelo (HAMBY, 1994). Crick *et al.* (1987) fizeram uma distinção, referindo-se aos parâmetros "importantes", como aqueles cuja incerteza contribui substancialmente para a incerteza nos resultados da avaliação; e parâmetros "sensíveis", como os que têm uma influência significativa sobre os resultados da avaliação. O consenso entre os autores é que os modelos são realmente sensíveis a parâmetros de entrada de duas maneiras distintas: (1) a variabilidade, ou incerteza, associada a um parâmetro de entrada sensível é propagada através do modelo resultando em uma grande contribuição para a variabilidade global de saída; e (2) os resultados do modelo podem ser altamente correlacionados com um parâmetro de entrada, de forma que pequenas alterações no valor de entrada provocam mudanças significativas no valor de saída (HAMBY, 1994).

A distinção entre os parâmetros importantes e sensíveis é necessária devido ao tipo de análise a ser realizada: análise de incerteza (parâmetro de importância) ou análise de sensibilidade (sensibilidade de parâmetros). Um parâmetro importante é sempre sensível porque a variabilidade do parâmetro não aparecerá na saída a menos que o modelo seja sensível à entrada. Um parâmetro sensível, no entanto, não é necessariamente importante, pois pode ser conhecido com precisão, e pode adicionar pouca variabilidade à saída (HAMBY, 1994).

A sensibilidade de um parâmetro pode ser determinada calculando a diferença da % da saída variando um parâmetro de entrada a partir do seu valor mínimo para o seu valor máximo (TILL; MEYER, 1983).

Existem diversos estudos que trabalharam com análise de sensibilidade. Tian e Choudhary (2012) fizeram um estudo em escolas secundárias de Londres a partir da análise de sensibilidade. Constatou-se que a ventilação e a infiltração de ar estão entre os três fatores mais influentes no desempenho energético da edificação, visto que as taxas de trocas de ar e a temperatura interna das salas estão fora do que seria recomendável.

Yildiz e Arsan (2011) determinaram que os parâmetros mais (sensíveis) influentes, por meio da análise de incerteza e sensibilidade, para resfriamento num apartamento térreo de um clima quente e úmido são o set point da temperatura de resfriamento, a ventilação natural, a largura da edificação e a área de janela.

Demanuele, Tweddell e Davies (2010) utilizaram a análise de sensibilidade local para determinar os principais fatores que afetam o gasto de energia em uma escola no Reino Unido. Os pesquisadores descobriram que as variáveis importantes estão relacionadas com a forma de ocupação; tais como carga dos equipamentos, horas de uso e *set point* das temperaturas de aquecimento determinadas pelos usuários.

Badescu *et al.* (2010) estudaram o primeiro edifício de escritórios passivo na Romênia e realizaram uma análise de sensibilidade local para encontrar a causa das cargas de refrigeração e superaquecimento estarem tão altas. Os resultados apresentaram que as fontes internas de calor afetam significativamente a carga de refrigeração. As venezianas revelaram-se eficazes na diminuição da entrada de calor no edifício. O estudo mostrou a necessidade de condicionamento mecânico do ar em alguns períodos do verão. A configuração da edificação usada para a Europa é projetada com fim de aquecimento e deve ser alterada na Romênia para refrigeração, já que essa se torna necessária no verão.

Ferreira (2013) realizou um estudo sobre o impacto das coberturas jardim na temperatura interna média na cidade do Porto em Portugal. O estudo compreendeu dezesseis fatores que foram variados conforme um cenário base. Foi utilizada a sensibilidade local por meio do índice de sensibilidade. O resultado mostrou grande diferença entre a influência dos fatores, ou seja, alguns tiveram grande influência e outros praticamente nenhuma sobre as temperaturas.

Silva (2016) aplicou a análise de sensibilidade local e global em uma edificação residencial no clima de Florianópolis para verificar as variáveis mais influentes. O estudo de caso permitiu descobrir variáveis de projeto influentes no modelo, como as transmitâncias térmicas das paredes e cobertura, as taxas de infiltração de ar nas janelas e absorções solares.

2.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A revisão bibliográfica relacionada ao tema foi abordada de forma que compreendesse os aspectos relevantes que deram embasamento para esse trabalho.

Sucintamente, tratou-se do conceito de eficiência energética em edificações, do clima da cidade de Joinville e as estratégias indicadas para esse clima.

A definição de um modelo de referência foi apresentada como uma maneira de facilitar o estudo termo-energético de um determinado estoque de edificações, nesse caso edificações escolares. A análise de agrupamento é uma das formas de determinar esse modelo de referência. A simulação energética em edifícios escolares foi destacada como sendo uma maneira de se alcançar resultados mais precisos e passíveis de análise tanto em termos de conforto térmico quanto de consumo de energia. A análise de sensibilidade é uma ferramenta que ajuda a compreender a magnitude da influência de cada parâmetro na edificação.

No capítulo seguinte é apresentada a metodologia utilizada para o levantamento das edificações escolares, para a definição do modelo de referência (caso base) e das simulações termo-energéticas. Objetivou-se, dessa forma, avaliar a influência das estratégias bioclimáticas em edifícios escolares em Joinville, com relação ao conforto térmico.

3 METODOLOGIA

Este trabalho visa avaliar alguns parâmetros no conforto ambiental e eficiência energética das escolas da rede municipal de Joinville (SC). Essa pesquisa ocorre por meio da determinação de um modelo de referência para essas escolas, que posteriormente é submetido a simulações termo-energéticas. Por meio dessas simulações são testadas algumas estratégias bioclimáticas recomendadas para a região de Joinville, com o intuito de melhorar o conforto térmico e a eficiência energética dessas edificações. O método dessa pesquisa divide-se em:

- coleta de dados por projeto e em campo;
- determinação do modelo de referência por análise de agrupamento;
- simulação computacional;
- desempenho termo-energético do modelo com diferentes estratégias bioclimáticas.

3.1 COLETA DE DADOS

Esta etapa consiste na definição da mostra e o levantamento das escolas da rede municipal de Joinville. Primeiramente, foram levantadas todas as escolas urbanas existentes na rede municipal e a sua localização. Foi definida uma amostra conforme a Equação (1) (BARBETTA, 2010):

$$n_0 = \frac{1}{er^2} \quad (1)$$

onde:

n_0 = número de elementos da amostra;

er = erro amostral.

Como o tamanho da população é conhecido, o tamanho da amostra n fica (Equação 2):

$$n = \frac{N \times n_0}{N + n_0 - 1} \quad (2)$$

onde:

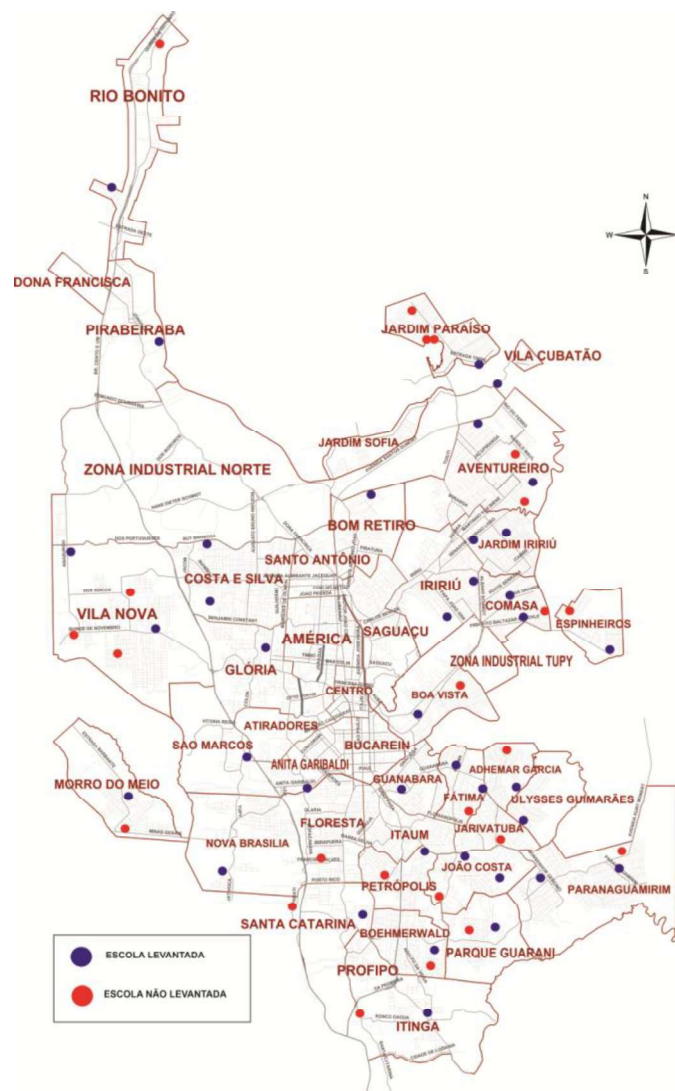
N = número de elementos da população;

n_0 = número de elementos da amostra;

n = tamanho da amostra.

Na rede municipal de Joinville há ao todo 62 unidades escolares urbanas. Aplicando as fórmulas com um erro de 10%, encontrou-se que o número da amostra ideal é de 39 escolas. Buscou-se, então, uma amostra por cotas, selecionando no mínimo uma escola por bairro, sendo que alguns bairros não possuem escolas. Nos bairros mais populosos foram levantadas duas unidades. A distribuição das escolas levantadas está na Figura 8.

Figura 8 - Escola levantadas da Rede Municipal



Fonte: Adaptado do IPPUJ <<http://simgeo.joinville.sc.gov.br/>> (2016)

Após a definição das escolas a serem levantadas foi realizado o contato com a Secretaria da Educação de Joinville em busca dos projetos das escolas e outros dados. A seguir, realizou-se a análise dos projetos. Como eram necessárias outras informações, que não constavam nos mesmos, foram realizadas visitas *in loco* para o levantamento de dados.

3.1.1 Análise dos projetos

Por meio dos projetos cedidos pela Secretaria da Educação de Joinville foram levantadas as seguintes informações métricas disponíveis que compreendem principalmente a distribuição espacial dos ambientes e suas dimensões:

- ambientes existentes com a sua área e função;
- existência ou não de ventilação cruzada nesses ambientes;
- espessura das paredes externas e internas;
- dimensão da circulação;
- área dos pátios internos;
- área de fachada;
- tipologia;
- orientação solar das salas de aula, nos casos onde o norte não constava no projeto, o qual foi retirado do *Google maps* (GOOGLE MAPS, 2016). A orientação também foi simplificada para Norte, Sul, Leste e Oeste.

3.1.2 Pesquisa de campo

A pesquisa de campo foi realizada com a autorização da Secretaria da Educação e com a colaboração da direção das escolas da rede municipal de Joinville. Foram levantadas *in loco*, por meio de fotos, registro visual e métrico, informações relevantes para análise do conforto térmico e da eficiência energética das escolas. Esses dados compreendem a forma de funcionamento da escola, materiais e medidas complementares a ficha de levantamento utilizada está no Apêndice A. Os dados levantados são:

- tipologia das janelas existentes. Foi verificado o tipo da janela, o material utilizado, a área de iluminação e a área de ventilação de cada janela;

- levantamento do material utilizado nas portas e a cor das mesmas;
- existência de elementos de proteção solar;
- número de condicionares de ar, assim como a área condicionada;
- tipo de piso de todas as dependências, assim como circulações e pátios;
- cores das fachadas, das circulações e do interior das salas;
- pé-direito das salas de aula;
- material da cobertura: forro, laje, telha e cor das mesmas.

Foram levantadas, por meio de entrevista com o responsável por cada escola, algumas informações em relação ao uso e ocupação da escola, como:

- horário de funcionamento;
- número de alunos;
- ocupação das salas: média de alunos por sala;
- ano de ocupação.

3.1.3 Seleção, organização e registro do material coletado

Esta etapa trata da análise das pesquisas realizadas e seleção dos dados pertinentes que tiveram relevante contribuição para o desenvolvimento da dissertação. Os dados, tanto coletados em campo quanto os contidos no projeto, foram organizados em fichas por escola (Apêndice A). Após a organização das fichas das escolas foi preenchida uma planilha de todas as escolas com as variáveis consideradas pertinentes para a seleção do modelo de referência. Essas variáveis foram selecionadas conforme os parâmetros considerados relevantes em estudos anteriores (seção 2) para o desempenho termo-energético.

A metodologia de organização dos dados foi realizada conforme Rosa (2014). Nessa metodologia seriam excluídos os casos que obtivessem mais de 10% de dados faltantes. Como todos os casos estavam completos não houve necessidade de excluir nenhum. Em seguida, reduziu-se algumas variáveis para obter uma matriz de dados concisa e sem perda significativa de informação. Por exemplo, as variáveis dos materiais da cobertura foram agrupadas em combinação dos materiais na cobertura. Essa redução evita a multicolinearidade dos dados e facilita as análises. Com a planilha de dados bem ajustada, contendo as variáveis a serem analisadas, foi possível identificar a escola mais representativa da amostra.

3.2 DEFINIÇÃO DO MODELO DE REFERÊNCIA

Essa etapa trata da definição da tipologia predominante que seja representativa das escolas municipais de Joinville. A técnica empregada nesse trabalho é a análise de agrupamento, trata-se de uma técnica considerada mais robusta do que a frequência cumulativa, conforme Gaitani *et al.* (2010). A análise de agrupamento tem como objetivo a simplificação de dados, com a qual se espera obter modelos de edificações com características representativas dentro dos grupos (ROSA, 2014).

Para a realização das análises estatísticas foi utilizado a linguagem R (R CORE TEAM, 2017). Esse é um programa computacional de uso livre, largamente empregado em pesquisas acadêmicas, motivo pelo qual foi selecionado para essa pesquisa.

Antes de iniciar o processo final de partição (formação dos agrupamentos) verificou-se a existência de possíveis *outliers*, pois eles poderiam influenciar no resultado final. Conforme Gaitani *et al.* (2010), *outliers* são objetos atípicos cujos dados parecem inconsistentes e diferem da maioria dos casos da amostra.

Na análise de agrupamento todas as variáveis são utilizadas para calcular a similaridade entre os objetos, por isso a investigação de *outliers* deve abranger outras técnicas, além das univariadas (ROSA, 2014). Logo, foi aplicado nesse trabalho o D^2 de Mahalanobis (Equação 3). Trata-se de uma medida de distância que padroniza os dados, escalonando-os em termos de desvio-padrão e explicando a correlação entre as variáveis. Não há um valor D^2 de corte, entretanto utiliza-se a probabilidade associada ao D^2 como fator decisivo. Foram considerados atípicos os objetos cuja probabilidade associada ao D^2 foi menor que 0,01.

$$D_{nm}^2 = \sqrt{(x_n - x_m)C^{-1}(x_n - x_m)'} \quad (3)$$

onde:

D_{nm}^2 é a medida de Mahalanobis;

C^{-1} é a matriz de covariâncias;

x_n é o valor de n para cada variável;

x_m é o valor de m para cada variável.

Além do D^2 de Mahalanobis foi construído um gráfico boxplot para cada variável, o que ajudou na análise dos objetos atípicos e na decisão de sua eliminação ou não. Essa eliminação deve ser cautelosa e deve visar aos objetivos da pesquisa. Dessa forma, após a identificação dos objetos cuja probabilidade encontrada estava abaixo do valor especificado, fez-se a comparação com os boxplots de cada variável e, assim, foi julgada a sua exclusão ou não.

A medida de similaridade escolhida foi o coeficiente de Gower (1971) que permite a combinação de variáveis numéricas e categóricas em uma mesma matriz. Para cada tipo de variável é empregada uma métrica particular que se ajuste bem àqueles dados, escalonando-os entre 0 (zero) e 1 (um) (R-Bloggers, 2017).

As variáveis qualitativas são inicialmente convertidos em colunas binárias e então é aplicado o coeficiente de Dice. Após essas etapas, é empregada a Equação 4.

$$S_{ij} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p S_i \quad (4)$$

para dados categóricos (qualitativos), temos:

S_{ij} = similaridade entre o objeto i e o objeto;

$S_i = 1$, quando há uma concordância entre os dados;

$S_i = 0$, quando não há uma concordância dos dados;

p = número de variáveis.

A semelhança entre as duas amostras é a média dos valores de similaridade para as p variáveis.

As variáveis quantitativas (numéricas) são tratadas de maneira diferente. Os dados são padronizados da seguinte maneira: em cada variável é inicialmente calculado o desvio entre os valores de duas amostras, $|y_{i1} - y_{i2}|$, este valor é então dividido pelo desvio máximo ($|\max(x_k) - \min(x_k)|$), utilizando a amostra disponível. Assim, a proporção é uma distância padrão e subtraindo-a de 1(um) encontra-se uma semelhança. Este cálculo é feito pela Equação 5.

$$S_i = 1 - \left[\left| \frac{y_{ik} - y_{jk}}{\max(x_k) - \min(x_k)} \right| \right] \quad (5)$$

onde:

y_{ik} = valor da k -ésima variável para o objeto i ;

y_{jk} = valor da k -ésima variável para o objeto j ;

$\max(x_k)$ = valor máximo da k -ésima variável;

$\min(x_k)$ = valor mínimo da k -ésima variável.

Ao coeficiente de Gower foi introduzido um elemento W_i (Delta de Kronecker) de flexibilidade. A comparação não é feita para as variáveis em que existe uma falta de informação para uma das duas amostras. O W_i funciona como uma “função indicadora”, informando a presença ou a ausência de determinada informação, que assume valor 0 (zero) se não há nenhuma informação que pertença a variável i de uma das duas amostras, e valor de 1(um) quando a informação está presente em ambas as amostras (MAXIMILIANO; CORDEIRO, 2008). Desse modo, o coeficiente é calculado pela Equação (6):

$$S_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^p W_k S_k (I_1, I_2)}{\sum_{k=1}^p W_k} \quad (6)$$

onde:

$W_k = 1$, quando se tem os valores da k -ésima variável para ambas as amostras;

$W_k = 0$, quando não se tem os valores da k -ésima variável para quaisquer das duas amostras;

S_k = depende do tipo de variável, chamada V_i .

Se for qualitativa e $V_i(I_1) = V_i(I_2)$, então $S_i(I_1, I_2) = 1$, senão $S_i(I_1, I_2) = 0$.

Se a variável for quantitativa então: $\frac{1 - |V_i(I_1) - V_i(I_2)|}{\max(V_i) - \min(V_i)}$

S_{ij} = similaridade entre os objetos i e j ;

p = número total de variáveis.

A "distância" entre duas unidades é obtida com a soma ponderada de dissimilaridades para cada variável. Assim, foram obtidas as distâncias entre os objetos. Segundo CUADRAS (1989), para converter uma medida de similaridade em uma distância utilizando a Equação 7, temos que:

$$\delta_{ij}=1-S_{ij} \quad (7)$$

onde:

δ_{ij} = distância entre i e j

s_{ij} = similaridade entre i e j

Os grupos foram formados combinando o método hierárquico e não-hierárquico. O hierárquico fornece uma formação preliminar dos grupos, enquanto que o não-hierárquico fornece a formação final dos grupos.

O Método de Ward foi selecionado como algoritmo de partição, que é um conjunto de regras que define quais pares de agrupamentos são combinados em cada etapa. Esse método considera como melhor solução a combinação que minimiza o aumento da soma total dos quadrados em todas as variáveis, em todos os agrupamentos (MINGOTI, 2005). Essa técnica é adequada para formar agrupamentos com o mesmo número de observações. A Equação para esse método é a (8):

$$ESS_K = \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \quad (8)$$

Após essas definições e esses procedimentos finalmente foi aplicado o método hierárquico. Nessa metodologia, foram formados novos agrupamentos com base da distância de similaridade, unindo agrupamentos distintos para formar novos. Esse processo é chamado aglomerativo e a partir dele é possível desenvolver um dendograma. Obtiveram-se, ainda, os coeficientes de aglomeração de cada combinação; esse valor é uma medida de heterogeneidade referente ao novo agrupamento. Essa medida vai crescendo conforme os agrupamentos vão se combinando.

A partir da análise do dendograma e dos coeficientes de aglomeração foi possível definir agrupamentos preliminares. Esses são formados com base nas variações percentuais da heterogeneidade de cada união. Se esse valor é muito alto, indica que agrupamentos muito distintos foram unidos e nesse caso sugere-se voltar para solução anterior.

Ainda nessa etapa, é necessário verificar se há algum agrupamento muito pequeno. Como se pretende obter um modelo de referência de um estoque edificado, os grupos muito pequenos podem ser irrelevantes para o resultado final. Desse modo, considera-se que os agrupamentos formados por menos de 10% de objetos da amostra são pouco representativos e devem ser excluídos. O resultado deve ser refeito para o novo banco de dados. Como não houve nenhum agrupamento pequeno, nenhum caso foi excluído.

Assim, determinada a quantidade de agrupamentos, foi aplicado o método não hierárquico para a obtenção do resultado final. Foi usada nesse processo a partição em torno do medóide (PAM), o k-medóides, que é uma versão mais robusta do k-médias. O K-medóide é mais adequado para o caso desse estudo, que apresenta variáveis quantitativas e qualitativas misturadas.

O algoritmo busca k objetos representativos ou medóides entre as observações de um determinado conjunto de dados. Depois de encontrar um conjunto de k medóides, as observações vão se agrupando em torno do medóide mais próximo; para isso é utilizada a matriz de distâncias. O objetivo é encontrar k objetos representativos que minimizem a soma das dissimilaridades das observações ao seu objeto representativo mais próximo. O processo ocorre diversas vezes conforme as observações vão se agrupando e os medóides vão se alterando. Algumas observações podem ser redesignadas para ficarem mais próximas do novo medóide, até que se alcance a convergência e não haja mais trocas em função do centro e os agrupamentos estejam formados.

A abordagem desse método e do k-médias é praticamente idêntica. A principal diferença é que no primeiro não há necessidade de recalcular a distância em cada iteração, pois o algoritmo simplesmente procura a distância em uma matriz de dissimilaridade (REYNOLDS *et al*, 2006). Outro benefício é ter uma observação que serve como exemplar para cada agrupamento.

Após a formação dos grupos, foram realizados os testes de hipóteses seguindo o procedimento de Rosa (2014) a fim de verificar se os grupos formados

são adequados. Todas as variáveis foram testadas para examinar se há diferenças significativas entre os agrupamentos.

Os testes estatísticos permitem avaliar se as diferenças observadas entre os dois agrupamentos são casuais ou reais (BARBETTA, 2010). O Quadro 1 apresenta os testes utilizados para cada caso, dependendo do tipo da variável e da quantidade de agrupamentos formados.

O teste t é utilizado para amostras independentes, nas quais a variável resposta é quantitativa (numérica), onde se supõe que a distribuição do agrupamento seja aproximadamente normal (BARBETTA, 2010). Para amostras as quais não foi possível verificar a suposição de normalidade foi aplicado o teste de Wilcoxon-Mann-Whitney para dois agrupamentos. Esse teste verifica a independência dos agrupamentos (BARBETTA; REIS; BORNIA, 2010).

Para mais de dois agrupamentos com amostra sem distribuição normal e respostas quantitativas será empregada, então, a análise da variância (ANOVA) (BARBETTA; REIS; BORNIA, 2010).

Quando a variável resposta é qualitativa (categórica) para testar se existe associação entre duas variáveis qualitativas será empregado o teste Qui-quadrado. Nesse teste, um coeficiente de associação descreve, nas amostras observadas, o quanto os dados de duas variáveis se mostram associados (BARBETTA, 2010).

Para todos os testes, foi adotado o nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$), admitindo que os grupos são heterogêneos se o p-valor encontrado for menor que 0,05.

Quadro 1 - Testes de hipótese utilizados para verificação quanto à adequação dos agrupamentos formados.

| Tipo de variável | Quantidade de grupos formados | Verificação quanto à normalidade | Teste de hipótese aplicado |
|------------------|-------------------------------|----------------------------------|----------------------------|
| Quantitativas | 2 agrupamentos | Paramétrico | t de Student |
| | | Não paramétrico | Teste de Wilcoxon |
| | K agrupamentos | Paramétrico | t de Student |
| | | Não paramétrico | ANOVA |
| Qualitativas | 2 agrupamentos | Não se aplica | Qui-quadrado |
| | K agrupamentos | Não se aplica | Qui-quadrado |

Fonte: Rosa (2014)

Como resultado, obtiveram-se os agrupamentos formados e suas características. Cada agrupamento foi definido a partir das variáveis analisadas. O modelo de referência foi determinado a partir dos objetos com menor distância ao medóide de cada agrupamento. Esse modelo é um modelo real com características de uma edificação real e não de uma edificação teórica (resultante da combinação das médias obtidas para cada variável).

Após a definição dos modelos de referência, foram apresentadas as plantas baixas e um corte esquemático de uma escola real contendo sua configuração espacial, suas dimensões, orientação solar e materiais. Essa foi, então, modelada no programa EnergyPlus.

3.3 MODELAGEM DO PROTÓTIPO

A edificação selecionada será modelada no programa Energyplus com as suas características de tipologia, dimensões e materiais existentes na realidade. O clima de Joinville será representado pelo arquivo climático da cidade de Itapoá (SC) elaborado por Roriz (2012) e disponibilizado no site do LabEEE (<www.labee.ufsc.br>), conforme apresentado na seção 2.

A modelagem do protótipo no programa EnergyPlus foi feita da seguinte forma, as trocas de calor entre o piso e o solo foram calculadas pelo objeto *Ground Domain:Slab*. Os objetos foram configurados conforme arquivo disponibilizado pelo LabEEE: Manual de Simulação Computacional de Edifícios com o Uso do Objeto *Ground Domain* (MAZZAFERRO; MELO; LAMBERTS, 2015) no programa EnergyPlus.

As trocas de ar entre a edificação e o meio foram realizadas com a configuração do objeto *AirflowNetwork*. Neste objeto são definidas as superfícies por onde acontecem as trocas de ar e as propriedades relativas a essa troca. O controle da ventilação foi realizado pela variável *Temperature*, juntamente com as rotinas de abertura de portas e janelas. Essa variável funciona da seguinte forma, quando a temperatura interna é menor que o valor da temperatura de *setpoint* as aberturas de fecham, quando a temperatura interna é maior que a externa as aberturas também se fecham, quando a edificação não está sendo utilizada, as aberturas também estão fechadas. Adotou-se como temperatura de *setpoint* 20°C. O padrão de uso foi determinado conforme o horário de funcionamento do modelo de referência.

Quanto às rotinas de operação, essas foram determinadas conforme a escola escolhida como modelo de referência. Ainda neste objeto, foram detalhados os componentes das aberturas, para os quais os coeficientes e expoentes de fluxo de ar foram adotados, conforme Liddament (1986), para as manobras de abertura e materiais das esquadrias. O modelo *AirflowNetwork* foi configurado conforme orientações encontradas no “Manual de Simulação Computacional de Edifícios Naturalmente Ventilados” (PEREIRA *et al*, 2013), no *INPUT/OUTPUT Reference* (EnergyPlus, versão 8.3) e dos exemplos (example files) disponibilizados junto com a instalação do programa.

Para as atividades realizadas em cada zona foram adotados valores de taxa metabólica (W) obtidos na ASHRAE (2010), considerando uma área de pele média de 1,80 m². A Tabela 3 apresenta estes dados.

Tabela 3 - Valores de taxa metabólica por atividade

| Atividades de escritório | Taxa metabólica [W/m ²] | Taxa metabólica para área de pele = 1,80 m ² [W] |
|-----------------------------|--|--|
| Sentado, lendo e escrevendo | 60 | 108 |
| Digitando | 65 | 117 |

Fonte: Adaptado de ASHRAE (2010).

A geometria dos modelos foi configurada com auxílio do *plugin* Open Studio, dentro do programa SketchUp, que facilita a inserção das coordenadas da edificação. Foram modeladas as zonas térmicas (representando cada ambiente), as aberturas, o sombreamento e a orientação solar da fachada frontal. No EnergyPlus, foram também utilizadas algumas informações da geometria no objeto *AirflowNetwork*, a respeito das zonas e superfícies onde há troca de ar com o meio externo e também em função da manobra de abertura realizada.

Os valores de propriedades térmicas dos materiais e componentes construtivos (*constructions*) foram retirados da NBR15220 (ABNT, 2005) e do arquivo “Metodologia Utilizada na Elaboração da Biblioteca De Materiais e Componentes Construtivos Brasileiros para Simulações no VisualDoe-3.1” (ORDENES *et al*, 2003). Para os valores de absorvância solar foi utilizado o trabalho de Dornelles (2008).

No EnergyPlus as *constructions* que definem cada superfície foram inseridas nos objetos *BuildingSurface: Detailed* e *Fenestration Surface: Detailed*.

No objeto *Lights* utilizou-se como referência o RTQ-C (Brasil, 2010). Foi adotado o nível de iluminação A para escolas, que é de 10,7 W/m². Esse valor foi escolhido para que a carga de iluminação não interferisse na análise, considerando uma iluminação eficiente, já que esse item não foi levantado. Não foi considerada nenhuma carga referente aos equipamentos. Também não foram considerados os aparelhos e equipamentos referentes à cozinha.

Os dados de operação foram modelados conforme o modelo de referência escolhido e inseridos no objeto *Schedule:compact*. Esses foram utilizados nos objetos *People* (referente à ocupação), *Lights* (referente ao padrão de uso das lâmpadas), e no objeto *AirflowNetwork* (referente ao padrão de operação de portas e janelas).

O resumo dos parâmetros e objetos configurados no modelo de simulação é apresentado no Quadro 2.

Quadro 2 – Parâmetros e objetos da simulação

| Bloco | Parâmetros | Objetos envolvidos |
|--------------------|---|---|
| Geometria | Dimensões Ambientes (zonas) Configuração espacial Dimensão das aberturas Manobra de abertura Sombreamento Orientação da fachada frontal | Zone BuildingSurface: Detailed Fenestration Surface: Detailed Shading:Building:Detailed AirflowNetwork |
| Materiais | Composição paredes Composição cobertura Composição pisos Contato com solo Absortância externa Esquadrias | Material WindowMaterial: Glazing Construction BuildingSurface: Detailed Fenestration Surface: Detailed GroundDomain:Slab |
| Potência instalada | Potência instalada em iluminação para cada ambiente | Lights |
| Operação | Quantidade de usuários Padrão de ocupação salas Padrão de uso da iluminação Operação de portas e janelas | Schedule compact People Lights AirflowNetwork |

Fonte: Autora (2017).

3.4 APLICAÇÃO DE ESTRATÉGIAS BIOCLIMÁTICAS

Após o modelo simulado, foram aplicadas as estratégias recomendadas pela NBR15220 (ABNT, 2005) para zona bioclimática 5, que é a de Joinville, cidade em estudo. As estratégias são as seguintes:

- Sombreamento de aberturas: foi utilizado um elemento de sombreamento, conforme as máscaras de sombra que foram realizadas após a definição do modelo. A máscara de sombra visa proteger a edificação no período do verão das 10h as 15h, onde a insolação é mais intensa. As máscaras de sombra foram elaboradas no programa Analysis SOL-AR (LabEEE, 2016);
- Ventilação: criação de ventilação cruzada em todos os ambientes. Ajuste do tamanho das janelas para 15 a 25% da área de piso conforme indicação da NBR15220 (ABNT, 2005). Uso da ventilação natural seletiva noturna, visando retirar o calor acumulado durante o dia;
- Inércia térmica para o aquecimento: uso de massa térmica para aquecimento através da mudança de material e aumento na espessura das paredes internas, aumentando o atraso térmico;
- Paredes leves e refletoras: alternativa de simulação com paredes externas leves, menos espessas, adequando as paredes existentes a NBR15220 (ABNT, 2005). Testaram-se, ainda, paredes com alto atraso térmico, fora da recomendação da norma, e baixa transmitância térmica, conforme estudos presentes na seção 2;
- Cobertura leve e isolada: alternativas de cobertura com baixa transmitância e pouco atraso térmico de acordo com os valores admissíveis na NBR15220 (ABNT, 2005).

Apesar da absorvância solar não constar diretamente na NBR 15220 (ABNT, 2005), esse parâmetro se configura como um fator influente e por isso foi simulada para os elementos expostos à radiação solar direta.

Absortância solar das paredes: foram simuladas paredes externas com cores mais claras do que as existentes, evitando os ganhos de calor pela insolação direta nos períodos mais quentes.

Absortância da cobertura: simularam-se telhas com cores mais claras do que as existentes, visando diminuir o excesso de calor advindo da cobertura.

3.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Cada estratégia foi simulada individualmente, com o intuito de avaliar a influência de cada uma no conforto térmico dos ambientes de maior permanência: as salas de aula. Os dados foram analisados por meio de graus-hora de resfriamento anual, graus-hora de aquecimento anual e porcentagem anual de horas em conforto.

O parâmetro “graus-hora” é a soma da diferença de temperatura horária, quando essa se encontra acima de uma determinada temperatura, no caso de graus-hora de resfriamento ou abaixo de uma determinada temperatura, para graus-hora de aquecimento. Essas temperaturas são os limites da zona de conforto.

O número de graus-hora é usualmente calculado para as temperaturas do ar. Porém, a quantidade de graus-hora, nesse estudo, será calculada para as temperaturas operativas. A temperatura operativa é representada pela Equação 9 (ENERGYPLUS, 2017).

$$T_{op} = A \cdot T_r + (1 - A) \cdot T_a \quad (9)$$

onde:

T_{op} é a temperatura operativa, (°C);

A é a fração radiante;

T_a é a temperatura do ar (°C);

T_r é a temperatura radiante média (°C);

sendo:

$A=0,5$ para $V_{ar}<0,2\text{m/s}$;

$A=0,6$ para V_{ar} de $0,2\text{m/s}$ a $0,6\text{m/s}$;

$A=0,7$ para V_{ar} de $0,6\text{m/s}$ a $1,0\text{m/s}$;

V_{ar} = Velocidade do ar no ambiente (m/s).

A temperatura operativa foi calculada como sendo o valor médio entre a temperatura do ar e a temperatura radiante média. O coeficiente da velocidade do ar utilizado para o cálculo foi de $A=0,5$, na equação acima.

Os limites de conforto para a temperatura operativa foram obtidos a partir dos critérios do Anexo D da ISO 7730 (ISO, 2005) para atividades leves (70W/m^2). Para as condições de inverno, período de aquecimento, assume-se que o isolamento térmico das roupas é de 1 clo; a temperatura operativa deve situar-se entre 20°C e 24°C . Para as condições de verão, período de resfriamento, adota-se um isolamento térmico do vestuário de 0,5 clo; a temperatura operativa deve estabelecer-se entre 23°C e 26°C . Dessa forma, a temperatura limite para o cálculo de graus-hora de resfriamento foi de 26°C , e a temperatura limite para o cálculo de graus-hora de aquecimento foi de 20°C . A Equação 10 e a Equação 11 foram utilizadas para calcular a quantidade de graus-hora para a temperatura operativa.

$$\text{GrausHora}_{\text{resf}} = \sum (T_h - 26^\circ\text{C}) \quad (10)$$

$$\text{GrausHora}_{\text{aquec}} = \sum (20^\circ\text{C} - T_h) \quad (11)$$

onde:

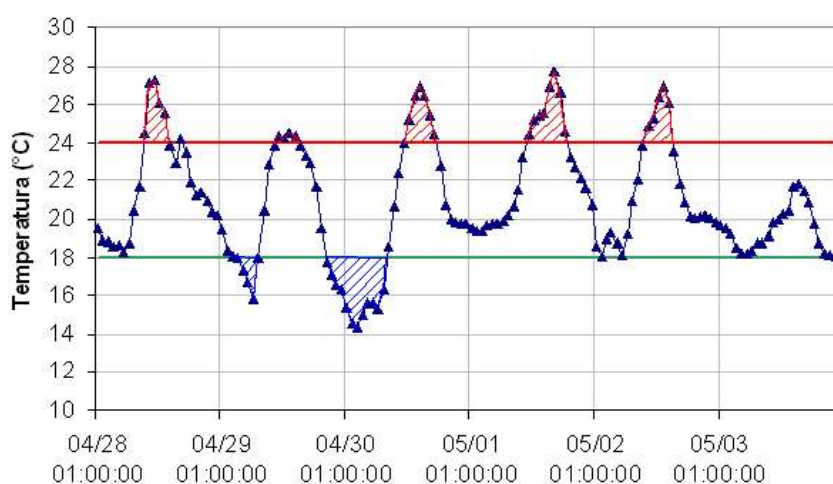
T_h é a temperatura em um determinado horário [$^\circ\text{C}$];

Na Figura 9 há uma representação desse parâmetro. A área hachurada em vermelho, acima da linha de temperatura de 26°C , representa a quantidade de graus-hora de resfriamento e a área hachurada em azul, abaixo da linha de temperatura de 20°C , representa a quantidade de graus-hora de aquecimento.

Foram obtidos os valores de graus-hora de resfriamento e aquecimento ao longo de todo o ano nas salas de aula mais representativas. Para avaliar a estratégia para o ano inteiro foi utilizada a somatória de graus-hora de aquecimento e resfriamento e a porcentagem de horas de conforto anuais. Para as horas de conforto, os valores limite são os mesmos calculados para os graus-hora, 26°C para o desconforto por calor e 20°C para o desconforto por frio, ou seja, as horas com temperaturas compreendidas dentro dessa faixa se configuram como horas de conforto, as demais não. No entanto, na porcentagem de horas de conforto utilizaram-se somente as horas ocupadas, das 7h às 18h. Optou-se por ajustar esse

parâmetro dessa forma para investigar se havia diferença no funcionamento das estratégias entre as horas totais (ponderando os graus-hora total) e as horas ocupadas (observando a porcentagem de horas em conforto), já que a norma preconizada nesse trabalho, NBR 15220 (ABNT, 2005) foi concebida para edificações de uso residencial, na qual os horários de ocupação divergem das edificações escolares, em estudo.

Figura 9 – Representação graus-hora de resfriamento e aquecimento



Fonte: Matos (2007)

Desse modo, foram determinadas as estratégias mais adequadas para a cidade de Joinville, selecionando os melhores resultados em busca do que seria uma escola próxima da ideal.

3.6 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Para perceber a influência de cada parâmetro foi realizada a análise de sensibilidade local (AS), pertencente à classe do método *one-at-a-time* (TIAN, 2013). A AS local está focada nos efeitos de incerteza das entradas em torno de um ponto (ou caso base), ou seja, ela considera a variação do parâmetro de saída contra a variação do parâmetro de entrada sobre um determinado valor x (HAMBY, 1994). A aplicação da AS local requer que o usuário especifique um valor “ x ” nominal para o fator de entrada (PIANOSI *et al.*, 2016). A escolha do caso base é muito importante nessa análise.

A partir dos melhores resultados de cada parâmetro obtido nas simulações das salas de aula, foi aplicada a análise de sensibilidade no mês de março e de junho, meses com a maior e menor temperatura do ano respectivamente. O parâmetro resposta foi a temperatura operativa das horas ocupadas, 7h as 18h, de cada zona térmica em estudo. Empregou-se esse parâmetro para que se pudesse perceber se a estratégia estava adequada e influente nas horas em que a edificação está sendo ocupada, já que as estratégias empregadas nesse estudo são advindas de uma norma, NBR 15220 (ABNT, 2005), desenvolvida para residências, onde a ocupação ocorre de maneira diferente das edificações escolares.

Utilizou-se como base o mesmo índice empregado por Ferreira (2013) para determinar a influência de um determinado parâmetro no resultado final. Esse é um método simples, designado de índice de sensibilidade (SI), cuja fórmula é definida pela Equação (12) (TILL; MEYER, 1983):

$$SI = \frac{D_{\text{máx}} - D_{\text{mín}}}{D_{\text{máx}}} \quad (12)$$

onde:

$D_{\text{máx}}$ – Corresponde ao maior valor dos percentis de referência (Θ_{10} , $\Theta_{\text{médio}}$ e Θ_{90}) que se obtém através das simulações com os valores limite de cada parâmetro;

$D_{\text{mín}}$ – Corresponde ao menor valor dos percentis de referência (Θ_{10} , $\Theta_{\text{médio}}$ e Θ_{90}) que se obtém através das simulações com os valores limite de cada parâmetro.

Para o cálculo do índice obteve-se os percentis de referência de cada dia dos meses em estudos. Calcularam-se, então, os valores máximos e mínimos de cada percentil por estratégia simulada. Cada estratégia foi comparada com o caso base e extraíram-se os valores máximos e mínimos entre eles. Após essa etapa foi aplicada a fórmula do IS (Equação 12).

Como o caso base apresenta por si só um IS, esse foi diminuído do SI encontrado para cada estratégia, podendo-se perceber de forma mais clara a real atuação de cada estratégia aplicada.

4 RESULTADOS

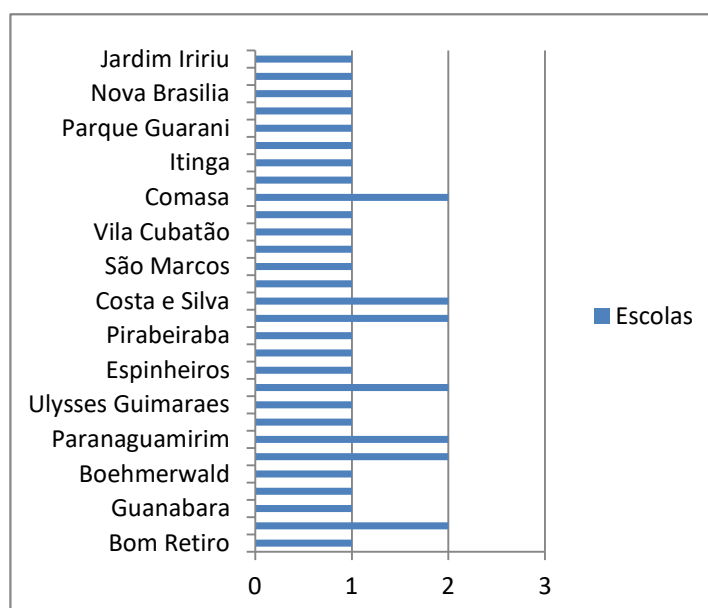
4.1 LEVANTAMENTO DE DADOS

Nesta seção, são apresentados os resultados das variáveis levantadas em campo e por meio dos projetos. É ainda analisada a relevância das variáveis para a análise de agrupamento. Os dados quantitativos e qualitativos foram analisados, visando obter um conjunto de dados único do qual saísse uma única escola a ser estudada.

