



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE TIJOLOS ECOLÓGICOS
EM ARACAJU/SE POR MEIO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Maria Paula Dunel

São Cristóvão/SE
2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE TIJOLOS ECOLÓGICOS
EM ARACAJU/SE POR MEIO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Maria Paula Dunel

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Sergipe como requisito parcial à obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL.

Orientadora: Prof.^a Dra. Carla Fernanda Barbosa Teixeira.

São Cristóvão/SE
2020

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE

D915a Dunel, Maria Paula
Avaliação do desempenho térmico de tijolos ecológicos em Aracaju-SE através de simulação computacional / Maria Paula Dunel ; orientadora Carla Fernanda Barbosa Teixeira. - São Cristóvão, 2020.
150 f. : il.

Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Sergipe, 2020.

1. Engenharia civil. 2. Tijolos. 3. Produtos ecológicos. 4. Gestão integrada de resíduos sólidos urbanos. 5. Sustentabilidade. 6. Análise térmica. I. Teixeira, Carla Fernanda Barbosa, orient. II. Título.

CDU 624.01

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

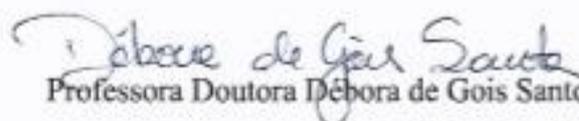
MARIA PAULA DUNEL

APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE EM 31 DE JANEIRO DE 2020

BANCA EXAMINADORA:



Professora Doutora Carla Fernanda Barbosa Teixeira
Orientadora



Professora Doutora Débora de Gois Santos

1ª Examinadora

Universidade Federal de Sergipe



Professora Doutora Cristina Guimarães Cesar

2ª Examinadora

CEFET-MG

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu esposo, Eduardo, grande colaborador e incentivador, e a minha filha, Martina, a luz da minha vida. Sem vocês, nenhuma conquista valeria a pena.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Liliana e Roberto, e minhas irmãs, Vicky e Belén, obrigada pelo apoio e incentivo, mesmo a distância sempre estiveram presentes nesta minha trajetória.

Ao meu irmão, Juan, obrigada pelos ensinamentos da tabela dinâmica do *Excel*® para tratar os dados.

As minhas amigas da Argentina, Noelia e Paula, que me ajudaram com palavras de incentivo em toda minha caminhada.

À Ingrid, que sempre me ajudou nos momentos mais corridos.

Aos meus sogros, cunhados e cunhadas, obrigada pelo apoio de sempre.

Agradeço a minha orientadora, Dr^a Carla Fernanda Barbosa Teixeira, pela oportunidade para realizar o mestrado.

Aos membros da banca examinadora, Dr^a Débora de Gois Santos e Dr^a Cristina Guimarães Cesar, pela disponibilidade em avaliar e contribuir com este trabalho. Todo o meu agradecimento por tudo que aprendi com vocês, como pessoa e excelente profissionais que são.

Ao Eng. Ignácio Marcolini, da CEAMSE, e a Empresa CEAMSE, pela disponibilidade e gentileza em me receber na Argentina e por me fornecer todos os dados necessários para realizar a pesquisa.

À Evelise Didoné, pesquisadora do Labconf/GECA/UFAL, pelos ensinamentos com o *software EnergyPlus*® e pela grande contribuição técnica com minha pesquisa.

E, finalmente, a todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho.

RESUMO

A crescente urbanização e a industrialização das sociedades modernas têm gerado a produção em grande escala de resíduos sólidos, constituindo a proliferação destes, portanto, um problema a nível mundial, com consequências imediatas à saúde pública e ao meio ambiente. Os resíduos sólidos urbanos devem ser geridos e controlados de forma a reduzir o seu volume e periculosidade, minimizando os prejuízos da poluição ambiental e os impactos sobre a saúde das populações. Atualmente, as técnicas de controle de resíduos mais comuns são a reciclagem e a compostagem. Tais técnicas são conhecidas como ferramentas que possibilitam o aproveitamento dos resíduos; nesse contexto, a utilização de materiais recicláveis na construção civil vem crescendo dia a dia. No entanto, no Brasil, não foi encontrada abordagem referente a algum material para a construção civil que tenha como base o resíduo sólido domiciliar, como é o caso do tijolo ecológico. Neste trabalho, foi analisado o desempenho térmico do tijolo ecológico, um tijolo de baixo impacto ambiental. O principal objetivo do estudo foi verificar a eficácia do tijolo ecológico quanto ao desempenho térmico. A estratégia metodológica consistiu em se mensurar o desempenho térmico de dois modelos de referência com alvenaria de tijolos maciço cerâmico, logo, foram realizadas alterações na parede equivalente do modelo de referência, como o acréscimo de argamassa de revestimento e pintura de cor branca ($\alpha=0,20$). Logo foi realizada a substituição da alvenaria de tijolo maciço cerâmico pela alvenaria de tijolo com ecológicos produzidos com RSUs estabilizados com a finalidade de comparar os valores de temperatura do ar interna das edificações. A mensuração foi realizada por simulação computacional com o software *EnergyPlus*® utilizando os protótipos em escala real, no dia típico de verão (21 de dezembro) no estado de Sergipe. Nos resultados, observou-se que nas edificações simuladas com parede equivalente de tijolos ecológicos, obteve-se uma diferença mínima de temperatura do ar interna de não mais de $0,14^{\circ}\text{C}$ no mais crítico do dia, horário às 15h, em comparação as edificações simuladas com parede equivalente de tijolos maciços cerâmicos. Já nas simulações realizadas com a parede equivalente com argamassa de revestimento e pintura de cor branca não tiveram diferença, mesmo no horário mais crítico do dia. Porém, observa-se que houve significativa melhoria do desempenho térmico das alvenarias, com uma diferença de temperatura interna do ar de chegando aos $1,84^{\circ}\text{C}$ com relação aos tijolos sem revestimento e pintura branca ($\alpha=0,20$). Portanto, para melhor desempenho térmico das edificações na zona bioclimática-8, é indicado que a vedação composta por tijolos ecológicos seja revestida com argamassa e tenha a sua fachada pintada com cor branca de absorvância igual a 0,20. Deste modo, verificou-se alteração nos valores de resistência térmica e atraso térmicos referentes ao comportamento das alvenarias nos diferentes ambientes da edificação. Assim, a espessura do material, o calor específico, a absorvância e a condutividade térmica foram as propriedades que mais influenciaram no desempenho térmico da edificação. Constatou-se que o tijolo ecológico, por ter maior espessura, maior calor específico e menor condutividade térmica, logrou uma maior otimização do desempenho térmico da edificação em comparação com o tijolo cerâmico maciço. Mas isso quando o tijolo ecológico é comparado apenas sem a aplicação da argamassa comum para o assentamento do tijolo.

Palavras-chave: Resíduos Sólidos Urbanos; Sustentabilidade; Tijolo Ecológico; Desempenho Térmico.

ABSTRACT

The growing urbanization and industrialization of modern societies has generated large-scale production of solid waste, thus constituting a proliferation of these, a problem worldwide, with immediate consequences for public health and the environment. Urban solid waste must be managed and controlled in order to reduce its volume and dangerousness, minimizing the damage caused by environmental pollution and the impacts on people's health. Currently, the most common waste control techniques are recycling and composting. Such techniques are known as tools that enable the use of waste, in this context, the use of recyclable materials in civil construction has been growing day by day. However, in Brazil, no approach was found regarding any material for civil construction based on solid household waste, such as ecological brick. In this work, the thermal performance of the ecological brick, a brick with low environmental impact, was analyzed. The main objective of the study was to verify the effectiveness of the ecological brick in terms of thermal performance. The methodological strategy consisted of measuring the thermal performance of two reference models with solid ceramic brick masonry, therefore, changes were made to the equivalent wall of the reference model, such as the addition of coating mortar and white paint ($\alpha = 0.20$). Soon, the replacement of solid ceramic brick masonry by brick masonry with ecological ones produced with stabilized RSUs in order to compare the indoor air temperature values of buildings. The measurement was performed by computer simulation with the EnergyPlus® software using the full-scale prototypes, on a typical summer day (December 21) in the state of Sergipe. In the results, it was observed that in the simulated buildings with an equivalent wall of ecological bricks, a minimum difference of internal air temperature of no more than 0.14 ° C was obtained in the most critical of the day, time at 3 pm, in comparison simulated buildings with an equivalent wall of solid ceramic bricks. In the simulations carried out with the equivalent wall with coating mortar and white paint, there was no difference, even at the most critical time of the day. However, it is observed that there was a significant improvement in the thermal performance of masonry, with a difference in the internal air temperature of reaching 1.84 ° C in relation to uncoated bricks and white paint ($\alpha = 0.20$). Therefore, for better thermal performance of buildings in the bioclimatic zone-8, it is recommended that the fence made of ecological bricks be coated with mortar and have its facade painted with a white color of absorbance equal to 0.20. Thus, there was a change in the values of thermal resistance and thermal delay related to the behavior of masonry in different building environments. Thus, material thickness, specific heat, absorbance and thermal conductivity were the properties that most influenced the building's thermal performance. It was found that the ecological brick, due to its greater thickness, greater specific heat and lower thermal conductivity, achieved a greater optimization of the building's thermal performance compared to solid ceramic brick. But this is when the ecological brick is compared only without the application of the common mortar for laying the brick.