4.1.1 Delimitação do objeto de estudo

Foi realizado o levantamento de 38 unidades escolares ao longo de aproximadamente um ano. O cálculo amostral indica que o número de escolas a ser levantado é de 39, no entanto, uma das escolas separadas para levantamento, no bairro Floresta, estava em reforma e não pode ser levantada. Algumas das variáveis levantadas, como iluminação artificial, equipamentos e materiais dos pátios cobertos, foram desprezadas pela falta de precisão dos dados e pela incompletude do levantamento. A Figura 10 mostra a quantidade de escolas levantadas por bairro.

Figura 10 – Quantidade de escolas levantadas por bairro

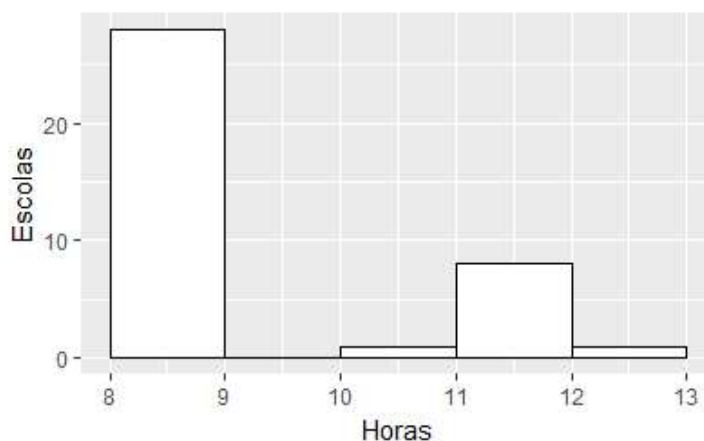


Fonte: Autora (2017).

4.1.2 Análise da Amostra

A Figura 11 mostra o horário de funcionamento das escolas. Observa-se que a maioria das escolas funciona em torno de oito a nove horas diárias, ou seja, em dois turnos, matutino e vespertino. Poucas escolas funcionam no período noturno e quando isso ocorre, o número de alunos é menor e o ensino é voltado para jovens e adultos (EJA). O horário de funcionamento das escolas apresenta poucas variações, seguindo um padrão, logo essa variável não influencia na análise de agrupamento e não foi considerada na escolha do modelo mais representativo.

Figura 11- Horário de funcionamento das escolas



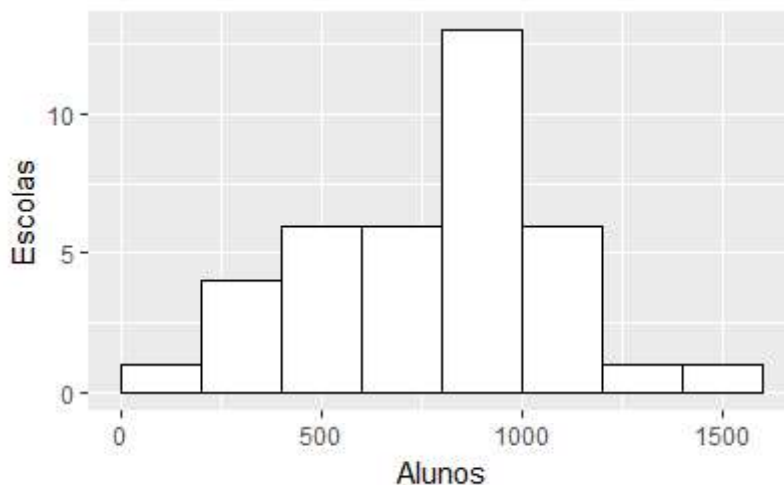
Fonte: Autora (2017).

A Figura 12 mostra o número total de alunos por escola. As escolas apresentam variações de acordo com o tamanho e a demanda da região em que estão inseridas, levando-se em conta a população do bairro e quantas escolas existem nas redondezas para atender a essa população. No entanto, percebe-se que a maior parte das escolas possui entorno de 800 alunos (Tabela 4).

O número de alunos por sala é padronizado, conforme Resolução 169, Art. 170 (JOINVILLE, 2011), sendo que no 1º ano do ensino fundamental, o máximo de alunos é de 25 por sala, no 2º e 3º ano, o máximo de alunos é 28, já do 4º ao 9º o máximo é de 35 alunos por sala. Assim, a média de alunos por sala também acaba se tornando mais ou menos padronizada, conforme se observa na Tabela 5 e na Figura 13, sendo que o número de alunos nas salas de aula se apresenta sempre

próximo ao limite exigido. Como esse número é padronizado, não se considerou essa uma variável influente para a escolha do modelo mais representativo.

Figura 12– Número de alunos total por escola



Fonte: Autora (2017).

Tabela 4 – Resumo das variáveis estatísticas do número de alunos total das escolas

| Variável | Valor (alunos) |
|---------------|----------------|
| Mínima | 154 |
| Máxima | 1413 |
| Média | 784,21 |
| Mediana | 853,5 |
| Desvio padrão | 290,25 |

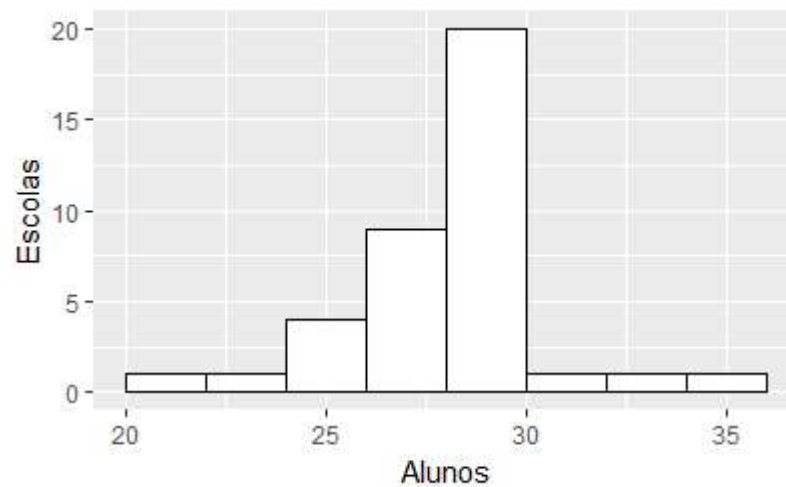
Fonte: Autora (2017).

Tabela 5 - Resumo das variáveis estatísticas da média de alunos por sala das escolas

| Variável | Valor (alunos) |
|---------------|----------------|
| Mínima | 21 |
| Máxima | 35 |
| Média | 28,87 |
| Mediana | 30 |
| Desvio padrão | 2,64 |

Fonte: Autora (2017).

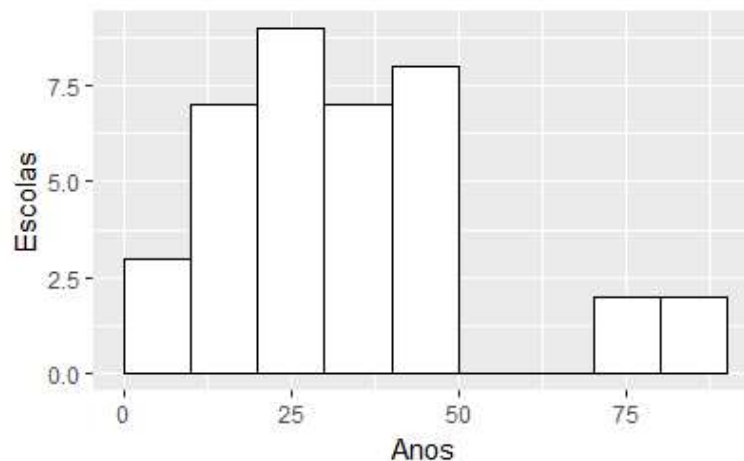
Figura 13 – Média de alunos por sala



Fonte: Autora (2017).

Nesse estudo, levou-se em consideração no fator idade, o ano de ocupação do prédio atual, no entanto praticamente todas as escolas vêm sofrendo diversas reformas ao longo dos anos, o que acaba padronizando as construções e descaracterizando o prédio original. Logo, é difícil analisar as escolas pela sua idade, visto que as características originais não são mantidas e as escolas vêm sendo ampliadas e modernizadas. Assim, não se considerou esse fator como representativo na escolha da escola “modelo”. O tempo de fundação das escolas pode ser observado na Figura 14 e na Tabela 6.

Figura 14 – Tempo de fundação das escolas



Fonte: Autora (2017).

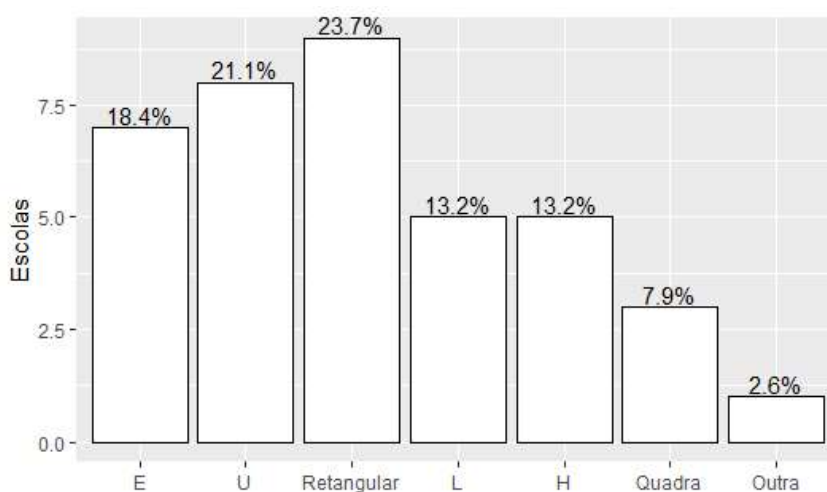
Tabela 6- Resumo das variáveis estatísticas da idade das escolas

| Variável | Valor (anos) |
|---------------|--------------|
| Mínima | 2 |
| Máxima | 89 |
| Média | 33,74 |
| Mediana | 30,5 |
| Desvio padrão | 20,09 |

Fonte: Autora (2017).

A caracterização da geometria da escola foi uma tarefa complexa, visto que diversas escolas se compõem de um conjunto de edificações que possuem ligação entre si por meio de circulações abertas ou pátios cobertos. Esse conjunto no geral vai sendo construído ao longo dos anos e gerando diferentes geometrias que muitas vezes são intrincadas e que influem no conforto térmico e na eficiência energética, visto que os prédios podem sombrear um ao outro e possuir diferentes orientações solares. Optou-se, desse modo, em captar a tipologia do conjunto de prédios existente, para que se pudesse usar um parâmetro de igualdade entre todas as escolas e analisar qualitativamente os resultados, visto que não foi encontrado um parâmetro que pudesse realizar uma análise quantitativa de forma correta. As tipologias encontradas podem ser vistas na Figura 15.

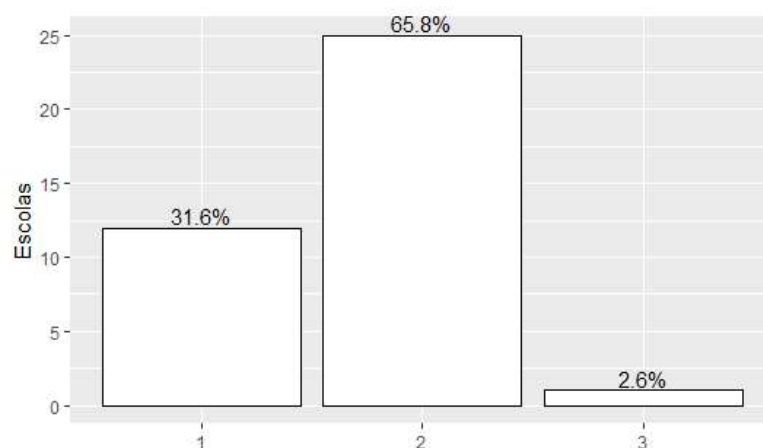
Figura 15 – Tipologia da edificação



Fonte: Autora (2017).

Por meio da Figura 16, nota-se que as escolas não possuem grande verticalidade, no geral apresentam-se com um ou dois pavimentos. O número de pavimentos é um importante fator de análise nas trocas térmicas e deve ser considerado tanto pela questão tipológica, quanto pelo contato da edificação com o meio externo.

Figura 16 – Número de pavimentos



Fonte: Autora (2017).

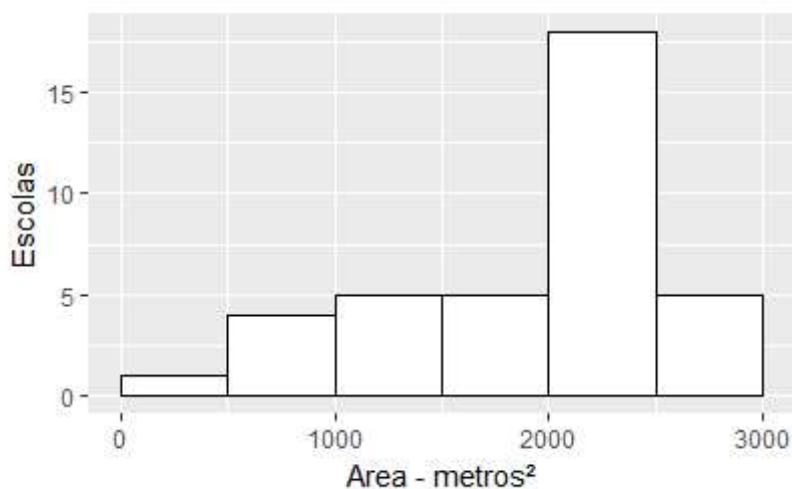
Conforme se percebe pela Tabela 7 e Figura 17, as escolas públicas possuem áreas semelhantes, muitas das escolas possuem uma área total entorno de 2000 metros quadrados, o que compõe o somatório de toda a parte coberta da edificação, desde salas, até pátios cobertos e circulações. Essa área foi decomposta em diversas variáveis de acordo com o seu uso: área administrativa, área de salas de aula, área de pátio coberto, áreas comuns e área de permanência não prolongada. Assim, para que não houvesse repetição de informações nas variáveis a área total foi retirada da análise final.

Tabela 7 - Resumo das variáveis estatísticas sobre a área total das escolas

| Variável | Valor (m ²) |
|---------------|-------------------------|
| Mínima | 435,36 |
| Máxima | 2861,14 |
| Média | 1873,69 |
| Mediana | 2095,38 |
| Desvio padrão | 623,07 |

Fonte: Autora (2017).

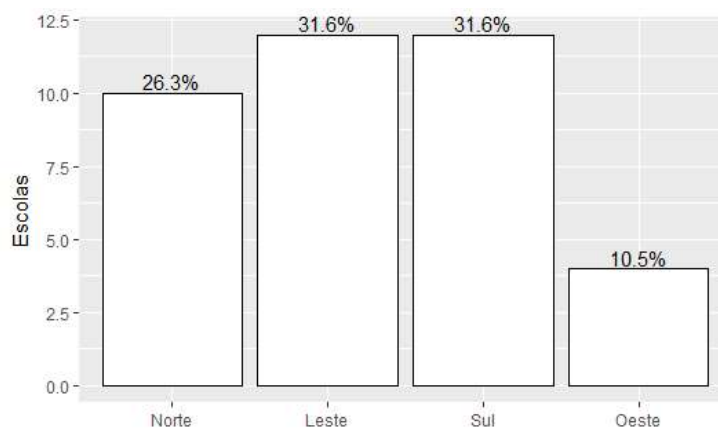
Figura 17 – Área total das escolas



Fonte: Autora (2017).

As orientações da fachada principal apresentam-se bem distribuídas, sendo que não há uma orientação claramente predominante, conforme a Figura 18. Como fachada principal, foi considerada a da entrada da escola, no entanto nem sempre essa é a mais exposta. Assim, optou-se por omitir essa variável na análise final.

Figura 18 – Orientação da fachada principal

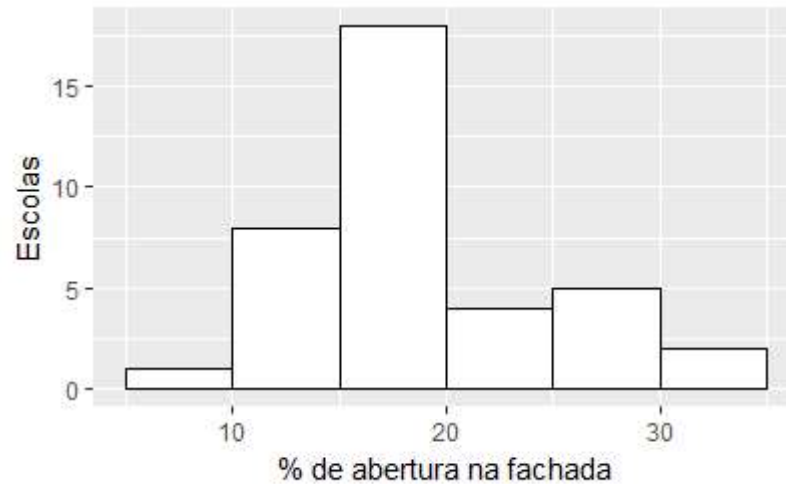


Fonte: Autora (2017).

A porcentagem de abertura na fachada é uma importante variável na análise do conforto térmico e eficiência energética. Essa variável se refere à área de vidro ou de janela na fachada. No geral, as escolas possuem o mesmo tipo e tamanho de aberturas com pequenas variações, logo essa porcentagem varia entre 15% e 20%

do total da fachada, como pode ser observado na Figura 19. A mediana está em 18,37% (Tabela 8).

Figura 19 – Porcentagem de abertura na fachada



Fonte: Autora (2017).

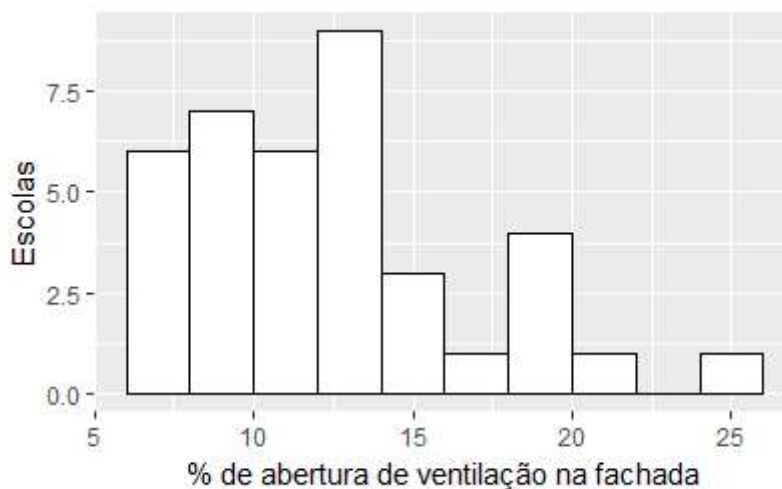
Tabela 8 - Resumo das variáveis estatísticas sobre a porcentagem de abertura na fachada

| Variável | Valor (%) |
|---------------|-----------|
| Mínima | 9,12 |
| Máxima | 32,08 |
| Média | 19,56 |
| Mediana | 18,37 |
| Desvio padrão | 5,54 |

Fonte: Autora (2017).

A porcentagem de abertura de ventilação na fachada está ligada à variável anterior, sendo que nesse caso foram descontados os vidros fixos, permanecendo apenas a parte das aberturas onde é possível haver ventilação. Dessa forma, procurou-se verificar além da iluminação, a ventilação dos ambientes e indiretamente captar o tipo de esquadria utilizada. Nota-se pela Figura 20 que nesse caso há mais variações, pois conforme o tipo da esquadria há mais ou menos vidros fixos. A média da porcentagem de abertura de ventilação na fachada é de 12,44% (Tabela 9).

Figura 20 – Porcentagem de abertura de ventilação na fachada



Fonte: Autora (2017).

Tabela 9 - Resumo das variáveis estatísticas sobre a porcentagem de abertura de ventilação na fachada

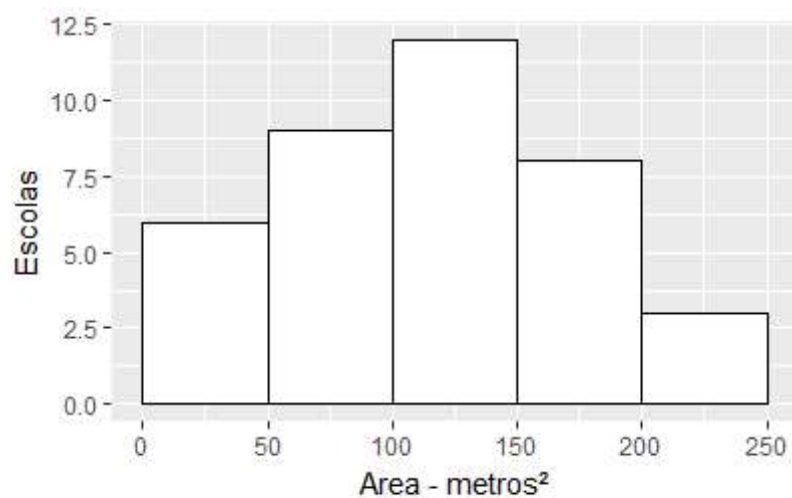
| Variável | Valor (%) |
|---------------|-----------|
| Mínima | 6,33 |
| Máxima | 25,58 |
| Média | 12,44 |
| Mediana | 11,90 |
| Desvio padrão | 4,59 |

Fonte: Autora (2017).

O total da área administrativa (Figura 21) inclui a área de todas as salas do corpo docente e administrativo das escolas, como sala dos professores, secretaria, diretoria, apoio pedagógico e outros. Essa variável foi criada para captar o tamanho da escola, pois quanto maior essa área maior a escola. A média da área administrativa é de 119,12 m² (Tabela 10).

As áreas comuns levantadas (Figura 22) incluem as salas que são usadas por todos os alunos esporadicamente, como biblioteca, laboratórios, espaço de educação física, auditório e outros. Essa variável também capta indiretamente o tamanho da escola e como é a sua infraestrutura, sendo que ela apresenta bastante variação conforme a escola (Tabela 11).

Figura 21 – Total da área administrativa



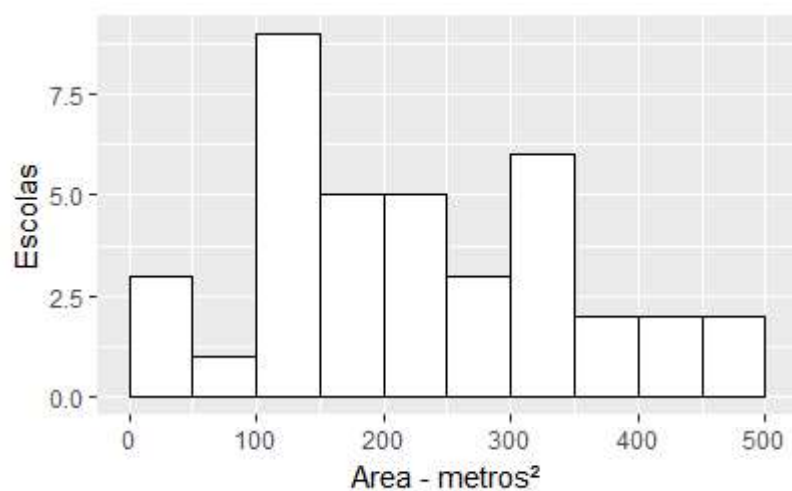
Fonte: Autora (2017).

Tabela 10- Resumo das variáveis estatísticas sobre a área administrativa total

| Variável | Valor (m²) |
|---------------|------------|
| Mínima | 22,80 |
| Máxima | 243,25 |
| Média | 119,12 |
| Mediana | 123,35 |
| Desvio padrão | 58,93 |

Fonte: Autora (2017).

Figura 22 – Total das áreas comuns



Fonte: Autora (2017).

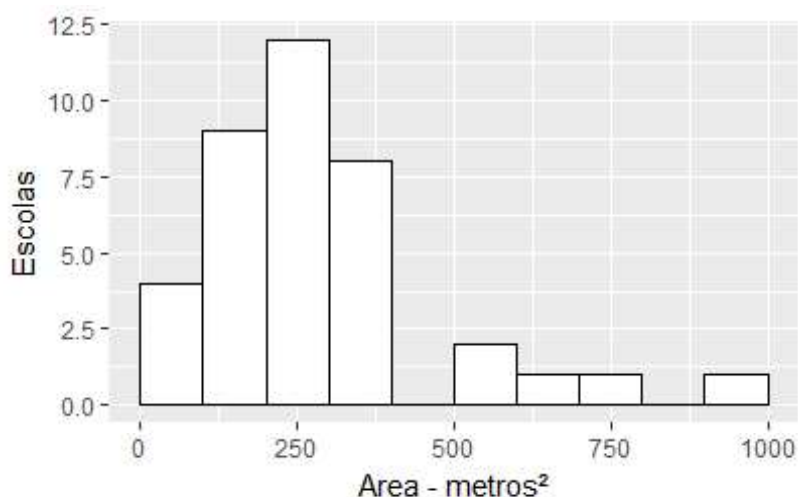
Tabela 11- Resumo das variáveis estatísticas sobre o total das áreas comuns

| Variável | Valor (m²) |
|---------------|------------|
| Mínima | 0 |
| Máxima | 469,21 |
| Média | 222,56 |
| Mediana | 224,71 |
| Desvio padrão | 121,83 |

Fonte: Autora (2017).

As áreas de permanência não prolongada (Figura 23 e Tabela 12) incluem as áreas de serviço, banheiros e circulações fechadas. Essa variável além de captar o tamanho da escola, também capta indiretamente a tipologia. As escolas possuem dois tipos de circulação: abertas e fechadas, o que interfere na sua tipologia. As escolas que possuem circulação fechada são retangulares e tem uma maior área de permanência não prolongada.

Figura 23 – Total da área de permanência não prolongada



Fonte: Autora (2017).

A área de pátio coberto leva em consideração o pátio coberto, a área de refeitório e as circulações abertas. Assim como a variável anterior, essa variável também capta indiretamente a tipologia, pois as circulações abertas estão inclusas nessa área. É possível perceber valores bem distribuídos na Figura 24, conforme os diferentes tamanhos das escolas, no entanto há um maior número de escolas com

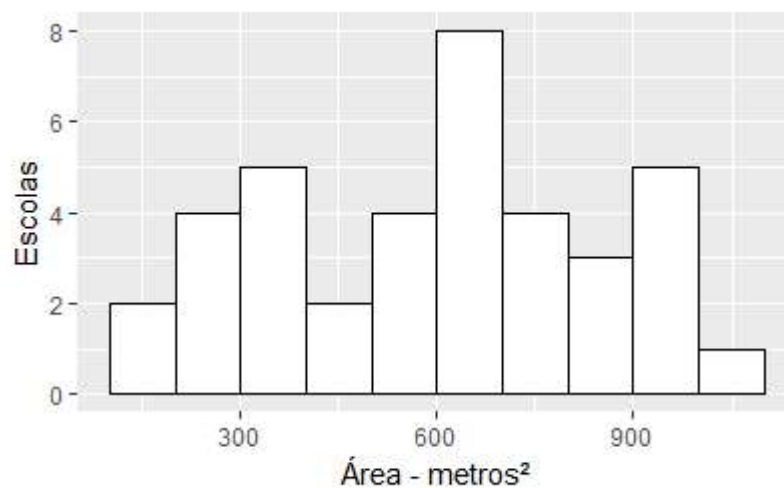
pátio entre 600m² e 700m². A média e a mediana também estão em torno de 600m² (Tabela 13).

Tabela 12 - Resumo das variáveis estatísticas sobre a área de permanência não prolongada

| Variável | Valor (m ²) |
|---------------|-------------------------|
| Mínima | 70,41 |
| Máxima | 997,79 |
| Média | 290,43 |
| Mediana | 253,04 |
| Desvio padrão | 191,10 |

Fonte: Autora (2017).

Figura 24 – Área de pátio coberto



Fonte: Autora (2017).

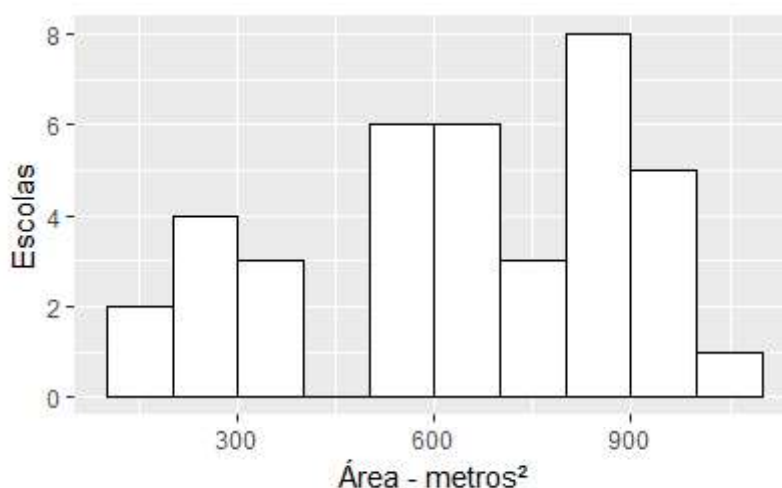
Tabela 13 - Resumo das variáveis estatísticas sobre a área de pátio coberto

| Variável | Valor (m ²) |
|---------------|-------------------------|
| Mínima | 124,50 |
| Máxima | 1080,50 |
| Média | 592,51 |
| Mediana | 610,01 |
| Desvio padrão | 251,88 |

Fonte: Autora (2017).

A área total de salas de aula (Figura 25 e Tabela 14) talvez seja um dos principais indicativos do tamanho da escola, pois quanto maior essa área, mais alunos a escola atende. Na análise de agrupamento, essa área foi representada pelas variáveis: número de salas de aula e área média dessas salas, sendo que multiplicando uma variável pela outra o número resultante seria a área total das salas de aula. Assim, para não haver multicolinearidade dos dados a área total das salas de aula foi retirada da matriz final.

Figura 25 - Área total de salas de aula



Fonte: Autora (2017).

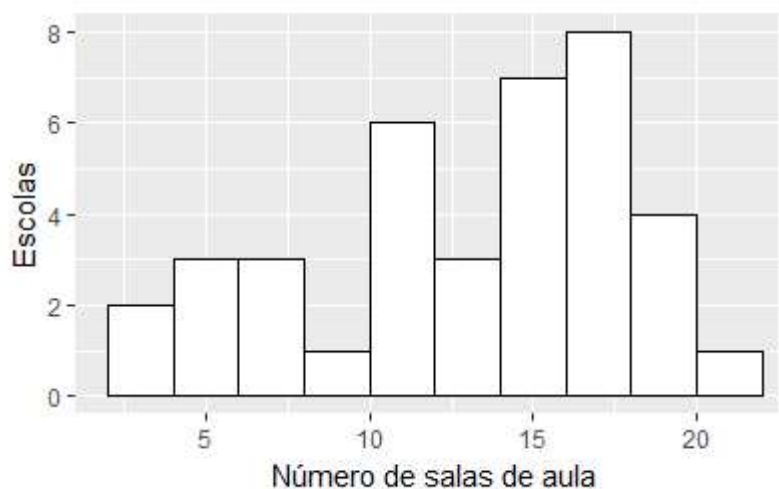
Tabela 14 - Resumo das variáveis estatísticas sobre a área total de salas de aula

| Variável | Valor (m²) |
|---------------|------------|
| Mínima | 139,86 |
| Máxima | 1031,66 |
| Média | 649,06 |
| Mediana | 671,65 |
| Desvio padrão | 257,22 |

Fonte: Autora, 2017.

O número de salas de aula, assim como a área total é um indicativo do tamanho da escola e de quantos alunos ela pode atender. Pela Figura 26 percebe-se que a maioria das escolas apresenta entre 10 e 20 salas de aula, sendo que a mediana é de 15.5 salas de aula (Tabela 15). As escolas menores são minoria.

Figura 26- Número de salas de aula



Fonte: Autora (2017).

Tabela 15 - Resumo das variáveis estatísticas sobre o número de salas de aula em cada escola

| Variável | Valor |
|---------------|-------|
| Mínima | 3,00 |
| Máxima | 21,00 |
| Média | 13,66 |
| Mediana | 15,50 |
| Desvio padrão | 4,93 |

Fonte: Autora (2017).

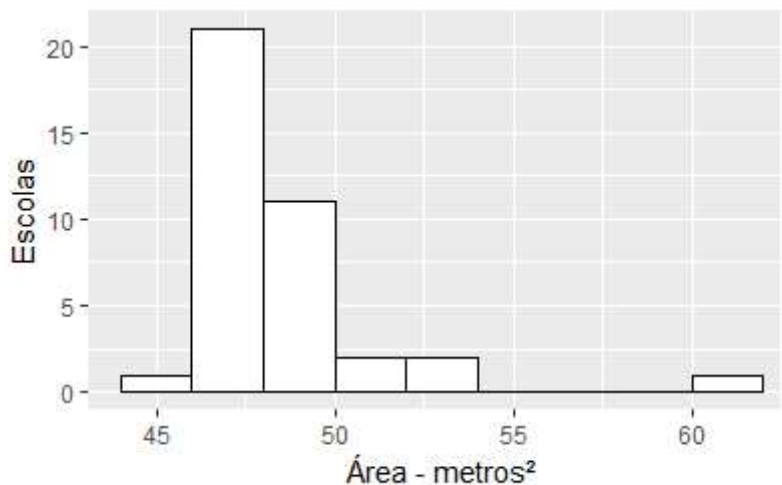
As salas de aula no geral apresentam um padrão de configuração, sendo que as dimensões gerais são 6m x 8m, o que totaliza 48m². Nota-se pela Tabela 16 que a área média das salas fica em torno disso, havendo pouca variação nessas dimensões (Figura 27).

Tabela 16 - Resumo das variáveis estatísticas sobre a área média de salas de aula

| Variável | Valor (m ²) |
|---------------|-------------------------|
| Mínima | 44,00 |
| Máxima | 61,21 |
| Média | 48,95 |
| Mediana | 48,00 |
| Desvio padrão | 2,58 |

Fonte: Autora (2017).

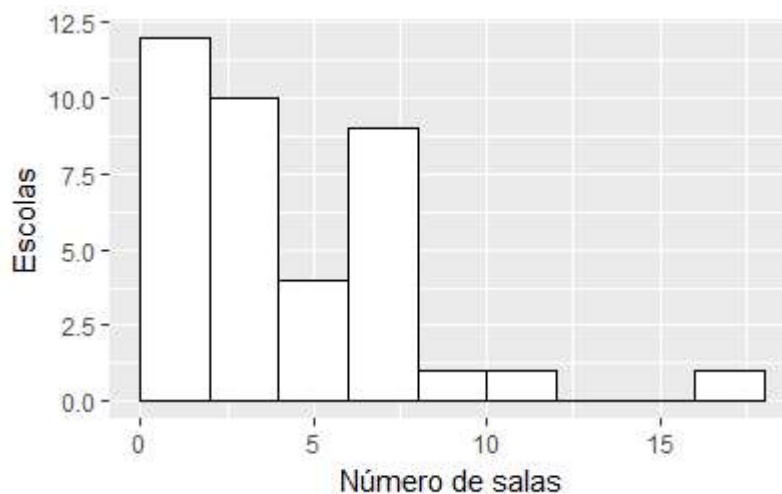
Figura 27 – Área média das salas de aula



Fonte: Autora (2017).

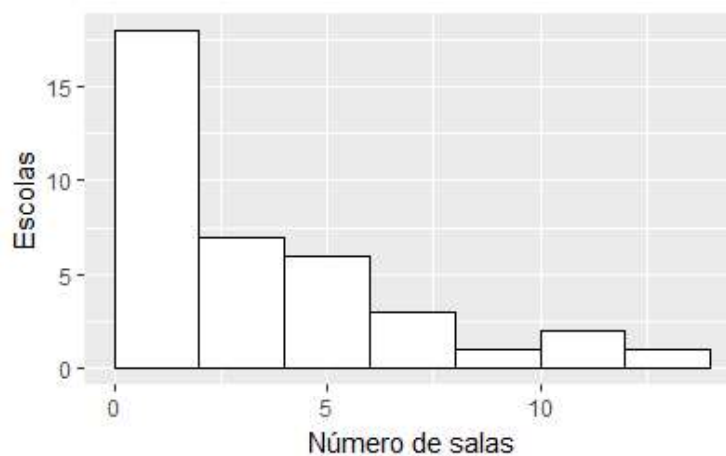
O foco desse estudo são as salas de aula, pois essas são o espaço do aprendizado e onde há maior concentração de pessoas e permanência. Assim, optou-se por estudar a orientação solar desses ambientes e não da edificação toda. Desse modo, quantificaram-se o número de salas de aula que havia em cada orientação, por escola, utilizando apenas as quatro orientações principais, conforme a simplificação do RTQ-C (Brasil, 2010). O resultado está nas Figuras 28, 29, 30 e 31 e na Tabela 17.

Figura 28 – Número de salas de aula com orientação norte por escola



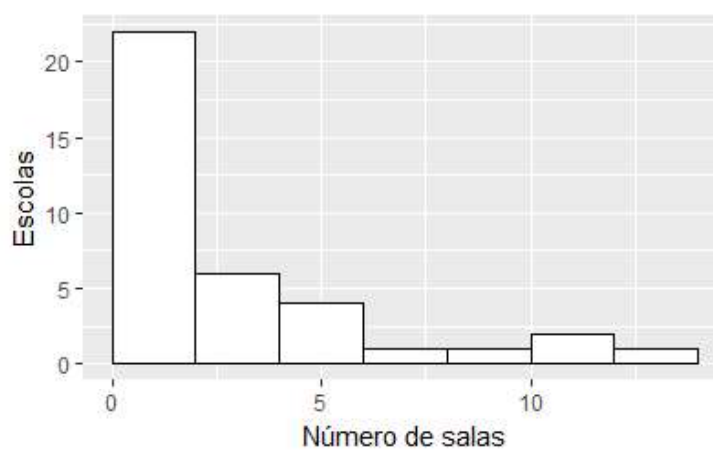
Fonte: Autora (2017).

Figura 29 - Número de salas de aula com orientação sul por escola



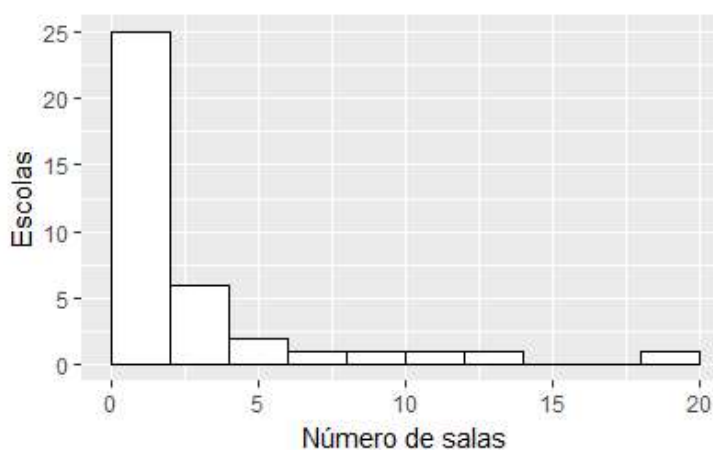
Fonte: Autora (2017).

Figura 30 - Número de salas de aula com orientação leste por escola



Fonte: Autora (2017).

Figura 31 - Número de salas de aula com orientação oeste por escola



Fonte: Autora (2017).

Tabela 17 - Resumo das variáveis estatísticas relativas à orientação das salas de aula

| Variável – Orient. Norte | Valor (salas de aula) |
|---------------------------------|------------------------------|
| Mínima | 0 |
| Máxima | 17 |
| Média | 4,37 |
| Mediana | 4 |
| Desvio padrão | 3,76 |
| Variável – Orient. Sul | Valor |
| Mínima | 0 |
| Máxima | 13 |
| Média | 3,45 |
| Mediana | 3,00 |
| Desvio padrão | 3,69 |
| Variável – Orient. Leste | Valor |
| Mínima | 0 |
| Máxima | 16 |
| Média | 3,21 |
| Mediana | 1,5 |
| Desvio padrão | 4,24 |
| Variável – Orient. Oeste | Valor |
| Mínima | 0 |
| Máxima | 19 |
| Média | 2,61 |
| Mediana | 0,00 |
| Desvio padrão | 4,33 |

Fonte: Autora (2017).

O pé-direito das edificações apresenta-se mais ou menos padronizado, seguindo entre 2,9m e 3m (Tabela 18). Como há poucas variações nesse fator (Figura 32) e ele não se configura como um fator essencial para o conforto térmico e a eficiência energética, ele foi retirado da análise final.

Muitas das escolas possuem circulações externas cobertas, outras possuem circulações internas, no entanto não há grandes diferenças em relação à largura dessas circulações (Tabela 19). Elas apresentam uma padronização entre 1,8m e 2,0m (Figura 33). A área dessas circulações e a forma como se apresentam, internas ou externas, foi considerada na área de permanência não prolongada ou na área de pátio coberto. Assim, excluiu-se esse fator da análise final, sendo que ele

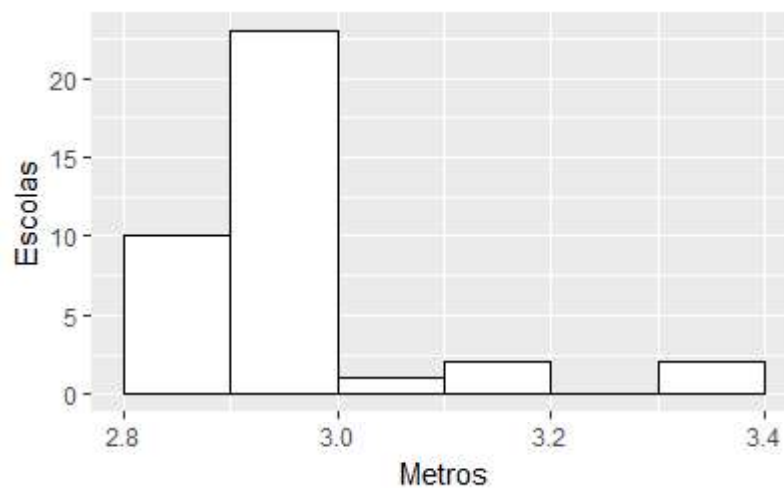
não apresenta uma variação significativa e indiretamente já havia sido considerado nas áreas.

Tabela 18 - Resumo das variáveis estatísticas sobre a altura do pé-direito das edificações

| Variável | Valor (m) |
|---------------|-----------|
| Mínima | 2,85 |
| Máxima | 3,40 |
| Média | 2,98 |
| Mediana | 2,95 |
| Desvio padrão | 0,12 |

Fonte: Autora (2017).

Figura 32 – Altura do pé-direito



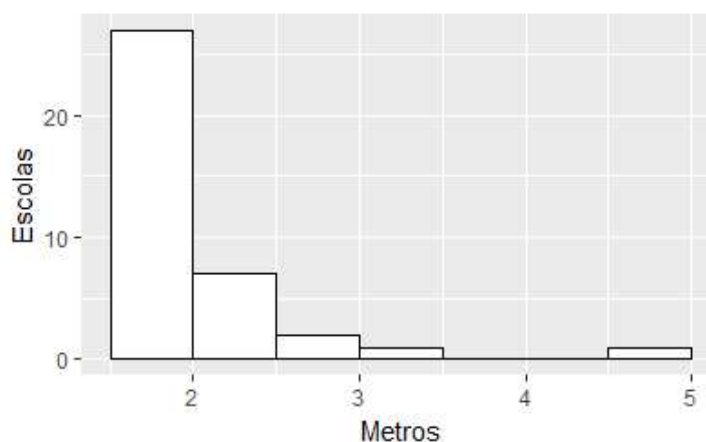
Fonte: Autora (2017).

Tabela 19 - Resumo das variáveis estatísticas sobre a dimensão das circulações

| Variável | Valor (m) |
|---------------|-----------|
| Mínima | 1,78 |
| Máxima | 4,80 |
| Média | 2,19 |
| Mediana | 2,00 |
| Desvio padrão | 0,52 |

Fonte: Autora (2017).

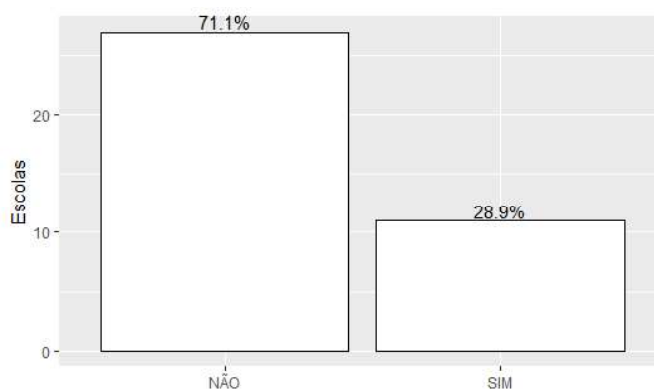
Figura 33 – Dimensão da circulação



Fonte: Autora (2017).

Algumas das escolas possuem um bloco apenas com as salas administrativas; em outras não se nota essa separação tão clara. Assim, levantou-se esse fator e pode-se perceber que a maioria das escolas não possui esse bloco administrativo separado (Figura 34).

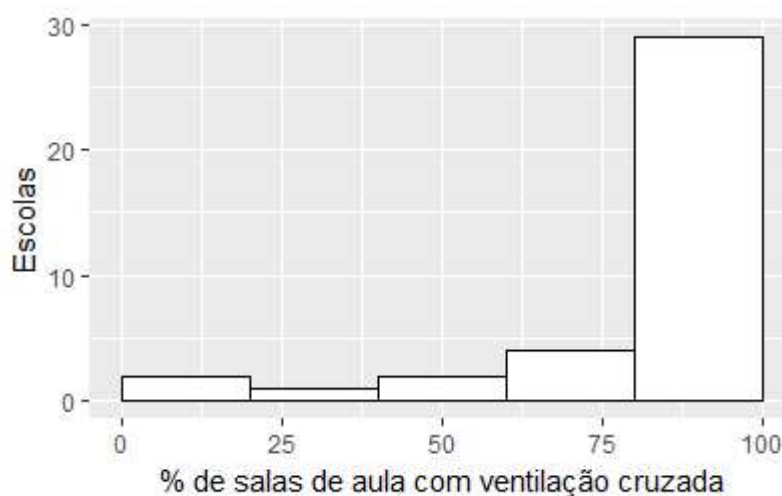
Figura 34 – Possui bloco administrativo separado



Fonte: Autora (2017).

A ventilação cruzada é uma das principais estratégias de ventilação recomendadas para a cidade de Joinville. Desse modo, verificaram-se quantas salas de aula possuíam esse tipo de ventilação (Figura 35). Foi possível notar que essa estratégia vem sendo utilizada nos projetos das escolas municipais. As escolas possuem uma média de 85.9% das salas de aula com ventilação cruzada (Tabela 20).

Figura 35 – Salas de aula com ventilação cruzada



Fonte: Autora (2017).

Tabela 20 - Resumo das variáveis estatísticas sobre a porcentagem de salas de aula com ventilação cruzada

| Variável | Valor (%) |
|---------------|-----------|
| Mínima | 0 |
| Máxima | 100 |
| Média | 85,90 |
| Mediana | 100 |
| Desvio padrão | 26,52 |

Fonte: Autora (2017).

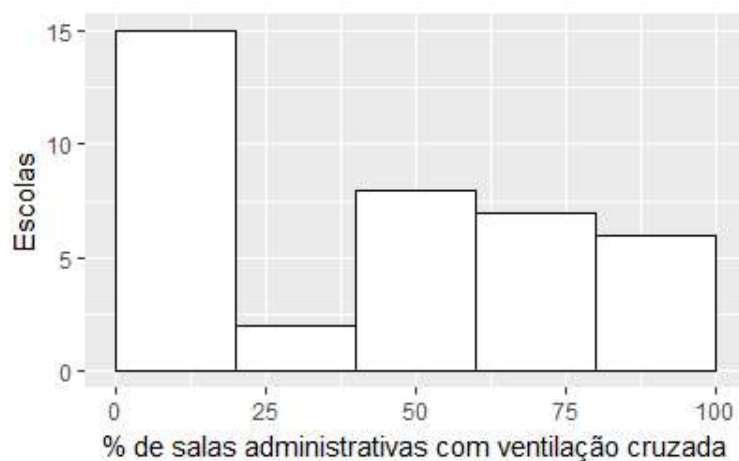
A estratégia da ventilação cruzada também é aplicada nas salas administrativas, mas com uma frequência menor. Verificou-se que a maioria das salas administrativas das escolas não possui tal estratégia (Figura 36). A mediana desse grupo é de 46.45% com um desvio padrão alto (Tabela 21).

O beiral é um importante elemento de proteção das aberturas, tanto em relação às chuvas, quanto em relação à insolação direta. Esse é um elemento comum nos projetos das escolas, sendo que foi verificada a sua existência em todas as escolas levantadas. Logo, ele não interfere na análise de agrupamento e foi excluído das variáveis finais.

Além dos beirais, verificou-se a existência ou não de brises. Nas escolas levantadas, esse elemento não é comumente encontrado, apenas duas escolas (Figura 37) apresentaram algum tipo de proteção solar das aberturas, além dos

beirais. Pela pouca ocorrência desse elemento, optou-se por não levar em consideração a sua existência nas edificações estudadas.

Figura 36- Salas administrativas com ventilação cruzada



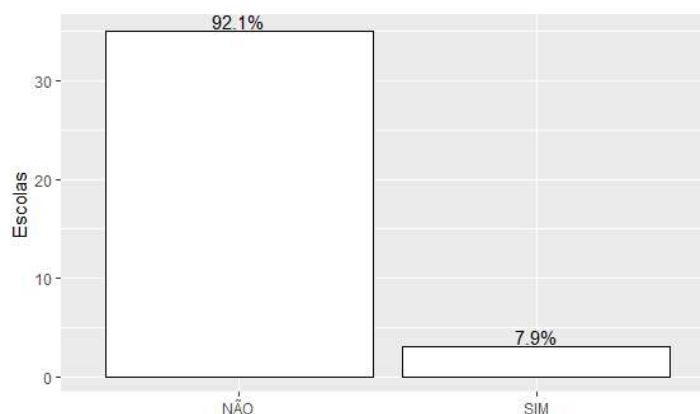
Fonte: Autora (2017).

Tabela 21 - Resumo das variáveis estatísticas sobre a porcentagem de salas administrativas com ventilação cruzada

| Variável | Valor (%) |
|---------------|-----------|
| Mínima | 0 |
| Máxima | 100 |
| Média | 42,30 |
| Mediana | 46,45 |
| Desvio padrão | 35,42 |

Fonte: Autora, 2017.

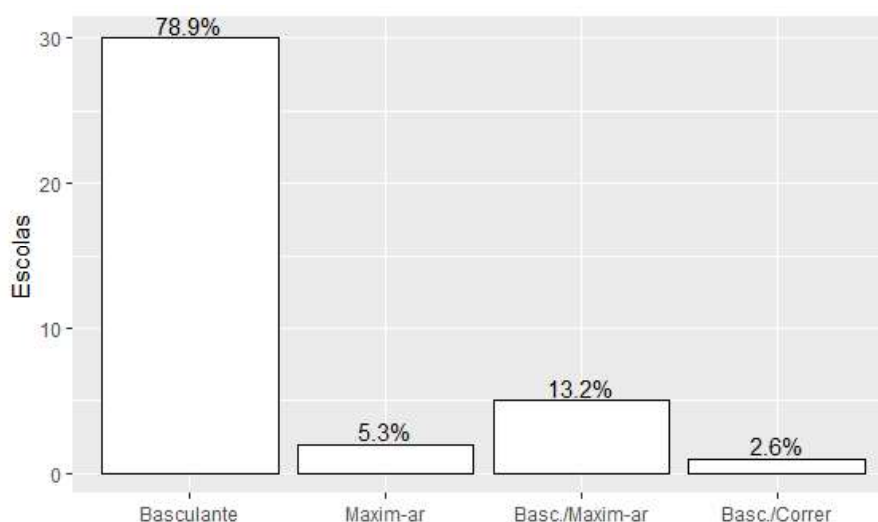
Figura 37 – Existência de brises



Fonte: Autora (2017).

Levantou-se também o tipo de esquadria utilizada nas janelas (Figura 38), já que essa influencia na abertura para ventilação. Predominantemente as esquadrias existentes são as do tipo basculante. Algumas escolas apresentam aberturas do tipo maxim-ar, ou um misto entre os dois tipos. Segundo os usuários das edificações, esses tipos de esquadria são mais adequados para a segurança da escola e dos alunos, além de impedir uma ventilação demasiada que faz com voem papéis, atrapalhe o andamento das aulas e a concentração dos alunos. Como foi levantada a porcentagem da área de ventilação na fachada, esse item também não foi considerado na análise de agrupamento, mas ele ajuda a caracterizar a amostra.

Figura 38 – Tipo de esquadria

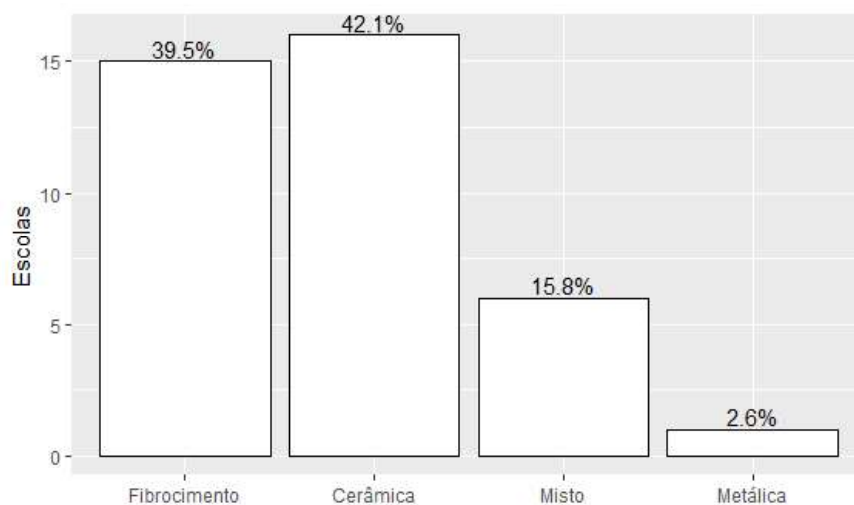


Fonte: Autora (2017).

As telhas são um dos elementos da cobertura que faz trocas térmicas da edificação com o meio externo. O tipo de telha se constitui como um importante elemento na análise de desempenho. Existem dois tipos de telha que são bastante utilizados na construção das escolas, a telha de fibrocimento e a telha cerâmica de cor natural, segundo análise da Figura 39.

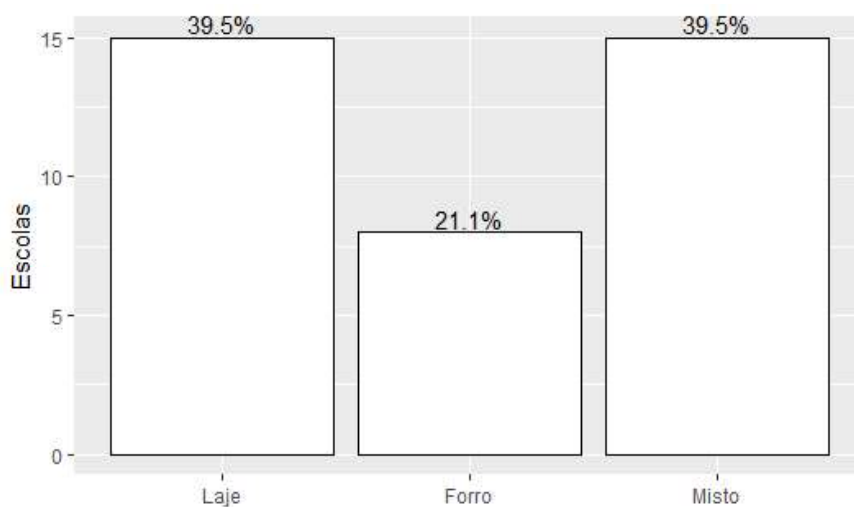
Dando sequência à análise do item da cobertura, duas possibilidades foram encontradas: escolas sem laje e com forro de PVC e escolas com laje. Também se verificou uma mistura dessas duas coberturas, blocos com laje e blocos com forro, conforme a data da construção. O resultado do levantamento pode ser visualizado na Figura 40.

Figura 39 – Tipo de telha



Fonte: Autora (2017).

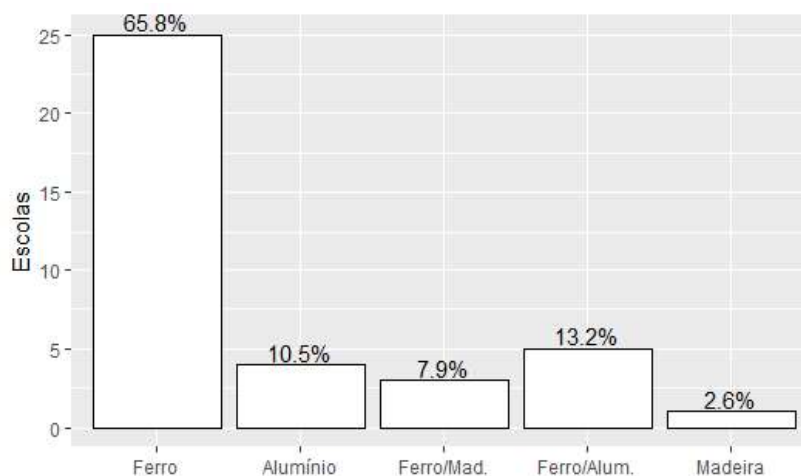
Figura 40 – Laje x Forro



Fonte: Autora (2017).

A Figura 41 mostra que o material encontrado nas janelas tem algumas variações, no entanto a maioria das esquadrias ainda é de ferro. Há algumas escolas usando alumínio e outras mais antigas que permanecem com esquadrias de madeira.

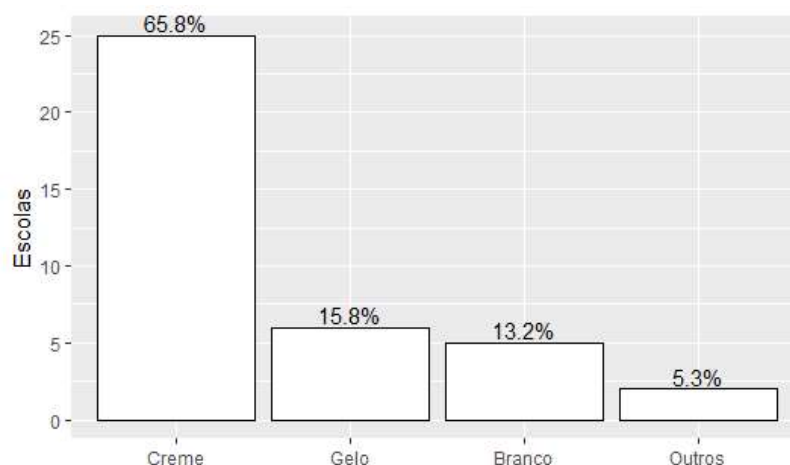
Figura 41 – Material das janelas



Fonte: Autora (2017).

Todas as portas levantadas são de madeira. Há uma pequena variação nas cores, no entanto a normativa é que as portas sejam na cor creme, conforme encontrado na maioria das escolas (Figura 42). Por serem elementos que não estão diretamente expostos, as cores das portas não foram consideradas na análise de agrupamento.

Figura 42 – Cor das portas



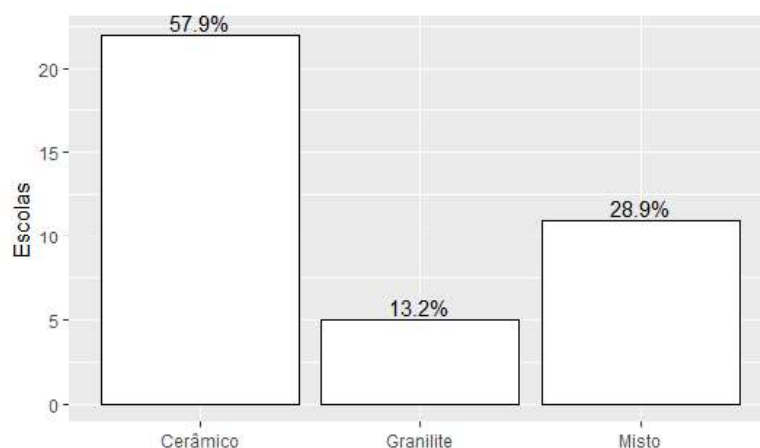
Fonte: Autora (2017).

Na Figura 43, observa-se que nas salas de aula o piso predominante é o cerâmico. Algumas escolas mais antigas possuem ainda granilite ou taco, mas

conforme as escolas vão sendo reformadas os pisos vão se alterando na sua maioria para cerâmica. Levantaram-se ainda algumas escolas com paviflex, no entanto são minoria. Esse item não foi considerado na análise de agrupamento por não se encontrar diretamente exposto ao meio externo.

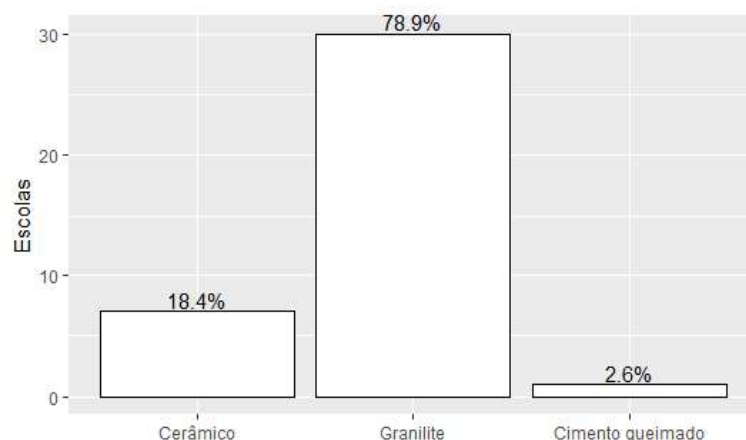
Na circulação, o piso predominante é o granilite (Figura 44); acredita-se que seja por se tratar de áreas maiores e muitas vezes externas. Esse tipo de piso é antiderrapante, fácil de limpar e garante uma melhor estética. Como as zonas de circulação não foram analisadas, essa variável foi eliminada na análise final.

Figura 43 – Tipo de piso geral



Fonte: Autora (2017).

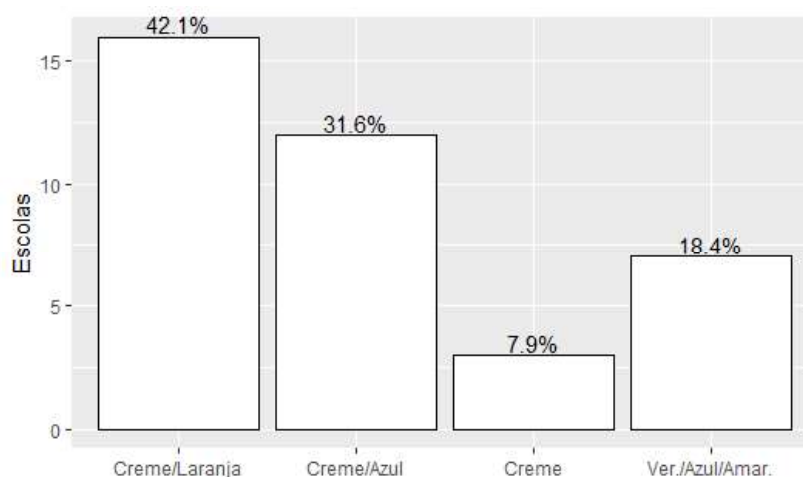
Figura 44 – Tipo de piso da circulação



Fonte: Autora (2017).

As cores da fachada são importantes nas trocas térmicas e indicam a absorção solar. Esse indicador encontra-se tanto na NBR15220 (ABNT, 2005) quanto é um pré-requisito no RTQ-C (BRASIL, 2010). As cores da fachada também seguem no geral uma normativa, sendo que costumavam ser laranja até meia parede e creme em cima (Figura 45). Essa divisão ocorre para facilitar a limpeza e evitar a degradação das paredes. As escolas que foram ou estão sendo reformadas têm alterado essas cores para azul escuro com branco.

Figura 45 – Cores da fachada



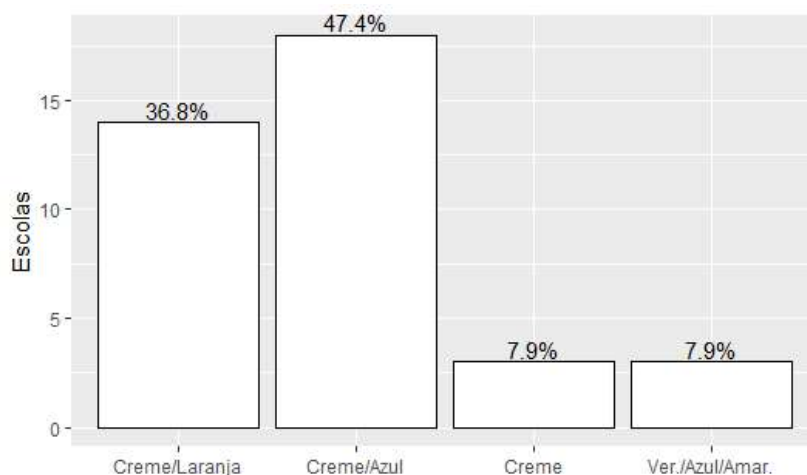
Fonte: Autora (2017).

As circulações normalmente seguem as cores da fachada, no entanto essas têm sido reformadas antes das fachadas e percebe-se um aumento da mudança de cores. Muitas das escolas têm optado por pastilhas azuis ao invés da pintura. Conforme se observa na Figura 46, as cores predominantes são creme e laranja seguidas por azul e branco. As circulações foram consideradas menos importantes por não estarem diretamente expostas à insolação e assim não foram consideradas na análise de agrupamento.

O material das paredes é um elemento importante na análise do desempenho da edificação, conforme aponta a NBR15220 (ABNT, 2005). Nessa pesquisa, no entanto, não foi possível obter as informações sobre esses materiais. Acredita-se pelas características básicas e pela frequência de uso que as paredes sejam todas em alvenaria com tijolos cerâmicos. Levantou-se, desse modo, a espessura das paredes, de acordo com os projetos que foram cedidos. Assim, foi possível simular

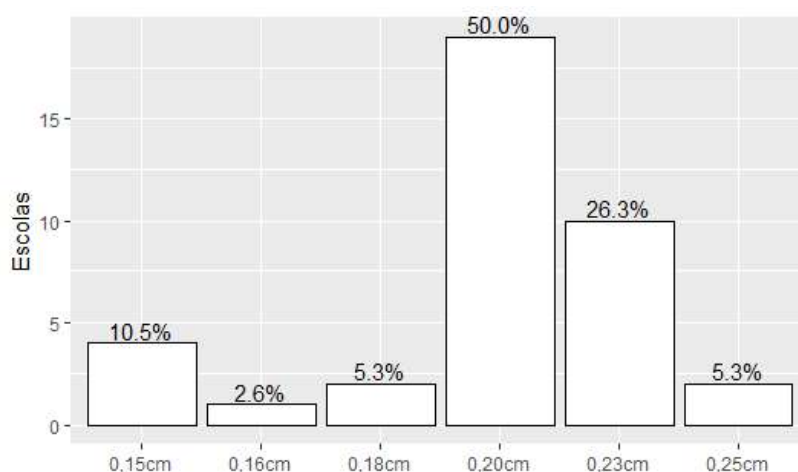
uma situação que seja mais próxima da realidade existente. A espessura predominante das paredes externas é de aproximadamente 20 cm (Figura 47).

Figura 46 – Cores da circulação



Fonte: Autora (2017).

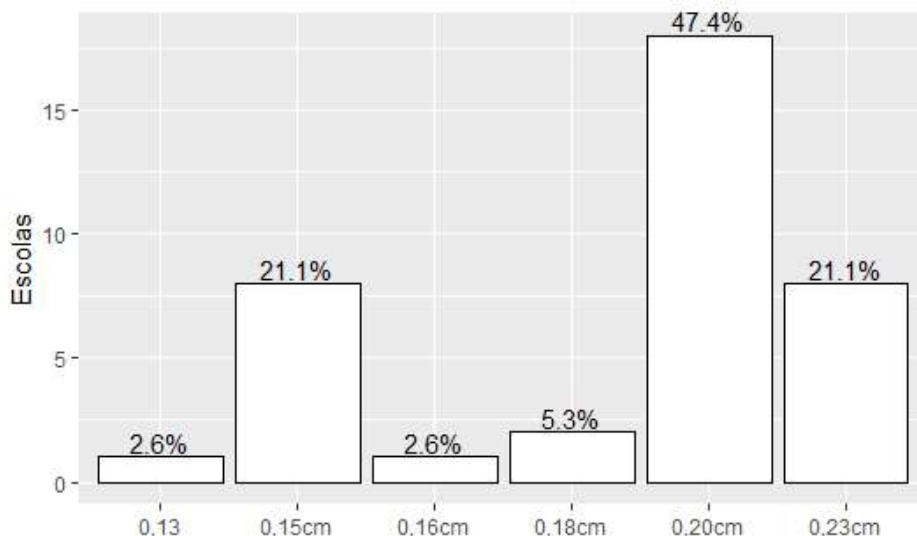
Figura 47 – Espessura das paredes externas



Fonte: Autora (2017).

No caso das paredes internas, as dificuldades e as soluções encontradas foram as mesmas. Ressalta-se que as estratégias para um melhor desempenho das edificações diferem entre as paredes internas e externas. O resultado do levantamento pode ser visto na Figura 48.

Figura 48 – Espessura das paredes internas



Fonte: Autora (2017).

O município recentemente instalou ar-condicionado em todas as salas de aula. No entanto, não foram estudados os impactos da aquisição desses aparelhos a longo prazo, sendo que nem todas as escolas possuem instalações elétricas adequadas e consciência de uso de tais equipamentos. Esses desdobramentos, não são objeto de estudo desse trabalho, ainda assim seria interessante verificar *in loco* o impacto desses aparelhos no consumo de energia elétrica dessas edificações.

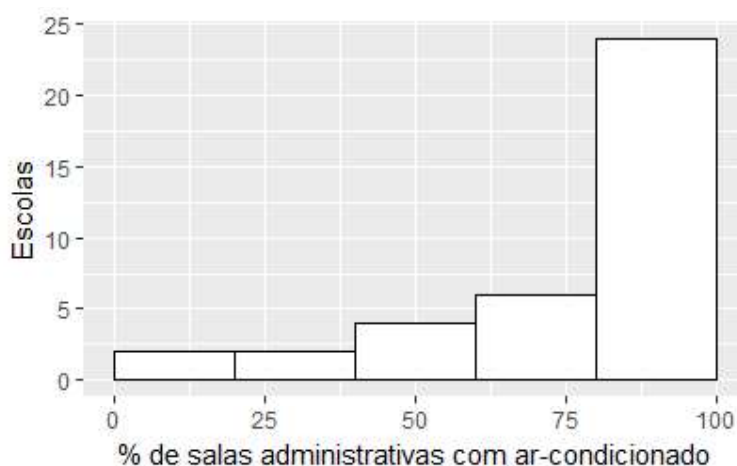
Nas salas administrativas verificou-se uma predominância do uso de ar-condicionado (Tabela 22), no entanto ainda há várias salas sem esses equipamentos (Figura 49). Verificou-se também que muitas das escolas que não possuíam ventilação cruzada em nenhuma sala administrativa, possuíam ar-condicionado em todas elas. Esse fator não foi considerado na análise de agrupamento, pois o foco desse estudo são as salas de aula e também porque a tendência é que as salas administrativas sejam num futuro próximo todas equipadas com aparelhos de ar-condicionado.

Tabela 22 - Resumo das variáveis estatísticas sobre a porcentagem de salas administrativas com ar-condicionado

| Variável | Valor (%) |
|---------------|-----------|
| Mínima | 0 |
| Máxima | 100 |
| Média | 82,67 |
| Mediana | 100 |
| Desvio padrão | 27,39 |

Fonte: Autora (2017).

Figura 49 – Porcentagem de salas administrativas com ar-condicionado



Fonte: Autora (2017).

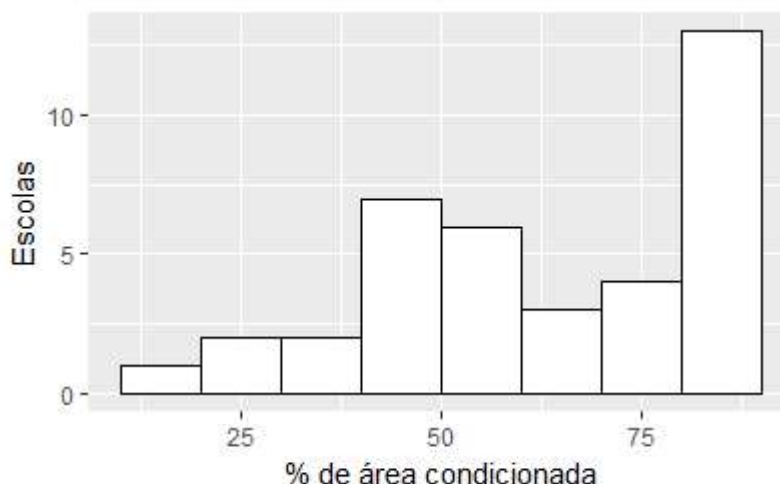
No quesito porcentagem de área total condicionada analisaram-se quantos por cento da área total, contabilizando todos os ambientes, possuía ar-condicionado. Verificou-se que há uma porcentagem alta de área possui os aparelhos (Figura 50 e Tabela 23), no entanto pelos mesmos motivos do item anterior, esse não foi levado em consideração nesse estudo.

Tabela 23 - Resumo das variáveis estatísticas sobre a porcentagem de área total condicionada na edificação

| Variável | Valor (%) |
|---------------|-----------|
| Mínima | 10,88 |
| Máxima | 87,90 |
| Média | 62,77 |
| Mediana | 64,24 |
| Desvio padrão | 20,63 |

Fonte: Autora (2017).

Figura 50 – Porcentagem de área total condicionada



Fonte: Autora (2017).

4.2 DETERMINAÇÃO DO MODELO DE REFERÊNCIA

A análise de agrupamentos foi realizada considerando todas as variáveis levantadas relevantes da amostra, em relação ao funcionamento, forma e materiais. Foram também analisadas em conjunto as variáveis quantitativas e qualitativas. Os resultados são mostrados a seguir.

As características das escolas foram resumidas em 22 variáveis, pois algumas delas estavam incompletas no levantamento, outras apresentavam duplicidade de informações ou aspectos poucos relevantes para análise de agrupamento.

Assim considerou-se na análise:

- o número de alunos, por se tratar de um importante indicativo em relação ao uso e ao tamanho da escola;
- a tipologia, que apesar de ser uma variável qualitativa, é uma das principais ferramentas em relação à forma da escola;
- o número de pavimentos, indicativo em relação à altura das edificações;
- a porcentagem de abertura na fachada, por ser um dos elementos que melhor mostra a exposição da edificação ao meio externo;
- a porcentagem de abertura à ventilação na fachada, que considera apenas a parte possível de ser ventilada das esquadrias. Esse indicador juntamente com a porcentagem de salas administrativas e de salas de aula com

ventilação cruzada, são indicadores em relação à forma da edificação que mostram de que maneira a ventilação ocorre;

- o total da área administrativa e o total das áreas comuns mostram a infraestrutura e o tamanho da escola;
- o total da área de permanência não prolongada e o total da área de pátio coberto, além de serem indicadores em relação ao tamanho da escola, também estão ligados à tipologia, pois o tamanho das circulações e do pátio coberto mudam conforme o desenho arquitetônico;
- a quantidade de salas de aula, pois essas nos dizem quantos alunos a escola é capaz de atender, ou seja, o tamanho dessa escola;
- a área média das salas de aula, já que essas são o foco desse estudo e o ambiente com maior concentração de pessoas. A área média das salas de aula é muito semelhante em todas as escolas, já que internamente a configuração delas é padrão;
- a orientação das salas de aula: Foram analisadas quantas salas de aula cada escola possuía em cada orientação;
- o tipo e cor de telha;
- forro de PVC x laje x misto;
- cor das fachadas;
- espessura das paredes externas e internas, já que não foi possível levantar o seu material.

No quesito dos materiais as variáveis escolhidas priorizaram os elementos externos e expostos da edificação.

As variáveis consideradas nesta análise estão apresentadas no Quadro 3, e serão chamadas de variáveis estatísticas. As escolas serão chamadas de objetos.

Quadro 3 – Variáveis consideradas na análise de agrupamento

| Grupo | Variável estatística | Tipo variável |
|------------------------|--|---------------|
| Funcionamento | Número de alunos | Quantitativa |
| Geometria | Tipologia | Qualitativa |
| | Pavimentos | Quantitativa |
| Aberturas | Porcentagem de abertura na fachada | Quantitativa |
| | Porcentagem de abertura de ventilação na fachada | Quantitativa |
| | Porcentagem de salas de aula com ventilação cruzada | Quantitativa |
| | Porcentagem de salas administrat. com ventilação cruzada | Quantitativa |
| Dimensão da edificação | Total da área administrativa | Quantitativa |
| | Total das áreas comuns | Quantitativa |
| | Total da área de permanência não prolongada | Quantitativa |
| | Total da área de pátio coberto | Quantitativa |
| | Número de salas de aula | Quantitativa |
| | Área média das salas de aula | Quantitativa |
| Relação com o entorno | Número de salas de aula com orientação Norte | Quantitativa |
| | Número de salas de aula com orientação Sul | Quantitativa |
| | Número de salas de aula com orientação Leste | Quantitativa |
| | Número de salas de aula com orientação Oeste | Quantitativa |
| Materiais | Tipo de Telha | Qualitativa |
| | Laje x Forro x Misto | Qualitativa |
| | Cores da fachada | Qualitativa |
| | Espessura das paredes externas | Quantitativa |
| | Espessura das paredes internas | Quantitativa |

Fonte: Autora (2017).

4.2.1 Identificação de *Outliers*

Após a escolha das variáveis, foram identificados possíveis objetos atípicos na amostra com a medida de D^2 de Mahalanobis (Tabela 24). Os objetos analisados estão listados na primeira coluna. O valor de distância de D^2 está na segunda coluna, sendo que quanto mais alto esse valor, maior a distância do objeto ao centro do grupo. Assim, quanto maior for essa distância mais chance ele tem de ser identificado como objeto atípico ou outlier. Não há um valor específico de corte e nesse caso foi utilizada a probabilidade associada ao D^2 de Mahalanobis como critério (terceira coluna). Foi considerado como um possível *outlier*, o objeto com valores de probabilidade menores que 10% ou 0,1. Não há uma regra para esse valor de corte, Ghisi e Schaefer (2016) utilizaram o valor de 0,001. Giglio *et al.*

(2014) também utilizaram o mesmo p-valor de corte, considerando objetos atípicos os que possuíam probabilidades menores que 0,001.

Tabela 24 - Identificação de potenciais objetos atípicos com a medida D^2 de Mahalanobis

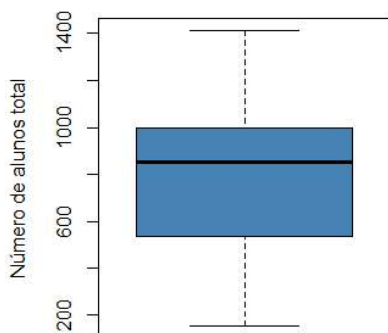
| Escola | D^2 | Probabilidade | Possível outlier |
|--------|------------------|--------------------|------------------|
| 1 | 20.8187333052566 | 0.407870077406646 | Não |
| 2 | 24.5351813750087 | 0.219795473745678 | Não |
| 3 | 15.0819749973304 | 0.771697915918829 | Não |
| 4 | 20.638587047422 | 0.418672526273995 | Não |
| 5 | 9.11823461672047 | 0.981496919584753 | Não |
| 6 | 15.1474523853306 | 0.767909069891109 | Não |
| 7 | 18.9893264006028 | 0.522519916870769 | Não |
| 8 | 23.1084849062279 | 0.283499150832462 | Não |
| 9 | 26.5029440233113 | 0.149836240993752 | Não |
| 10 | 23.1792080119159 | 0.280080967259994 | Não |
| 11 | 22.9666835253651 | 0.29043341242981 | Não |
| 12 | 14.9739481472703 | 0.777896359647405 | Não |
| 13 | 30.6391967384424 | 0.0601374236623579 | Talvez |
| 14 | 13.864442991121 | 0.837301915089055 | Não |
| 15 | 10.4724451503842 | 0.958774446381375 | Não |
| 16 | 20.677394335912 | 0.416334675093783 | Não |
| 17 | 20.210647631546 | 0.444823961751304 | Não |
| 18 | 10.659996420491 | 0.954567800927011 | Não |
| 19 | 17.4189168581164 | 0.625627995935062 | Não |
| 20 | 8.74476909285819 | 0.985679289423505 | Não |
| 21 | 22.6011112184853 | 0.308802463042 | Não |
| 22 | 28.0644151119802 | 0.107883277862445 | Não |
| 23 | 9.9735359366183 | 0.968649274046344 | Não |
| 24 | 11.7858286120044 | 0.923250314531987 | Não |
| 25 | 15.7153191686584 | 0.734120881625599 | Não |
| 26 | 19.4664678507559 | 0.49171717558438 | Não |
| 27 | 18.3080396506688 | 0.56712409937925 | Não |
| 28 | 21.3173920411409 | 0.378667392297085 | Não |
| 29 | 33.2946104016913 | 0.0313116621760929 | Talvez |
| 30 | 9.59501107729044 | 0.974935266069689 | Não |
| 31 | 32.0415805612838 | 0.0428572629867811 | Talvez |
| 32 | 25.1335618736139 | 0.196369059096672 | Não |
| 33 | 13.8943513865901 | 0.835811894197238 | Não |
| 34 | 20.3875258492342 | 0.433934695201009 | Não |
| 35 | 23.5962529747676 | 0.260473503094433 | Não |
| 36 | 17.9598047000426 | 0.590056203238897 | Não |
| 37 | 25.369425131184 | 0.187661522067807 | Não |
| 38 | 23.7471984933565 | 0.253609525127613 | Não |

Fonte: Autora (2017).

Percebe-se que há poucos *outliers* na amostra. Caso fosse usado um critério de corte de probabilidade de D^2 de Mahalanobis de 1%, não haveria *outliers*. Foram ainda realizados os boxplots para cada variável quantitativa para poder verificar caso a caso os possíveis *outliers*.

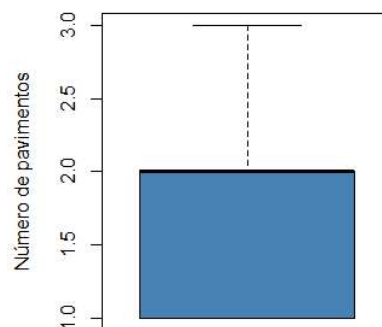
Observando o boxplot das Figuras 51, 52, 53, 55 e 56 percebe-se que não há objetos atípicos no número total de alunos, no número de pavimentos, na porcentagem de abertura da fachada, no total da área administrativa e no total das áreas comuns.

Figura 51 – Boxplot número total de alunos



Fonte: Autora (2017).

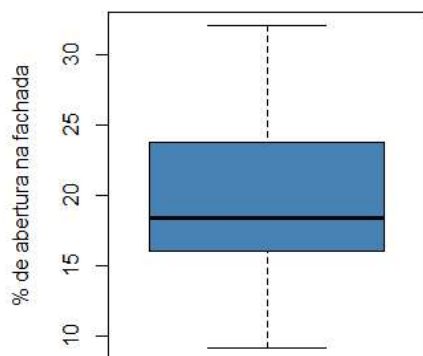
Figura 52 – Boxplot número de pavimentos



Fonte: Autora (2017).

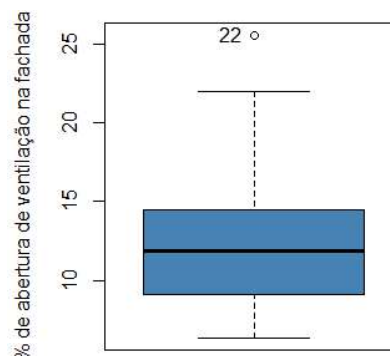
Analisando a Figura 54, observa-se que há um objeto atípico: a escola 22, que apresenta porcentagem de abertura para ventilação maior que as demais. Essa escola, no entanto, não aparece como outlier em outros boxplots e nem no D^2 de Mahalanobis, logo ela não foi considerada um outlier.