Key words: Urban Solid Waste; Sustainability; Ecologic Brick; Thermal Performance.

SUMÁRIO

	Pág.
1 INTRODUÇÃO.....	18
1.1 JUSTIFICATIVA	18
1.2 HIPÓTESES DO TRABALHO.....	20
1.3 OBJETIVOS	21
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	21
2 REVISÃO DA LITERATURA	23
2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	23
2.1.1 Brasil	23
2.1.2 Argentina.....	25
2.2 A INDÚSTRIA DA CERÂMICA VERMELHA NA CONSTRUÇÃO CIVIL E SEU IMPACTO AMBIENTAL NO BRASIL: O CASO DO TIJOLO CERÂMICO MACIÇO.....	28
2.3 DESEMPENHO TÉRMICO DAS EDIFICAÇÕES.....	30
2.3.1 Fechamento com materiais opacos.....	31
2.3.2 Inercia térmica e absorvância dos componentes da envoltória	38
2.4 NORMAS TÉCNICAS DE DESEMPENHO TÉRMICO NO BRASIL.....	39
2.4.1 NBR 15220 (2005): Desempenho térmico de edificações	39
2.4.2 NBR 15575 (2013): Edificações Habitacionais-Desempenho	44
2.5 ENERGYPLUS®.....	45
2.6 ASHRAE STANDARD 140: MÉTODO BESTEST-CASO 600.....	48
3 MATERIAL DE ESTUDO: TIJOLO ECOLÓGICO DE RSU	51
3.1 COORDINACIÓN ECOLÓGICA ÁREA METROPOLITANA SOCIEDAD DEL ESTADO (CEAMSE)	51
3.2 PROCESSOS DE TRATAMENTO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	52
3.3 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DO TIJOLO ECOLÓGICO	53
3.4 APRESENTAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, MECÂNICAS E TÉRMICAS DO TIJOLO ECOLÓGICO.....	55
4. MÉTODO DE TRABALHO.....	57
4.1 DESCRIÇÃO DAS ETAPAS.....	57
4.1.1 Modelo caso 600	61
4.1.1.1 Modelagem da edificação	61
4.1.1.2 Descrição da edificação	62
4.1.1.3 Rotinas de ocupação	63
4.1.1.4 Ventilação natural.....	64
4.1.1.5 Temperatura do solo	64
4.1.1.6 Elementos construtivos do envelope	65

4.1.1.7	Variações no modelo de referência	68
4.1.2	Modelo de habitação de interesse social (HIS)	75
4.1.2.1	<i>Modelagem da edificação</i>	75
4.1.2.2	<i>Descrição da edificação</i>	76
4.1.2.3	<i>Rotinas de ocupação</i>	78
4.1.2.4	<i>Ventilação natural</i>	79
4.1.2.5	<i>Temperatura do solo</i>	80
4.1.2.6	Elementos construtivos do envelope	80
4.1.2.7	Variações no modelo de referência	81
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	82
5.1	MODELO CASO 600	86
5.2	MODELO DE HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL (HIS)	98
5.3	AVALIAÇÃO DAS ALVENARIAS COM TIJOLOS ECOLÓGICOS E TIJOLOS MACIÇOS CERÂMICOS: DESEMPENHO TÉRMICO	108
5.3.1	Análise das propriedades térmicas	109
5.3.2	Análise quanto a influência da argamassa de assentamento e de revestimento	111
5.3.3	Análise quanto a influência da pintura externa	114
5.3.4	Avaliação do desempenho térmico das vedações segundo os limites estipulados pela norma NBR 15220 (2005) e NBR 15575 (2013)	117
6	CONCLUSÕES	121
7	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	123
	REFERÊNCIAS	124
	APÊNDICE A – CÁLCULOS DOS SISTEMAS DE PAREDES EQUIVALENTES	130

LISTA DE TABELAS

	Pág.
TABELA 1 - RECOMENDAÇÕES CONSTRUTIVAS PARA A ZB8.....	44
TABELA 2 - DIMENSÕES E PROPRIEDADES TERMO FÍSICAS DO TIJOLO ECOLÓGICO.....	67
TABELA 3 - PROPRIEDADES DA ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO.....	68
TABELA 4 - DIMENSÕES E PROPRIEDADES TERMO FÍSICAS DA COMBINAÇÃO TIJOLO COM ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO.....	69
TABELA 5 - PROPRIEDADES DE EMISSIVIDADE E ABSORTÂNCIA DOS MATERIAIS EXPOSTOS AO EXTERIOR.	69
TABELA 6 - COMPARAÇÃO PROPRIEDADES TERMO FÍSICAS PARA DIFERENTES SISTEMAS.....	72
TABELA 7 - PROPRIEDADES DE EMISSIVIDADE E ABSORTÂNCIA DA PINTURA BRANCA.	72
TABELA 8 - DIMENSÕES DO TIJOLO ECOLÓGICO PRODUZIDO COM REJEITOS DE RSU E DO TIJOLO MACIÇO CERÂMICO PARA VEDAÇÃO DAS EDIFICAÇÕES..	72
TABELA 9 - DIMENSÕES E PROPRIEDADES TERMO FÍSICAS DO TIJOLO MACIÇO CERÂMICO.....	73
TABELA 10 - DIMENSÕES E PROPRIEDADES TERMO FÍSICAS DA COMBINAÇÃO TIJOLO MACIÇO CERÂMICO COM ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO.....	74
TABELA 11 - DIFERENÇA DE TEMPERATURA INTERNA DO AR ENTRE OS AMBIENTES SIMULADOS COM TIJOLOS MACIÇOS CERÂMICOS E COM TIJOLOS ECOLÓGICOS.....	111
TABELA 12 - COMPARAÇÃO PROPRIEDADES TERMO FÍSICAS PARA DIFERENTES SISTEMAS.....	114
TABELA 13 - PROPRIEDADES TÉRMICAS CALCULADAS DAS DIFERENTES COMBINAÇÕES.....	118
TABELA 14 - VALORES DO FATOR SOLAR DAS COMBINAÇÕES POSSÍVEIS DAS VARIÁVEIS ANALISADAS.....	119
TABELA 15 - VALORES CALCULADOS DE TRANSMITÂNCIA TÉRMICA, FATOR SOLAR E ATRASO TÉRMICO E AS RECOMENDAÇÕES DAS NORMAS NBR15220(2005) E NBR 15575(2013)	123
TABELA 16 - DIMENSÕES E PROPRIEDADES TERMO FÍSICAS DOS MATERIAIS CONSTITUINTES DO SISTEMA DE PAREDE EQUIVALENTE (TIJOLO ECOLÓGICO + ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO)	130

TABELA 17 - DIMENSÕES E PROPRIEDADES TERMO FÍSICAS DA COMBINAÇÃO TIJOLO COM ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO.....	132
TABELA 18 - DIMENSÕES E PROPRIEDADES TERMO FÍSICAS DA ARGAMASSA DE REVESTIMENTO)	133
TABELA 19- COMPARAÇÃO PROPRIEDADES TERMO FÍSICAS PARA DIFERENTES SISTEMAS.....	133
TABELA 20- DIMENSÕES E PROPRIEDADES TERMO FÍSICAS DOS MATERIAIS CONSTITUINTES DO SISTEMA DE PAREDE EQUIVALENTE (TIJOLO ECOLÓGICO + ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO)	133
TABELA 21 - DIMENSÕES E PROPRIEDADES TERMO FÍSICAS DA COMBINAÇÃO TIJOLO COM ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO.....	135
TABELA 22- DIMENSÕES E PROPRIEDADES TERMO FÍSICAS DA ARGAMASSA DE REVESTIMENTO)	136
TABELA 23 - COMPARAÇÃO PROPRIEDADES TERMO FÍSICAS PARA DIFERENTES SISTEMAS.....	137
TABELA 24 - VALORES DE ABSORTÂNCIA PARA OS MATERIAIS UTILIZADOS.....	139
TABELA 25 - DADOS EXTRAÍDA DO EXCEL COM OS CÁLCULOS DAS PROPRIEDADES FÍSICO TÉRMICAS DOS TIJOLOS	140