Figura 53 - Boxplot porcentagem de abertura na fachada



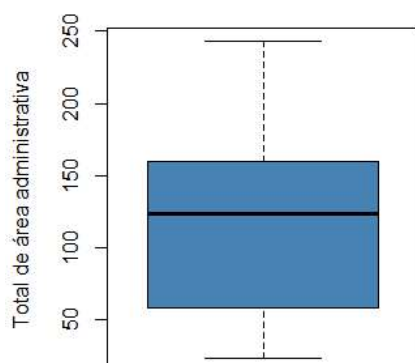
Fonte: Autora (2017).

Figura 54 - Boxplot porcentagem de abertura de ventilação na fachada



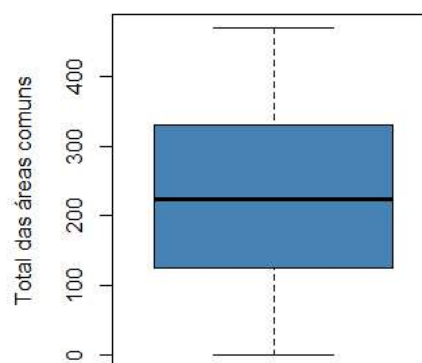
Fonte: Autora (2017).

Figura 55 – Boxplot total da área administrativa



Fonte: Autora (2017).

Figura 56 – Boxplot total das áreas comuns

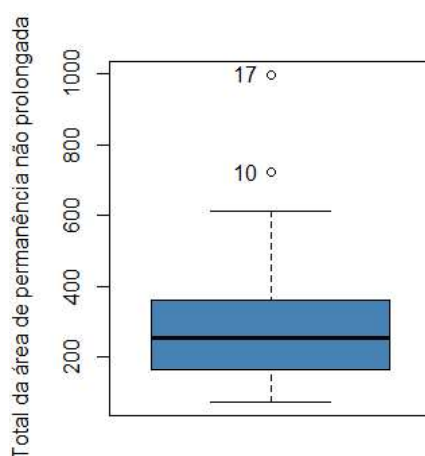


Fonte: Autora (2017).

No total de área de permanência não prolongada (Figura 57) há duas escolas que aparecem como objetos atípicos: a escola 10 e a escola 17. A escola 17 aparece como outlier por ser uma escola grande em relação às demais e principalmente pela sua tipologia, que apresenta circulações internas e uma rampa central que foram áreas contabilizadas como áreas de permanência não prolongada, o mesmo ocorre com a escola 10.

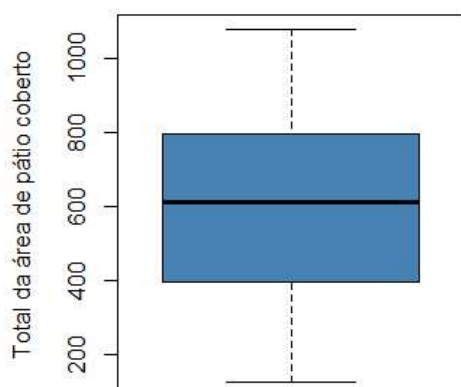
A maioria das escolas apresenta circulações externas que foram contabilizadas nas áreas de pátio coberto (Figura 58). As áreas de pátio coberto não apresentam objetos atípicos, assim como a variável número de salas de aula (Figura 59).

Figura 57 - Boxplot total da área de permanência não prolongada



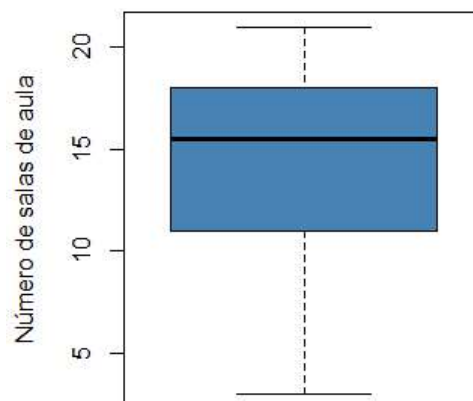
Fonte: Autora (2017).

Figura 58 – Boxplot total da área de pátio coberto



Fonte: Autora (2017).

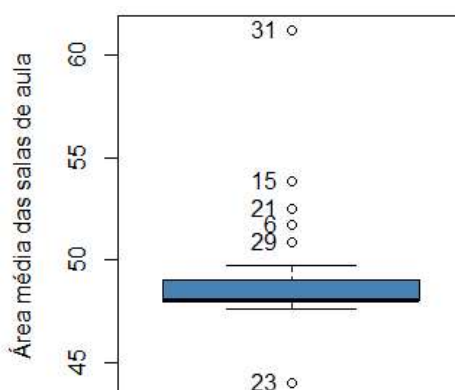
Figura 59 – Boxplot número de salas de aula



Fonte: Autora (2017).

A área média de salas de aula (Figura 60) é a variável que mais apresenta objetos atípicos e é possivelmente a variável que colocou as escolas 29 (junto com a variável porcentagem de salas de aula com ventilação cruzada) e 31 como possíveis *outliers* na análise do D^2 de Mahalanobis. A área média de salas de aula apresenta valores muito próximos, pois as dimensões costumam ser padrões, assim qualquer diferença nesses valores passa a ser um objeto atípico. Apesar das escolas 29 e 31 apresentarem salas de aula com dimensões um pouco acima do padrão, o restante das suas variáveis apresentam valores coerentes com a amostra e desse modo, optou-se em mantê-las na matriz de dados. O mesmo é válido para as demais escolas (6, 15, 21 e 23) que apareceram como *outliers*.

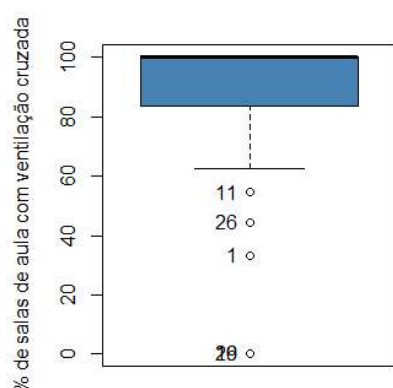
Figura 60 – Boxplot área média das salas de aula



Fonte: Autora (2017).

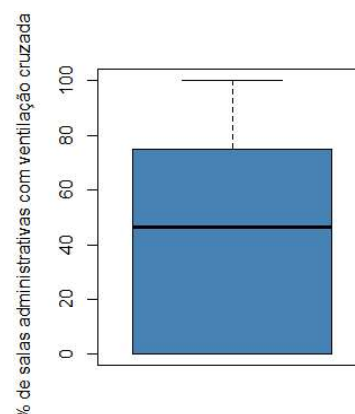
Algumas escolas (1, 11, 16, 26 e 29) apareceram como *outliers* na variável porcentagem de salas de aula com ventilação cruzada (Figura 61). Essas escolas apareceram como objetos atípicos porque a maioria das salas de aula possui ventilação cruzada. Logo, algumas tipologias que não privilegiam essa estratégia aparecem como *outliers*, no entanto essas escolas estão coerentes com a amostra nos outros quesitos e por isso foram consideradas na análise de agrupamento. A escola 29 também foi considerada um objeto atípico na área média de salas de aula e por isso apareceu como *outlier* no D^2 de Mahalanobis. A porcentagem de salas administrativas com ventilação cruzada não apresenta objetos atípicos, conforme nota-se na Figura 62.

Figura 61 – Boxplot porcentagem de salas de aula com ventilação cruzada



Fonte: Autora (2017).

Figura 62 – Boxplot porcentagem de salas administ. com ventilação cruzada

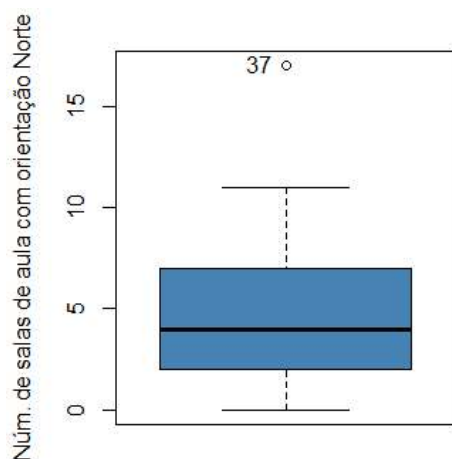


Fonte: Autora (2017).

No boxplot do número de salas de aula com orientação Norte (Figura 63), a escola 37 foi considerada como objeto atípico. No entanto, ela não aparece como objeto atípico nas demais análises, mantendo-se na amostra final. Com relação às variáveis relativas à orientação, apareceram diversos *outliers*. A orientação das salas está ligada à tipologia da edificação e conforme essa, algumas escolas apresentam salas de aula voltadas para apenas uma ou duas orientações, o que aumenta o número de salas de aula nessas orientações e zera nas outras, gerando falsos objetos atípicos. O mesmo caso ocorreu com a escola 35, na variável: número de salas de aula com orientação Sul (Figura 64); e com as escolas 12 e 33 na variável: número de salas de aula com orientação Leste (Figura 65).

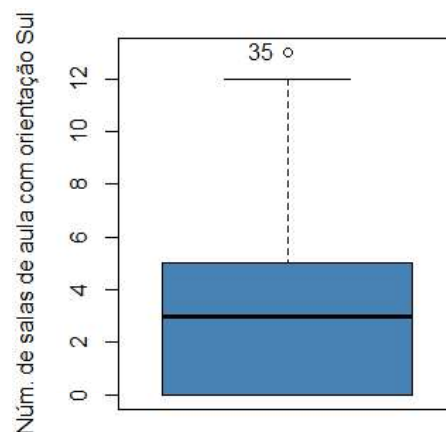
No boxplot número de salas de aula com orientação Oeste (Figura 66), há diversos objetos atípicos: 8, 13, 19, 25 e 27. Destaca-se aí a escola 13 por apresentar um valor bastante distante da mediana do grupo. Essa é a variável que colocou essa escola como objeto atípico na análise do D^2 de Mahalanobis. No entanto, por ela não ser um objeto atípico em nenhuma outra variável e pelos motivos acima apresentados nas variáveis relativas à orientação solar, a escola 13 foi mantida na amostra.

Figura 63 – Boxplot número de salas de aula com orientação norte



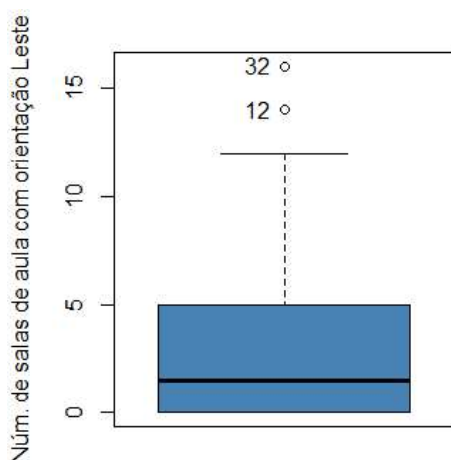
Fonte: Autora (2017).

Figura 64 – Boxplot número de salas de aula com orientação sul



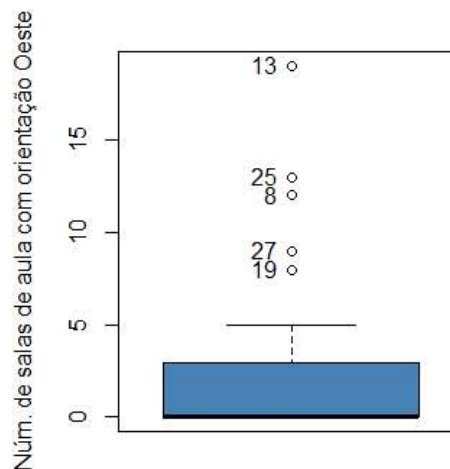
Fonte: Autora (2017).

Figura 65 – Boxplot número de salas de aula com orientação leste



Fonte: Autora (2017).

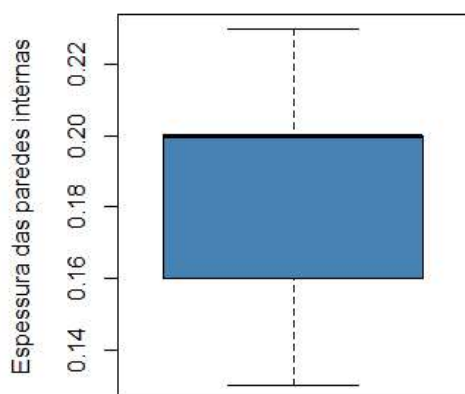
Figura 66 – Boxplot número de salas de aula com orientação oeste



Fonte: Autora (2017).

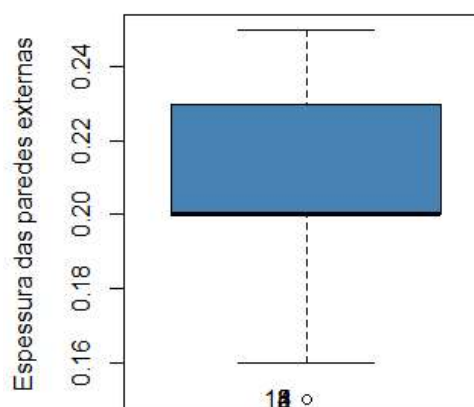
No boxplot da variável espessura de paredes internas não há objetos atípicos, conforme nota-se na Figura 67. No boxplot da variável espessura de paredes externas (Figura 68), há alguns objetos atípicos: escolas 2, 4, 5 e 18. Esses *outliers*, no entanto, estão próximos ao valor mínimo e não foram encontrados em outras variáveis.

Figura 67 – Boxplot espessura das paredes internas



Fonte: Autora (2017).

Figura 68 – Boxplot espessura das paredes externas



Fonte: Autora (2017).

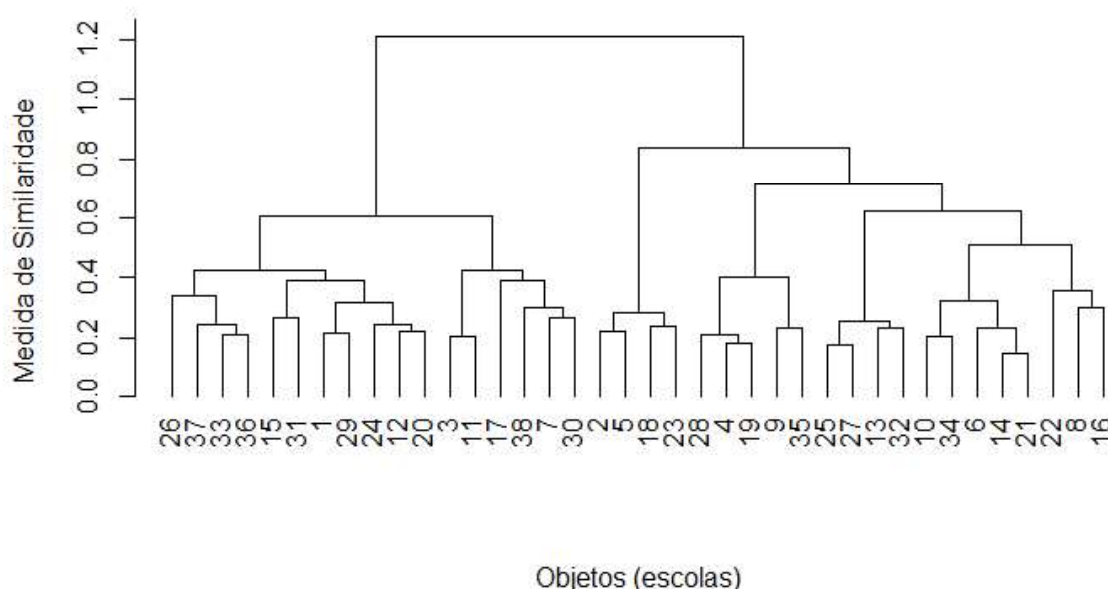
Após a análise dos boxplots e do D^2 de Mahalanobis, optou-se por considerar todos os 38 casos da amostra, decidindo incorporar os possíveis *outliers* na análise de agrupamento. Nenhum caso foi não excluído e todas as variáveis foram consideradas nos *clusters*.

4.2.2 Formação dos *Clusters* (análise de agrupamento).

A próxima etapa desse estudo consiste na aplicação da análise de agrupamento ou *clusters*. Primeiro, foi realizada uma análise hierárquica. Essa técnica se inicia considerando cada objeto como um agrupamento. Os agrupamentos se unem para dar origem a novos agrupamentos. O processo é repetido até que se forme um único agrupamento. A Figura 69 mostra o dendograma, resultante desse processo. Os agrupamentos se encontram no eixo horizontal, cada número representa uma escola, essas vão formando agrupamentos de acordo com as suas características, o que é representado pelas divisões da figura. As escolas semelhantes vão se agrupando de acordo com o nível de

similaridade. Os níveis de similaridade são os números que estão no eixo vertical, que aumentam conforme as escolas vão se agrupando. Nas primeiras etapas são unidos agrupamentos unitários, já nas últimas etapas os agrupamentos formados vão-se unindo entre si. Uma inspeção visual permite propor a quantidade de agrupamentos ideal, correspondente à etapa em que o nível de similaridade referente à união de dois agrupamentos foi relativamente maior que nas etapas anteriores.

Figura 69 – Dendograma da análise de agrupamento hierárquico com Ward

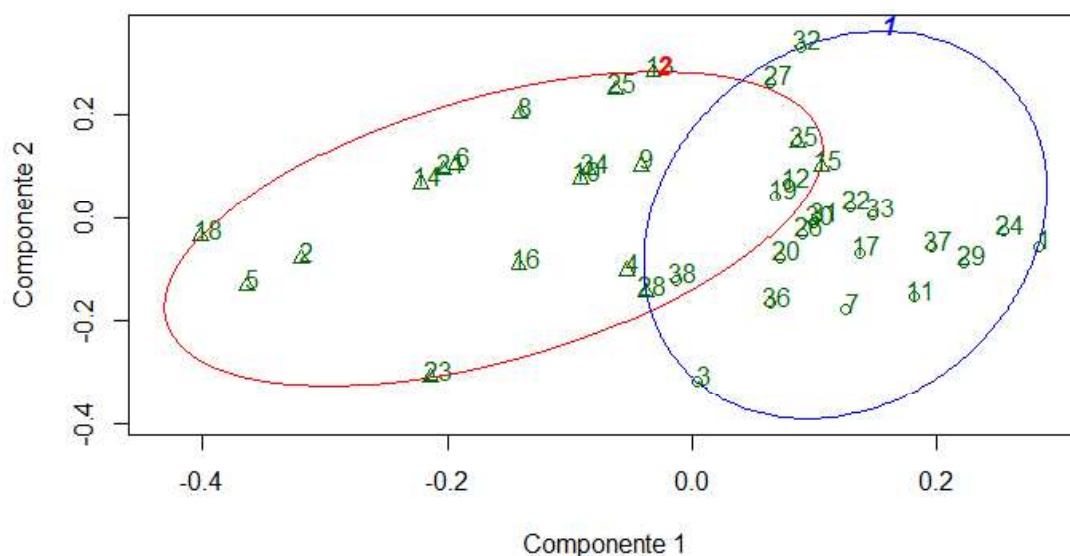


Fonte: Autora (2017).

Observando o dendograma, e tendo em mente que um dos objetivos da pesquisa que é achar uma escola que seja capaz de representar a amostra, optou-se por criar dois agrupamentos, visto que o grau de heterogeneidade aumenta de maneira linear e não há uma linha de corte clara. Como não há nenhum agrupamento formado por uma quantidade muito pequena de objetos, não houve necessidade de excluir nenhum caso e repetir o processo.

Assim, partiu-se para a segunda etapa da análise, o agrupamento não hierárquico. Para esse agrupamento foi utilizado o K-medóide; e o resultado desse agrupamento, considerando dois pontos medóides, pode ser visualizado na Figura 70.

Figura 70 – Análise de agrupamentos não hierárquico



Fonte: Autora (2017).

Foram formados dois agrupamentos, um com 20 objetos (agrupamento 1) e outro com 18 objetos (agrupamento 2). As duas escolas que se constituem como o medóide de cada agrupamento, respectivamente são as escolas “33” e “14”. As escolas medóides, que são as que melhor representam cada agrupamento são determinadas pelo algoritmo utilizado para formação dos clusters. A intersecção entre esses dois agrupamentos representa uma região sombreada, a qual contém objetos que poderiam pertencer aos dois agrupamentos, ou seja, essas são áreas em que o agrupamento não está bem definido ou heterogêneo.

4.2.3 Análise dos agrupamentos formados

A análise dos agrupamentos formados foi realizada aplicando alguns testes de hipóteses para as variáveis envolvidas na análise. Como não foi possível confirmar a normalidade para a maioria das variáveis, aplicou-se o teste de Wilcoxon para as variáveis quantitativas e o teste Qui-quadrado para as variáveis qualitativas. Entre as dezoito variáveis quantitativas envolvidas na análise, nove (número de alunos, total área administrativa, total da área de pátio coberto, % de abertura na fachada, número de salas de aula com orientação Leste, salas de aula com ventilação cruzada, salas administrativas com ventilação cruzada e espessura das paredes externas e internas) apresentaram independência estatística entre os

agrupamentos formados, a um nível de significância de 0,05 e uma (número de salas de aula) apresentou independência estatística a um nível de 0,1 (Tabela 25). Para as quatro variáveis qualitativas envolvidas na análise, uma (laje x forro) apresentou independência estatística a um nível de significância 0,05 e duas (telha e cor das fachadas) apresentaram independência estatística a um nível de 0,1(Tabela 26).

Tabela 25 - Comparação das médias das variáveis quantitativas dos agrupamentos por meio do teste de Wilcoxon (nível de significância $p < 0,05$)

| Variáveis | p-valor |
|--|----------------|
| Número de alunos | 0,004569 |
| Número de pavimentos | 0,5479 |
| Total área administrativa | 0,001655 |
| Total da área de permanência não prolongada | 0,3462 |
| Total das áreas comuns | 0,6129 |
| Total da área de pátio coberto | 0,03825 |
| Número de salas de aula | 0,08064 |
| Áreas médias das salas de aula | 0,673 |
| % de abertura na fachada | 0,003529 |
| % de abertura na fachada para ventilação | 0,6964 |
| Número de salas de aula com orientação Norte | 0,367 |
| Número de salas de aula com orientação Sul | 0,8929 |
| Número de salas de aula com orientação Leste | 0,008548 |
| Número de salas de aula com orientação Oeste | 0,8742 |
| Salas de aula com ventilação cruzada | 0,03684 |
| Salas administrativas com ventilação cruzada | 0,01449 |
| Espessura das paredes internas | 0,001094 |
| Espessura das paredes externas | 0,01704 |

Fonte: Autora (2017).

Tabela 26 - Comparação das médias das variáveis qualitativas dos agrupamentos por meio do teste Qui-quadrado (nível de significância $p < 0,05$).

| Variável qualitativa | p-valor | novo agrupamento |
|-----------------------------|----------------|-------------------------|
| Tipologia | 0,1056 | |
| Telha | 0,0925 | |
| Laje x Forro | 6,502e-05 | |
| Cor das fachadas | 0,8042 | |

Fonte: Autora (2017).

A definição do modelo de referência baseou-se no conceito de edifício real (*Real Reference Building*), proposto nas diretrizes do EPBD recast (2010), que é a edificação cujas características mais se aproximam da média do grupo, em todas as variáveis. Neste estudo, os modelos de referência de cada agrupamento foram designados como sendo o objeto mais próximo ao medóide. Esses objetos são o 14 para o agrupamento 1 e o 33 para o agrupamento 2. Observando a Tabela 24 novamente, pode-se notar que estes dois objetos apresentaram de fato um bom índice de D^2 . É importante ressaltar que o modelo de referência baseado no edifício real não possui os valores de cada variável iguais às médias do grupo, podendo inclusive possuir alguma característica bem diferente da média do agrupamento (ROSA, 2014). Nesse caso, foi preciso ponderar se mantinha no modelo a característica da edificação real ou se devia ser adotada a média do agrupamento.

As Tabelas 27 e 28 apresentam as características descritivas de cada agrupamento, juntamente com as características do modelo de referência, para todas as variáveis utilizadas na análise (qualitativas e quantitativas, respectivamente).

Observou-se que os valores encontrados para cada variável do modelo de referência encontram-se perto da média do seu agrupamento, a partir do que se conclui que os modelos se ajustaram bem aos agrupamentos. Por exemplo, no agrupamento 1, a área média de salas de aula é de 49,17m², já o modelo de referência possui uma média de 49,6m². No agrupamento dois a média do grupo para número de salas de aula é de 11,83 salas, já o modelo de referência possui 11 de salas de aula.

Tabela 27 - Perfil dos agrupamentos ao longo das variáveis quantitativas envolvidas na análise de agrupamentos (Continua)

| Número de alunos | Grupo 01 | Grupo 02 |
|--|----------|----------|
| Média | 910,6 | 643,78 |
| Mediana | 966 | 616 |
| Desvio padrão | 252,87 | 268,73 |
| Escola | 932 | 480 |
| Porcentagem de abertura na Fachada | Grupo 01 | Grupo 02 |
| Média | 22,03 | 16,80 |
| Mediana | 19,85 | 16,74 |
| Desvio padrão | 5,87 | 3,6 |
| Escola | 19,86 | 18,32 |
| Porcentagem de abertura de ventilação na Fachada | Grupo 01 | Grupo 02 |
| Média | 12,79 | 12,04 |
| Mediana | 12,11 | 10,38 |
| Desvio padrão | 4,95 | 4,27 |
| Escola | 8,75 | 10,16 |
| Total de área administrativa | Grupo 01 | Grupo 02 |
| Média | 145,91 | 89,35 |
| Mediana | 141,69 | 79,32 |
| Desvio padrão | 53,07 | 51,25 |
| Escola | 194,36 | 35,82 |
| Total das áreas comuns | Grupo 01 | Grupo 02 |
| Média | 234,9 | 208,85 |
| Mediana | 206,87 | 229,72 |
| Desvio padrão | 111,16 | 134,59 |
| Escola | 246,85 | 110,7 |
| Total da área de permanência não prolongada | Grupo 01 | Grupo 02 |
| Média | 307,81 | 271,11 |
| Mediana | 268,12 | 206,1 |
| Desvio padrão | 202,17 | 181,81 |
| Escola | 265,43 | 206,1 |

Tabela 27 - Perfil dos agrupamentos ao longo das variáveis quantitativas envolvidas na análise de agrupamentos (Continuação)

| Área de pátio coberto | Grupo 01 | Grupo 02 |
|---|----------|----------|
| Média | 678,69 | 496,76 |
| Mediana | 647,26 | 434,43 |
| Desvio padrão | 228,67 | 247,37 |
| Escola | 610,35 | 249,11 |
| Número de salas de aula | Grupo 01 | Grupo 02 |
| Média | 15,35 | 11,83 |
| Mediana | 16 | 12 |
| Desvio padrão | 3,52 | 5,64 |
| Escola | 19 | 11 |
| Área média das salas de aula | Grupo 01 | Grupo 02 |
| Média | 49,17 | 48,71 |
| Mediana | 48 | 48 |
| Desvio padrão | 2,95 | 2,16 |
| Escola | 49,6 | 48 |
| Porcentagem de salas de aula com ventilação cruzada | Grupo 01 | Grupo 02 |
| Média | 79,91 | 92,55 |
| Mediana | 94,31 | 100 |
| Desvio padrão | 28,17 | 23,55 |
| Escola | 89,5 | 90,91 |
| Porcentagem de salas administrativas com ventilação cruzada | Grupo 01 | Grupo 02 |
| Média | 55,15 | 28,03 |
| Mediana | 61,45 | 12,5 |
| Desvio padrão | 33,48 | 32,68 |
| Escola | 42,9 | 0 |
| Número de salas de aula com orientação Norte | Grupo 01 | Grupo 02 |
| Média | 4,95 | 3,72 |
| Mediana | 4 | 3 |
| Desvio padrão | 4,15 | 3,27 |
| Escola | 8 | 3 |

Tabela 27 - Perfil dos agrupamentos ao longo das variáveis quantitativas envolvidas na análise de agrupamentos (Conclusão)

| Número de salas de aula com orientação Sul | Grupo 01 | Grupo 02 |
|--|----------|----------|
| Média | 3,25 | 3,67 |
| Mediana | 3,5 | 2 |
| Desvio padrão | 3,37 | 4,10 |
| Escola | 1 | 4 |
| Número de salas de aula com orientação Leste | Grupo 01 | Grupo 02 |
| Média | 5 | 1,22 |
| Mediana | 4 | 0 |
| Desvio padrão | 4,99 | 1,80 |
| Escola | 6 | 0 |
| Número de salas de aula com orientação Oeste | Grupo 01 | Grupo 02 |
| Média | 2,1 | 3,17 |
| Mediana | 0,5 | 0 |
| Desvio padrão | 2,77 | 5,62 |
| Escola | 4 | 3 |
| Espessura das paredes internas | Grupo 01 | Grupo 02 |
| Média | 0,207 | 0,175 |
| Mediana | 0,20 | 0,16 |
| Desvio padrão | 0,02 | 0,029 |
| Escola | 0,20 | 0,20 |
| Espessura das paredes externas | Grupo 01 | Grupo 02 |
| Média | 0,213 | 0,192 |
| Mediana | 0,20 | 0,20 |
| Desvio padrão | 0,018 | 0,030 |
| Escola | 0,20 | 0,20 |

Fonte: Autora (2017).

Para as variáveis qualitativas (Tabela 28), verificou-se que os modelos de referência possuem as características iguais à maior frequência de ocorrência de cada variável. Por exemplo, no agrupamento um a maioria das escolas possui um misto de laje e forro na cobertura, assim como o modelo escolhido. No agrupamento dois, a tipologia que mais aparece é a retangular, assim como no modelo de

referência desse grupo. No caso das variáveis quantitativas, para todas as variáveis os valores dos modelos estão dentro do intervalo de um desvio padrão a partir da média. Verificou-se também que os dois modelos diferem nas características referentes às variáveis que rejeitaram a hipótese de igualdade de médias, sendo praticamente iguais nas demais.

Tabela 28 - Perfil dos agrupamentos ao longo das variáveis qualitativas envolvidas na análise de agrupamentos

| Tipologia | Grupo 01 | Escola 01 | Grupo 02 | Escola 02 |
|----------------|----------|-----------|----------|-----------|
| 0 – Em “E” | 5 | | 2 | |
| 1 - Em “U” | 5 | X | 3 | |
| 2 – Retangular | 1 | | 8 | X |
| 3 - Em “L” | 4 | | 1 | |
| 4 - Em “H” | 2 | | 3 | |
| 5 – Em Quadra | 2 | | 1 | |
| 6 – Outro | 2 | | 0 | |

| Número de Pavimentos | Grupo 01 | Escola 01 | Grupo 02 | Escola 02 |
|----------------------|----------|-----------|----------|-----------|
| 1 | 5 | | 7 | |
| 2 | 15 | X | 10 | X |
| 3 | 0 | | 1 | |

| Tipo de Telha | Grupo 01 | Escola 01 | Grupo 02 | Escola 02 |
|------------------|----------|-----------|----------|-----------|
| 0 – Fibrocimento | 9 | | 6 | |
| 1- Cerâmica | 5 | | 11 | X |
| 2 – Misto | 5 | X | 1 | |
| 3 - Metálica | 1 | | 0 | |

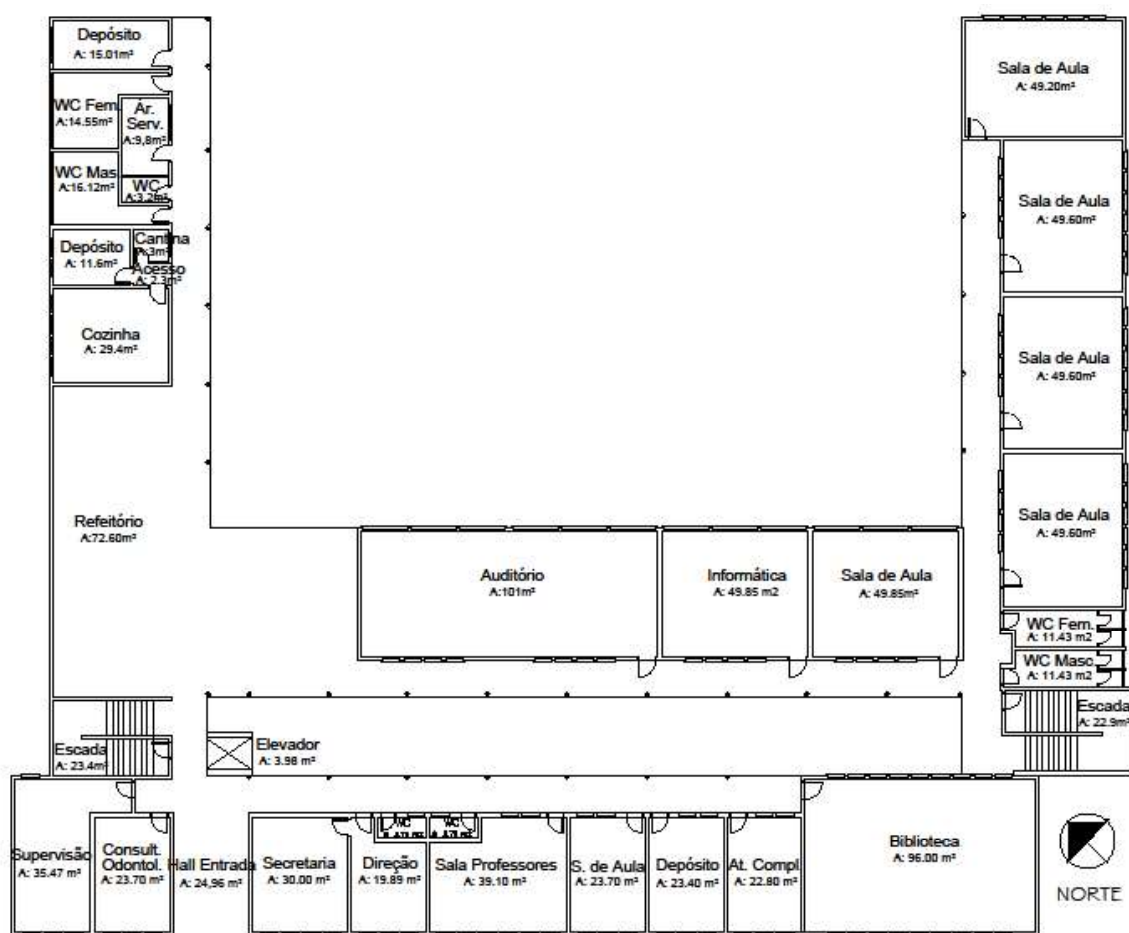
| Laje x Forro x Misto | Grupo 01 | Escola 01 | Grupo 02 | Escola 02 |
|----------------------|----------|-----------|----------|-----------|
| 0 – Laje | 2 | | 13 | X |
| 1- Forro de PVC | 4 | | 4 | |
| 2- Misto | 14 | X | 1 | |

| Cores da Fachada | Grupo 01 | Escola 01 | Grupo 02 | Escola 02 |
|-------------------------|----------|-----------|----------|-----------|
| 0- Creme e Laranja | 9 | X | 7 | X |
| 1-Azul e Creme | 5 | | 7 | |
| 2-Creme | 2 | | 1 | |
| 3- Verm., Azul, Amarelo | 4 | | 3 | |

Fonte: Autora (2017).

As Figuras 71, 72 e 73 apresentam a configuração gráfica do modelo de referência do agrupamento 01. O modelo de referência 01 é uma escola maior com mais alunos e mais salas de aula. Ela tem uma tipologia em “U” que é recorrente nas escolas levantadas, as suas circulações são externas, o que também é bastante comum. O modelo 01 possui, ainda, salas de aula, na sua maioria com ventilação cruzada, voltadas para todas as orientações solares, o que se mostrou ser um caso frequente nas escolas e colabora no estudo do comportamento das salas de aula nas diferentes orientações. A cobertura também é um misto de telha de fibrocimento e forro de PVC no bloco que possui apenas um pavimento; e com telha cerâmica e laje nos blocos que possuem dois pavimentos.

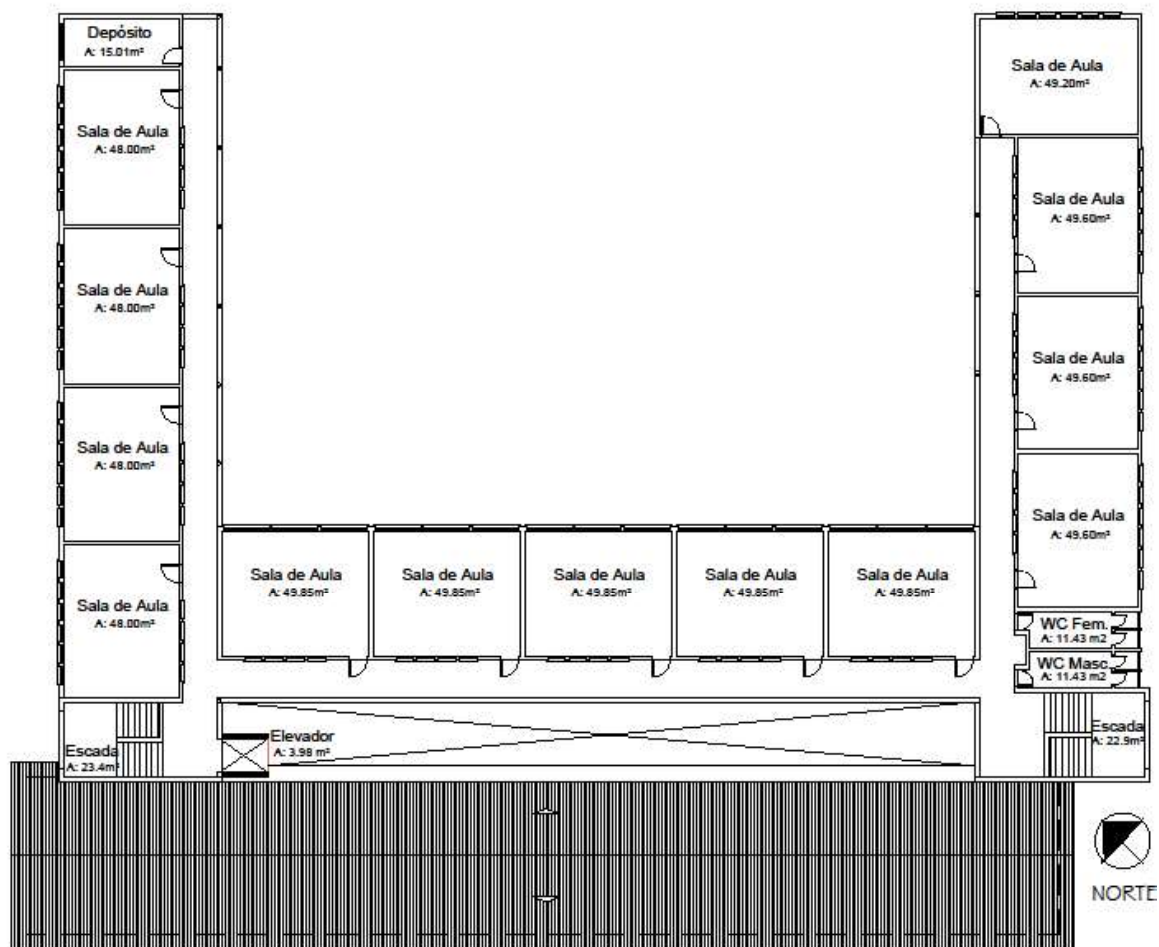
Figura 71 - Configuração do modelo de referência do agrupamento 01 – térreo



PLANTA BAIXA – SEM ESCALA

Fonte: Secretaria da Educação – adaptado pela Autora (2017).

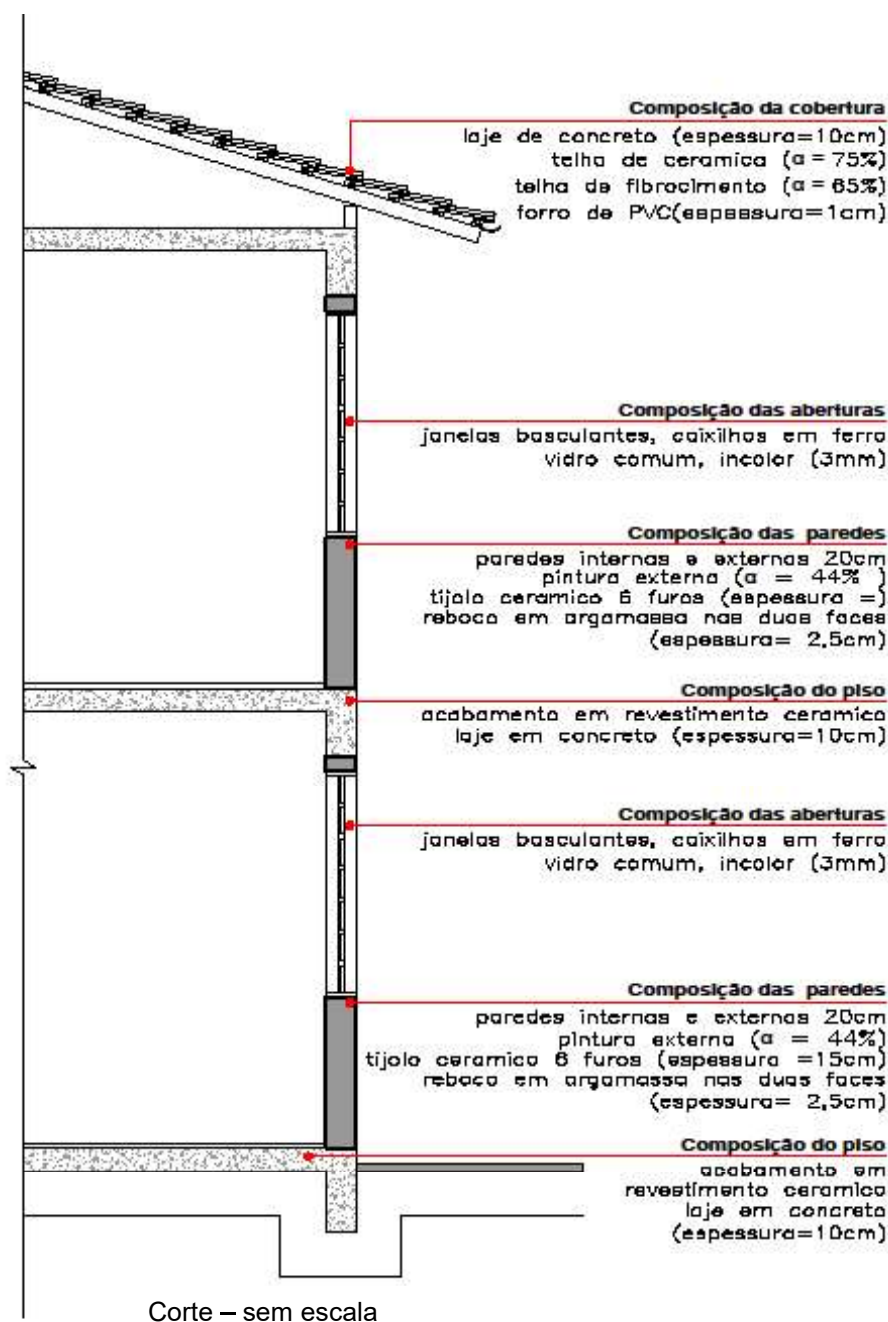
Figura 72 - Configuração do modelo de referência do agrupamento 01 – primeiro pavimento



PLANTA BAIXA – SEM ESCALA

Fonte: Secretaria da Educação – adaptado pela Autora (2017).

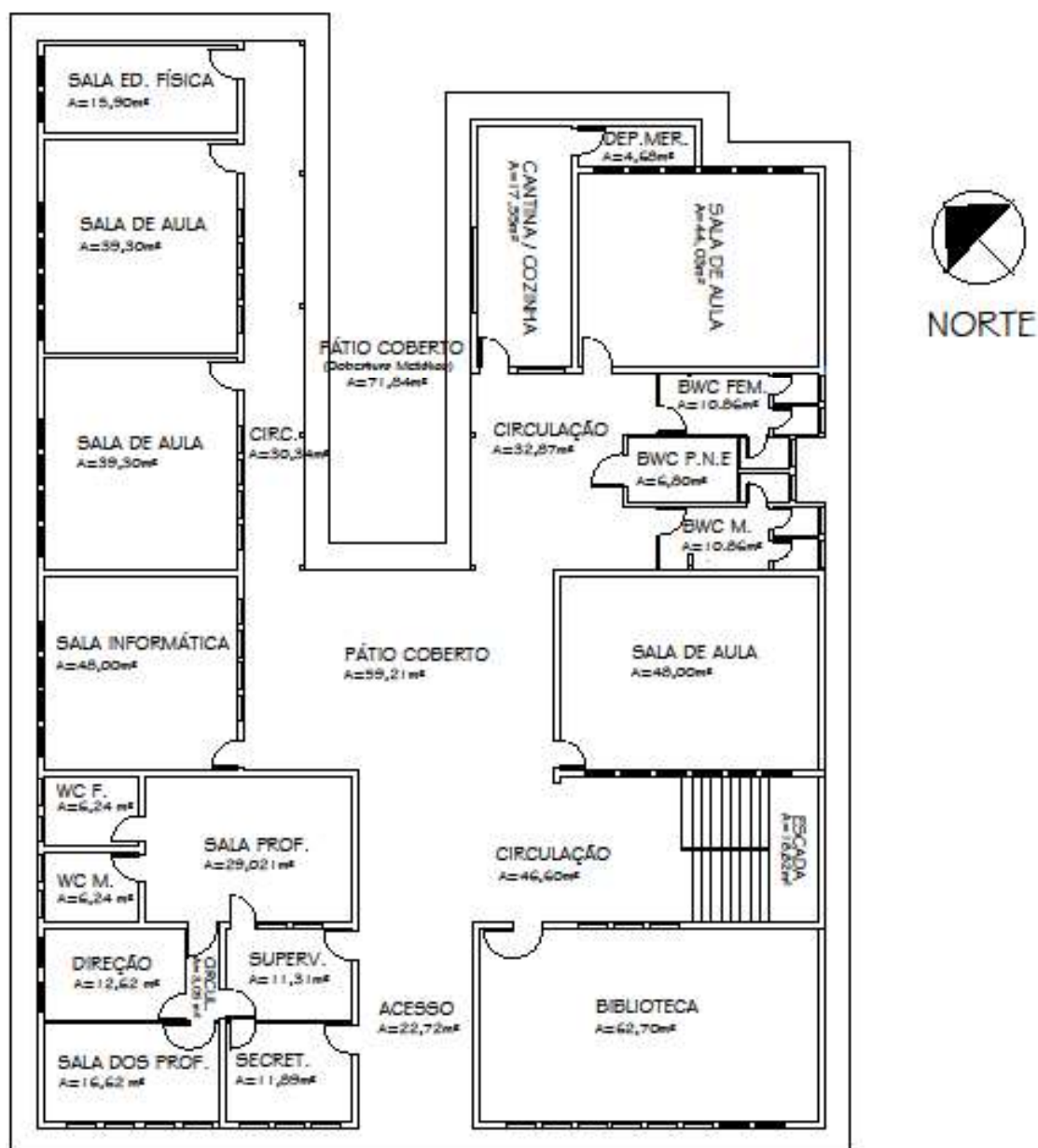
Figura 73 – Corte esquemático materiais modelo de referência 01



Fonte: Autora (2017).

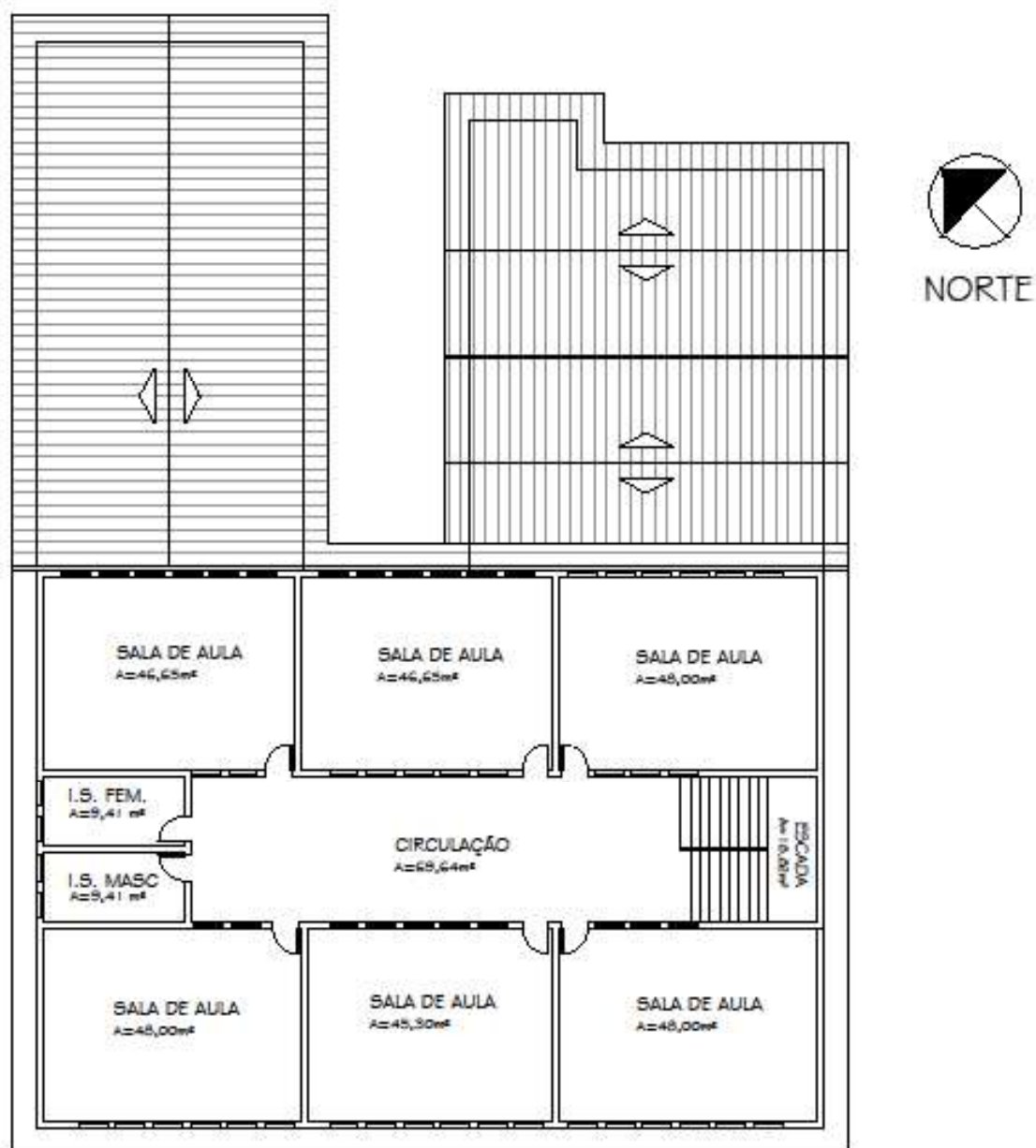
O modelo de referência do agrupamento 02 está graficamente representado nas Figuras 74, 75 e 76. Essa escola apresenta menores dimensões, menos alunos e menos salas de aula. Possui uma tipologia retangular, que também é recorrente nas escolas. As circulações são um misto de fechadas, no segundo pavimento, e abertas, no térreo. Possui salas de aula com ventilação cruzada, e em três orientações solares diferentes.

Figura 74 - Configuração do modelo de referência do agrupamento 02 – térreo



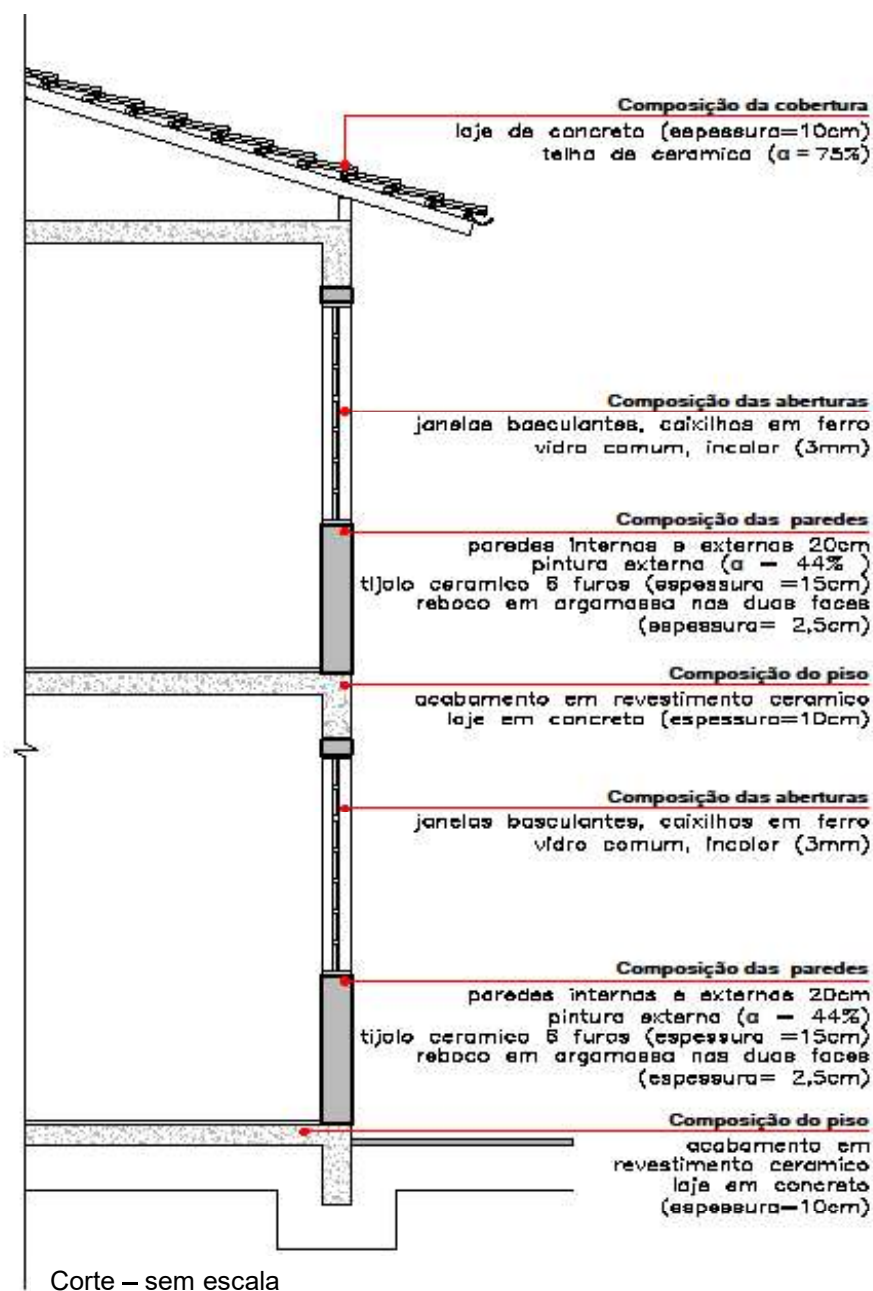
Fonte: Secretaria da Educação – adaptado pela Autora (2017).

Figura 75 - Configuração do modelo de referência do agrupamento 02 – primeiro pavimento



Fonte: Secretaria da Educação – adaptado pela Autora (2017).

Figura 76 - Corte esquemático materiais modelo de referência 02



Fonte: Autora (2017).

De forma geral, os dois modelos mostraram-se adequados, sendo distintos em critérios importantes para a simulação, como as dimensões da envoltória e o número de alunos. Por outro lado foram similares para características igualmente importantes, como a porcentagem de abertura de ventilação na fachada, número de

pavimentos e cores da fachada. Isso aconteceu porque não há de fato grande diferenciação na amostra quanto a essas variáveis.

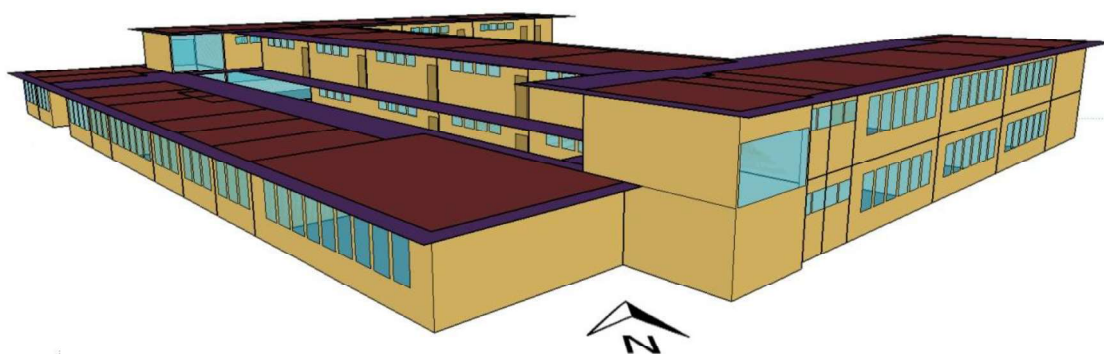
Concluiu-se, baseando-se nos conceitos de análise de agrupamentos, nos testes aplicados e nas características das escolas medóides (que estão próximas das médias encontradas em cada agrupamento), que a formação dos agrupamentos foi satisfatória.

Como esse estudo busca apenas um único modelo de referência para todo o estoque de edificações existente, optou-se em desenvolver apenas o modelo de referência 01. Esse modelo provem de um agrupamento mais numeroso; o seu tamanho e quantidade de alunos está mais próximo da média total da amostra, visto que há mais escolas “maiores” do que “menores”. Essa escola também possui circulações externas, característica, que muda a ventilação e é encontrada na maioria das escolas levantadas. A sua configuração compondo diferentes blocos e com salas de aula em todas as orientações também é uma característica perceptível na maioria das edificações levantadas.

4.3 SIMULAÇÃO DO MODELO DE REFERÊNCIA

Nesta seção, é mostrado o edifício real utilizado como caso base dos parâmetros utilizados na simulação e os seus resultados. Essa edificação, Figuras 71, 72 e 73, foi modelada no SketchUp por meio do plugin Legacy OpenStudio (Figura 77).

Figura 77 - Modelo para simulação



Fonte: Autora (2017).

A Tabela 29 apresenta as zonas térmicas simuladas que serão apresentadas nos resultados da pesquisa. Foram selecionadas as zonas das salas de aula nas quatro orientações existentes, no primeiro e no segundo pavimento. As zonas escolhidas foram selecionadas por serem as com maiores somas de graus-hora total e menores índices de conforto entre as zonas que estavam na mesma orientação e possuíam a mesma área, distribuição e tamanho de aberturas. O parâmetro graus-hora é a soma da diferença de temperatura que está fora de uma faixa de conforto pré-determinada, podendo ser acima de uma determinada temperatura (graus-hora de resfriamento), abaixo de uma determinada temperatura (graus-hora de aquecimento) ou o somatório dos dois parâmetros, sendo chamado de graus-hora total. Os resultados de todas as zonas podem ser encontrados no Apêndice B.

Tabela 29 – Descrição das zonas térmicas

| | Pavimentos | | Descrição |
|-----------------------|------------|----------|--|
| | Térreo | 1º andar | |
| Zonas térmicas | Zn 8 | ----- | Sala de aula menor - orientação SO |
| | Zn 17 | Zn 21 | Salas de aula – orientação SE |
| | Zn 20 | Zn 24 | Salas de aula – orientação NE |
| | Zn 26 | Zn 29 | Salas de aula – orientação NE |
| | ----- | Zn 32 | Sala de aula sob pilotis - orientação NE |
| | ----- | Zn 47 | Salas de aula - orientação NO |

Fonte: Autora (2017).

As zonas térmicas para avaliação foram definidas conforme a Figura 78 e 79.

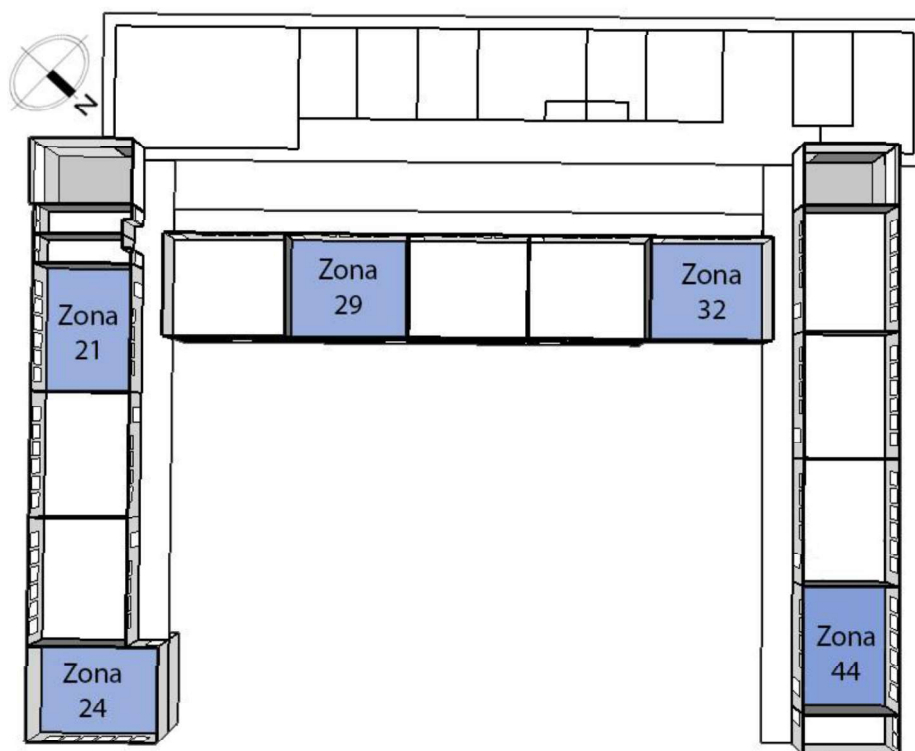
Em relação aos materiais de construção, na Tabela 30 são apresentados os materiais existentes na edificação, cujas características foram retiradas da NBR15220 (ABNT, 2005) e do relatório de Ordenes *et al.* (2003).

Figura 78 – Esquema zonas térmicas térreo



Fonte: Autora (2017).

Figura 79 - Esquema zonas térmicas 1º andar



Fonte: Autora (2017).

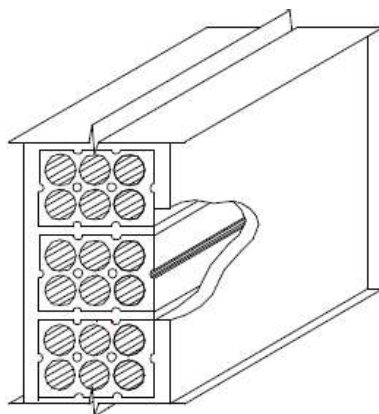
Tabela 30 – Descrição do caso base

| Piso | | | | | |
|--|----------------|-------------------------------|-------------------|---------------------------|------------------------------|
| Material | Espessura (cm) | Condutividade térmica (W/m-K) | Densidade (Kg/m³) | Calor específico (J/kg-K) | Resistência térmica (m²-K/W) |
| Laje de concreto | 12 | 1.75 | 2200 | 1000 | - |
| Reboco | 2.5 | 1.15 | 2000 | 1000 | - |
| Piso cerâmico | 1.0 | 0.9 | 1600 | 920 | - |
| Cobertura telha cerâmica e laje | | | | | |
| Telha | 1.0 | 1.05 | 2000 | 920 | - |
| Câmara de ar fluxo descend. (e > 5) | - | - | - | - | 0.21 |
| Laje de concreto | 12 | 1.75 | 2200 | 1000 | - |
| Cobertura telha de fibrocimento e forro de PVC | | | | | |
| Telha | 0.7 | 0.95 | 1900 | 840 | - |
| Câmara de ar fluxo descend. (e > 5) | - | - | - | - | 0.21 |
| Forro PVC | 0.3 | 0.2 | 1300 | 1000 | - |
| Câmara de ar fluxo descend. (1 < e < 2) | - | - | - | - | 0.15 |
| Forro PVC | 0.3 | 0.2 | 1300 | 1000 | - |
| Portas | | | | | |
| Madeira | 3.0 | 0.29 | 800 | 1340 | - |
| Paredes internas e externas | | | | | |
| Reboco | 2.5 | 1.15 | 2000 | 1000 | - |
| Tijolo cerâmico. 6 furos | 15 | 0.9 | 840 | 920 | - |
| Câmara de ar fluxo horizont. (2 < e < 5) | - | - | - | - | 0.16 |
| Tijolo cerâmico. 6 furos | 15 | 0.9 | 840 | 920 | - |
| Reboco | 2.5 | 1.15 | 2000 | 1000 | - |

Fonte: Autora (2017).

Os elementos de fechamento vertical, paredes externas e internas (Figura 80), e o forro de PVC foram inseridos nos dados de entrada do EnergyPlus como materiais equivalentes, com transmitância e capacidade térmicas de mesmo valor às definidas anteriormente.

Figura 80 – Parede de tijolos cerâmicos deitados



Fonte: ABNT (2005)

A absorptância solar das paredes foi calculada fazendo uma média ponderada entre a cor laranja (1,2m) e a cor creme (1,8m), que são as cores das fachadas. A absorptância solar das paredes e coberturas pode ser visualizada na Tabela 31.

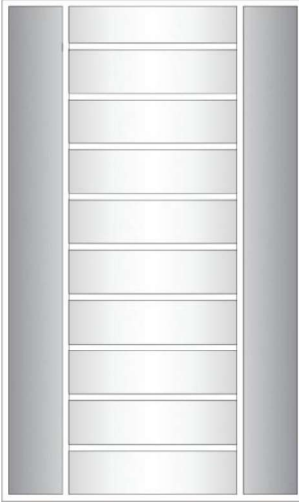
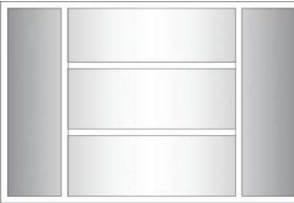
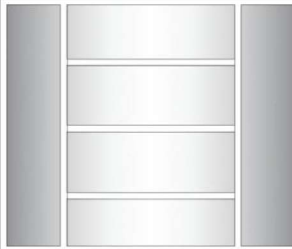
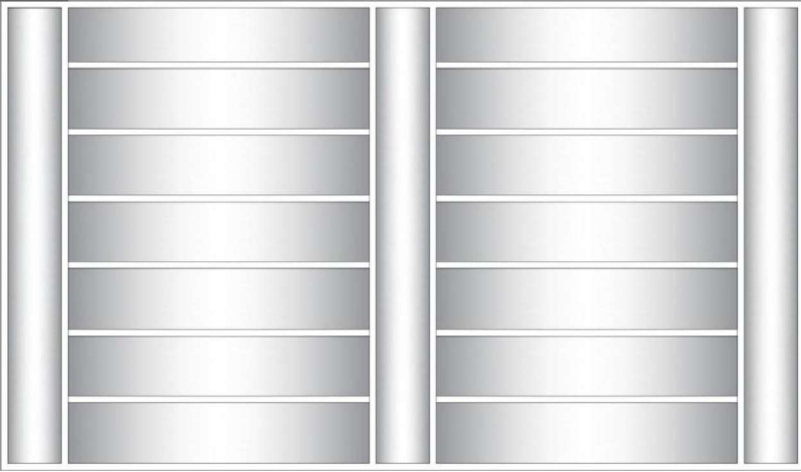
Tabela 31 – Absortância solar do caso base

| Material | Cor | Valor de α |
|--------------------|-----------------|-------------------|
| Paredes | Laranja e creme | 0,65 e 0,3 = 0,44 |
| Telha cerâmica | Cor natural | 0,75 |
| Telha fibrocimento | Cor acinzentada | 0,65 |

Fonte: Autora (2017).

As janelas são todas iguais, de vidro comum ($e = 3\text{mm}$), $FS = 0,87$, com montantes em ferro, e a área envidraçada corresponde a 19,86% da área de fachada. As janelas encontradas na edificação são basculantes de quatro tamanhos conforme Figura 81.

Figura 81 – Tamanho e abertura das Janelas

| | | |
|---|---|--|
|  |  |  |
| J1 – 0,9m x 1,5m x 1,0m | J2 – 0,9m x 0,6m x 1,9m | J3 – 0,9m x 0,76m x 1,44m |
| Abertura 44,44% | Abertura 37,04% | Abertura 43,86% |
|  | | |
| J4 – 2,4m x 1,4m x 1,1m | | |
| Abertura 53,57% | | |

Fonte: Autora (2017).

O funcionamento da escola foi modelado conforme o horário de funcionamento real: das 7:30h às 11:45h e das 13:15h às 17:30h, de segunda-feira a sexta-feira. Não há aula no período noturno, assim como a maioria das escolas da rede municipal. Como as aulas ocorrem durante o dia foi utilizada 50% da potência de iluminação instalada.

A ventilação do caso base ocorre apenas no período de funcionamento da escola. Foi empregada uma ventilação seletiva com controle de temperatura,

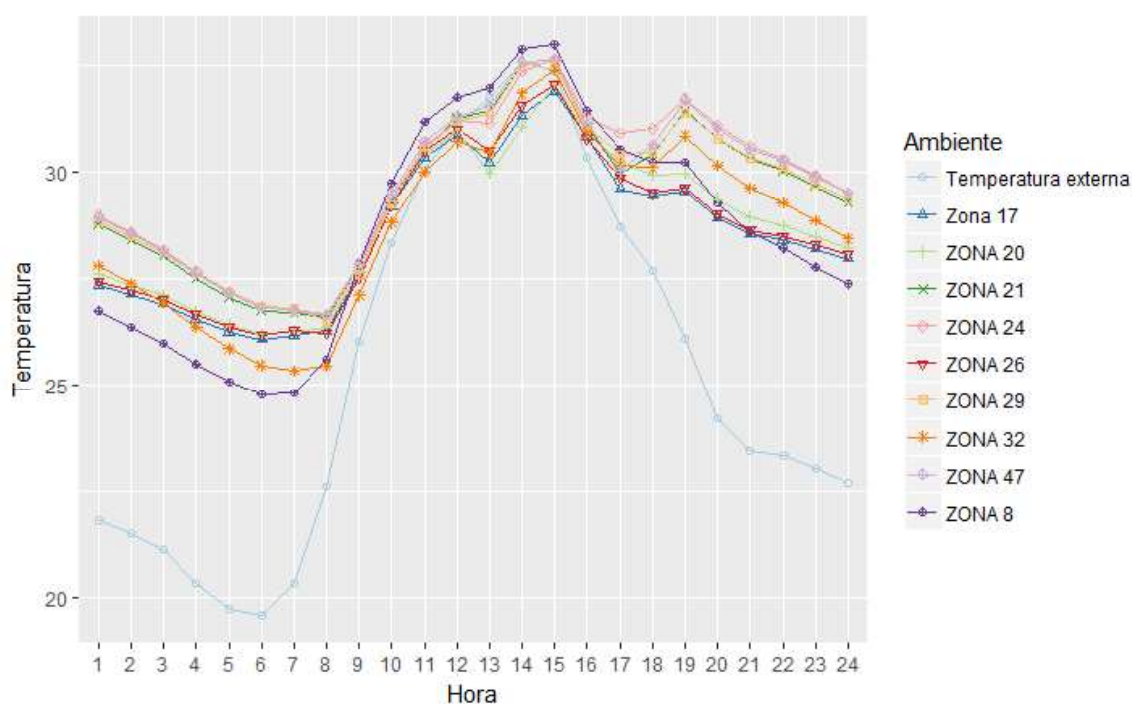
utilizando um *setpoint* de 20°C, que é a temperatura limite adotada para o conforto térmico.

A ocupação nas salas de aula é de 30 alunos por sala, conforme média encontrada no levantamento realizado. Na sala de aula pequena (Zona 8), foi utilizada uma ocupação de 25 alunos.

4.3.1 Temperatura do ar

De acordo com o arquivo climático, a temperatura máxima ocorre no dia 03 de março às 14h e é de 32,6 °C. A temperatura operativa é muito próxima entre as salas de aula, apesar de estarem em orientações diferentes (Figura 82).

Figura 82 -Valores de temperatura horária do ar para o dia 3 de março



Fonte: Autora (2017).

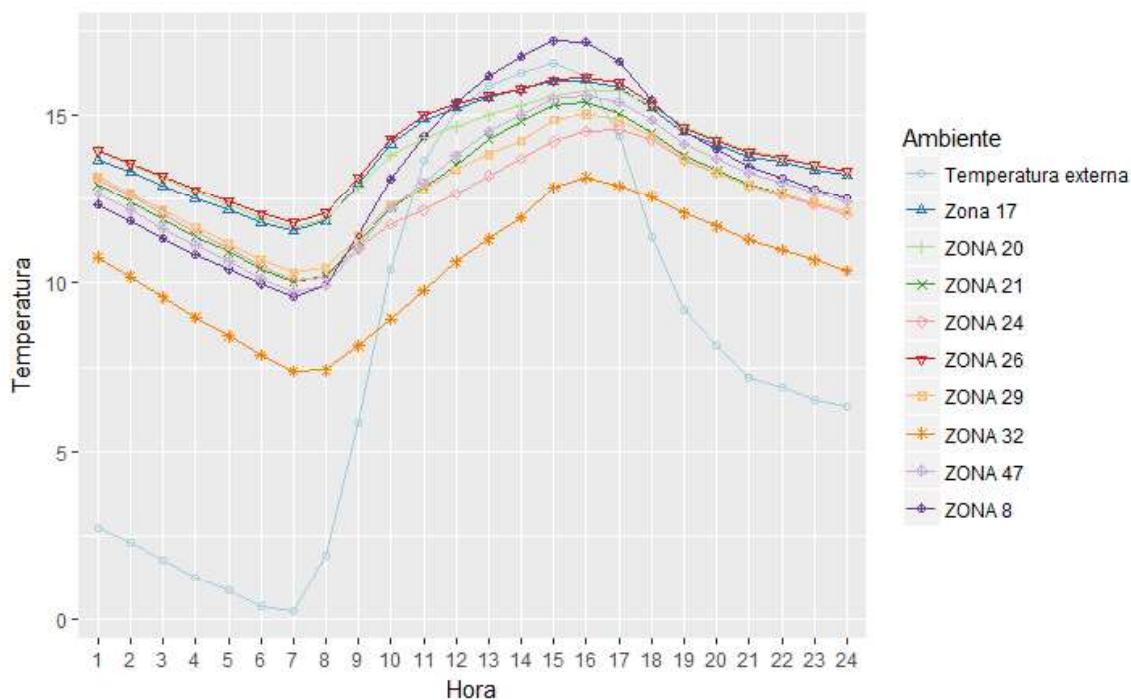
Há uma diferença entre o comportamento das salas do primeiro pavimento (Zonas 21, 24, 29 e 47) e do térreo (Zonas 17, 26 e 20). As salas do primeiro pavimento possuem temperaturas mais altas do que as do térreo em todos os horários do dia. Destaca-se a sala de aula 1, zona 08; essa apresenta as maiores temperaturas mínimas e máximas, é a única que possui cobertura com telha de fibrocimento e um pavimento único. A sala de aula 15, sob pilotis, zona 32, também

apresenta um desempenho diferente das demais com temperaturas mais baixas em relação às demais até às 16h. A partir de então as temperaturas delas são maiores do que as salas de aula do térreo, mas menores do que as do primeiro pavimento.

No horário de funcionamento, quando as janelas estão abertas, nota-se que as temperaturas internas seguem as externas, durante a noite as temperaturas internas se mantêm mais altas que as externas.

O dia mais frio do ano no arquivo climático em estudo é o dia 17 de junho; a temperatura mais baixa é de 0,26°C às 7h. As temperaturas mais altas ocorrem entre as 10h e 17h, período de insolação (Figura 83). As salas de aula não possuem uma grande amplitude térmica, sendo que nas mínimas a temperatura interna é maior que a externa e nas máximas a temperatura interna é levemente menor que a externa em quase todas as salas. A exceção é a sala 01, zona 08, em que nas máximas a temperatura interna é maior que a externa, no entanto quando as temperaturas são mais baixas, a temperatura interna dessa sala é menor que as demais salas.

Figura 83 - Valores de temperatura horária do ar para o dia 17 de junho



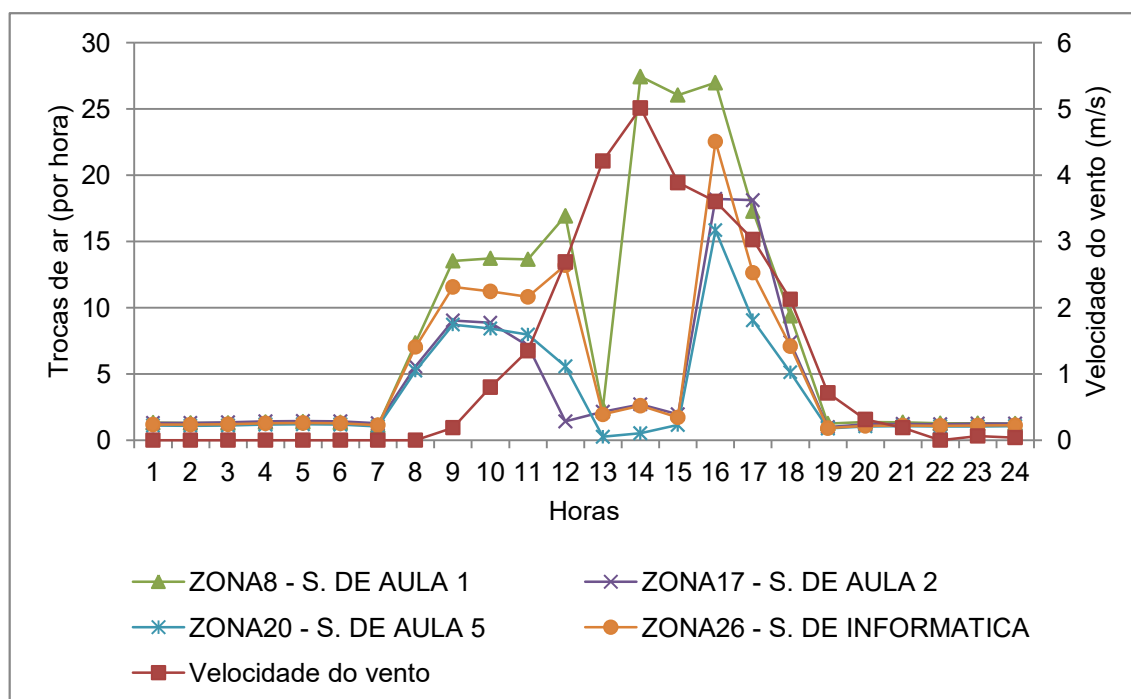
Fonte: Autora (2017).

As salas de aula do primeiro pavimento apresentam temperaturas mais baixas que as salas de aula do pavimento térreo, ao contrário do que ocorre no verão. Conclui-se então, que as salas do térreo devem possuir maior conforto térmico. Destaca-se no gráfico a zona 32, sala de aula 15, que apresenta temperaturas mais baixas que as demais salas em todos os horários.

4.3.2 Ventilação

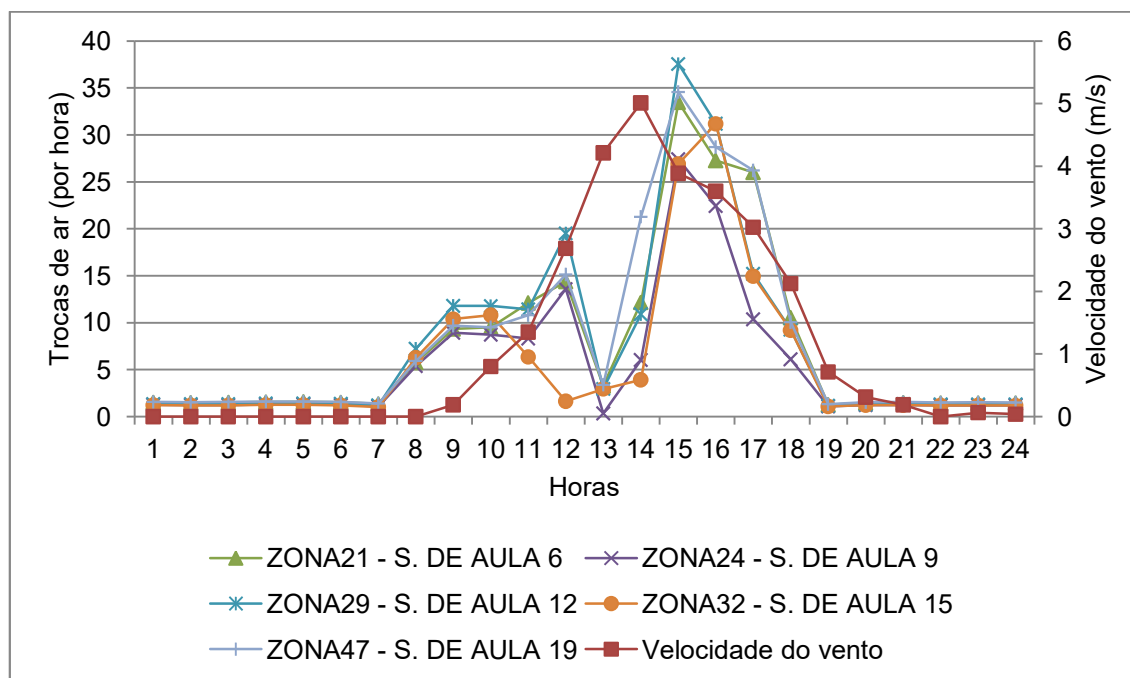
A ventilação adotada para o caso base é a ventilação seletiva durante o horário de funcionamento. Ela pode ocorrer entre as 7h e 11:45h e entre 13:15h e 17:15h. Para os outros horários, as trocas de ar podem ocorrer por infiltração, pois as janelas estão fechadas. Nas Figuras 84 e 85, são apresentados, hora a hora, os valores de renovações de ar para cada sala e a velocidade do vento para o dia 03 de março. Os valores de trocas de ar apresentados são referentes ao fluxo de ar externo que adentra pelas aberturas.

Figura 84 – Trocas de ar x velocidade do vento no dia 03 de março nas salas de aula do térreo



Fonte: Autora (2017).

Figura 85 - Trocas de ar x velocidade do vento no dia 03 de março nas salas de aula do primeiro pavimento



Fonte: Autora (2017).

Os valores de trocas de ar durante a noite ocorrem devido à infiltração já que as janelas estão fechadas, estes são muito pequenos e a velocidade do vento durante a madrugada é nula.

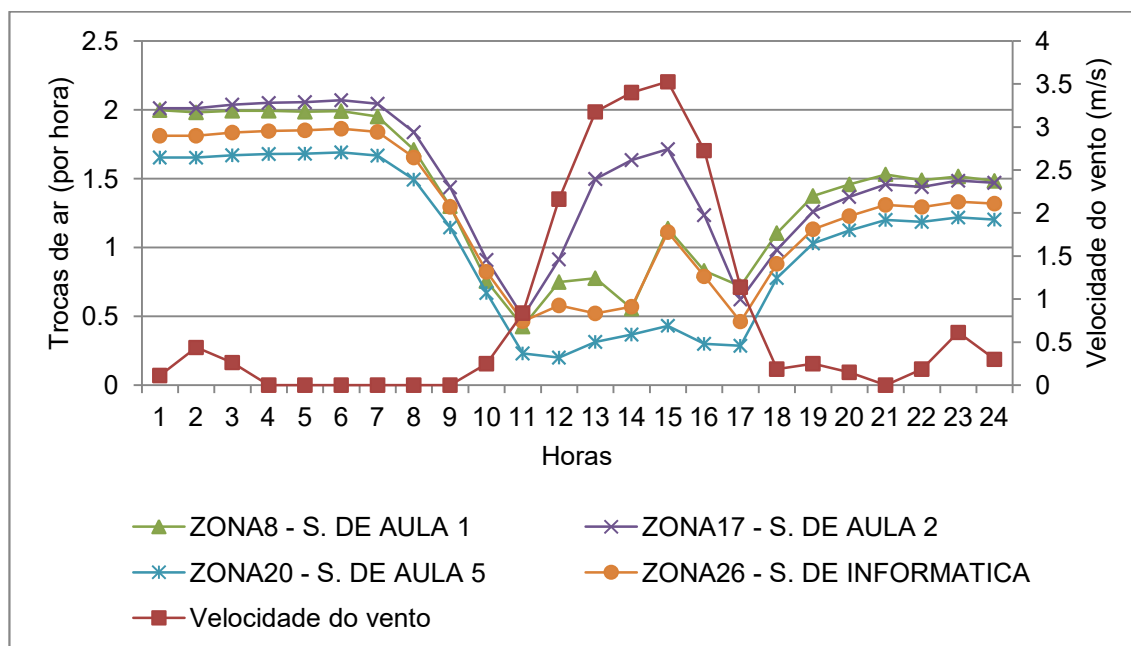
Ocorrem mais trocas de ar no período vespertino do que no matutino, com pico entre 15h e 16h, 37 trocas de ar, próximo ao pico da maior velocidade do vento, 5m/s. O aumento das trocas de ar segue o aumento da velocidade do vento.