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
FIGURA 1 - TIJOLO CERÂMICO MACIÇO E TIJOLO ECOLÓGICO.....	29
FIGURA 2 - FECHAMENTO OPACO EXPOSTO À RADIAÇÃO SOLAR.....	33
FIGURA 3 - MAPA DO ZONEAMENTO BIOCLIMÁTICO BRASILEIRO	42
FIGURA 4 - MODULO EQUIVALENTE DE PAREDE DE TIJOLOS MACIÇOS CERÂMICOS REBOCADOS EM AMBAS AS FACES	47
FIGURA 5 - CASO BASE DE PROTÓTIPO DE MODELAGEM: DO CASO 600.....	49
FIGURA 6 - PROCESSO DE SEPARAÇÃO MECÂNICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	52
FIGURA 7 - PROCESSO DE TRATAMENTO BIOLÓGICO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	53
FIGURA 8 - RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ESTABILIZADOS.....	54
FIGURA 9 - SEQUÊNCIA DA FABRICAÇÃO DO TIJOLO COM O ADITIVO DE CAL, AREIA E CIMENTO.....	54
FIGURA 10- FÁBRICA DE TIJOLOS ECOLÓGICOS.....	55
FIGURA 11- TIJOLO ECOLÓGICO FINALIZADO.....	55
FIGURA 12- ESQUEMA DE MEDIÇÃO SEGUNDO O MÉTODO INTL.....	56
FIGURA 13- ESQUEMA DA ETAPA 1: MODELO CASO 600.....	60
FIGURA 14- ESQUEMA DA ETAPA 2: MODELO HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL (HIS).....	61
FIGURA 15- PLANTA BAIXA DO MODELO CASO 600.....	63
FIGURA 16- PERSPECTIVA DO MODELO CASO 600.....	64
FIGURA 17- COMPOSIÇÃO DO PISO DA EDIFICAÇÃO DO CASO 600.....	66
FIGURA 18- SISTEMA DE PAREDE EQUIVALENTE COMPOSTO POR TIJOLOS MACIÇO CERÂMICO.....	67
FIGURA 19- SISTEMA DE PAREDE EQUIVALENTE COMPOSTO POR TIJOLOS MACIÇO CERÂMICO COM REVESTIMENTO E PINTURA.....	70
FIGURA 20- SISTEMA DE PAREDE EQUIVALENTE COM TIJOLOS ECOLÓGICOS.....	73
FIGURA 21- SISTEMA DE PAREDE EQUIVALENTE COM TIJOLOS ECOLÓGICOS COM REVESTIMENTO E PINTURA.....	74
FIGURA 22- PLANTA BAIXA DA HIS.....	76
FIGURA 23- ESQUEMA DAS ZONAS TÉRMICA DA HIS.....	77
FIGURA 24- PERSPECTIVA DA HIS.....	77
FIGURA 25- SEQUÊNCIA DAS VARIÁVEIS PARA AS SIMULAÇÕES.....	81

FIGURA 26- ESQUEMA DA APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS NA ETAPA 1.....	84
FIGURA 27- ESQUEMA DA APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS NA ETAPA 2.....	85
FIGURA 28- ESQUEMA DA APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DAS ALVENARIAS COM TIJOLOS ECOLÓGICOS E TIJOLOS.....	86
FIGURA 29- DIFERENÇAS ENTRE A TEMPERATURA DO AR EXTERNA E A INTERNA DA ZONA TÉRMICA TIJOLO ECOLÓGICO E DO TIJOLO MACIÇO CERÂMICO SEM REVESTIMENTO DURANTE O DIA.....	90
FIGURA 30- DIFERENÇAS NAS PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DOS TIJOLOS: ESPESSURA.....	91
FIGURA 31- DIFERENÇAS NAS PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DOS TIJOLOS: CONDUTIVIDADE TÉRMICA.....	92
FIGURA 32- COMPARAÇÃO DA TEMPERATURA DO AR EXTERNA COM A INTERNA DO CASO 600 SIMULADO COM TIJOLOS ECOLÓGICOS COM REVESTIMENTO E PINTURA ÀS 15H.....	196
FIGURA 33- COMPARAÇÃO DAS TEMPERATURAS DO AR (EXTERNA E INTERNA) DA SIMULAÇÃO DE PAREDE EQUIVALENTE DE TIJOLO MACIÇO CERÂMICO COM REVESTIMENTO E PINTURA (1B) E A SIMULAÇÃO DE PAREDE EQUIVALENTE DE TIJOLO ECOLÓGICO COM REVESTIMENTO E PINTURA (1D)	99
FIGURA 34- COMPARAÇÃO DA TEMPERATURA DO AR INTERNA DA ZONA TÉRMICA DA SALA.....	104
FIGURA 35- COMPARAÇÃO DA TEMPERATURA DO AR INTERNA DA ZONA TÉRMICA DO QUARTO 01.....	104
FIGURA 36- COMPARAÇÃO DA TEMPERATURA DO AR INTERNA DA ZONA TÉRMICA DO QUARTO 02.....	105
FIGURA 37- COMPARAÇÃO DA TEMPERATURA DO AR INTERNA DA ZONA TÉRMICA DO QUARTO 03.....	106
FIGURA 38- COMPARAÇÃO DA TEMPERATURA DO AR EXTERNA COM A INTERNA DA HIS SIMULADO COM TIJOLOS ECOLÓGICOS COM REVESTIMENTO E PINTURA DE COR BRANCA (A=0,20) ÀS 15H.....	109
FIGURA 39- RESISTÊNCIA TÉRMICA ALVENARIAS SEM ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO.....	113
FIGURA 40- TRANSMITÂNCIA TÉRMICA ALVENARIAS SEM ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO.....	114

FIGURA 41- CAPACIDADE TÉRMICA ALVENARIAS SEM ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO.....	114
FIGURA 42- ATRASO TÉRMICO ALVENARIAS SEM ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO.....	114
FIGURA 43- RESISTÊNCIA TÉRMICA ALVENARIAS COM ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO.....	116
FIGURA 44- TRANSMITÂNCIA TÉRMICA ALVENARIAS COM ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO.....	116
FIGURA 45- CAPACIDADE TÉRMICA ALVENARIAS COM ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO.....	117
FIGURA 46- ATRASO TÉRMICO ALVENARIAS COM ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO.....	117
FIGURA 47- FATOR SOLAR ALVENARIAS SEM ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO.....	120
FIGURA 48- FATOR SOLAR DE ALVENARIAS DE TIJOLOS ECOLÓGICOS COM ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO.....	120
FIGURA 49- FATOR SOLAR DE ALVENARIAS DE TIJOLOS MACIÇOS CERÂMICOS COM ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO.....	121

LISTA DE QUADROS

	Pág.
QUADRO 1 - DIMENSÕES NOMINAIS DO TIJOLO MACIÇO CERÂMICO.....	29
QUADRO 2 - RESISTÊNCIA MÍNIMA À COMPRESSÃO DO TIJOLO MACIÇO CERÂMICO	30
QUADRO 3 - CONDUTIVIDADE TÉRMICA DOS MATERIAIS.....	35
QUADRO 4 - DIVISÃO DAS PARTES DA NBR 15220/ABNT 2005: DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES.....	41
QUADRO 5 - TRANSMITÂNCIA TÉRMICA, ATRASO TÉRMICO E FATOR DE CALOR SOLAR ADMISSÍVEIS PARA CADA TIPO DE VEDAÇÃO.....	43
QUADRO 6 - ABERTURAS PARA VENTILAÇÃO PARA AS ZONAS BIOCLIMÁTICAS (ZBS).....	43
QUADRO 7 - DESCRITIVO DAS PARTES DA NBR 15575 (ABNT, 2013)	44
QUADRO 8 - DIMENSÕES NOMINAIS DO TIJOLO ECOLÓGICO	56
QUADRO 9 - PROPRIEDADES TÉRMICAS DO TIJOLO ECOLÓGICO.	57
QUADRO 10 - HORÁRIOS DE USO DE ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL NO MODELO HIS DA SIMULAÇÃO.....	78
QUADRO 11 - HORÁRIO DE USO DE EQUIPAMENTOS.....	79
QUADRO 12 - TEMPERATURA DO AR (EXTERNA E INTERNA) DA SIMULAÇÃO COM PAREDE EQUIVALENTE DE TIJOLO MACIÇO CERÂMICO (1A) E COM PAREDE EQUIVALENTE DE TIJOLO ECOLÓGICO (1C).....	87
QUADRO 13 – TEMPERATURA DO AR (EXTERNA E INTERNA) DA SIMULAÇÃO COM PAREDE EQUIVALENTE DE TIJOLO ECOLÓGICO SEM REVESTIMENTO E PINTURA (1C) E DA SIMULAÇÃO COM PAREDE EQUIVALENTE DE TIJOLO ECOLÓGICO COM REVESTIMENTO E PINTURA (1D)	93
QUADRO 14 – TEMPERATURA DO AR (EXTERNA E INTERNA) DA SIMULAÇÃO DE PAREDE EQUIVALENTE DE TIJOLO MACIÇO CERÂMICO COM REVESTIMENTO E PINTURA (1B) E A SIMULAÇÃO DE PAREDE EQUIVALENTE DE TIJOLO ECOLÓGICO COM REVESTIMENTO E PINTURA (1D)	97
QUADRO 15 – TEMPERATURA DO AR EXTERNA E INTERNA DAS ZONAS TÉRMICAS, SALA E QUARTOS, DA HIS COM TIJOLOS ECOLÓGICOS SEM REVESTIMENTO E PINTURA (A=0,20)..	100
QUADRO 16 – TEMPERATURA DO AR EXTERNA E INTERNA DAS ZONAS TÉRMICAS, SALA E QUARTOS, DA HIS COM TIJOLOS MACIÇO CERÂMICO SEM REVESTIMENTO E PINTURA (A=0,20).....	101
QUADRO 17 – TEMPERATURA DO AR EXTERNA E INTERNA DAS ZONAS TÉRMICAS, SALA E QUARTOS, DA HIS COM TIJOLOS ECOLÓGICOS COM REVESTIMENTO E PINTURA (A=0,20).....	107