As zonas térmicas do primeiro pavimento são mais bem ventiladas do que as do térreo, com mais trocas de ar. Nota-se, ainda, uma diferença de trocas de ar de acordo com a orientação solar. Sendo que as zonas térmicas que possuem mais trocas de ar são as de orientação sudoeste (zona 8), seguidas pela nordeste (zonas 26 e 29) levando em conta o pavimento em que estão localizadas, seguidas pela noroeste (zona 47) e por último as salas da zona sudeste (zonas 17 e 21). Esses dados vão ao encontro dos dados da Rosa dos Ventos desse arquivo climático (Seção 2).

Percebe-se que as zonas 20 e 24 (NE) possuem menos trocas de ar que as demais no mesmo pavimento; isso ocorre possivelmente por essas não apresentarem ventilação cruzada.

As trocas de ar no dia mais frio do ano, 17 de junho são bem menores, do que no dia mais quente, 03 de março (Figura 86 e 87). Nota-se também, uma menor velocidade do vento, sendo que a noite a ventilação é quase inexistente.

Figura 86 - Trocas de ar x velocidade do vento no dia 17 de junho nas salas de aula do térreo

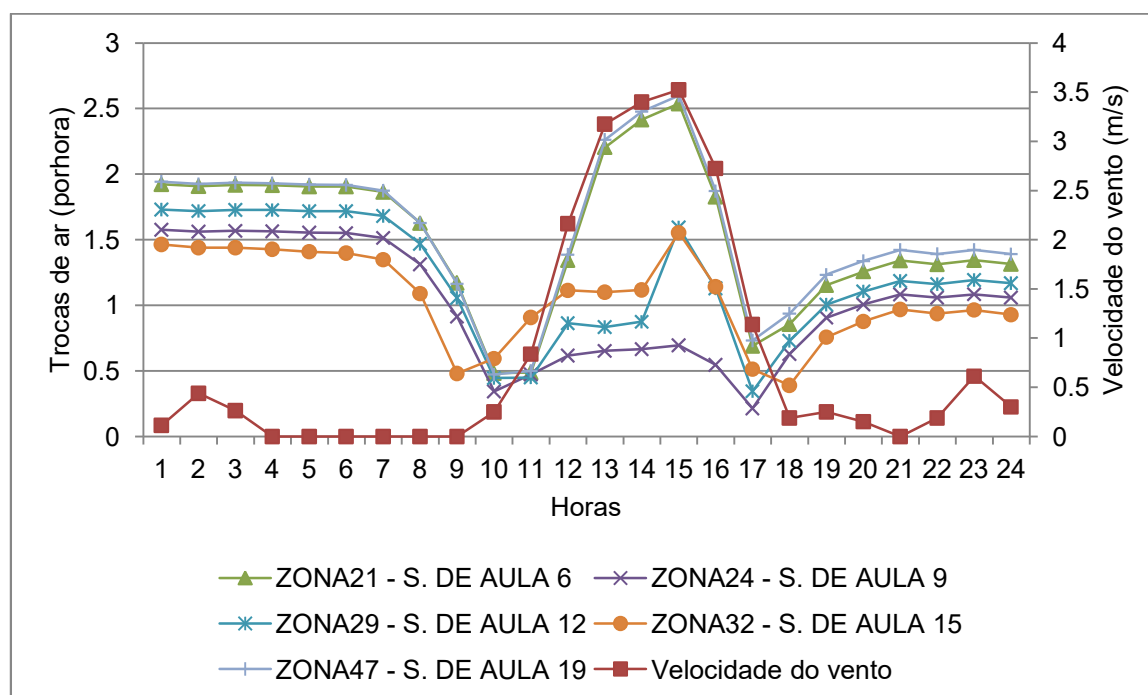


Fonte: Autora (2017).

As janelas, bem como as portas externas permanecem fechadas quando a temperatura é menor que 20°C, o que acontece no dia analisado. Portanto, nesse período somente pode ocorrer infiltração de ar para o interior dos ambientes através das frestas das portas e janelas. Desse modo, as trocas de ar acontecem pela diferença de temperatura entre os ambientes e o exterior que chega a atingir mais de 11°C.

Durante o horário de maior incidência solar, das 11h as 17h, as trocas de ar diminuem, pois a diferença de temperatura entre o interior da edificação e o exterior diminui, sendo que esses horários se configuram como pontos de queda.

Figura 87 - Trocas de ar x velocidade do vento no dia 17 de junho nas salas de aula do primeiro pavimento



Fonte: Autora (2017).

A orientação com maior número de trocas de ar é a noroeste (zona 47), seguida pela sudeste (zonas 21 e 17), sudoeste (zona 8) e por último a nordeste. Nota-se ainda, que as salas do primeiro pavimento tendem a ter mais trocas de ar do que as do térreo. Percebe-se que as zonas 20 e 24 possuem menos trocas de ar que as demais no mesmo pavimento; isso ocorre possivelmente por essas não apresentarem ventilação cruzada.

4.4 APLICAÇÃO DAS ESTRATÉGIAS BIOCLIMÁTICAS

4.4.1 Ventilação

A norma NBR15220 (ABNT, 2005) recomenda que as aberturas para ventilação sejam médias, ou seja, entre 15% e 25% da área de piso. Essa condição é atendida em todas as salas de aula, os cálculos podem ser encontrados no Apêndice C. A norma também recomenda o uso de ventilação cruzada como estratégia para a Zona Climática 5. Essa estratégia é utilizada em 89.5% das salas de aula. Assim, como forma de melhorar a ventilação das salas de aula, utilizou-se

uma ventilação seletiva com controle de temperatura durante todo o dia e durante toda a noite, aplicando um *setpoint* de 20°C.

4.4.2 Paredes externas

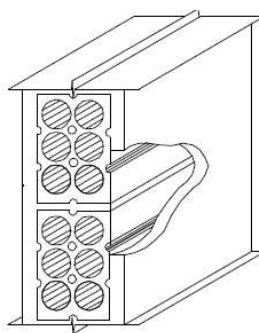
A norma recomenda paredes leves e refletoras, conforme Tabela 32. As paredes existentes se encontram fora da norma no quesito do atraso térmico, que é maior que o recomendado. Propôs-se, desse modo, uma parede mais leve, conforme a recomendação da norma, com tijolo cerâmico de seis furos circulares, assentados na menor dimensão, com espessura de 10cm e argamassa de emboço de 2,5cm de cada lado, totalizando 15cm de espessura (Proposta 1 - Figura 88). Como o fator solar estava fora da norma, diminuiu-se a absorvância solar para 0,4, para que todos os quesitos estivessem dentro das recomendações da NBR 15220 (ABNT, 2005).

Tabela 32 – Valores para as paredes externas

| | Transmitância térmica - U W/m ² .K | Atraso térmico - ϕ Horas | Fator solar - Fso % | Absorvância solar - α |
|-------------------|---|-------------------------------------|------------------------|---------------------------------|
| Norma | $U \leq 3,6$ | $\leq 4,3$ | $FS_o \leq 4,0$ | - |
| Existente | $U = 1,92$ | $\phi = 4,8$ | $FS_o = 3,38$ | $\alpha = 0,44$ |
| Proposta 1 | $U = 2,28$ | $\phi = 3,7$ | $FS_o = 3,65$ | $\alpha = 0,40$ |
| Proposta 2 | $U = 1,0$ | $\phi = 10,8$ | $FS_o = 1,76$ | $\alpha = 0,44$ |

Fonte: Autora, 2017.

Figura 88 – Proposta 1

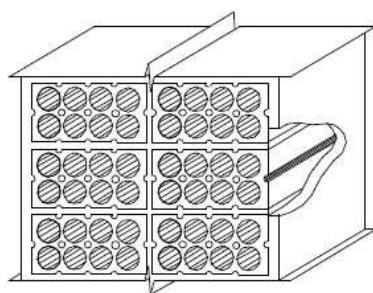


Fonte: ABNT(2005)

A proposta 2 de parede externa possui uma baixa transmitância térmica, 1,0 W/m².K e um alto atraso térmico, 10,8 horas, muito superior ao da norma, já que outros estudos (Seção 2) apontaram que paredes com maior atraso térmico possuem um melhor desempenho. Essa é uma parede dupla com tijolos de oito furos circulares assentados na maior dimensão. A espessura do tijolo é de 10x20x20cm, a argamassa de emboço é igual a 2,5cm de cada lado e a argamassa de assentamento é de 1,0cm. A parede possui uma espessura total de 46cm (Figura 89).

Ainda no quesito das paredes externas, foi proposto um caso com absorvância, $\alpha = 0,3$, menor que a existente.

Figura 89 – Proposta 2



Fonte: ABNT(2005)

4.4.3 Paredes internas

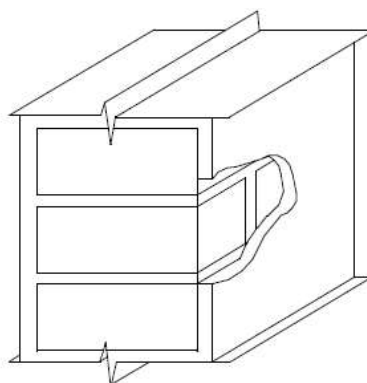
Outra estratégia recomendada é a alta inércia térmica das paredes internas. As paredes existentes apresentam atraso térmico inferior ao recomendado pela norma, assim propõe-se uma parede com mais inércia térmica e maior atraso térmico (Tabela 33). A parede proposta foi referenciada no trabalho de Grigoletti e Sattler (2010) e é composta por alvenaria de tijolos maciços (0,23 m x 0,11 m x 0,06 m), com argamassa de assentamento de 0,01m, argamassa de revestimento em ambos os lados, espessura 0,25 m (Figura 88).

Tabela 33 – Valores para as paredes internas

| | Transmitância térmica - U W/m ² .K | Atraso térmico – φ Horas | Fator solar – Fso % | Absortância solar - α |
|------------------|---|--|---------------------------|---------------------------------|
| Norma | $U \leq 2,2$ | $\varphi \geq 6,5$ | $FS_o \leq 3,5$ | - |
| Existente | $U = 1,92$ | $\varphi = 4,8$ | $FS_o = 3,38$ | $\alpha = 0,44$ |
| Proposta | $U = 1,84$ | $\varphi = 7,78$ | $FS_o = 2,21$ | $\alpha = 0,3$ |

Fonte: Autora (2017).

Figura 90 – Parede tijolo maciço

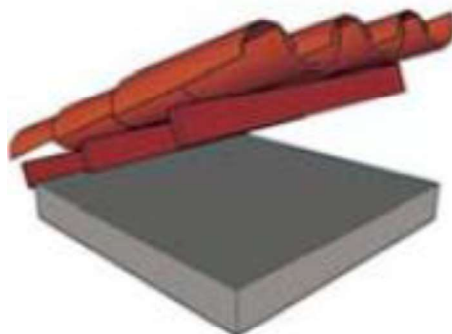


Fonte: ABNT (2005)

4.4.4 Cobertura

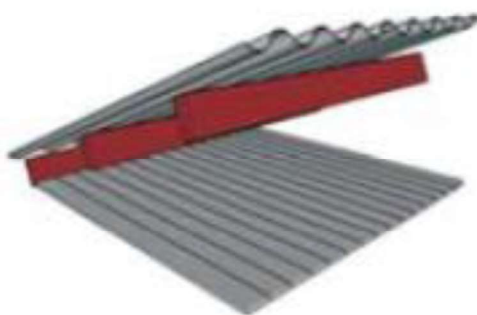
A cobertura é um dos fatores mais importantes no desempenho térmico das edificações. A cobertura presente na maior parte da edificação é a com telhas de cerâmica e laje (Figura 91). Essa combinação está acima do atraso térmico recomendado pela norma. A outra cobertura presente apenas em uma sala de aula é a com telha de fibrocimento e forro de PVC (Figura 92). Essa combinação está dentro da norma, no entanto, acredita-se que seu desempenho não será adequado para o inverno, visto que o atraso térmico é muito baixo. Ainda assim, testou-se um caso colocando toda a edificação com essa cobertura (Tabela 34).

Figura 91 – Cobertura telha cerâmica e laje 12cm



Fonte: Caixa (2010)

Figura 92 – Cobertura fibrocimento e forro de PVC



Fonte: Caixa (2010)

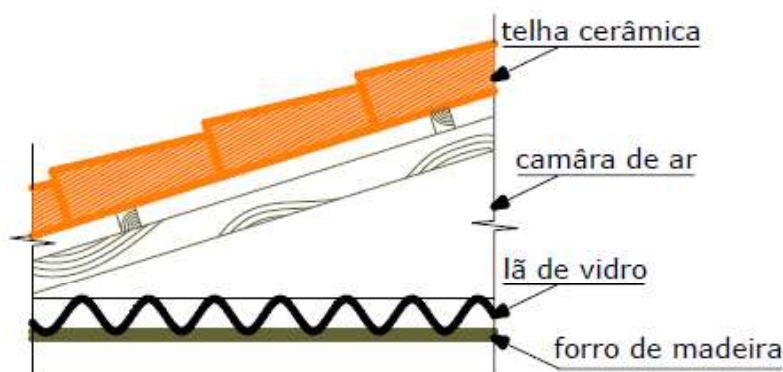
Tabela 34 - Valores para cobertura

| | Transmitância térmica - U W/m ² .K | Atraso térmico - ϕ Horas | Fator solar Fso % | Absortância solar - α |
|-----------------------------------|---|-------------------------------------|-------------------------|---------------------------------|
| Norma | $U \leq 2,0$ | $\phi \leq 3,3$ | $FS_o \leq 6,5$ | - |
| Existente Cerâmica | $U = 1,92$ | $\phi = 3,6$ | $FS_o = 5,76$ | $\alpha = 0,75$ |
| Existente fibrocimento | $U = 1,71$ | $\phi = 0,81$ | $FS_o = 4,42$ | $\alpha = 0,65$ |
| Proposta 1 | $U = 0,62$ | $\phi = 3,1$ | $FS_o = 1,86$ | $\alpha = 0,75$ |

Fonte: Autora (2017).

A proposta para a edificação consistiu em uma cobertura com telha de cerâmica, 1,0cm de espessura, e lã de vidro, espessura de 5,0cm, sobre forro de madeira, 0,7cm de espessura (Figura 93).

Figura 93 – Cobertura telha cerâmica, forro de madeira e lã de vidro



Fonte: Matos (2007)

Ainda no quesito da cobertura foram propostos dois casos alterando a absorvância solar no caso base. Um caso com $\alpha=0,4$ e outro com $\alpha=0,2$.

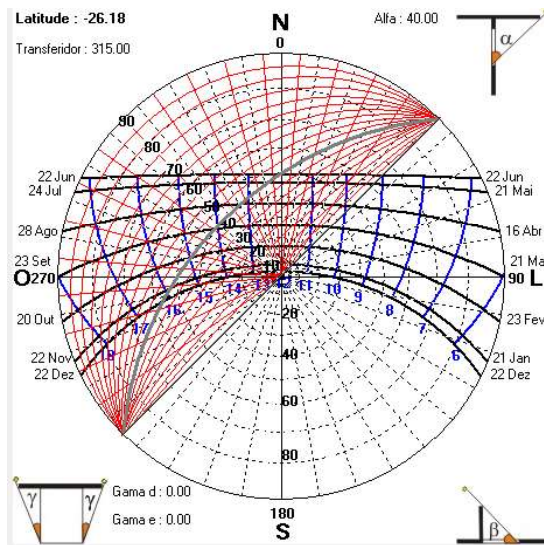
4.4.5 Sombreamento de aberturas

Outra recomendação da norma para a zona bioclimática em estudo é o sombreamento de aberturas. Para o correto dimensionamento dos elementos de proteção solar foram elaboradas as máscaras de sombra de cada orientação visando proteger a edificação da incidência solar direta entre as 9h e as 16h nos meses de verão.

Para a orientação Noroeste o recomendado são elementos de proteção solar horizontais num ângulo de 40° (Figura 94). O beiral forma um ângulo de 25° com a parte inferior da janela. Assim, foram projetados brises de 75cm acima das aberturas, atendendo à angulação necessária para o sombreamento.

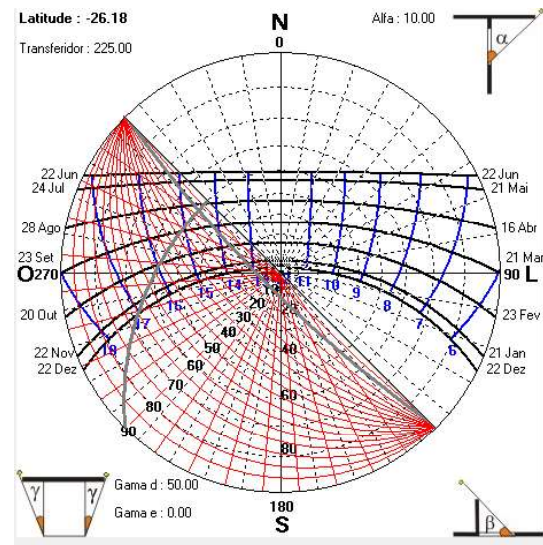
Para a orientação Sudoeste e Sudeste o ideal são elementos de proteção solar horizontais se estendendo além da abertura formando um ângulo de 50° e 40° respectivamente (Figura 95 e 97). Nessas orientações, o beiral existente de 80cm está provendo o sombreamento necessário, já que ele é contínuo.

Figura 94 – Máscara de sombra fachada noroeste



Fonte: Autora (2017)

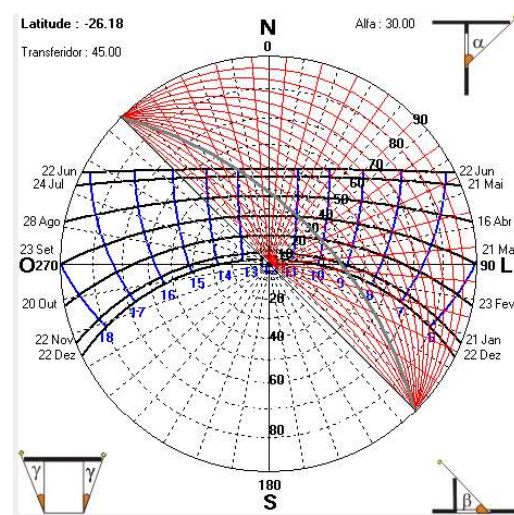
Figura 95 – Máscara de sombra fachada sudoeste



FONTE: AUTORA (2017)

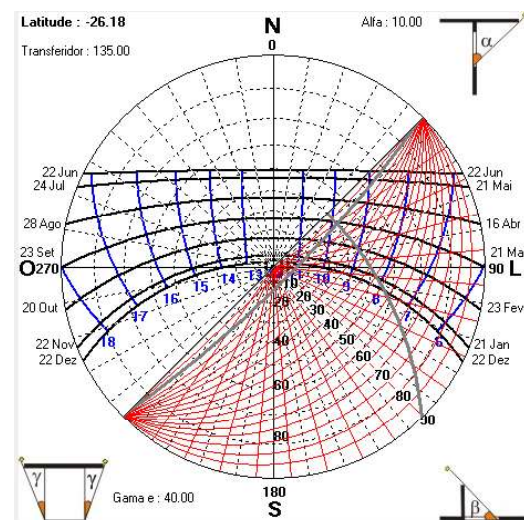
Para a orientação Nordeste foram propostos brises em cima da abertura e na metade dela com 52 cm, de forma a atender a angulação de 40°, apresentada na máscara de sombra (Figura 96).

Figura 96 - Máscara de sombra fachada nordeste



Fonte: Autora (2017)

Figura 97 - Máscara de sombra fachada sudeste



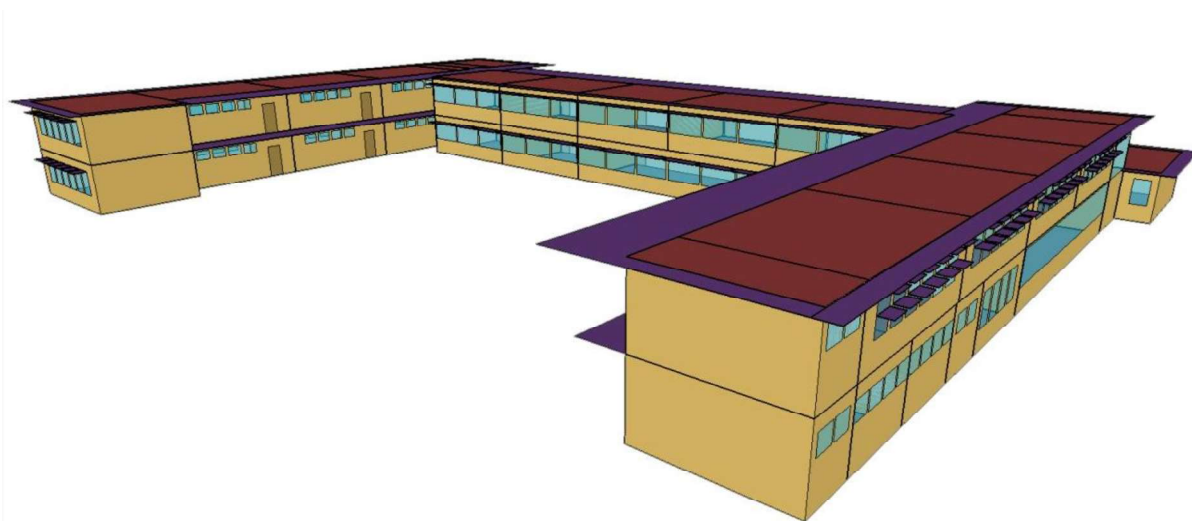
Fonte: Autora (2017)

O tamanho e a disposição dos brises podem ser visualizados na Figura 96. Apesar do dimensionamento dos brises de acordo com as máscaras de sombra, os

beirais e circulações cobertas existentes interferem na angulação dos elementos de proteção solar. Essa intervenção provê um sombreamento desejado em algumas horas do dia e épocas do ano, no entanto ela também faz um sombreamento indesejado em alguns períodos do ano.

Desse modo, foi feita uma simulação sem sombreamento para verificar a influência dos elementos de sombreamento existentes (beirais e circulações cobertas).

Figura 98 – Maquete com brises



Fonte: Autora (2017).

4.4.6 Resumo das simulações paramétricas

Nessa seção foram apresentadas as características do caso base e as descrições dos parâmetros das alternativas adotadas nas simulações. A Tabela 35 apresenta o resumo dos valores adotados para cada variável.

Tabela 35 – Resumo das alternativas de simulação

| Parâmetros | Caso Base | Alternativas |
|------------------------|---|--|
| Ventilação | Durante horário de funcionamento | Durante 24h |
| Paredes externas | Tijolos cerâmicos 6 furos assentados na maior dimensão (20cm) | Tijolos 6 furos assentados na menor dimensão (15cm) Parede dupla, tijolos 8 furos, assentados maior dimensão (46cm) |
| | $\alpha = 0.44$ | $\alpha = 0.3$ |
| Paredes internas | Tijolos cerâmicos 6 furos assentados na maior dimensão (20cm) | Tijolos maciços 23cm (25cm) |
| Cobertura | Parte com telha fibrocimento e forro de PVC e parte com telha cerâmica e laje de 12cm | Toda a edificação com telha fibrocimento e forro de PVC Telha cerâmica com lâ de vidro sobre forro de madeira |
| | Fibrocimento - $\alpha = 0.65$ | $\alpha = 0.4$ |
| | Cerâmica - $\alpha = 0.75$ | $\alpha = 0.2$ |
| Sombreamento aberturas | de Beiras de 80cm | Sem sombreamento Com brises - máscara de sombra |

Fonte: Autora (2017).

4.5 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

A influência da variação de cada parâmetro foi analisada através de simulações paramétricas, conforme descrito na seção anterior. A seguir são apresentados os resultados de graus-hora e conforto térmico para a alteração do

tipo das paredes e cobertura, assim como sua absorção solar e ainda a análise das estratégias de sombreamento e ventilação.

4.5.1 Graus-hora de resfriamento

Comparando o caso base com as mudanças dos parâmetros obtendo como resultados os graus-hora de resfriamento (Tabela 36), as paredes mais claras apresentaram um desempenho melhor em todas as salas de aula, de 6% a 19% de redução em relação ao caso base, o que era esperado, já que as paredes claras absorvem menos calor e são recomendadas tanto pela NBR15220 (ABNT, 2005) quanto pelo RTQ-C (Brasil, 2010). As paredes externas mais leves, com 15cm, produziram o mesmo efeito, num menor grau com redução de 3% a 9% em relação ao caso base. Essas paredes encontram-se dentro dos índices recomendados pela norma e obtiveram um desempenho satisfatório para o calor, visto que elas não mantêm o calor dentro da edificação.

Já as paredes externas duplas, que possuem valores de atraso térmico fora da indicação da norma, aumentaram os graus-hora de resfriamento, houve um aumento de 1,5% a 19%. Acredita-se que isso tenha ocorrido pela alta inércia térmica dessas paredes. No caso das paredes internas pesadas, recomendadas para o inverno, apresentaram um melhor desempenho mesmo para o desconforto por calor, exceto na zona 17. Esse comportamento das paredes internas, distinto ao das externas, mesmo com propriedades similares (alta massa térmica e grande atraso térmico) pode ter ocorrido pelo fato de as paredes externas, mais expostas à insolação direta, acumularem mais calor, o que torna mais difícil a sua perda num clima úmido.

Comparando o caso base com a simulação sem sombreamento, todas as zonas apresentaram um aumento nos graus-hora para resfriamento, que variou de 4,28% a 32,45% em relação ao caso base, já que o sombreamento impede a entrada de calor. No caso com o uso dos brises houve uma diminuição no número de graus-hora para resfriamento, a redução foi de 6,7% a 15,7% em relação ao caso base, essa redução já era esperado, pois essa é uma das três principais estratégias recomendadas na carta bioclimática de Givoni (seção 2).

Tabela 36 – Resultado das simulações para graus-hora de resfriamento

| Graus-horas Resfriamento (% de redução de Graus-hora de Resfriamento em relação ao caso base) | | | | | | | | | |
|---|---------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|
| Orientação | SO | SE | NE | | | NO | | | |
| Pavimento | Térreo | Térreo | 1º andar | Térreo | 1º andar | Térreo | 1º andar | Pilotis | 1º andar |
| Zonas | Zona 8 | Zona 17 | Zona 21 | Zona 20 | Zona 24 | Zona 26 | Zona 29 | Zona 32 | Zona 47 |
| Caso base | 4379,11 | 2703,10 | 5342,49 | 2932,23 | 5436,25 | 2805,53 | 5103,21 | 2878,39 | 5518,62 |
| Paredes $\alpha=0.3$ | 9,27% | 13,01% | 8,47% | 19,84% | 12,76% | 11,65% | 6,00% | 8,12% | 7,46% |
| Paredes 15cm | 3,01% | 8,48% | 5,47% | 9,32% | 7,11% | 8,15% | 5,33% | 2,58% | 5,14% |
| Parede duplas | -6,94% | -19,06% | -10,56% | -19,71% | -14,25% | -18,75% | -12,36% | -1,44% | -10,33% |
| Par. inter.maciça | 6,37% | -5,44% | 1,46% | 4,31% | 7,56% | 2,55% | 2,86% | 3,08% | 3,73% |
| Sem sombream. | -9,29% | -19,43% | -4,8% | -9,94% | -2,13% | -32,45% | -24,84% | -19,05% | -22,23% |
| Caso brises | ----- | ----- | ----- | 13,24% | 9,88% | 15,69% | 9,15% | 5,69% | 5,88% |
| Cob.fibrocimento | ----- | 10,47% | 8,46% | 8,99% | 6,68% | 10,66% | 9,40% | -0,61% | 7,70% |
| Cob. lâ de vidro | 20,86% | 16,57% | 20,94% | 14,83% | 20,40% | 16,62% | 23,39% | 27,83% | 19,13% |
| Cobertura $\alpha=0.4$ | 36,86% | 32,76% | 48,86% | 30,27% | 48,10% | 32,03% | 50,39% | 52,04% | 46,47% |
| Cobertura $\alpha=0.2$ | 61,89% | 50,93% | 71,85% | 47,45% | 71,00% | 49,89% | 73,53% | 74,04% | 69,04% |
| Ventilação | 46,91% | 68,31% | 59,48% | 65,85% | 58,88% | 68,05% | 62,14% | 48,51% | 59,73% |

Fonte: Autora (2017).

| | |
|--|------------------------|
| | Caso base |
| | Melhor que o caso base |
| | Pior que o caso base |

Na simulação paramétrica da cobertura, a de fibrocimento mostrou-se mais adequada para o calor do que o caso base, com reduções que vão de 6,7% a

10,7%, exceto na zona 32, que está sob pilotis (aumento de 0,61%). No entanto, a cobertura com forro de madeira e lã de vidro sob o forro apresentou um comportamento melhor do que a de fibrocimento, redução nos graus-horas de resfriamento de 14,8% a 27,8%, possivelmente por ela ser mais isolada e com um maior atraso térmico; o que vai de encontro com o artigo de Bogo (2008) que defende que a NBR15220 (ABNT, 2005) possui índices de transmitância térmica muito altos, devendo esses ser mais restritivos. Assim, as duas coberturas estão com índices dentro da recomendação da norma, no entanto a cobertura mais isolada apresenta um desempenho muito superior a outra.

No quesito da absorvância solar, tanto o caso com $\alpha=0,4$ e com $\alpha=0,2$, apresentaram bons resultados, no entanto com a cor mais clara houve uma diferença mais expressiva em relação ao caso base, redução de 47,5% a 74% contra uma redução de 30,3% a 52% no caso da cobertura com $\alpha=0,4$. Essa situação também é encontrada no estudo de Matos (2007), no qual a cobertura mais clara possui uma melhor performance no verão.

Com o emprego da ventilação seletiva noturna, houve uma diminuição de 46,9% a 68,8% nos graus-hora de resfriamento, ou seja, essa estratégia se mostrou eficaz contra o calor, coerente com o que está na carta bioclimática e com outros estudos realizados como Tian e Choudhary (2012) e Yildiz e Arsan (2011).

4.5.2 Graus-hora de aquecimento

Ao analisar os graus-hora de aquecimento (Tabela 37), percebeu-se que algumas estratégias eficazes para o resfriamento surtiram o efeito contrário no aquecimento. É o caso das paredes com menor absorvância solar e das paredes mais leves, ambas aumentaram os graus-hora de aquecimento, já que essas se constituem como estratégias próprias para o calor.

As paredes duplas melhoraram o desempenho da edificação no frio, assim como as paredes internas maciças, que obtiveram um aumento do conforto tanto para o calor quanto para o frio. As duas paredes possuem o mesmo princípio de aumento de massa térmica, o que é uma estratégia eficaz para amenizar o desconforto por frio e é a principal estratégia recomendada na análise da carta bioclimática (42,26%). Isso comprovou que apesar da zona bioclimática 5 se configurar como uma zona com predominante desconforto por calor, ela também

apresentou índices consideráveis de desconforto por frio. Logo, deve haver um equilíbrio entre a aplicação de estratégias tanto para o calor quanto para o frio.

Tabela 37 - Resultado da simulações para graus-hora de aquecimento

| Graus-horas de Aquecimento (% de redução de Graus-hora de Aquecimento em relação ao caso base) | | | | | | | | | |
|--|---------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|---------|
| Orientação | SO | SE | NE | | | NO | | | |
| Pavimento | Térreo | Térreo | 1º andar | Térreo | 1º andar | Pilotis | 1º andar | | |
| Zonas | Zona 8 | Zona 17 | Zona 21 | Zona 20 | Zona 24 | Zona 26 | Zona 29 | Zona 32 | Zona 47 |
| Caso base | 3802,05 | 2443,42 | 3388,95 | 2609,54 | 3710,09 | 2328,83 | 3337,48 | 6491,38 | 3300,76 |
| Paredes $\alpha=0.3$ | -7,47% | -9,23% | -6,80% | -13,67% | -9,88% | -8,86% | -4,81% | -3,47% | -6,23% |
| Paredes 15cm | -10,28% | -13,36% | -10,14% | -18,45% | -14,05% | -12,96% | -8,79% | -5,20% | -9,64% |
| Parede duplas | 18,95% | 29,87% | 22,50% | 37,93% | 30,40% | 29,10% | 20,98% | 11,38% | 21,18% |
| Par. inter.maciça | 7,48% | 6,23% | 4,48% | 4,09% | 2,22% | 5,84% | 4,24% | 1,40% | 3,33% |
| Sem sombream. | 4,62% | 7,10% | 2,66% | 5,47% | 1,53% | 14,33% | 10,90% | 4,07% | 8,77% |
| Caso brises | ----- | ----- | ----- | -3,49% | -3,15% | -4,53% | -3,88% | -1,14% | -5,80% |
| Cob.fibrocimento | ----- | -9,08% | -44,63% | -8,72% | -39,87% | -9,77% | -45,05% | -30,85% | -45,64% |
| Cob. lã de vidro | 34,30% | 9,71% | 3,83% | 8,39% | 3,29% | 9,65% | 4,03% | -7,10% | 4,22% |
| Cobertura $\alpha=0.4$ | -19,90% | -25,55% | -41,67% | -23,30% | -37,87% | -26,17% | -42,58% | -24,36% | -39,43% |
| Cobertura $\alpha=0.2$ | -39,75% | -45,75% | -75,44% | -41,61% | -68,12% | -46,84% | -76,76% | -42,24% | -71,56% |
| Ventilação | -13,40% | -14,44% | -8,20% | -13,77% | -7,70% | -14,91% | -8,46% | -2,22% | -28,29% |

Fonte: Autora (2017).

| | |
|--|------------------------|
| | Caso base |
| | Melhor que o caso base |
| | Pior que o caso base |

O caso sem sombreamento melhorou o desempenho da edificação no frio, com índices de redução de graus-hora de aquecimento 1,5% a 10,9% em relação ao caso base, pois permitiu maior insolação nos ambientes. O caso com brises aumentou o número de graus-hora para aquecimento de 1,15% a 5,8%, pois os elementos de proteção solar apesar de terem sido dimensionados para bloquear o sol no verão nos horários de pico, também bloqueiam o sol em alguns horários no inverno onde esse é desejado.

A cobertura de fibrocimento que se mostrou adequada ao calor, aumentou os graus-hora de aquecimento num intervalo de 9,1% a 45,6%, evidenciando novamente que o desconforto por frio deve ser considerado na região da cidade de Joinville. A cobertura com forro de madeira e lã de vidro por ser bastante isolada foi eficiente tanto para o calor, quanto para o frio. Essa diminuiu os graus-hora para aquecimento em todos os ambientes (redução de 3,3% a 34% em relação ao caso base), exceto na zona 32 (aumento de 7,1%), que está sob pilotis. Essa zona apresentou um comportamento diferente das demais em diversos casos.

As coberturas com cores mais claras, $\alpha=0,4$ e $\alpha=0,2$, aumentaram os graus-hora para aquecimento, sendo que o $\alpha=0,2$ apresentou pior desempenho (aumento de 39,7% a 76,7%) que o $\alpha=0,4$ (aumento de 19,9% a 42,6%), o que era esperado, já que em alguns momentos do ano é interessante que a cobertura absorva o calor e não reflita, que é o comportamento que ocorre com o uso das cores claras.

A ventilação seletiva noturna também aumentou os graus-hora para aquecimento, mas num grau menor que a absorvência da cobertura (2,2% a 28,29% aumento de graus-hora em relação ao caso base), pois quando a temperatura cai abaixo de 20°C as aberturas se fecham para evitar que a edificação perca mais calor e cause ou aumente o desconforto por frio.

Como em diversos casos, as estratégias apresentaram comportamentos divergentes para o frio e o calor, foram utilizados indicadores que pudessem considerar a estratégia ao longo do ano, já que não é possível, por exemplo, trocar a cor da cobertura ou o material das paredes de acordo com a estação climática. A norma privilegia as estratégias que visam amenizar o calor, no entanto há desconforto tanto no verão quanto no inverno. Assim, para determinar que estratégias ou materiais que devem ser priorizados nas edificações escolares empregou-se a somatória dos graus-hora e as horas anuais em conforto.

4.5.3 Graus-hora total

A análise de graus-hora total, ou seja, a somatória dos graus-hora para resfriamento e aquecimento nos permite ter uma compreensão de como a estratégia se comporta ao longo de todo o ano (Tabela 38).

As paredes com absorvância solar de 0,3, apesar de serem adequadas apenas no verão, apresentaram um melhor desempenho do que as paredes do caso base com redução de graus-hora total de até 4%. Isso vai ao encontro das normas e manuais vigentes para a região (NBR15220, NBR15775, RTQ-C) que descreve que paredes com baixa absorvância solar proporcionam maiores índices de conforto e menos gasto energético.

As paredes externas mais leves com 15cm, apesar de estarem dentro da recomendação na NBR15220 (ABNT, 2005) e se mostrarem eficientes para o calor, na somatória dos graus-horas apresentam um desempenho pior que o caso base, que é de paredes com 20cm, os aumentos de graus-hora foram de até 3,8%. As paredes externas duplas, com alta inércia térmica, possuem atraso térmico maior do que recomendação da norma, mas proporcionam um melhor comportamento que o caso base, com reduções de graus-hora de até 7,5%. Essa contradição em relação à norma também ocorreu no estudo de Matos (2007) em Florianópolis e em algumas cidades estudadas por Ferreira, Souza e Assis (2017), nos quais a recomendação também era de paredes leves, mas as paredes pesadas obtiveram um melhor desempenho.

As paredes internas maciças, também com alta inércia térmica, recomendadas pela norma, apresentaram melhoria em relação ao caso base, com reduções de 5,4% nos graus-hora total. Esse comportamento comprova que paredes com elevada massa térmica devem ser aplicadas em toda a edificação.

Em relação ao caso sem sombreamento e ao com brises, esse último apresentou-se mais eficiente em relação ao sem sombreamento. Ou seja, apesar dos elementos de proteção solar aumentarem um pouco os graus-hora de aquecimento, eles possuem um efeito benéfico considerando o ano inteiro, o que vai ao encontro da NBR15220 (ABNT, 2005) que preconiza sombreamento das aberturas.

Tabela 38 - Resultado da simulações com a somatória dos graus-hora

| Graus-horas Total (% de redução de Graus-hora Total em relação ao caso base) | | | | | | | | | | |
|--|---------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|--|
| Orientação | SO | SE | NE | | | NO | | | | |
| Pavimento | Térreo | Térreo | 1º andar | Térreo | 1º andar | Térreo | 1º andar | Pilotis | 1º andar | |
| Zonas | Zona 8 | Zona 17 | Zona 21 | Zona 20 | Zona 24 | Zona 26 | Zona 29 | Zona 32 | Zona 47 | |
| Caso base | 8181,15 | 5146,52 | 8731,44 | 5541,77 | 9146,34 | 5134,36 | 8440,69 | 9369,6 | 8819,38 | |
| Paredes $\alpha=0.3$ | 1,49% | 2,45% | 2,54% | 4,06% | 3,57% | 2,34% | 1,73% | 0,09% | 0,00% | |
| Paredes 15cm | -3,17% | -1,89% | -0,59% | -3,76% | -1,47% | -1,42% | -0,26% | -2,81% | -0,39% | |
| Parede duplas | 5,09% | 4,17% | 2,27% | 7,43% | 3,86% | 2,96% | 0,82% | 7,44% | 1,46% | |
| Par. inter.maciça | 6,89% | 0,10% | 2,63% | 4,21% | 5,40% | 4,04% | 3,40% | 1,92% | 3,58% | |
| Sem sombream. | -2,82% | -6,83% | -1,59% | -2,69% | -0,64% | -11,23% | -10,71% | -3,03% | -10,63% | |
| Caso brises | ----- | ----- | ----- | 5,36% | 4,59% | 6,52% | 4,00% | 0,96% | 1,51% | |
| Cob.fibrocimento | ----- | 1,18% | -12,15% | 0,65% | -12,20% | 1,39% | -12,13% | -21,56% | -12,26% | |
| Cob. lã de vidro | 27,11% | 13,31% | 14,30% | 11,80% | 13,46% | 13,46% | 15,73% | 3,63% | 13,55% | |
| Cobertura $\alpha=0.4$ | 10,48% | 5,07% | 13,72% | 5,05% | 13,23% | 5,63% | 13,63% | -0,89% | 14,32% | |
| Cobertura $\alpha=0.2$ | 14,65% | 5,03% | 14,68% | 5,51% | 14,57% | 6,01% | 14,11% | -6,52% | 16,42% | |
| Ventilação | 18,89% | 29,02% | 33,21% | 15,25% | 31,87% | 30,42% | 28,95% | 13,37% | 37,05% | |

Fonte: Autora (2017).

| | |
|--|------------------------|
| | Caso base |
| | Melhor que o caso base |
| | Pior que o caso base |

Na cobertura, as duas variações estão dentro das recomendações da norma. A cobertura de fibrocimento, com baixo atraso térmico, mostra-se mais influente nos ambientes do primeiro andar, onde ela representa um pior desempenho em relação ao caso base, aumento dos graus-hora de 12% a 21,5%. Já nas salas do térreo, a cobertura de fibrocimento provocou uma leve melhoria, com uma redução em torno de 1% em relação ao caso base.

A aplicação desse tipo de cobertura é polêmica, já que ela apresenta um comportamento ruim no inverno, seu atraso térmico é muito pequeno e sua transmitância está muito próxima do valor limite.

A cobertura com lã de vidro sob forro de madeira obteve uma melhoria expressiva em relação ao caso base em todos os ambientes, e em todos os períodos do ano com reduções de até 27% nos graus-hora total em relação ao caso base. Não restaram dúvidas de que essa opção é altamente recomendada como forma de aumentar o desempenho térmico da edificação.

A variação da absorvância solar da cobertura para cores mais claras representou uma melhoria em relação ao caso base em todas as zonas, exceto na zona térmica 32. Entre os dois alfas, o de menor valor, ou seja, com a cor mais clara, obteve um melhor resultado em quase todos os casos com índices de redução de 5% a 16,4%. Ou seja, na cobertura, o melhor é refletir o calor proveniente da incidência solar, diminuindo o desconforto por calor.

A ventilação seletiva durante 24h foi uma das estratégias mais eficazes com um melhor desempenho em todos os ambientes obtendo reduções de 13,4% a 37% em relação ao caso base.

4.5.4 Horas em conforto

Calculou-se ainda a porcentagem de horas em conforto ocupadas, ou seja, das 07h às 18h, durante todo o ano. Levou-se em consideração a mesma temperatura de conforto utilizada para os cálculos de graus-hora (Tabela 39).

No caso da absorvância das paredes, as paredes claras apresentaram um melhor desempenho em quase todos os casos, assim como na somatória dos graus-hora, o que configurou essa estratégia como apropriada e selecionada para a análise de sensibilidade.

Tabela 39 – Porcentagem de horas anuais em conforto

| Porcentagem de horas em conforto (%) | | | | | | |
|--------------------------------------|--------|---------|----------|---------|----------|---------|
| Orientação | SO | SE | NE | | NO | |
| Pavimento | Térreo | Térreo | 1º andar | Térreo | 1º andar | Pilotis |
| Zonas | Zona 8 | Zona 17 | Zona 21 | Zona 20 | Zona 24 | Zona 26 |
| | | | | | | |
| Caso base | 0,5263 | 0,5909 | 0,5087 | 0,5747 | 0,4979 | 0,5137 |
| | | | | | | |
| Paredes α=0.3 | 0,5288 | 0,5947 | 0,5030 | 0,5826 | 0,5030 | 0,5162 |
| | | | | | | |
| Paredes 15cm | 0,5231 | 0,5895 | 0,5062 | 0,5731 | 0,4932 | 0,5105 |
| | | | | | | |
| Parede duplas | 0,5235 | 0,5881 | 0,5107 | 0,5779 | 0,5068 | 0,5160 |
| | | | | | | |
| Par. inter.maciça | 0,5322 | 0,5861 | 0,5130 | 0,5788 | 0,5048 | 0,5192 |
| | | | | | | |
| Sem sombream. | 0,5162 | 0,5781 | 0,5073 | 0,5715 | 0,4977 | 0,5048 |
| | | | | | | |
| Caso brises | ----- | ----- | ----- | 0,5893 | 0,5053 | 0,5217 |
| | | | | | | |
| Cob.fibrocimento | ----- | 0,5963 | 0,4952 | 0,5788 | 0,4856 | 0,5920 |
| | | | | | | |
| Cob. lã de vidro | 0,5742 | 0,6151 | 0,5411 | 0,5982 | 0,5247 | 0,5436 |
| | | | | | | |
| Cobertura α=0.4 | 0,5498 | 0,6059 | 0,5338 | 0,5881 | 0,5210 | 0,5377 |
| | | | | | | |
| Cobertura α=0.2 | 0,5774 | 0,6196 | 0,5539 | 0,5993 | 0,5404 | 0,5584 |
| | | | | | | |
| Ventilação | 0,5815 | 0,6769 | 0,5772 | 0,6566 | 0,5612 | 0,5808 |
| | | | | | | |

Fonte: Autora, 2017.

| | |
|--|------------------------|
| | Caso base |
| | Melhor que o caso base |
| | Pior que o caso base |

As paredes externas de 15cm, diminuíram as horas em conforto em todos os casos. Como nos graus-hora, essas paredes também não apresentaram um bom desempenho, essa não foi considerada uma estratégia adequada para a edificação.

As paredes externas duplas aumentaram as horas em conforto, em quase todos os casos, exceto nos que estão em vermelho, onde houve uma pequena diminuição do conforto. O desempenho dessas paredes, apesar de ser inadequado para o verão, mostrou-se melhor que o caso base, tanto nas horas de conforto, quanto na somatória dos graus-hora, sendo também uma estratégia a ser empregada nas edificações em estudo.

As paredes internas com alto atraso térmico aumentaram a porcentagem de conforto ao longo do ano em quase todas as zonas, exceto na 17. Logo, essa variável também foi estudada na análise de sensibilidade.

O caso sem sombreamento piorou o conforto térmico, assim como aumentou os graus-hora em todos os ambientes. Os brises foram elementos que melhoraram os índices de conforto nas salas com orientação NE e pioraram-nos na sala com orientação NO. Isso pode ter ocorrido nessa zona devido à ventilação ser muito pequena nessa orientação. Os brises podem ter interferido na ventilação, já que essa é um dos itens mais influentes. Como na somatória dos graus-hora, o desempenho com os brises foi melhor em todos os casos, optou-se por manter o elemento como uma estratégia positiva.

Na análise da cobertura, a opção com fibrocimento e forro de PVC obteve o mesmo comportamento da somatória dos graus-hora com uma pequena melhoria apenas nas salas térreas. Assim, essa composição de cobertura não foi julgada como apropriada.

A cobertura com lã de vidro sob forro de madeira obteve melhores índices em todas as salas, assim como obteve um bom desempenho para o frio e para o calor e para a somatória de graus-hora, sendo indiscutivelmente uma boa opção de cobertura.

A absorvância solar da cobertura apresentou melhores resultados com o alfa menor ($\alpha=0,2$) em todos os casos, revelando-se como o mais adequado.

A ventilação durante 24h aumentou os índices de conforto significativamente em todas as zonas térmicas.

Observou-se ainda, que as salas 20 e 24 que não possuem ventilação cruzada apresentaram índices de conforto inferiores às demais salas localizadas no

mesmo pavimento, comprovando a eficiência da ventilação cruzada que é uma estratégia nas demais salas de aula da edificação e é recomendada pela NBR15220 (ABNT, 2005).

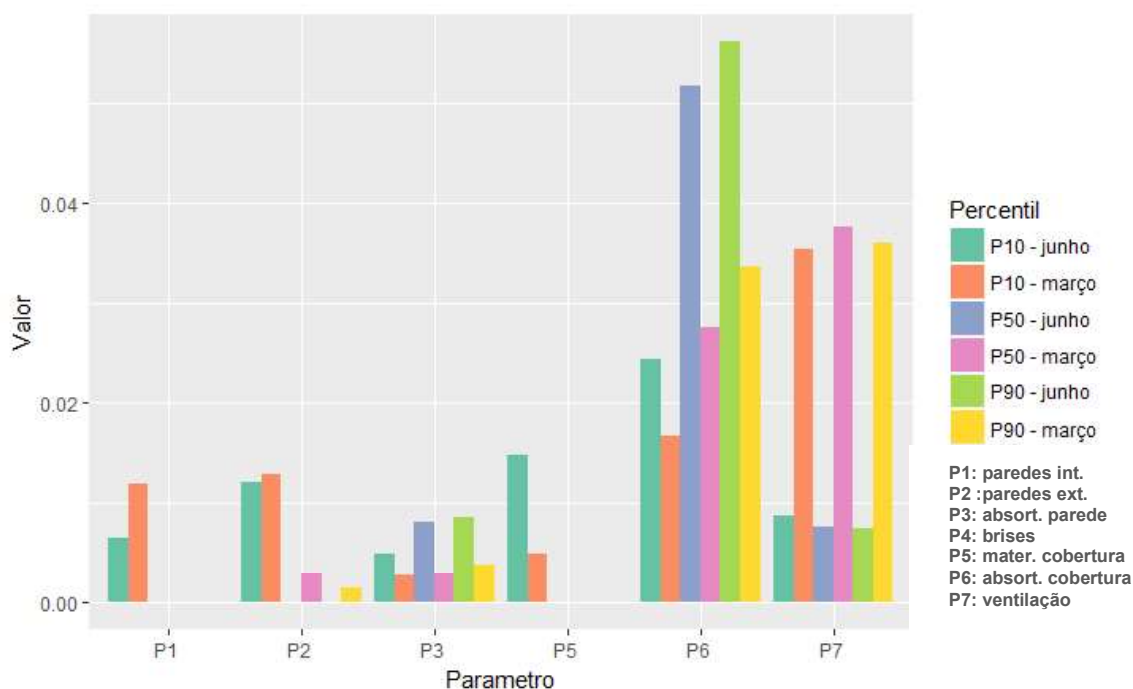
4.6 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE COM OS MELHORES RESULTADOS

Baseado nos resultados das simulações paramétricas, selecionaram-se as melhores estratégias que foram: as paredes externas mais claras com absorvância solar de 0,3; as paredes externas duplas com alta inércia térmica; as paredes internas maciças também com alta inércia térmica; o caso com aplicação de elementos de proteção solar (brises); a cobertura com telha cerâmica, lã de vidro e forro de madeira; a cobertura com absorvância solar de 0,2 e o uso da ventilação durante 24h com controle por temperatura. Sobre o resultado das temperaturas dessas estratégias comparando com o caso base se aplicou uma análise de sensibilidade local, percebendo a influência de cada uma sobre a edificação. A análise foi realizada em cada zona térmica nos meses de março e junho que contêm a máxima e a mínima temperatura.

Na zona térmica 08 (térreo, orientação SO), percebe-se uma maior influência do parâmetro P6 (absorvância da cobertura) e do P7 (ventilação) (Figura 99). A mudança da absorvância para cores mais claras teve influência principalmente em junho nas temperaturas máximas. Esse parâmetro age de forma a diminuir as temperaturas, o que é desejável no verão e indesejável no inverno. No entanto, apesar de ele apresentar um índice de sensibilidade maior no mês de junho (inverno), observando durante todo o ano, ele teve um efeito positivo no desempenho da edificação (item 4.5). A forte influência desse fator também pode ser vista no trabalho de Almeida (2014).

Outro fator que se destacou nessa zona térmica é a ventilação, item P7 (ventilação), o que vai ao encontro dos trabalhos de Tian e Choudhary (2012) e Yildiz e Arsan (2011) que apresentaram a ventilação natural como um dos fatores mais influentes. Essa foi mais influente nos meses de verão do que inverno, o que demonstra que ela é eficaz em diminuir as temperaturas nos períodos mais quentes. Apesar de ter um efeito negativo no conforto no inverno, a ação durante todo o ano aumentou os índices de conforto.

Figura 99 – Análise de sensibilidade zona térmica 08



Fonte: Autora (2017).

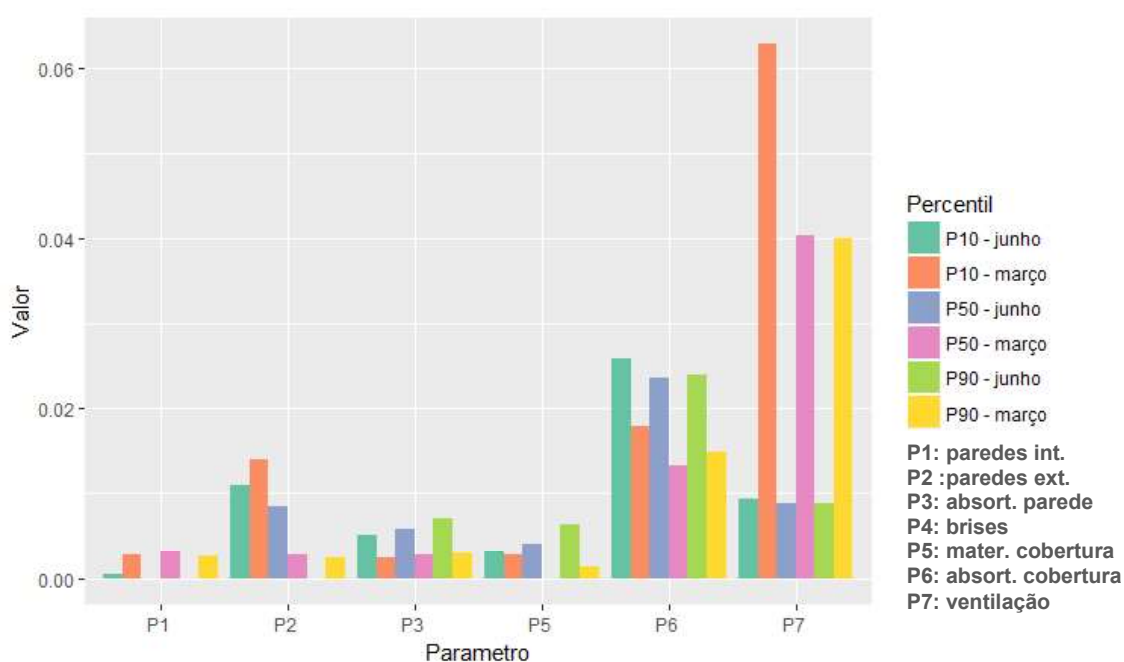
Os parâmetros P1 (paredes internas), P2 (paredes externas duplas) e P5 (cobertura com lã de vidro) tiveram maior ação nas temperaturas mínimas. P1 e P2 são estratégias parecidas que utilizam de paredes com alta inércia térmica, atuando principalmente contra o frio, logo foi interessante que esses operassem de forma mais intensa nas temperaturas mínimas. P5 é uma cobertura mais isolada, que aumentou o conforto tanto no frio, quanto no calor e o fato de ela agir nas temperaturas nos meses mais frios também é um fator positivo. Essa orientação não apresenta brises. A absorvância solar das paredes apesar de constar nos trabalhos de Almeida (2014) e Ferreira, Souza e Assis (2017) como um fator influente, não apresentou grande mudança nesse estudo, pois os valores presentes no caso base eram de 0,44, próximos aos valores da perturbação que é de 0,3.

Na zona térmica 17 (térreo, orientação SE), os fatores mais influentes também foram P6 (cobertura com $\alpha=0,2$) e P7 (ventilação), o que pode ser visualizado na Figura 100. A ventilação novamente atuou de forma mais eficaz no verão, principalmente nas temperaturas no mês de março, o que é positivo, já que essa estratégia visa diminuir o desconforto por calor. Esse comportamento também ocorreu nas zonas 20 (orientação NE, térreo), 21 (orientação SE, 1º andar), 24

(orientação NE, 1º andar), 26 (orientação NE, térreo) e 29 (orientação NE, 1º andar) conforme Figuras 101, 102, 103, 104 e 105 respectivamente.

A absorvância solar da cobertura também agiu de forma expressiva tanto no verão quanto inverno, destacando-se mais no inverno novamente, apesar dessa estratégia ser própria para o verão e aumentar os índices de conforto anuais.

Figura 100 – Análise de sensibilidade zona térmica 17



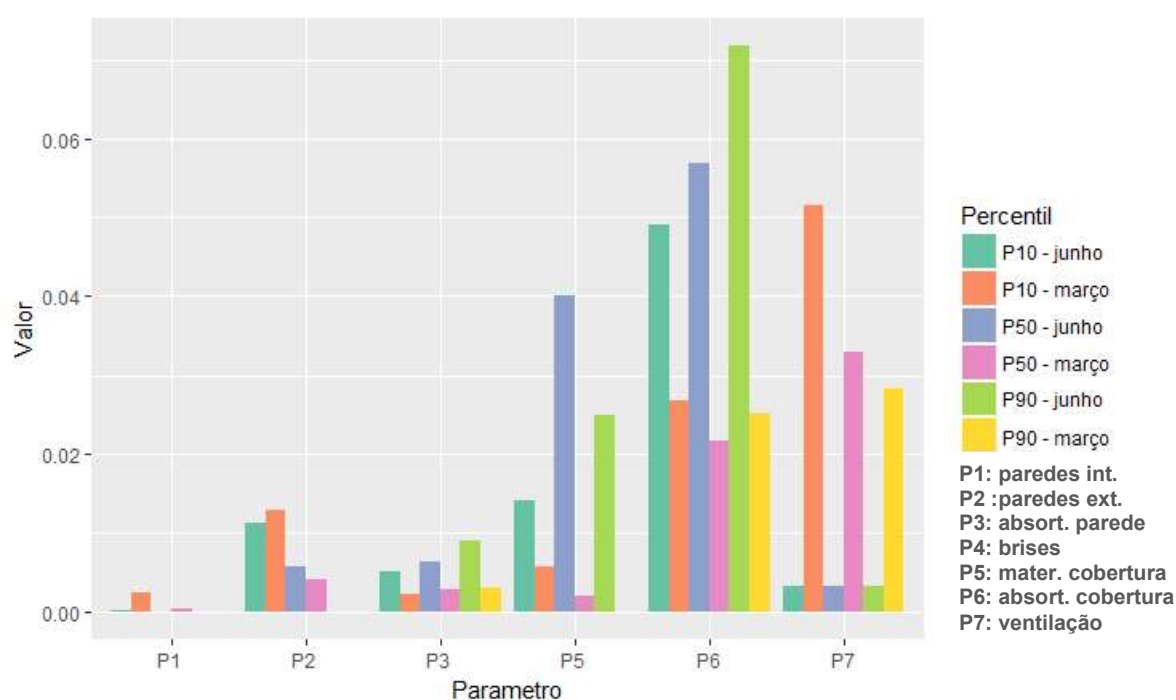
Fonte: Autora (2017).

As paredes internas (P1) mostraram-se pouco relevantes nesse ambiente, sendo que elas são colocadas na literatura como uma estratégia apropriada para o inverno e nesse caso foram ligeiramente mais influentes no verão. As paredes externas duplas (P2) com maior inércia térmica influíram mais nas temperaturas mínimas. Possivelmente essa estratégia seja mais eficaz no inverno em edificações que possuam usos noturnos, já que esse seria o período que o calor seria liberado. No verão, ela pode ser benéfica no horário comercial, impedindo a edificação de ganhar calor nos horários de pico devido ao atraso térmico. Nessa orientação também não há brises (P4).

O parâmetro P3 (absortância das paredes) e P5 (material da cobertura) possuíram pouca expressividade nessa sala, sendo que há um índice de sensibilidade um pouco maior no mês de junho.

A zona térmica 21 (Figura 101) está no primeiro pavimento acima da zona 17 (orientação SE). Percebeu-se que os elementos referentes à cobertura, P5 (material da cobertura) e P6 (absortância da cobertura), apresentaram maior influência nessa sala. Sobressaiu-se a absortância (P6), com maior influência no mês de junho nas temperaturas máximas. A cobertura com material isolante (P5) também apresentou maior expressividade nas temperaturas mais frias, com destaque para a mediana.

Figura 101– Análise de sensibilidade zona térmica 21



Fonte: Autora (2017).

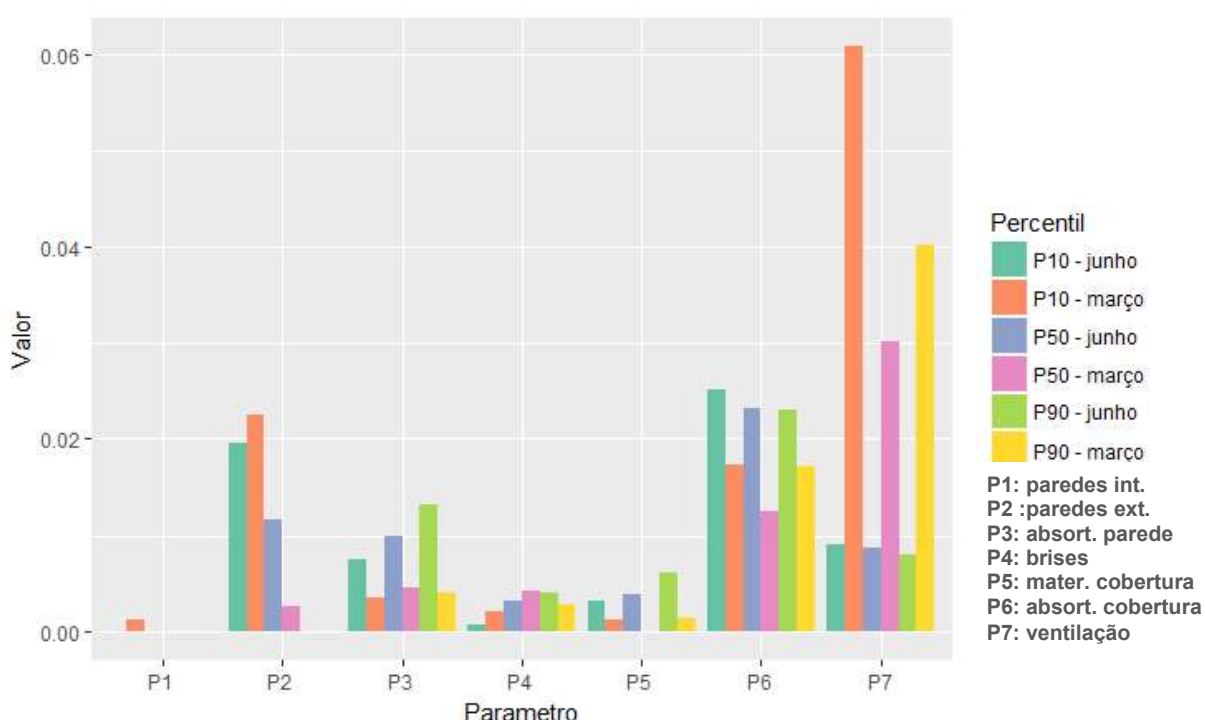
A absortância das paredes externas (P3) apresentou o mesmo comportamento da zona 17, assim como a mudança das paredes externas para paredes duplas (P2). Nesse caso não houve nenhuma perturbação nas temperaturas máximas.

As paredes internas (P1) foram inexpressivas nesse ambiente e nos demais que se seguem (Figuras 102, 103, 104, 105, 106 e 107).

Assim como na zona 17 (térreo, orientação SE), a zona 20 (orientação NE, Figura 102), por estar no térreo, sofreu pouca influência do material da cobertura (P5); e sua absortância (P6) também foi menor do que na zona 24 (1º andar, orientação NE, Figura 103).

Nas zonas 20 e 24 (Figura 102 e 103), as paredes externas duplas (P2) sobressaíram-se mais do que nas anteriores, evidenciando-se as temperaturas mínimas e não afetando as máximas. Isso significa que, de fato, o calor liberado pela alta inércia térmica das paredes ocorreu nos períodos com temperaturas mais baixas.

Figura 102 - Análise de sensibilidade zona térmica 20



Fonte: Autora (2017).

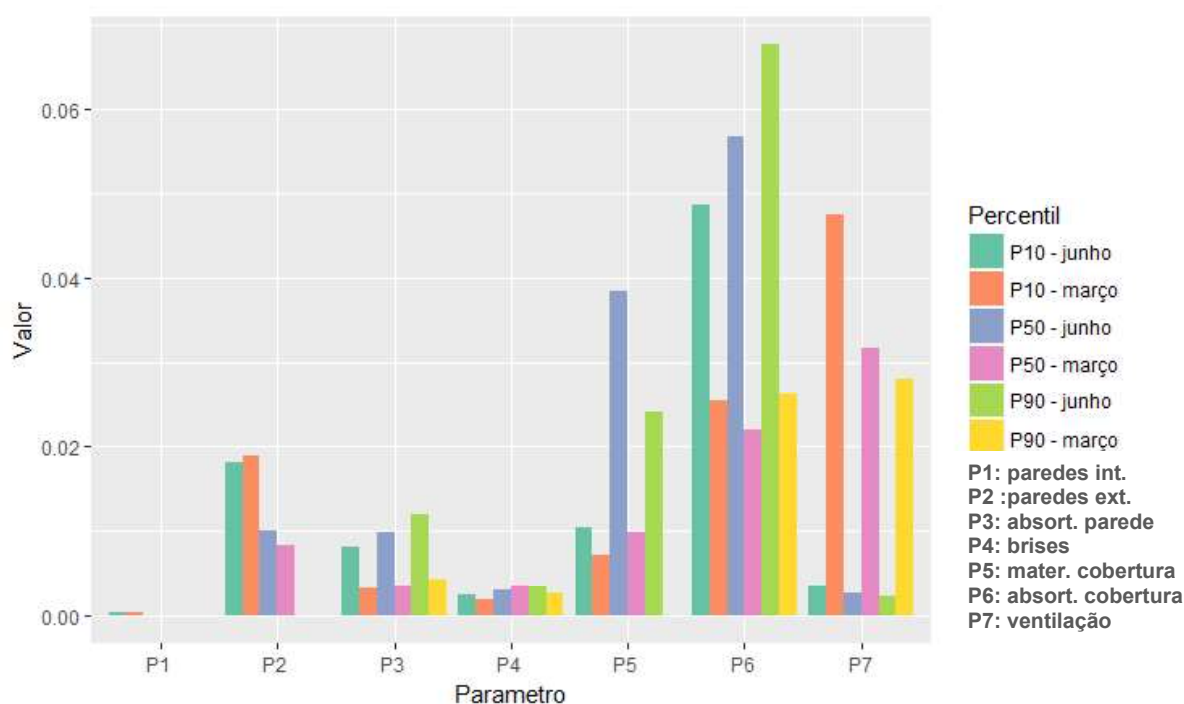
A absortância das paredes (P3) apresentou valores de SI um pouco mais altos nessas zonas (20 e 24), sendo mais relevantes no inverno, nas temperaturas máximas.

Os brises (P4), apesar de constarem como umas das principais estratégias bioclimáticas para climas quentes (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014), foram um dos parâmetros menos influentes nas zonas térmicas com orientação Nordeste, zonas 20, 24, 26, 29 e 32. Acredita-se que isso tenha ocorrido porque o caso base já apresentava elementos de proteção solar, como beirais e circulações abertas.

A zona térmica 24 (1º andar, orientação NE, Figura 103) mostrou uma maior influência do P5 (material da cobertura) e P6 (absortância da cobertura), possivelmente por estar no primeiro pavimento. Esses apresentaram um

comportamento muito parecido com o da zona térmica 21 (1º andar, orientação SE, Figura 101), pois essas salas estão no mesmo bloco, apesar de terem aberturas em orientações diferentes.

Figura 103 - Análise de sensibilidade zona térmica 24



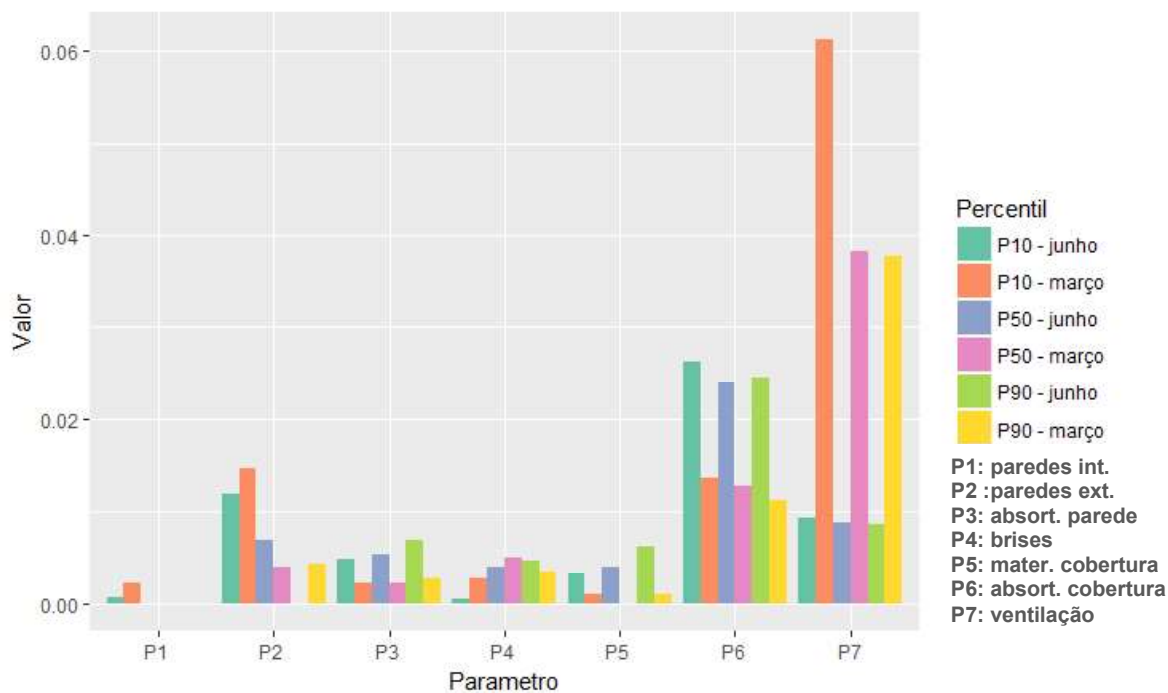
Fonte: Autora (2017).

A zona térmica 26 (térreo, orientação NE, Figura 104), assim como as demais do térreo, apresentou menos influência dos elementos da cobertura. No entanto, a absorvância da cobertura (P6) ainda foi um dos elementos mais influentes, principalmente no mês com as temperaturas mais baixas.

As paredes externas (P2) foram levemente mais relevantes no térreo (zona 26) do que no primeiro pavimento (zona 29, Figura 105) evidenciando-se as mínimas.

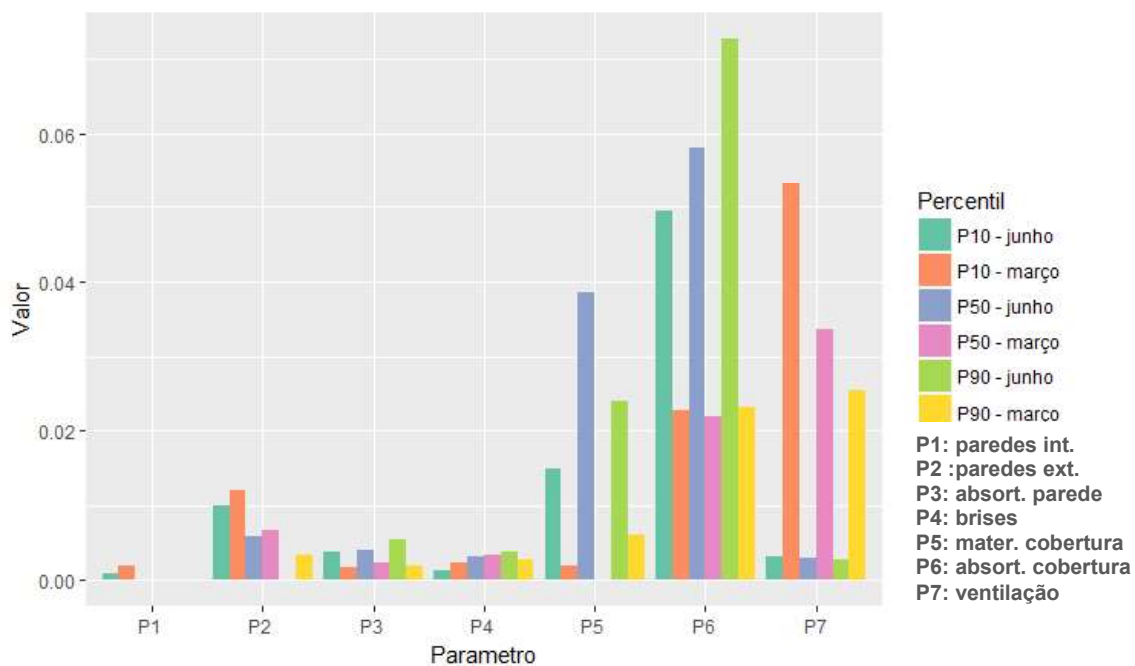
Na Figura 105, observou-se uma forte influência no parâmetro 6 (absorvância da cobertura) nas temperaturas máximas em junho, sendo que nesse mês todos os índices de absorvância foram maiores que em março. A cobertura mais isolada (P5) também se configurou como um fator relevante, sendo que ela atuou de forma mais intensa no mês de junho, alterando em especial a mediana.

Figura 104 - Análise de sensibilidade zona térmica 26



Fonte: Autora (2017).

Figura 105 - Análise de sensibilidade zona térmica 29



Fonte: Autora (2017).

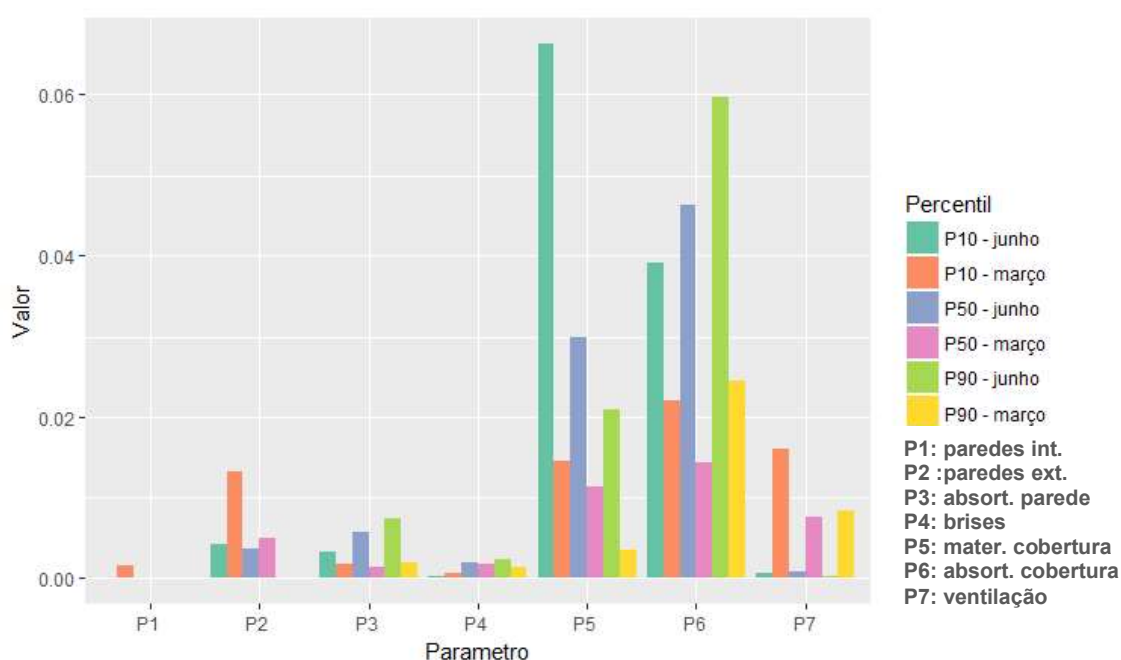
A zona 32 (orientação NE, Figura 106), por estar sob pilotis, apresentou um comportamento distinto das demais em alguns aspectos. A ventilação (P7) que foi

um fator proeminente nos outros casos, apresentou uma influência muito menor nessa sala.

O material da cobertura (P5) apresentou uma grande perturbação na temperatura com destaque para as mínimas no mês de junho. Essa troca de materiais representou no tópico 4.5 uma melhora de desempenho tanto para o desconforto por frio quanto para o calor. Assim, nesse ambiente a cobertura com lã de vidro significou uma melhoria no conforto do ambiente.

Os demais fatores mostraram comportamento semelhante aos demais ambientes estudados. Ressalta-se, ainda, a absorvência da cobertura (P6) como um fator relevante, em especial no mês de junho.

Figura 106 - Análise de sensibilidade zona térmica 32



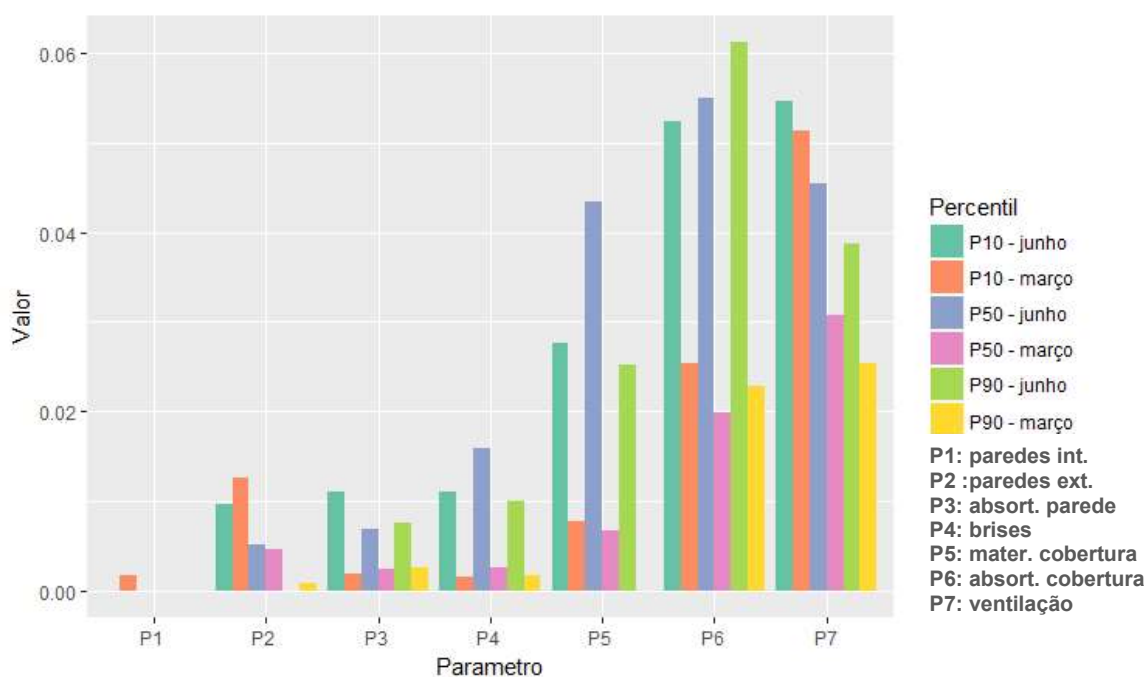
Fonte: Autora, 2017.

Na zona térmica 47 (1º andar, orientação NO, Figura 107), observou-se que os brises (P4) influíram mais do que nas demais salas. Nas horas em conforto, essa zona térmica apresentou um comportamento diferente no parâmetro relacionado aos elementos de proteção solar, possuindo menores índices de conforto do que as outras salas.

Percebeu-se que nessa sala, a ventilação (P7) também teve um comportamento diferente das demais. Por meio do gráfico, observa-se que ela

provocou perturbações consideráveis em todas as temperaturas, sendo de magnitude maior no mês de junho, em particular nas mínimas. Uma possível explicação é que essa orientação é a que recebe menos ventilação (ver rosa dos ventos, seção 2).

Figura 107 - Análise de sensibilidade Zona térmica 47



Fonte: Autora (2017).

Assim, de um modo geral, os parâmetros que tiveram maior influência de acordo com a análise de sensibilidade local foram a ventilação (P7), a absortância da cobertura (P6) e o material da cobertura (P5).

Esse é um estudo inicial e verifica apenas cada parâmetro separadamente. Não foram feitas mudanças no caso base ou a aplicação de todas as estratégias em conjunto para aprimorar o benchmark da edificação real. Portanto, é necessário um maior aprofundamento, de forma que seja possível constatar a influência dos parâmetros em conjunto, e desse modo, perceber como um parâmetro afeta o outro e qual seria o real ganho caso todos eles fossem implantados.

5 CONCLUSÃO

O objetivo geral desse trabalho foi avaliar a influência dos parâmetros construtivos no desempenho térmico de uma edificação escolar representativa dentro de um estoque de edificações.

Primeiramente, através de uma revisão de literatura, identificaram-se quais são os parâmetros físicos que exercem influência sobre o desempenho termoenergético das edificações. Os estudos e as normas apontaram que esses são: as propriedades termofísicas dos materiais, o contato da edificação com o solo, a absorvância das paredes e coberturas, a orientação solar da edificação e das aberturas, a forma da edificação, a área das fachadas e aberturas, o tamanho dos ambientes, a área de abertura para ventilação, o sombreamento, a disposição das aberturas e a forma como ocorre a ventilação.

Baseando-se nos parâmetros encontrados na revisão de literatura, foram levantadas 38 escolas na cidade de Joinville-SC. Esses dados foram simplificados e resultaram em uma matriz de todas as escolas com os parâmetros mais relevantes. Dessa forma, foi possível conhecer melhor as características dessas edificações.

A partir dessa matriz, realizou-se a análise de agrupamentos, com variáveis quantitativas e qualitativas em conjunto. Para possibilitar essa análise utilizou-se o coeficiente de Gower como medida de similaridade, o método de Ward para o dendograma e a partição em torno do medóide para o método não hierárquico. Obtiveram-se então, dois agrupamentos e duas edificações que representaram o centro de cada agrupamento. Dentre dessas duas edificações, escolheu-se uma que representava a maioria das edificações, tanto pelo seu agrupamento, quanto pelo seu tamanho e características.

A utilização da análise de agrupamento mostrou-se uma técnica eficaz, objetiva e que possui embasamento na literatura para o estudo de um estoque de edificações, por meio de modelos de referência. No entanto, por essa ser uma técnica exploratória e não inferencial é primordial que o pesquisador tenha domínio das variáveis que irão compor a matriz de dados, de forma que essas sejam cuidadosamente escolhidas, já que elas podem modificar o resultado final.

Observa-se, que seria interessante investigar a aplicação de outra técnica estatística como regressão que pudesse auxiliar na escolha dessas variáveis, de forma que as que não contribuíssem para o desempenho térmico da edificação

fossem excluídas e que nenhuma variável influente fosse esquecida na hora de compor a matriz. Além disso, é importante ressaltar o uso de algum indicador que possa avaliar os resultados, como os testes de hipóteses ou *silhoutte*.

O modelo obtido com a análise de agrupamento foi submetido a simulações computacionais paramétricas. Foram realizadas alterações seguindo as diretrizes da norma NBR15220 (ABNT, 2005). Não foi possível realizar a calibração do modelo simulado com o real.

A análise dos resultados deu-se por meio dos graus-hora de resfriamento e aquecimento, horas ocupadas em conforto e análise de sensibilidade local. Utilizou-se como temperatura base a temperatura operativa horária.

Os índices de conforto encontrados aumentaram, mas esse aumento não foi expressivo. Esse fato ocorreu por se ter utilizado uma faixa de conforto restritiva, de 20°C a 26°C. O caso base já apresentava elementos positivos, como telhas cerâmicas, ventilação cruzada, tamanho adequado das aberturas e sombreamento das mesmas. Procurou-se aplicar situações próximas à realidade e não houve uma variação extrema dos parâmetros de modo que os resultados não foram tão discrepantes.