LISTA DE ABREVIATURAS

ABRELPE	Associação Brasileiras das Empresas de Limpeza Públicas e Resíduos Especiais
ABNT	Associação brasileira de normas técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
CBIC	Câmara Brasileira da Indústria da Construção
CEAMSE	Coordenación Ecológica Área Metropolitana Sociedad del Estado
CEF	Caixa Econômica Federal
CEMPRE	Compromisso Empresarial pela Reciclagem
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
GIRSU	Gerenciamento integrado de Resíduos Sólidos Urbanos
HIS	Habitação de Interesse Social
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
INTI	Instituto Nacional de Tecnologia Industrial
IRAM	Instituto Argentino de Normalización y Certificación
ISO	International Organization for Standardization
LabEEE	Laboratório de Eficiência Energética em Edificações
m	Metros
MAyPE	Ministério de Ambiente y Espacio Público
NBR	Norma Brasileira
ONU	Organização das Nações Unidas
PET	Politereftalato de Etileno
Planares	Plano Nacional de Resíduos Sólidos
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SE	Sergipe
TMB	Tratamento Mecânico Biológico
TRY	Test Reference Year
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UFS	Universidade Federal de Sergipe
ZB	Zona Bioclimática Brasileira

LISTA DE SÍMBOLOS

h_r	Coeficiente de trocas térmicas por radiação
Q_r	Intensidade do fluxo térmico por radiação
t	Temperatura do ar
T_1	Temperatura Externa
T_2	Temperatura Interna
θ	Temperatura da superfície da parede considerada
θ_r	Temperatura radiante relativa às demais superfícies
e	Espessura da parede
θ_e	Temperatura da superfície externa da envolvente
θ_i	Temperatura da superfície interna da envolvente
δ	Coeficiente e condutibilidade térmica do material
α	Absortância
φ	Atraso térmico
ε	Emissividade
c	Calor específico
q_r	Intensidade do fluxo térmico por radiação
q_c	Intensidade do fluxo térmico por convecção
h_c	Coeficiente de trocas térmicas por convecção
R	Resistência térmica
R_t	Resistência térmica total
R_{se}	Resistência superficial externa
R_{si}	Resistência superficial interna
R_a, R_b, R_n	Resistências térmicas de superfície para cada seção
A	Área
C	Capacidade térmica
C_t	Capacidade térmica total
$CT_a, CT_b,$	Capacidades térmicas do componente para cada seção
U	Transmitância térmica
U_t	Transmitância térmica total
ρ	Densidade
FS	Fator solar
R_a	Resistência da argamassa
R_t	Resistência do tijolo
R_{conv1}	Resistências superficiais internas
R_{conv2}	Resistências superficiais externa

1 INTRODUÇÃO

As discussões sobre os impactos ambientais se converteram em um tema atual no mundo. Tanto os governos, quanto as empresas e a sociedade, estão em constante busca por novos métodos que causem menos danos ao meio ambiente (SANTOS; ROVARIS, 2017).

Na medida que se tem um crescimento populacional, cresce, também, o consumo, predominando os produtos descartáveis, como plástico, alumínio, papel, entre outros, que, por sua vez, gera o aumento da produção de resíduos sólidos urbanos, especialmente nos grandes centros, dando como resultado a diminuição da vida útil dos aterros sanitários e gerando maiores impactos ambientais (ROCHA, 2012).

Ainda de acordo com Rocha (2012), a extração de recursos naturais para a produção de bens de consumo, assim como a geração de resíduos sólidos, causa incontáveis danos ao meio ambiente, portanto, uma alternativa para a diminuição desses impactos é a realização de um gerenciamento adequado dos resíduos sólidos produzidos pela população. O autor ressalta que a coleta seletiva é o meio mais correto e sustentável de reciclar os resíduos, tendo como consequência uma vida útil mais longa dos aterros sanitários e, por sua vez, elimina a quantidade de resíduo circulando pelas ruas dando benefícios para saúde pública e o meio ambiente.

Conforme a pesquisa da Ciclossoft¹, existe um aumento dos números de cidades com a determinação em aplicar a coleta seletiva. A pesquisa foi iniciada no ano 1994, em que se registraram apenas 81 cidades com algum tipo de sistema relacionado à coleta seletiva. Na pesquisa anual do ano 2010, registrou-se um número de 443 cidades no país e, em 2018, constatou-se um aumento significativo para 1.227 cidades no país (CEMPRE, 2018).

Segundo dados da CEMPRE (2018), os programas de coleta seletiva estão concentrados nas áreas do Sudeste e Sul do país. No panorama de 2018, da CEMPRE, podem se encontrar os seguintes dados: do total de municípios brasileiros que realizam esse serviço, 87% estão situados nessas regiões. No Nordeste, são apenas 97 cidades com coleta seletiva, no Centro Oeste, 62 cidades, e, na região Norte, somente 15 cidades. O panorama também destaca a composição dos resíduos oriundos de coleta seletiva, e apresenta que a maior fração do que é coletado, 26%, é de rejeito, um dado altamente preocupante, pois esse resíduo não está apto

¹ Ciclossoft é uma pesquisa realizada pelo Compromisso Empresarial pela Reciclagem (CEMPRE). A pesquisa consiste em atualizar anualmente os dados referentes à coleta seletiva em cidades brasileiras, indispensável para o desenvolvimento do setor de reciclagem no país.

para reciclagem e vai diretamente para disposição em aterro sanitário, causando danos ao meio ambiente.

No Brasil, a coleta seletiva começou a ser aplicada com a sanção da Lei nº 12.305 (BRASIL, 2010), a lei que trata dos resíduos sólidos urbanos. Esta lei indica as diretrizes aplicáveis aos resíduos sólidos e aponta como prioridade a “não geração”, “redução”, “reutilização”, “reciclagem”, “repensar” “recusar”, como, também, que os resíduos sólidos devem ter um “tratamento por meio de processos tecnológicos e economicamente viáveis”, para que os rejeitos oriundos desse tratamento sejam destinados corretamente em aterros sanitários. Entretanto, é visível o atraso de parte dos municípios brasileiros quanto ao acatamento dessa lei, por falta de recursos financeiros (GOMES et al., 2014).

Internacionalmente, sem ir muito longe, em um país limítrofe como Argentina (pontualmente na Cidade Autônoma de Buenos Aires), que tem o regime de políticas de resíduos sólidos urbanos similar ao do Brasil, foi implantada a técnica de reciclagem e coleta seletiva (BRANDÃO; GUTIERREZ, 2016). Na Argentina, aplica-se o Tratamento Mecânico Biológico (TMB²) de resíduos sólidos urbanos, e a partir dos rejeitos oriundos do tratamento mecânico e biológico são fabricados os tijolos ecológicos. Dessa forma, evita-se que parte dos rejeitos seja descartada no meio ambiente e logra-se um material com alto grau de sustentabilidade para a construção civil.

A utilização de materiais recicláveis na construção civil vem crescendo dia a dia. Dado que o setor da construção civil é o setor que mais resíduos gera, existe uma preocupação pela aplicabilidade dos resíduos reciclados nos diversos ramos da construção (BRASILEIRO; MATOS, 2015). Por essa razão, o setor necessita de novos produtos e soluções, já existindo muitas pesquisas e estudos sendo desenvolvidos com excelentes resultados, como, por exemplo, a utilização de garrafas de Politereftalato de Etileno (PET) na produção de blocos de concreto. Um estudo realizado pelos pesquisadores Santos et al. (2017). Outra pesquisa relaciona-se aos tijolos produzidos com lama ferruginosa retirada do Rio Doce, após a catástrofe ambiental causada em Mariana/MG, da pesquisa de Ferreira; Neves e Dias (2018). Entretanto, no Brasil, não foi encontrada abordagem referente a algum material para a construção civil que tenha como base o resíduo sólido domiciliar (resíduos que contêm materiais orgânicos e inorgânicos), como é o caso do tijolo ecológico produzido na Argentina.

² O sistema de Tratamento Mecânico Biológico (TMB) é um método tecnológico para realizar o tratamento dos resíduos domiciliares, comerciais e industriais. O sistema inicia com triagem mecânica de separação dos resíduos e termina com um tratamento de digestão anaeróbica (CEAMSE, 2019).

Existe uma constante busca por novos materiais sustentáveis no setor da construção civil, assim como também há um avanço na avaliação dos sistemas de construção, tanto que o setor vem procurando refinar os sistemas construtivos perante o motivo da eficiência energética, por meio de soluções arquitetônicas e tecnológicas, com o objetivo de melhorar o desempenho das edificações (CBIC, 2013).

1.1 JUSTIFICATIVA

Para que uma edificação esteja sujeita à habitabilidade, precisa cumprir com as exigências presentes na norma NBR 15575 (ABNT, 2013) – Edificações Habitacionais – Desempenho. Portanto, ambientes confortáveis dependem de uma análise do comportamento térmico dos materiais construtivos que compõem a envoltória da edificação, do partido arquitetônico adotado, e da aplicabilidade das exigências das normas vigentes. Além disto, Lamberts et al. (2010) ressaltam que as edificações precisam estar adaptadas às características climáticas locais, por isso é necessário o estudo do comportamento térmico do material no local em questão.

Por essa razão, considerando a necessidade de proteção do meio ambiente degradado, a busca atual por materiais sustentáveis para inserção no setor da construção civil e a necessidade de redução da disposição dos rejeitos em aterros sanitários, a presente pesquisa se denota relevante, a fim de avaliar a adaptação do tijolo ecológico no Brasil, a partir da análise de sua adequação às regras relativas à norma de desempenho térmico, NBR 15.220-3 (ABNT, 2005) na zona bioclimática 8 correspondente a Aracaju/SE, cidade onde será avaliado o material.

Com a aplicação do tijolo ecológico no Brasil, além de melhorar as condições ambientais, também surgiriam mais oportunidades de emprego, o que deve ser levado em consideração, com o conseqüente barateamento da construção de casas de baixa renda, que tornaria a autoconstrução civil acessível às pessoas mais carentes, como já acontece na Argentina.

1.2 HIPÓTESES DO TRABALHO

- A baixa condutividade térmica (0,43 W/m k) do tijolo ecológico produzidos com resíduos sólidos urbanos estabilizados, em comparação com a condutividade térmica (0,90 W/m k) do tijolo maciço cerâmico, influenciará positivamente no comportamento das edificações.
- O acréscimo da argamassa de revestimento a vedação e da pintura de cor branca ($\alpha=0,20$) irá proporcionar melhorias no desempenho térmico do sistema construtivo.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Avaliar o desempenho térmico do tijolo ecológico na cidade de Aracaju/SE, por meio de simulação computacional, utilizando o *software EnergyPlus®*.

1.3.2 Objetivos específicos

- Avaliar o desempenho térmico de tijolos ecológicos na zona bioclimática brasileira 8, por meio de simulação computacional;
- Avaliar a influência da argamassa de revestimento e a pintura externa de cor branca e de baixa absorvância no desempenho térmico da alvenaria de vedação em tijolos ecológicos, por meio de simulação computacional;
- Avaliar a influência da argamassa de assentamento da parede equivalente de tijolos maciços cerâmicos e de tijolos ecológicos aplicando os cálculos estipulados na norma NBR 15520 (ABNT, 2005);
- Comparar o desempenho térmico do tijolo ecológico com o tijolo maciço cerâmico, aplicando cada material em um modelo padrão de residência popular brasileira, por meio de simulação computacional.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho encontra-se estruturado em oito capítulos: Introdução, Revisão Bibliográfica, Material de estudo, Método de trabalho, Resultados e discussões, Conclusões, Sugestões para trabalhos futuros e Referências Bibliográficas.

O primeiro capítulo apresenta a introdução ao tema, os objetivos da pesquisa e as justificativas.

O segundo capítulo aborda, por meio de referencial teórico, os assuntos relacionados ao tema, sendo eles: Resíduos sólidos urbanos, A indústria da cerâmica vermelha na construção civil e seu impacto ambiental no Brasil: o caso do tijolo cerâmico maciço, Comportamento

térmico da construção, Normas técnicas de desempenho térmico no Brasil, o *software EnergyPlus®*, e a norma americana *Ashrae standard 140*: método bestest, o caso 600.

O terceiro capítulo apresenta o material em estudo, o tijolo ecológico produzido com resíduos sólidos urbanos estabilizados, como, também, apresenta a Coordinación Ecológica Área Metropolitana Sociedad del Estado (CEAMSE), como funciona o processo de tratamento dos resíduos e como é o processo de fabricação do tijolo e uso na Argentina.

O quarto capítulo trata do Método de trabalho, em que são detalhadas por etapas a sequência da execução do trabalho.

O quinto capítulo apresenta os Resultados e a Discussões dos dados de saída e do comportamento térmico do material.

O sexto capítulo expõe as Conclusões finais da pesquisa.

O sétimo capítulo apresenta Sugestões para trabalhos futuros.

O oitavo capítulo traz as referências bibliográficas aplicadas neste trabalho.

Por fim, os Apêndices, que contêm todos os cálculos realizados na pesquisa, tanto para a inserção dos dados no *software EnergyPlus®*, como para as análises dos resultados.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Ao longo dos anos, tem-se tornado crescente a preocupação da humanidade às questões de sustentabilidade, muito em razão do aumento exponencial da degradação ambiental, que resulta na redução dos potenciais de recursos renováveis e evidencia o importante papel que, nesse contexto, desempenha a educação ambiental. Existe uma constante conscientização de preservação da natureza e de que não se deve agredir ao meio ambiente (PALMA; NASCIMENTO, 2005).

O crescimento populacional, aliado à evolução urbanística, tem gerado um aumento na geração de resíduos sólidos, requerendo uma postura mais consciente, dado que ocasiona a escassez dos recursos naturais não renováveis e a inexistência de espaços para disposição dos rejeitos. Por essa razão, os Resíduos Sólidos Urbanos (RSUs) devem ser geridos e controlados de forma a reduzir o seu volume e periculosidade, minimizando os prejuízos da poluição ambiental e os impactos sobre a saúde das populações (SOUZA, 2011).

Ainda de acordo com Souza (2011), a produção de resíduos sólidos é um problema cotidiano e ocorre em função do aumento da população humana. O autor ressalta que as sociedades modernas geram uma alta quantidade de resíduos, sendo grande parte de resíduo domiciliar. Esse tipo de resíduo permite a proliferação de insetos e roedores, além de produzir odores desagradáveis e contaminar o solo.

Diante desse panorama, existe uma constante busca por alternativas para solucionar a questão dos resíduos dos processos produtivos. Segundo Brandão e Gutierrez (2016), em países da América Latina, a exemplo do Brasil e da Argentina, nos anos 2000, instituiu-se um novo regime de políticas de Resíduos Sólidos Urbanos (RSUs) que, mesmo com diferenças institucionais entre ambos, compartilha a mesma ideia com base no modelo de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos Urbanos (GIRSU): não gerar, reduzir, recuperar, reutilizar, reciclar, recusar, repensar, tratamento da fração orgânica por processos biológicos e disposição final adequada.

2.1.1 Brasil

Conforme Brandão e Gutierrez (2016), foi no final do Século XX que o Brasil começou a demonstrar preocupação pelo manejo dos RSUs, junto vieram as sanções das leis ambientais municipais e a aprovação dos programas de coleta seletiva em alguns municípios brasileiros. Dois acontecimentos importantes para as questões ambientais foram: a aprovação, no ano 1981, da Lei n. 6.938 da Política Nacional do Meio Ambiente (BRASIL, 1981) e, em 1988, a aprovação da nova Constituição Federal, na qual consta, no artigo 225, o “direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado” (BRASIL, 1988). No entanto, até o ano 1988, não foi sancionada nenhuma lei nacional que tratasse especificamente a problemática dos resíduos sólidos.

Na década de 1990 existia uma preocupação para regular a responsabilidade pós-consumo dos resíduos de pneus, pilhas, baterias e óleo lubrificante, entre outros materiais similares. Nessa época, o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) sancionou resoluções para regular essa problemática, como, também, teve a iniciativa de realizar debates para achar uma solução nacional sobre os RSUs. No ano de 1999 ainda não existia uma legislação nacional sobre o tema, portanto, o CONAMA tomou frente no assunto e levou o tema ao parlamento nacional. Em paralelo, acontecia o Fórum Lixo e Cidadania, com o foco nas propostas para solucionar a problemática dos lixões a céu aberto nos Brasil (BRANDÃO; GUTIERREZ, 2016).