As paredes internas com alta inércia térmica apresentaram um melhor resultado na somatória dos graus-hora (redução de até 5,4% em relação ao caso base) e nas horas ocupadas de conforto. No entanto, essas foram praticamente insignificantes na análise de sensibilidade local. Acredita-se que isso tenha ocorrido pelo fato de a estratégia ter como objetivo aquecer a edificação no período noturno e diminuir o desconforto por frio, no entanto essas horas não foram contabilizadas, já que não são horas ocupadas.

As paredes externas duplas sofrem o mesmo problema das paredes internas maciças em relação à praticidade de aplicação. Além disso, elas possuem um custo mais elevado, tanto pelo material quanto pelo tempo de execução. Em relação aos resultados das simulações, essas apresentaram uma maior influência do que as paredes internas, no entanto sua relevância ainda é pequena. Nos graus hora de resfriamento, seu desempenho foi negativo, e nos graus-hora de aquecimento foi positivo; o saldo na somatória foi positivo com reduções de graus-hora total de até 7,5% em relação ao caso base, assim como nas horas ocupadas em conforto. As paredes externas pesadas apresentaram um comportamento melhor do que as leves, contradizendo a NBR15220 (ABNT, 2005).

As paredes com menor absorvência apresentaram uma melhor *performance* do que o caso base diminuindo em até 4% os graus-hora total. Sua influência, no entanto, não é expressiva, o que se atribui ao fato de a variação usada nas simulações ter sido pequena, de 0,44 para 0,3. A aplicação de cores muito claras nas paredes mostrou-se inapropriada, devido à questão da manutenção e limpeza. Apesar dessa restrição, a sugestão é que se aplique cores claras dentro de uma manutenção possível.

Os brises não foram muito influentes na edificação, ao contrário do que diz a literatura. Isso pode ter-se dado porque a edificação já apresentava elementos de proteção solar que supriam quase toda a sua necessidade. É possível verificar esse fato, comparando a simulação sem sombreamento (aumento de até 11,23 na somatória de graus-hora) com a simulação com brises (diminuição de até 6,5% nos graus-hora total). Caso fosse implantado, esse parâmetro não apresentaria um custo elevado e é de uso comum na arquitetura e facilmente encontrado no mercado.

Os elementos referentes à cobertura apresentaram maior influência nos ambientes do primeiro pavimento. De um modo geral, as salas do térreo apresentaram menos desconforto térmico que as do primeiro pavimento.

A cobertura é um elemento importante, principalmente nas salas do primeiro pavimento. A cobertura com lã de vidro apresentou um dos melhores índices de conforto entre os parâmetros estudados (índices de redução de até 27% nos graus-hora total), sendo que ela possui um bom desempenho tanto no verão, quanto no inverno. A lã de vidro é um material durável, de fácil aplicação, com isolamento acústico e favorável custo-benefício. A cobertura de fibrocimento, por sua vez, também estava dentro dos índices da norma, no entanto apresentou uma *performance* muito inferior. Conclui-se que coberturas com maior isolamento e com baixa transmitância são mais favoráveis ao conforto térmico.

A absorvência da cobertura apresentou-se como um dos elementos mais importantes na edificação em estudo (melhoria no índice de graus-hora total de 5% a 16,4%). Quanto mais clara a cor, melhor o índice de conforto térmico. Apesar das cores claras possuírem um bom desempenho nas épocas mais quentes (reduções de até 74% nos graus-hora de resfriamento), elas aumentam o desconforto por frio (aumento de até 76% nos graus-hora de aquecimento). Ou seja, esse elemento deve ser estudado com muito cuidado, conforme o clima. Apesar de a aplicação de

cores muito claras na cobertura ser de difícil manutenção, propõe-se que elas sejam usadas dentro da possibilidade de manutenção na edificação.

A ventilação durante 24 horas é bastante influente no conforto térmico da edificação, pois retira o calor armazenado durante o dia. Essa estratégia demonstra o quanto a ventilação bem dimensionada pode impactar de forma positiva em climas quentes e úmidos, como é o caso do clima em estudo, que apesar de apresentar desconforto por frio, o desconforto por calor age de forma mais intensa, apresentando uma melhoria de 13,4% a 37% nos graus-hora total. Essa estratégia é de difícil aplicação, já que exige a abertura das janelas em períodos desocupados, pondo em risco a segurança do local. Recomenda-se o uso de dispositivos mecânicos que possam fazer essa troca de ar, sem que se prejudique a segurança da escola ou exija contratação extra de funcionários.

A análise de sensibilidade local é uma ferramenta que auxilia na percepção do impacto de cada estratégia, no entanto ela é limitada. Essa não permite que se observe a interação entre as estratégias e nem se a influência atua de forma a melhorar ou piorar os índices de conforto.

A partir do trabalho apresentado, concluiu-se que o objetivo geral deste estudo foi alcançado. Os modelos de referência de edificações escolares de Joinville foram determinados e as diferenças entre as características físicas dos agrupamentos formados foram significativas a um nível de significância de 0,05, para a maioria das variáveis envolvidas na análise. A edificação foi simulada e os parâmetros construtivos foram analisados do ponto de vista do conforto térmico e da contribuição para o desempenho da edificação.

Por fim, conclui-se como satisfatória a determinação de modelos de referência a partir da análise de agrupamentos e a avaliação da influência dos parâmetros construtivos na edificação por meio de simulação computacional e análise de sensibilidade local. Este é apenas um estudo inicial e muito ainda deve ser desenvolvido para que se possa estudar de forma mais assertiva um estoque de edificações na cidade de Joinville.

5.1 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Limitações quanto à etapa de levantamento dos dados:

- a amostra ideal é de 39 escolas em diferentes bairros; faltou uma escola para que se completasse esse número. A escola não foi levantada porque estava em reforma na época em que foram realizados os levantamentos;
- simplificações foram necessárias quanto aos dados coletados, dada a imprecisão dos levantamentos de algumas variáveis como o material das paredes. Esses não foram levantados, visto que não constavam nos projetos e não eram de conhecimento da administração da escola. Também não foi possível medir as refletâncias para cada comprimento de onda para determinar as cores. Essas foram levantadas por inspeção visual.
- Não há uma norma específica para edifícios escolares, a norma que orientou esse estudo, NBR 15220 (ABNT, 2005), foi desenvolvida para habitações de interesse social.

Limitações quanto à etapa de análise de agrupamentos:

- não foi aplicada nenhuma técnica, ou criado algum tipo de coeficiente para ponderar as variáveis envolvidas na análise de acordo com a sua contribuição ao desempenho termo-energético de cada edificação, de forma que todas as variáveis tiveram o mesmo peso na análise;
- a forma e distribuição dos ambientes são variáveis importantes e difíceis de incluir na análise. Elas foram colocadas de forma qualitativa na tipologia;
- outra variável que não foi bem ajustada na análise de agrupamento é a orientação solar da edificação. Ela foi considerada no número de salas de aula por orientação, gerando quatro variáveis e aumentando o seu peso na análise;
- a inclusão de dados em relação aos equipamentos e gasto com energia deixaria o trabalho mais completo, visto que esses são importantes para o desempenho termo-energético da edificação. No entanto, esses não foram levantados pela dificuldade de obtenção dos dados;
- a análise de agrupamentos deveria contar com mais agrupamentos, o que definiria melhor o perfil de cada agrupamento formado.

Limitações quanto à etapa da simulação:

- por não existir o arquivo climático da cidade de Joinville, foi utilizado o da cidade mais próxima, gerando diversas imprecisões e diferenças nos resultados encontrados;
- por não haver aparelhos disponíveis e calibrados, não foi realizada a calibração do modelo simulado com o real existente, para que se corrigissem eventuais discrepâncias nas simulações e os resultados fossem mais condizentes com a realidade;
- devido ao tempo hábil para realização do trabalho, não foram realizadas simulações das edificações com aparelhos condicionadores de ar e com ventilação híbrida (parte ventilação, parte ar-condicionado), o que seria o caso mais próximo à realidade encontrada.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Algumas sugestões para trabalhos futuros que poderiam complementar o trabalho apresentado são:

- utilizar análise de agrupamento separando em diferentes blocos: materiais, forma, equipamentos e uso;
- aplicar regressão *stepwise* para verificar que elementos são de fato influentes e o grau de influência de cada variável para o desempenho termoenergético da edificação;
- verificar a eficiência energética da edificação levantando os equipamentos presentes na edificação e incluindo-os na simulação;
- calcular a economia de energia, caso fossem aplicadas as melhores alternativas simuladas;
- fazer o *Silhouette* e estudar a análise de agrupamento com mais grupos;
- analisar os resultados da edificação utilizando técnicas de inferência mais abrangentes, que possam se auto-verificar, como regressão linear múltipla ou análise de sensibilidade global;
- verificar custo de implantação dos parâmetros simulados;
- aplicar a metodologia desenvolvida nesse estudo em outros climas;
- desenvolver uma norma específica para edificações escolares.

REFERÊNCIAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220: Desempenho Térmico de Edificações**. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15575: Edificações habitacionais de até 5 pavimentos: desempenho**. Rio de Janeiro, 2013.

ALMEIDA, L. S. S. **Influência de parâmetros físicos e geométricos no desempenho termoenergético de habitações unifamiliares**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

ASHRAE. AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Standard 140-2011. Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs**. Atlanta, 2011.

_____. **Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. ANSI/ASHRAE Standard 55**. Atlanta, 2010.

ATEM, C. G.; BASSO, A. Apropriação e eficiência dos brisesoleil: o caso de Londrina (PR). **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 5, n. 4, p. 29-45, out./dez. 2005.

BADESCU, V.; LAASER, N.; CRUTESCU, R. Warm season cooling requirements for passive buildings in southeastern Europe (Romania). **Energy**, v.35, p.3284-3300, 2010.

BALLARINI, Ilaria; CORGNATI, Stefano Paolo; CORRADO, Vincenzo. Use of reference buildings to assess the energy saving potentials of the residential building stock: The experience of TABULA project. **Energy Policy**, v.68, p.273–284, 2014.

BARBETTA, P. A. **Estatística Aplicada às Ciências Sociais**. 7 ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2010.

BARBETTA, P. A.; REIS, M. M.; BORNIA, A. C. **Estatística para Cursos de Engenharia e Informática**. 3 ed. São Paulo: Editora Atlas, 2010

BITTENCOURT, L. **Uso das cartas solares: diretrizes para arquitetos**. 5.ed. Maceió: Edufal, 2015.

BRANDAO, D.M.M. da M.T. **Análise de custo benefício de sistemas energéticos em escolas secundárias portuguesas.** 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente). Universidade de Lisboa, Lisboa, 2009.

BRANDÃO, D. Q. Tipificação e aspectos morfológicos de arranjos espaciais de apartamentos no âmbito da análise do produto imobiliário brasileiro. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 3, p. 35–53, 2003.

BRASIL MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR – MDIC. INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA – INMETRO. Portaria no 372, de 17 de Setembro de 2010. **Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C).** Rio de Janeiro, 2010.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2016: Ano base 2015.** Rio de Janeiro: EPE, 2016.

BOGO, A. J. Reflexões críticas quanto as limitações do texto das normas brasileiras de desempenho NBR 15220-3 e NBR 15575. **Holos**, v.7, p.290-298, 2016.

BORGSTEIN, E.H.; LAMBERTS, R.; HENSEN, J.L.M. Evaluating energy performance in non-domestic buildings: A review. **Energy and Buildings**, v- 128, p- 734–755, 2016.

BURATTI, C.; MORETTI, E.; BELLONI, E.; COTANA, F. Unsteady simulation of energy performance and thermal comfort in non-residential buildings. **Building and Environment**, v.59, p.482- 491, 2013.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. **Selo Casa Azul: Boas Práticas para Habitação Mais Sustentável.** São Paulo: Páginas & Letras, 2010.

CARLO, J. C.; LAMBERTS, R. **AET Nº 02/04 Elaboração de regulamentação e classificação de edificações eficientes. Processamento de arquivos climáticos para simulação de desempenho energético de edificações.** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2005. Relatório Técnico - LabEEE200504.

CARLO, Joyce Correna. **Desenvolvimento de metodologia de avaliação de eficiência energética do envoltório de edificações não-residenciais.** 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

CECHINEL, R. J.; HENNING, E.; HACKENBERG, A. M. Uso do R para comparação de arquivos climáticos: uma análise da aplicação do arquivo climático de Itapoá na cidade de Joinville. *In: The World of Big Data Analysis, II Seminário Internacional de Estatística com R*, 2017, Niterói. **Anais...Niterói: Universidade Federal Fluminense**, 2017.

CRAWLEY, Drury B.; HAND, Jon W.; KUMMERT, Michael; GRIFFITH, Brent T. Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. **Building and Environment**, v- 43, p-661–673, 2008.

CRICK, M.J.; HILL, M.D.; CHARLES, D. The Role of Sensitivity Analysis in Assessing Uncertainty. **Proceedings of an NEA Workshop on Uncertainty Analysis for Performance Assessments of Radioactive Waste Disposal Systems**, Paris, OECD, p.1-258, 1987.

CORGNATI, S. P.; FABRIZIO, E.; FILIPPI, M.; MONETTI, V. Reference buildings for cost optimal analysis: Method of definition and application. **Applied Energy**, v- 102, p- 983–993, 2012.

DASCALAKI, E. G.; DROUTSA, K. G; BALARAS, C. A; KONTOYIANNIDIS, S. Building typologies as a tool for assessing the energy performance of residential buildings – A case study for the Hellenic building stock. **Energy and Buildings**, v- 43, n. 12, p- 3400– 3409, 2011.

DEMANUELE, C.; TWEDDELL, T.; DAVIES, M. Bridging the gap between predicted and actual energy performance in schools. *In: World Renewable Energy Congress XI*, Set. 2010, Abu Dhabi, UAE. **Anais...Abu Dhabi: LEA: Low Energy Architecture**, 2010.

DOE. **Commercial Buildings Energy Consumption Survey**. Disponível em: <<http://www.eia.doe.gov/emeu/cbecs/contents.html>>. Acesso em: Set. 2016.

DORNELLES, K. A. **Absortância solar de superfícies opacas: métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e PVA**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Estadual de Campinas, Campinas , Campinas, 2008.

EUROPEAN UNION. **Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings(recast)**. Official Journal of the European Union, Jun. 2010.

FERREIRA, C. C., SOUZA, H. A. de, ASSIS, E. S. de. Discussão dos limites das propriedades térmicas dos fechamentos opacos segundo as normas de desempenho térmico brasileiras. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 1, p. 183- 200, jan./mar. 2017.

FERREIRA, R. J. da S. **Análise de sensibilidade dos parâmetros de cálculo das coberturas jardim**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil-Especialização em Construções). Universidade do Porto, Portugal, 2013.

FONSECA, Ingrid Chagas Leite; ALMEIDA, Carla Cristina da Rosa; LOMARDO, Louise Land Bittencourt; MELLO, Estefânia Neiva. Avaliações de conforto ambiental e eficiência energética do projeto do prédio do Centro de Informações do Cresesb, no Rio de Janeiro. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 10, n. 2, p. 41-58, abr./jun. 2010.

FRACASTORO, G. V.; SERRAINO, M. A methodology for assessing the energy performance of large scale building stocks and possible applications. **Energy and Buildings**, v.43, n. 4, p. 844–852, 2011.

FROTA, A. F. e SCHIFFER, S. R. **Manual de Conforto Térmico**. 5.ed. São Paulo: Livraria Nobel S.A., 2001.

GAITANI, N.; LEHMANN, C.; SANTAMOURIS, M.; MIHALAKAKOU, G.; PATARGIAS, P. Using principal component and cluster analysis in the heating evaluation of the school building sector. **Applied Energy**, v.87, p. 2079–2086, 2010.

GAO, Xuefeng; MALKAWI, Ali. A new methodology for building energy performance benchmarking: An approach based on intelligent clustering algorithm. **Energy and Buildings**, v. 84, p. 607–616, 2014.

GIVONI, B. Climatic aspects of urban design in tropical regions. **Atmospheric Environment**, v. 26B, n. 3, p. 397-406, 1992.

GIGLIO, T., LAMBERTS, R; BARBOSA, M.; URBANO, M.. A procedure for analysing energy savings in multiple small solar water heaters installed in low-income housing in Brazil. **Energy Policy**, v. 72, p. 43–55, set. 2014.

GRIEGO, Danielle; KRARTI, Moncef; HERNÁNDEZ-GUERRERO, Abel. Optimization of energy efficiency and thermal comfort measures for residential buildings in Salamanca, Mexico. **Energy and Buildings**, v. 54, p.540-549, 2012.

GRUNBERG, Paula Regina Mendes. **Avaliação das estratégias bioclimáticas de projeto para clima quente e úmido através de simulação: Estudo de caso de edificação unifamiliar em Joinville-SC.** 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção Civil). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

GOOGLE MAPS. **Imagens diversas.** 2016. Disponível em: <https://www.google.com/maps/d/viewer?mid=1ee2mfuiE_SKBfHdQfgtB252JMtl&hl=en_US>. Acesso em: set. de 2016.

GOWER, J. C. A general coefficient of similarity and some of its properties. **Biometrics**, v. 27, p. 857–874, 1971.

GRIGOLETTI, G. de C., SATTTLER, M. A. Método de avaliação global de desempenho higrotérmico de habitações de interesse social para Porto Alegre – RS – Brasil. **Ambiente Construído**, v. 10, n. 2, p. 101-114, abr./jun. 2010.

HAIR, J. F.; ANDERSON, R.E.; TATHAM, R.L.; BLACK, W.C. **Análise multivariada de dados.** 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

HAMBY, D. M. A review of techniques for parameter sensitivity: analysis of environmental models. **Environmental Monitoring and Assessment**, v.32. p. 135-154, 1994.

IPPUJ. **Simgeo.** 2016. Disponível em: < <http://simgeo.joinville.sc.gov.br/>>. Acesso em: mar. de 2016.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARTIZATION. **ISO 7730: Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.** Geneva, 2005.

ISOPPO, G. **Dados climatológicos da estação da EPAGRI em Joinville entre 2013 à 2015.** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por macrorodrigo@gmail.com em 23/05/2016
JOINVILLE. Secretaria Municipal de Educação. **Resolução Nº169/2011/CME.** Regimento único da Rede Municipal de Educação de Joinville. Joinville, dez. de 2011.

KOWALTOWSKI, D. C. C. K. **Arquitetura Escolar: o projeto do ambiente de ensino.** São Paulo: Ed. Oficina de Textos, 2011.

LABEEE. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. **Analysis SOL-AR**. Disponível em: < <http://www.labeee.ufsc.br/downloads/softwares/analysis-sol-ar>>. Acesso em: mar. de 2017.

LAMBERTS, R.; BORGSTEIN, E. **Plataforma de Cálculo Benchmarking**. Disponível em: < <http://www.cbcs.org.br/website/benchmarking-plataforma/>>. Acesso em: jul. de 2017.

LAMBERTS, R., DUTRA, L., PEREIRA, F. **Eficiência energética na arquitetura**. 3.ed. Revisada. São Paulo: Ed. Pro Livros, 2014.

LAMBERTS, R.; GHISI, E.; ABREU, A.; CARLO, J. **Desempenho térmico de edificações**. 3.ed. Florianópolis:Universidade Federal de Santa Catarina. 2005.

LARA, Rigoberto Arambula; PERNIGOTTO, Giovanni; CAPPELLETTI, Francesca; ROMAGNONI, Piercarlo; GASPARELLA, Andrea. Energy audit of schools by means of cluster analysis. **Energy and Buildings**, v.95, p.160–171, 2015.

LIDDAMENT, M. W. **Air infiltration calculation techniques - an applications guide: AIVC**. Bracknell, UK, 1986.

LIU , Guopeng; LIU, Mingsheng. A rapid calibration procedure and case study for simplified simulation models of commonly used HVAC systems. **Building and Environment**, v.46, p.409-420, 2011.

LOPES, Felipe da Silva Duarte. **Simulação de consumo energético e conforto térmico para edifício de escritórios em Teresina/PI com o uso de estratégias bioclimáticas passivas**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016.

MAHONEY, C. Climate and house design. **Department of economic and social affairs**. New York. United Nations, 93 p, 1971.

MATOS, Juliana; PEDRINI, Aldomar, TINÔCO, Marcelo; RUCK, Alice. Análise Tipológica De Edifícios Residenciais Verticais A Luz Do RTQ-R. *In*: XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2014, Maceió. **Anais...**Maceió: ENTAC, 2014, p.648-656.

MAXIMILIANO, A. S.; CORDEIRO, M. T. A. **Partição de grupos e validação da análise de agrupamento para equipamentos de fiscalização eletrônica de trânsito**. 2008. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Estatística). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

MAZZAFERRO, L.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. **Manual de simulação computacional de edifícios com o uso do objeto *Ground Domain* no programa *EnergyPlus***. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2015. Relatório Interno – Departamento de Engenharia Civil.

MINGOTI, S. A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada**. Belo Horizonte: Ed. Da UFMG, 2005.

ORDENES, M.; PEDRINI, A.; GHISI, E.; LAMBERTS, R. **Metodologia Utilizada na Elaboração da Biblioteca de Materiais e Componentes Construtivos Brasileiros Para Simulações no VisualDOE 3.1**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2003. Relatório Interno – Departamento de Engenharia Civil.

PAPST, Ana Lúcia. **Uso de inércia térmica, no clima subtropical estudo de caso em Florianópolis – SC**. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

PEREIRA, C. D.; GHISI, E. The influence of the envelope on the thermal performance of ventilated and occupied houses. **Energy and buildings**, v. 43, p. 3391-3399, 2011.

PEREIRA, H. A. da C.; MELO, A. P.; VERSAGE, R.; SORGATO, M.; LAMBERTS, R. **Manual de simulação computacional de edifícios naturalmente ventilados no programa EnergyPlus – versão 8.0**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2013. Relatório Interno – Departamento de Engenharia Civil.

PEREIRA, Luísa Dias; RAIMONDO, Daniela; CORGNATI, Stefano Paolo; SILVA, Manuel Gameiro da. Energy consumption in schools - A review paper. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.40, p-911-922, 2014.

PIANOSI, Francesca; BEVEN, Keith; FREER, Jim; HALL, Jim W.; ROUGIER, Jonathan; STEPHENSON, David B.; WAGENER, Thorsten. Sensitivity analysis of environmental models: A systematic review with practical workflow. **Environmental Modelling & Software**, v. 79, p. 214-232, 2016.

RAVETZ, J. State of the stock—What do we know about existing buildings and their future prospects? **Energy Policy**, v. 36, n. 12, p.4462–4470, dez. 2008.

R-Bloggers.< <https://www.r-bloggers.com/clustering-mixed-data-types-in-r/>>. Acesso em: Jun. 2017.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. 2017. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em: <<http://www.R-project.org/>>. Acesso em: Maio 2017.

REYNOLDS, A.; RICHARDS, G.; DE LA IGLESIA, B.; RAYWARD-SMITH, V. Clustering rules: A comparison of partitioning and hierarchical clustering algorithms. **Journal of Mathematical Modelling and Algorithms**, v. 5, p-475–504, 2006.

RORIZ, M. **Correções nas Irradiâncias e Iluminâncias dos arquivos EPW da Base ANTAC**. São Carlos: ANTAC, 2012. Disponível em: <<http://roriz.dominiotemporario.com/doc/Correcoes%20nos%20arquivos%20EPW%20-%20ANTAC.pdf>>. Acesso em: 08 out. 2016.

ROSA, Aline Schaefer da. **Determinação de modelos de referência de Habitações populares unifamiliares para Florianópolis através de análise de agrupamento**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

SANTANA, M. V. **Influência de Parâmetros Construtivos no Consumo de Energia de Edifícios de Escritório Localizados em Florianópolis – SC**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

SANTAMOURIS, M.; MIHALAKAKOU, G.; PATARGIAS, P.; GAITANI, N.; SFAKIANAKI, K.; PAPAGLASTRA, M.; PAVLOU, C.; DOUKAS, P.; PRIMIKIRI, E.; GEROS, V.; ASSIMAKOPOULOS, M.N.; MITOULA, R.; ZEREFOS, S. Using intelligent clustering techniques to classify the energy performance of school buildings. **Energy Buildings**, v- 39, p. 45–51, 2007.

SCHAEFER, Aline; GHISI, Enedir. Method for obtaining reference buildings. **Energy and Buildings**, v-128, p-660-672, 2016.

SCHELLER, Camila; MELO, Ana Paula; SORGATO, Márcio; LAMBERTS, Roberto. **Análise de arquivos climáticos para a simulação do desempenho energético de edificações**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2015. Relatório Interno – Departamento de Engenharia Civil.

SILVA, A. S. **Desenvolvimento de um método para avaliação do desempenho térmico e energético de edificações aplicando análise de incertezas e sensibilidade**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

SORGATO, M. J. **Desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares ventiladas naturalmente**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

TORCELLINI, P.; DERU, M.; GRIFFITH, B.; BENNE, K. DOE commercial building benchmark models. *In: ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*, 2008, Washington. **Anais...**Washington: ACEEE, 2008.

TIAN, W.; CHOUDHARY, R. A probabilistic energy model for non-domestic building sectors applied to analysis of school buildings in greater London. **Energy and Buildings**, v.54, p.1-11, 2012.

TIAN, W. A review of sensitivity analysis methods in building energy analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 20, p.411–419, 2013.

TILL, J. E.; MEYER, H. R. **Radiological Assessments: a Textbook on Environmental Dose Assessment**. Washington, DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission. Report No.NUREG/CR-3332, 1983.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **EnergyPlus Energy Simulation Software**, 2017. Disponível em: <<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>>. Acesso em: Mar. 2017.

VERSAGE, R. S. **Ventilação natural e desempenho térmico de edifícios verticais multifamiliares em Campo Grande, MS**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). 2009. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

YILDIZ, Yusuf; ARSAN, Zeynep Durmus,. Identification of the building parameters that influence heating and cooling energy loads for apartment buildings in hot-humid climates. **Energy**, v.36, p.4287-4296, 2011.

APÊNDICES

APÊNDICE A- FICHA USADA NO LEVANTAMENTO DAS ESCOLAS.

| Levantamento Escola Municipal | | | |
|-------------------------------|---------------------------|-----------------------|---|
| Cidade | Nome do Edifício | | |
| Endereço | | | |
| Projetista | | | |
| Ano de ocupação | Orient. Fachada Principal | | |
| Área total do Edifício | Tipologia | | |
| Nº de Pavimentos | Funcionamento | | |
| Área de cada pav. | Circulação | | |
| Nº de alunos total | Portas | | |
| Área cada sala de aula | Área pátio coberto | | |
| Nº de alunos por sala | Pé-direito | | |
| Nº de salas de aula | | | |
| Cobertura | Material | Cor | |
| | | | |
| FACHADA 01 | Largura (m) | Altura (m) | Área(m²) Cor |
| Janelas 01 | Dimensões | Á. abertura vent Núm. | Tipo de abertura Tipo vent. Á. ambiente (m²) |
| Brises 01 | Janela | Tamanho | Tipo |
| | Material | Espessura | Cor |
| Paredes externas | | | |
| Paredes internas | | | |
| Piso | Material | Cor | Ar-cond. |
| | | | |
| FACHADA 02 | Largura (m) | Altura (m) | Área(m²) Cor |
| Janelas 02 | Dimensões | Área de abertura Núm. | Tipo de abertura Tipo de ven Á. ambiente (m²) |
| Brises 02 | Janela | Tamanho | Tipo |
| | Material | Espessura | Cor |
| Paredes externas | | | |
| Paredes internas | | | |
| Piso | Material | Ar- cond. | cor |

| | | | | | | |
|------------------|-------------|-------------------|-----------|------------------|------------|------------------|
| FACHADA 03 | Largura (m) | Altura (m) | Área(m²) | Cor | | |
| Janelas 03 | Dimensões | Á. abertura vent. | Núm. | Tipo de abertura | Tipo vent. | Á. ambiente (m²) |
| Brises 03 | Janela | Tamanho | Tipo | | | |
| Paredes externas | Materiais | Espessura | Cor | | | |
| Paredes internas | | | | | | |
| Piso | Material | Cor | ar- cond. | | | |

| | | | | | | |
|------------------|-------------|-------------------|----------|------------------|-----------------|------------------|
| FACHADA 04 | Largura (m) | Altura (m) | Área(m²) | Cor | | |
| Janelas 04 | Dimensões | Á. abertura vent. | num. | Tipo de abertura | Tipo ventilaçãc | Á. ambiente (m²) |
| Brises 04 | Janela | Tamanho | Tipo | | | |
| Paredes externas | Materiais | Espessura | Cor | | | |
| Paredes internas | | | | | | |
| Piso | Material | cor | ar-cond. | | | |

Croqui (indicar Norte) Numerar fachadas

APÊNDICE B - TABELA COM O RESULTADO DAS ZONAS TÉRMICAS NA MESMA ORIENTAÇÃO.

Tabela 40 –Graus-hora de resfriamento nas zonas térmicas da orientação sudeste

| Graus-hora de Resfriamento | | | | | | |
|---|---------|---------|---------|----------|----------|----------|
| Pavimento | Térreo | Térreo | Térreo | 1º andar | 1º andar | 1º andar |
| Zonas | Zona 17 | Zona 18 | Zona 19 | Zona 21 | Zona 22 | Zona 23 |
| Caso base | 2703.10 | 2834.96 | 2827.87 | 5342.49 | 5583.81 | 5544.93 |
| Caso paredes $\alpha=0.3$ | 2351.30 | 2455.72 | 2440.25 | 4890.12 | 5090.50 | 5046.12 |
| Caso paredes 15cm | 2473.79 | 2592.41 | 2580.82 | 5050.31 | 5272.93 | 5227.23 |
| Caso paredes duplas | 3218.22 | 3366.01 | 3370.58 | 5906.78 | 6167.90 | 6153.60 |
| Caso paredes inter. maciças | 2850.05 | 3067.87 | 3012.25 | 5264.56 | 5548.80 | 5467.47 |
| Caso sem sombreamento | 3228.29 | 3444.64 | 3392.08 | 5571.32 | 5843.23 | 5780.70 |
| Caso brises | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- |
| Caso cobertura fibrocimento | 2420.24 | 2545.28 | 2539.77 | 4890.71 | 5121.54 | 5086.26 |
| Caso cobertura lâ de vidro | 2255.22 | 2388.12 | 2381.46 | 4223.70 | 4500.68 | 4458.04 |
| Cobertura $\alpha=0.4$ | 1817.66 | 1924.82 | 1920.64 | 2732.33 | 2906.57 | 2878.63 |
| Cobertura $\alpha=0.2$ | 1326.50 | 1416.96 | 1414.63 | 1503.89 | 1630.89 | 1611.37 |
| Ventilação setpoint 20°C | 856.489 | 914.84 | 914.59 | 2164.68 | 2286.08 | 2271.37 |

Fonte: Autora (2017).

Tabela 41- Graus-hora de aquecimento nas zonas térmicas da orientação sudeste

| Graus-hora de Aquecimento | | | | | | |
|---|---------|---------|---------|----------|----------|----------|
| Pavimento | Térreo | Térreo | Térreo | 1º andar | 1º andar | 1º andar |
| Zonas | Zona 17 | Zona 18 | Zona 19 | Zona 21 | Zona 22 | Zona 23 |
| Caso base | 2443.42 | 2320.02 | 2333.75 | 3388.95 | 3217.46 | 3242.07 |
| Caso paredes $\alpha=0,3$ | 2669.05 | 2557.08 | 2579.84 | 3619.36 | 3463.94 | 3497.34 |
| Caso paredes 15cm | 2769.83 | 2647.37 | 2667.58 | 3732.71 | 3567.72 | 3599.93 |
| Caso paredes duplas | 1713.54 | 1607.90 | 1609.38 | 2626.55 | 2461.19 | 2467.21 |
| Caso paredes inter. maciças | 2291.16 | 2095.60 | 2110.37 | 3237.29 | 3015.19 | 3047.17 |
| Caso sem sombreamento | 2269.87 | 2101.58 | 2114.67 | 3298.73 | 3103.00 | 3129.56 |
| Caso brises | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- |
| Caso cobertura fibrocimento | 2665.36 | 2537.21 | 2551.51 | 4901.29 | 4699.39 | 4726.37 |
| Caso cobertura lã de vidro | 2206.28 | 2085.38 | 2101.68 | 3259.16 | 3076.33 | 3106.54 |
| Cobertura $\alpha=0,4$ | 3067.75 | 2920.09 | 2933.65 | 4801.04 | 4563.02 | 4590.69 |
| Cobertura $\alpha=0,2$ | 3561.22 | 3393.36 | 3406.24 | 5945.65 | 5657.21 | 5685.40 |
| Ventilação setpoint 20°C | 2796.36 | 2661.26 | 2676.36 | 3666.77 | 3488.33 | 3513.33 |

Fonte: Autora (2017).

Tabela 42 –Somatória de graus-hora nas zonas térmicas da orientação sudeste

| Total de Graus-hora | | | | | | |
|---|---------|---------|---------|----------|----------|----------|
| Pavimento | Térreo | Térreo | Térreo | 1º andar | 1º andar | 1º andar |
| Zonas | Zona 17 | Zona 18 | Zona 19 | Zona 21 | Zona 22 | Zona 23 |
| Caso base | 5146.52 | 5154.97 | 5161.63 | 8731.44 | 8801.27 | 8787.00 |
| Caso paredes $\alpha=0.3$ | 5020.36 | 5012.80 | 5020.09 | 8509.48 | 8554.44 | 8543.47 |
| Caso paredes 15cm | 5243.62 | 5239.78 | 5248.41 | 8783.02 | 8840.65 | 8827.16 |
| Caso paredes duplas | 4931.76 | 4973.91 | 4979.96 | 8533.33 | 8629.10 | 8620.81 |
| Caso paredes inter. maciças | 5141.21 | 5163.46 | 5122.63 | 8501.85 | 8563.99 | 8514.65 |
| Caso sem sombreamento | 5498.16 | 5546.23 | 5506.75 | 8870.05 | 8946.22 | 8910.26 |
| Caso brises | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- |
| Caso cobertura fibrocimento | 5085.61 | 5082.49 | 5091.29 | 9792.00 | 9820.93 | 9812.63 |
| Caso cobertura lâ de vidro | 4461.50 | 4473.50 | 4483.14 | 7482.87 | 7577.01 | 7564.58 |
| Cobertura $\alpha=0.4$ | 4885.42 | 4844.90 | 4854.28 | 7533.37 | 7469.59 | 7469.32 |
| Cobertura $\alpha=0.2$ | 4887.72 | 4810.32 | 4820.87 | 7449.54 | 7288.10 | 7296.76 |
| Ventilação setpoint 20°C | 3652.85 | 3576.09 | 3590.95 | 5831.45 | 5774.42 | 5784.70 |

Fonte: Autora (2017).

Tabela 43 – Porcentagem de horas anuais em conforto nas zonas térmicas da orientação sudeste

| Porcentagem de horas anuais em conforto | | | | | | |
|--|---------|---------|---------|----------|----------|----------|
| Pavimento | Térreo | Térreo | Térreo | 1º andar | 1º andar | 1º andar |
| Zonas | Zona 17 | Zona 18 | Zona 19 | Zona 21 | Zona 22 | Zona 23 |
| Caso base | 0.5739 | 0.5743 | 0.5741 | 0.4916 | 0.4945 | 0.4936 |
| Caso paredes $\alpha=0.3$ | 0.5783 | 0.5805 | 0.5799 | 0.4942 | 0.4947 | 0.4947 |
| Caso paredes 15cm | 0.5733 | 0.5755 | 0.5755 | 0.4903 | 0.4922 | 0.4912 |
| Caso paredes duplas | 0.5767 | 0.5780 | 0.5784 | 0.4969 | 0.4981 | 0.4978 |
| Caso paredes inter. maciças | 0.5702 | 0.5727 | 0.5743 | 0.4951 | 0.4989 | 0.4992 |
| Caso sem sombreamento | 0.5613 | 0.5638 | 0.5647 | 0.4904 | 0.4914 | 0.4926 |
| Caso brises | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- |
| Caso cobertura fibrocimento | 0.5814 | 0.5823 | 0.5822 | 0.4999 | 0.4991 | 0.4999 |
| Caso cobertura lã de vidro | 0.6036 | 0.6043 | 0.6040 | 0.5430 | 0.5417 | 0.5416 |
| Cobertura $\alpha=0.4$ | 0.5914 | 0.5930 | 0.5933 | 0.5191 | 0.5212 | 0.5213 |
| Cobertura $\alpha=0.2$ | 0.6032 | 0.6071 | 0.6068 | 0.5394 | 0.5417 | 0.5419 |
| Ventilação setpoint 20°C | 0.6747 | 0.6791 | 0.6785 | 0.5909 | 0.5947 | 0.5943 |

Fonte: Autora (2017).

Tabela 44 - Graus-hora de resfriamento nas zonas térmicas da orientação nordeste

| Graus-hora de Resfriamento | | |
|---|----------|----------|
| Pavimento | 1º andar | 1º andar |
| Zonas | Zona 44 | Zona 47 |
| Caso base | 4566.29 | 5518.62 |
| Caso paredes $\alpha=0.3$ | 4123.42 | 5107.03 |
| Caso paredes 15cm | 4305.96 | 5234.75 |
| Caso paredes duplas | 5056.52 | 6088.54 |
| Caso paredes inter. maciças | 4373.78 | 5312.53 |
| Caso sem sombreamento | 5366.57 | 6745.68 |
| Caso brises | 4267.90 | 5194.24 |
| Caso cobertura fibrocimento | 4247.11 | 5093.63 |
| Caso cobertura lâ de vidro | 3464.29 | 4463.01 |
| Cobertura $\alpha=0.4$ | 2204.06 | 2954.25 |
| Cobertura $\alpha=0.2$ | 1155.94 | 1708.55 |
| Ventilação setpoint 20°C | 1841.76 | 2222.37 |

Fonte: Autora (2017).

Tabela 45 - Graus-hora de aquecimento nas zonas térmicas da orientação nordeste

| Graus-hora de Aquecimento | | |
|---|----------|----------|
| Pavimento | 1º andar | 1º andar |
| Zonas | Zona 44 | Zona 47 |
| Caso base | 3808.85 | 3300.76 |
| Caso paredes $\alpha=0.3$ | 4097.31 | 3506.44 |
| Caso paredes 15cm | 4197.73 | 3619.03 |
| Caso paredes duplas | 2963.62 | 2601.64 |
| Caso paredes inter. maciças | 3682.81 | 3190.89 |
| Caso sem sombreamento | 3566.51 | 3011.35 |
| Caso brises | 4034.34 | 3492.20 |
| Caso cobertura fibrocimento | 5540.78 | 4807.34 |
| Caso cobertura lâ de vidro | 3783.32 | 3161.31 |
| Cobertura $\alpha=0.4$ | 5344.27 | 4602.18 |
| Cobertura $\alpha=0.2$ | 6572.86 | 5662.68 |
| Ventilação setpoint 20°C | 4101.30 | 4234.58 |

Fonte: Autora (2017).

Tabela 46 – Somatória de graus-hora nas zonas térmicas da orientação nordeste

| Total de Graus-hora | | |
|---|----------|----------|
| Pavimento | 1º andar | 1º andar |
| Zonas | Zona 44 | Zona 47 |
| Caso base | 8375.14 | 8819.38 |
| Caso paredes $\alpha=0.3$ | 8220.73 | 8613.48 |
| Caso paredes 15cm | 8503.69 | 8853.78 |
| Caso paredes duplas | 8020.14 | 8690.18 |
| Caso paredes inter. maciças | 8056.59 | 8503.43 |
| Caso sem sombreamento | 8933.08 | 9757.03 |
| Caso brises | 8302.25 | 8686.44 |
| Caso cobertura fibrocimento | 9787.89 | 9900.97 |
| Caso cobertura lâ de vidro | 7247.60 | 7624.32 |
| Cobertura $\alpha=0.4$ | 7548.33 | 7556.42 |
| Cobertura $\alpha=0.2$ | 7728.80 | 7371.23 |
| Ventilação setpoint 20°C | 5943.06 | 6456.95 |

Fonte: Autora (2017).

Tabela 47 - Porcentagem de horas anuais em conforto nas zonas térmicas da orientação nordeste

| Porcentagem de horas anuais em conforto | | |
|--|----------|----------|
| Pavimento | 1º andar | 1º andar |
| Zonas | Zona 44 | Zona 47 |
| Caso base | 0.4949 | 0.4921 |
| Caso paredes $\alpha=0.3$ | 0.4953 | 0.4935 |
| Caso paredes 15cm | 0.4922 | 0.4912 |
| Caso paredes duplas | 0.5034 | 0.4977 |
| Caso paredes inter. maciças | 0.5008 | 0.4987 |
| Caso sem sombreamento | 0.4869 | 0.4801 |
| Caso brises | 0.4934 | 0.4909 |
| Caso cobertura fibrocimento | 0.4959 | 0.4937 |
| Caso cobertura lã de vidro | 0.5450 | 0.5350 |
| Cobertura $\alpha=0.4$ | 0.5187 | 0.5140 |
| Cobertura $\alpha=0.2$ | 0.5349 | 0.5317 |
| Ventilação setpoint 20°C | 0.5832 | 0.5736 |

Fonte: Autora (2017).

APÊNDICE C – CÁLCULO DA ÁREA DAS JANELAS DAS SALAS DE AULA EM RELAÇÃO À ÁREA DO PISO

1. Sala de Aula tipo 01: Zona térmica 08

Área de piso 23,7 m²

Área de janela 5,13 m²

Área de janela 21,64% da área de piso

2. Sala de Aula tipo 02: Zonas térmicas 17,18, 19, 21, 22 e 23

Área de piso 49,6 m²

Área de janela 10,26 m²

Área de janela 20,68% da área de piso

3. Sala de Aula tipo 03: Zonas térmicas 20 e 24

Área de piso 49, 2 m²

Área de janela 8,1 m²

Área de janela 16,46 % da área de piso

4. Sala de Aula tipo 04: Zonas térmicas 25, 26, 28, 29, 30, 31 e 32

Área de piso 49,86 m²

Área de janela 12,24 m²

Área de janela 24,55 % da área de piso

5. Sala de Aula tipo 05: Zonas térmicas 44, 45, 46 e 27

Área de piso 48,00 m²

Área de janela 10,26 m²

Área de janela 21,37 % da área de piso