Ainda de acordo com Brandão e Gutierrez (2016), na década de 1990, os procedimentos de coleta seletiva e de encerramento dos lixões a céu aberto já estavam sendo aplicados nas capitais dos estados do Sul e Sudeste, mas, nas demais regiões do país ainda continuavam com a disposição dos resíduos em lixões a céu aberto. No ano 2000, o tema da gestão dos RSUs chegou à agenda nacional, em que foram discutidos em audiência pública o projeto de lei de saneamento básico e RSU. Logo, foi aprovada a Lei n.11445, Lei Nacional de Saneamento, em 05 de janeiro de 2007, sem, no entanto, alterações relevantes em relação aos RSUs.

O principal acontecimento foi realizado no ano 2010, quando foi aprovada a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº. 12.305/10, que compreende o conjunto de “princípios”, “objetivos”, “instrumentos”, “diretrizes”, “metas” e “ações” adotadas em âmbito federal. Trata-se de um marco regulatório, que possui como base a diretriz sequencial de “não geração, redução, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, e a disposição final ambientalmente adequada de rejeitos” (BRASIL, 2010).

No capítulo II, a PNRS define os conceitos de “gerenciamento de resíduos sólidos”, “coleta seletiva”, “reciclagem”, “rejeitos”, “responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida do produto”, “logística reversa”, além de estabelecer que os resíduos precisam ser “tratados e

recuperados por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis” (BRASIL, 2010). Destaca-se que, para que a destinação final seja considerada ambientalmente adequada, os resíduos devem ser valorizados mecanicamente, biologicamente e/ou energeticamente. O Plano Nacional de Resíduos Sólidos é um dos principais instrumentos da PNRS, e consiste em uma ferramenta que contribuiu para a execução da Política Nacional (BRASIL, 2010).

As “diretrizes” e “metas” previstas no PNRS podem repercutir, inclusive, nas emissões de gases “efeito estufa”. As mais relevantes são: a coleta seletiva e a reciclagem³, bem como, a reutilização⁴ (BRASIL, 2010).

De acordo com Sousa (2012), na área urbana a principal problemática são os resíduos descartados diariamente nas residências, sendo que, dentro desses resíduos, grande parte pode ser reciclada (vidro, plástico, papel e metal), enquanto que outra parte, que pertence ao resíduo orgânico, pode ser reaproveitada por meio da biogestão, compostagem e outros processos afins. O autor afirma que esses processos, além de diminuir a quantidade de RSU encaminhados para aterros, apresentam menores potenciais de geração de gases “efeito estufa”. Assim, a gestão eficiente da fração orgânica dos resíduos é considerada um dos instrumentos eficazes para uma célere redução das emissões de gases “efeito estufa”.

2.1.2 Argentina

Segundo Brandão e Gutierrez (2016), foi no século XXI quando começaram os registros referentes à maior atenção ao manejo dos RSUs. Como resultado dessa preocupação, foram aprovadas novas leis que provocaram uma mudança normativa em relação ao gerenciamento dos RSUs. Consoante os autores, no ano 2004, na Argentina, sancionou-se a Lei Nacional de Patamares Mínimos de Proteção Ambiental para a Gestão Integrada de Resíduos Domiciliares com número 25.916 (ARGENTINA, 2004). Além dessa lei, cada província da Argentina sancionou leis que levam as mesmas diretrizes da Norma Federal.

Assim como no Brasil, na Argentina, na década de 1990, existia uma responsabilidade sobre a gestão dos RSU. Com o surgimento do novo artigo 41, da Constituição Argentina, introduziu-se o direito ao meio ambiente saudável (BRANDÃO; GUTIÉRREZ, 2016).

³ Reciclagem: “processo de transformação dos resíduos sólidos que envolve a alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, com vistas à transformação em insumos ou novos produtos, observadas as condições e os padrões estabelecidos pelos órgãos competentes do Sisnama e, se couber, do SNVS e do Suasa” (BRASIL, 2010).

⁴ Reutilização: processo de aproveitamento dos resíduos sólidos sem sua transformação biológica, física ou físico-química, observadas as condições e os padrões estabelecidos pelos órgãos competentes do Sisnama e, se couber, do SNVS e do Suasa (BRASIL, 2010).

Na Argentina existem duas situações opostas em relação aos resíduos: por um lado, tem-se a região metropolitana, que está conformada pela Cidade Autônoma de Buenos Aires (CABA) e pelos municípios que rodeia a CABA, sendo no total 41 municípios, por outro lado, as demais regiões do país. Na Região Metropolitana de Buenos Aires se concentra a maior parte de população da Argentina e, desde o ano 1978, a disposição dos resíduos é realizada em aterros sanitários operados pela empresa pública Coordenação Ecológica Área Metropolitana Sociedade do Estado (CEAMSE). De acordo com Gutierrez (2015), em outras localidades do país, assim como acontece no Brasil, os RSUs não têm nenhum tratamento e a disposição final se dá em lixões a céu aberto.

Na cidade de Buenos Aires e na área metropolitana o sistema de coleta e tratamento dos resíduos é implementado pela CEAMSE. Essa empresa ressalta a sua preocupação nos impactos ambientais erradicando os lixões a céu aberto e substituindo por aterros sanitários (GUTIERREZ, 2015).

Na cidade de Buenos Aires, na Argentina, em 2005, foi sancionada a Lei nº 1.854/2005 que trata da gestão dos resíduos sólidos urbanos na cidade, em que é conhecida como Lei de Resíduos Zero, sendo projetada e fomentada pela *greenpace* Argentina. A Lei de Resíduos Zero tem como foco à redução dos resíduos na fonte, a recuperação, a reciclagem e a diminuição a toxicidade do lixo, assim como a responsabilidade do fabricante sobre os seus produtos (SELUR,2010).

No ano de 2008, a coleta seletiva ganhou força na Argentina, e, no ano de 2013, fortaleceu-se por completo com a sanção que modificou a Lei nº. 1.854 (CIUDAD AUTONOMA DE BUENOS AIRES, 2005) pela Lei nº. 4.859 (CIUDAD AUTONOMA DE BUENOS AIRES, 2013). Essa lei determina aos grandes geradores se ocuparem, por conta própria, da coleta e disposição dos resíduos que geram, fora da coleta pública realizada pelo governo argentino. São considerados, ainda na mesma lei, geradores especiais: hotéis 4 e 5 estrelas; edifícios com mais de 40 unidades funcionais; bancos, entidades financeiras e seguradoras; supermercados, minimercados, autosserviços, e hipermercados; shoppings centers, galerias comerciais e centros comerciais a céu aberto; centros educativos privados; universidades; locais com a ocorrência de mais de 300 pessoas; edifícios públicos e todo comércio que gere mais de 500 litros de resíduo por dia (BRANDÃO; GUTIERREZ, 2016).

Nesse contexto, os grandes geradores devem seguir algumas indicações, como estar inscrito no Registro de Geradores Especiais do Ministério do Ambiente e Espaço Público Portenho (MAyEP) e, no Programa de Geradores Privados da CEAMSE. Dessa forma, terão a exigência de separar na origem os resíduos secos recicláveis (papel, papelão, metal, plástico e

vidro) dos úmidos, e logo ser entregues às cooperativas de recuperadores urbanos/e ou para tratamento em usinas.

Ademais, os grandes geradores ficam responsabilizados pela contratação do transporte, este tem que estar habilitado pelo governo para coleta e disposição adequada dos resíduos (BRANDÃO; GUTIERREZ, 2016).

A Lei nº. 1.854 determina o tratamento e a disposição final dos resíduos no capítulo IX, ainda, os artigos 28 e 30 determinam a instalação de centros de seleção e tratamento adequado para resíduos secos e úmidos (ARGENTINA, 2005). Segundo Zubillaga (2013), a fração orgânica é tratada nas plantas de Tratamento Mecânico Biológico (TMB), para logo dispor os rejeitos em aterro sanitário. A CEAMSE utiliza o material estabilizado como matéria-prima para a fabricação de tijolos ecológicos, e, dessa forma, com essa gestão eficiente da fração orgânica dos resíduos é possível uma redução dos gases responsáveis pelo “efeito estufa”.

Assim que são recebidos os resíduos na planta de TMB, o resíduo é carregado em um sistema de esteiras transportadoras, separando o papel, o plástico e o vidro, e realizada uma recuperação do metal por imãs. Os resíduos úmidos passam por um processo de tratamento em “biorreatores⁵”, em que se mantêm em um ambiente controlado por aproximadamente 21 dias para gerar um material estabilizado. Esse material estabilizado pela CEAMSE além de ir para disposição final em aterros sanitários tem outro destino: a fabricação dos tijolos ecológicos produzidos com rejeitos de resíduos sólidos estabilizados. Esse material é sustentável já que parte da matéria prima é material rejeitado e não gera poluição ao meio ambiente no processo de fabricação. No final do processo, de cada 1000 toneladas que ingressam a estação de tratamento, 400 toneladas são enviadas à disposição final, com isso, logra-se uma vida útil maior nos aterros sanitários (ZUBILLAGA, 2013).

De acordo com Brandão; Gutierrez (2016), as políticas públicas de resíduos sólidos urbanos no Brasil e na Argentina estão baseadas no modelo internacional GIRSU, mesmo que exista uma semelhança entre estes países, a composição dos regimes foi diferente. Os dois países têm como diretriz na sua legislação a coleta seletiva e a reciclagem, no entanto, na Argentina, aplicasse o Tratamento Mecânico Biológico (TMB).

Dada a inexistência de estudos aplicados ao tijolo ecológico no Brasil, a seguir, apresenta-se o estudo referente ao tijolo maciço cerâmico, que foi escolhido por ser um material com características físicas similares ao tijolo ecológico.

⁵ Biorreatores são capsulas fechadas hermeticamente durante 21 dias, e monitoradas por um sistema computacional para controlar a temperatura, o oxigênio e a umidade, permitindo ajustar estes parâmetros ao longo do tratamento (CEAMSE, 2018).

2.2 A INDÚSTRIA DA CERÂMICA VERMELHA NA CONSTRUÇÃO CIVIL E SEU IMPACTO AMBIENTAL NO BRASIL: O CASO DO TIJOLO MACIÇO CERÂMICO

No Brasil, o crescimento populacional provocou, como é esperado, um crescimento no consumo dos materiais de construção. Assim, surge a demanda de produtos do setor cerâmico para suprir a necessidade do mercado (PRADO FILHO, 2014).

Para Santos Jr et al. (2017), o setor cerâmico está dividido em diferentes segmentos, e cada um desses possui características diferentes, devido às matérias-primas empregadas para a fabricação dos produtos. O tijolo maciço cerâmico, material utilizado para a presente pesquisa, insere-se no segmento da cerâmica vermelha.

Segundo Grigoletti (2001), a cerâmica vermelha é caracterizada pela extração da argila, matéria prima, junto com os procedimentos de moldagem, secagem, e logo, a queima, dando como fim o produto final.

Prado Filho (2014) afirma que dentro do setor da cerâmica o segmento da cerâmica vermelha é o que mais impactos negativos causa ao meio ambiente. Os problemas ambientais gerados dizem respeito, especialmente, à extração e ao consumo de matérias-primas: argila, água, lenha etc.; bem como, os rejeitos de produção, principalmente dos produtos defeituosos, e emissões gasosas oriundas da queima.

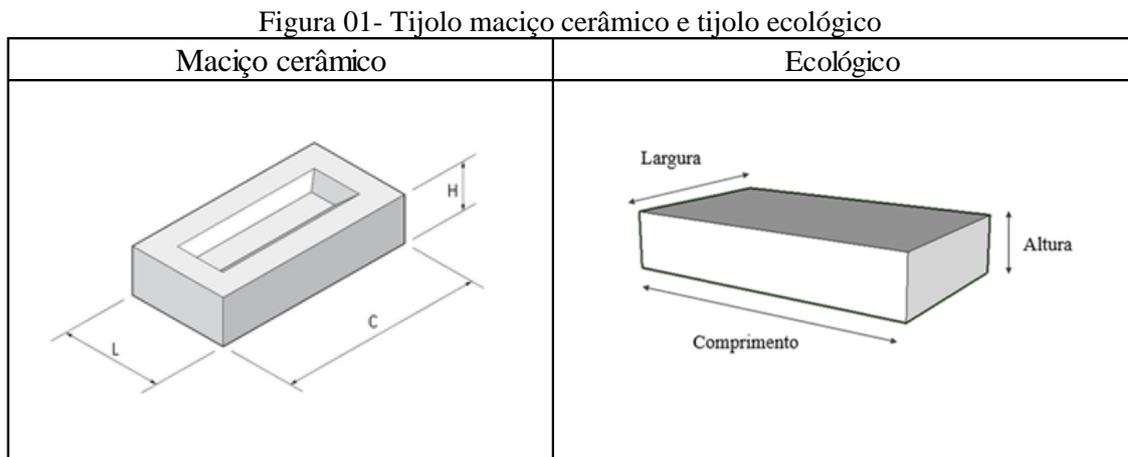
De acordo com a pesquisa realizada por Grigoletti (2001), nas indústrias analisadas, o processo de queima é efetivado por lenha, refil, óleo BPF ou papel, e, em todas as indústrias, constatou-se a produção de emissões poluentes. Além dessas, existem as emissões ligadas ao transporte dos insumos e do transporte do produto final. Ainda de acordo com o autor, precisam ser considerados os resíduos que esporadicamente são incorporados à matéria-prima, já que esses podem ser tóxicos no processo de queima.

Santos Jr. et al. (2017) afirmam que, no Brasil, há uma grande dificuldade de obtenção de dados estatísticos e indicadores de desempenho do setor cerâmico, o que provoca a deficiência em acompanhar o seu crescimento e melhorar a competitividade. Somado a essa peculiaridade, o segmento de cerâmica vermelha apresenta uma série de complicadores, tanto ambientais, quanto de qualidade dos produtos.

Prado Filho (2014) destaca, no seu artigo, que em olarias rurais o processo de queima dos tijolos é realizado em fornos construídos de maneira artesanal, utilizando-se sobras de madeiras advindas de áreas rurais provenientes de derrubadas de árvores, sendo uma madeira legalmente proibida. Por outro lado, Grigoletti (2001) afirma, na sua pesquisa, que as indústrias

de médio e grande porte utilizam lenhas oriundas de madeiras, que estão aptas legalmente, como fonte de energia. Porém, nos dois casos, o processo de queima dos tijolos contribui para a poluição da atmosfera, da água e do lençol freático.

Dentro dos materiais da indústria cerâmica, encontra-se o tijolo maciço cerâmico. Esse material é estudado devido à similitude nas características físicas e geométricas, quando comparadas ao tijolo ecológico. O tijolo maciço cerâmico deve possuir a forma de um paralelepípedo retângulo, conforme apresenta a Figura 01.



Fonte: NBR 15270-1 (ABNT, 2017a); INTI (2015). Adaptada.

A norma NBR 15270-1 (ABNT, 2017a) “Componentes cerâmicos- blocos e tijolos para alvenaria” recomenda as dimensões nominais em altura, largura e comprimento. Para esta pesquisa, utilizou-se as dimensões do tijolo maciço cerâmico que mais se aproximaram do tijolo ecológico, como pode ser visualizado no Quadro 1. É importante ressaltar que essas medidas são as utilizadas pela norma NBR 15520-2 para a realização dos cálculos da parede equivalente de tijolo maciço cerâmico.

Quadro 01- Dimensões nominais do tijolo maciço cerâmico e ecológico.

Propriedades Físicas dos tijolos		
	Tijolo ecológico de RSU	Tijolo maciço cerâmico
Comprimento (m)	0,25	0,22
Largura (m)	0,12	0,10
Altura (m)	0,05	0,06

Fonte: NBR 15270-1 (ABNT, 2017a); INTI (2015). Adaptado.

Os tijolos maciços cerâmicos são classificados em A, B ou C, de acordo com as suas propriedades mecânicas prescritas pela norma 15270-1 (ABNT, 2017a) “Componentes cerâmicos - Blocos e tijolos para alvenaria”. Por sua vez, a sua resistência à compressão deve ser testada segundo encaminhamento prescrito na referida norma e atender aos valores indicados pelo Quadro 02.

Quadro 02 - Resistência mínima à compressão do tijolo maciço cerâmico.

Categoria	Resistência a compressão (MPa)
A	1,5
B	2,5
C	4,5

Fonte: 15270-1 (ABNT, 2017a). Adaptado.

De acordo com os apontamentos citados anteriormente, pode-se dizer, que, diante dos flagrantes impactos ambientais causados no processo de produção do tijolo maciço cerâmico e o aumento de produção desse material frente ao crescimento da construção civil, mostra-se relevante a utilização de alternativas ambientalmente adequadas, como é o caso do tijolo ecológico, a fim de não gerar resíduos e reduzir a agressão do meio ambiente.

Os tijolos maciços, seja ou ecológico ou cerâmico, são elementos constituintes da envoltória de uma edificação. De acordo com Mazzafero; Silva; Ghisi (2014), a envoltória de uma edificação é o elemento responsável por separar o ambiente interno do ambiente externo. Por isso, a especificação das propriedades termofísicas da envoltória do edifício é, dentre as estratégias passivas de condicionamento, uma das mais importantes e estudadas.

2.3 DESEMPENHO TÉRMICO DAS EDIFICAÇÕES

De acordo com Lamberts et al. (2010), o desempenho térmico de uma edificação se refere à resposta física da edificação e à influência do uso dos habitantes, assim como, da interferência do meio ambiente externo. A resposta das variáveis externas da edificação, como a ventilação, insolação, temperatura e umidade, está baseada em função da utilização das variáveis internas, como, por exemplo, as esquadrias, o acionamento dos sistemas artificiais de iluminação e acondicionamento. Ainda de acordo com os autores, esses acontecimentos configuram o comportamento térmico, dando como resultado uma variação da temperatura e umidade nos ambientes internos.

Conforme apontam Lamberts et al. (2010), o comportamento térmico da edificação é influenciado pelos ganhos de calor do envelope da edificação e pelos ganhos de calor internos

gerados pelos usuários (equipamentos e pessoas), bem como pelo número de renovações de ar na ventilação da edificação.

Segundo Souza (2017), assim como o partido arquitetônico ocupa um papel importante no desempenho térmico da edificação, os materiais construtivos da envoltória precisam ser empregados de forma a promover melhor adequação do edifício ao meio que o envolve, em função das condições climáticas do local em questão, possibilitando a promoção do conforto térmico⁶ ao usuário.

A especificação dos materiais da envoltória é uma das estratégias passivas de condicionamento mais estudadas, e estão baseadas nas propriedades térmica de interesse de acordo com o clima local (PEREIRA, 2009).

Considerando tais aspectos, percebe-se a importância na análise dos mecanismos de transferência de calor por meio dos materiais construtivos da envoltória da edificação. Por isso, como a presente pesquisa tem como principal objetivo a avaliação do desempenho térmico dos tijolos ecológicos, mostra-se relevante a aplicação dos cálculos referentes a envoltória.

2.3.1 Fechamentos com materiais opacos

De acordo com Kowaltowski; Labaki (1993), o projeto arquitetônico, já na fase de concepção, define o conforto ambiental dos usuários de um edifício. Desse modo, de nada valeria a utilização dos tijolos ecológicos na construção civil, tão somente assentado nos benefícios propiciados ao meio ambiente, sem a análise do seu desempenho térmico.

Ainda conforme com Kowaltowski; Labaki (1993), os elementos manipulados pelo projetista são: a forma, o volume, a orientação, a distribuição dos espaços, os parâmetros de dimensionamento, a localização das aberturas e a escolha dos materiais, aliados ao entorno natural. Tais elementos determinam em grande parte o desempenho térmico da edificação sem equipamentos de condicionamento mecanizado. Por esse motivo, é de suma importância a avaliação do desempenho térmico dos materiais de construção para sua adequada utilização.

Segundo Marques (2013), para projetar um edifício confortável e eficiente energeticamente, faz-se necessário estudar cada um dos elementos que compõe o envelope, como são produzidas as trocas de calor e saber se o material utilizado é opaco ou transparente. O autor afirma que os materiais opacos impedem a transmissão direta da radiação solar ao

⁶ De acordo com a norma americana ASRAE Standard 55 (2013, p.3), o conforto térmico é definido como: “a condição da mente que expressa satisfação com o ambiente térmico”.

ambiente interno, em contrapartida, os materiais transparentes transmitem uma grande parcela de radiação. Ainda ressaltam que, em habitações de interesse social (HIS), as características que influenciam no conforto do usuário são as propriedades das superfícies opacas e as estratégias de ventilação natural.

Lamberts; Dutra; Pereira (2014) afirmam que a existência de uma diferença de calor entre uma superfície interna e uma externa se dá em razão da passagem de calor em um fechamento opaco. Os autores ainda relatam que o sentido do fluxo de calor acontecerá da superfície mais quente para a superfície mais fria.

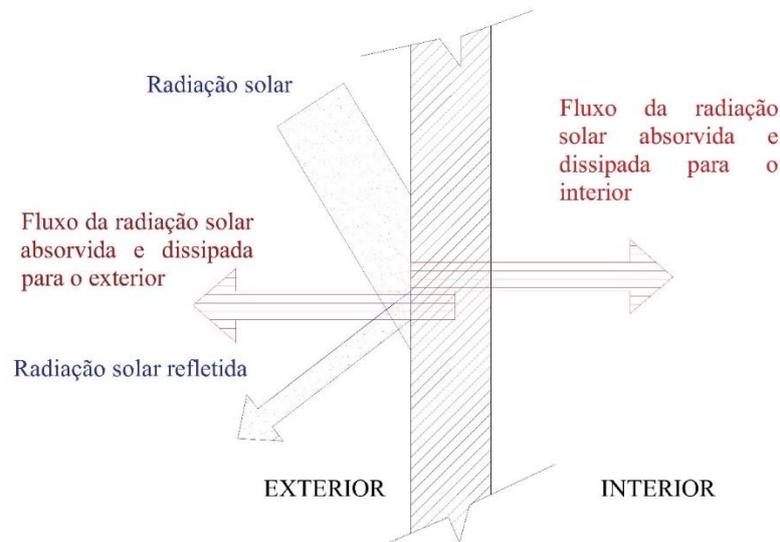
Conforme Frota; Schiffer (2001), o sol incide sobre o edifício representando uma porção de ganho de calor, que está relacionada em função da intensidade da radiação incidente e das propriedades térmicas dos elementos envolventes do edifício. De acordo com os autores, um fechamento opaco que está exposto à radiação solar (Figura 02) é submetido a uma diferença de temperatura entre o ambiente exterior (T_1) e o ambiente interno (T_2).

Para o estudo do comportamento térmico das edificações foi necessário pesquisar conceitos referentes às trocas térmicas, sendo umas dessas as trocas térmicas secas⁷: Radiação, Condução e Convecção (FROTA; SCHIFFER, 2001).

Frota; Schiffer (2001) definem a radiação como a ação de troca de calor entre dois corpos por meio de sua possibilidade de emitir e de absorver energia térmica. Na Figura 02 pode ser visualizada a ação da radiação sobre o fechamento opaco.

⁷ Frota; Schiffer (2001, p. 31) destacam que “as trocas de calor que envolvem variações de temperatura são denominadas trocas secas”.

Figura 02 - Fechamento opaco exposto à radiação solar.



Fonte: Frota; Schiffer (2001). Adaptada.

Ainda de acordo com os autores, o fluxo de calor será conforme apresentado na Equação (1):

$$q_r = h_r(\theta - \theta_r) \text{ (W/m}^2\text{)} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

q_r = intensidade do fluxo térmico por radiação (W/m²);

h_r = coeficiente de trocas térmicas por radiação (W/m² C°);

θ = temperatura da superfície da parede considerada (C°);

θ_r = temperatura radiante relativa às demais superfícies (C°).

Frota; Schiffer (2001, p.32) definem a convecção como a “troca de calor entre dois corpos, tratando-se de um corpo sólido e outro de um fluido diferente, seja líquido ou gasoso”.

Como pode ser observado na Figura 02, a convecção se dar no contato da superfície da parede opaca com o ar, que, por sua vez, apresentam temperaturas diferentes.

Tal qual menciona Frota; Schiffer (2001, p.32), a “intensidade do fluxo térmico por convecção” é conforme apresentado na Equação (2):

$$q_c = h_c (t - \theta) \text{ (W/m}^2\text{)} \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

q_c = intensidade do fluxo térmico por convecção (W/m²);

h_c = coeficiente de trocas térmicas por convecção (W/m². C°);

t = temperatura do ar (C°);

θ = temperatura da superfície do sólido (parede) (C°), sendo que $t > \theta$ ou $\theta < t$.

A condução é definida por Frota; Schiffer (2001, p. 34) como “a troca de calor entre dois corpos que estão em contato e que por sua vez estejam a temperaturas diferentes”.

Conforme a Figura 02, este comportamento está dado no interior da parede opaca já que estas duas superfícies (externa e interna), encontram-se com diferença de temperatura.

Segundo Frota; Schiffer (2001, p.34), “a intensidade do fluxo térmico por condução será envolvida nesse mecanismo de troca” conforme apresentada na Equação (3):

$$q_{cd} = \frac{\delta}{e} (\theta_e - \theta_i) \text{ (W/m}^2\text{)} \quad \text{Equação (3)}$$

Onde:

e = espessura da parede (m);

θ_e = temperatura da superfície externa da envolvente (C°);

θ_i = temperatura da superfície interna da envolvente (C°);

δ = coeficiente de condutibilidade térmica do material (W/m. C°).

Como $\frac{e}{\delta} = r$, sendo r a resistência térmica específica da parede (m² C/W). Por tanto, para o fluxo térmico por condução tem-se a Equação (4):

$$q_{cd} = \frac{(\theta_e - \theta_i)}{r} \text{ (W/m}^2\text{)} \quad \text{Equação (4)}$$

De acordo com Lamberts; Dutra; Pereira (2014), os materiais e elementos construtivos agem termicamente em conformidade com as propriedades térmicas. Serão descritas as principais dessas propriedades. Os cálculos e os quadros apresentados são baseados na norma

NBR 15220-2 (ABNT, 2005b) e apenas os dados referentes ao tijolo ecológico são extraídos das informações apresentadas pelo Instituto Nacional de Tecnologia Industrial (INTI).

A Condutividade térmica (λ) é “a característica do material que depende da densidade do material e representa sua capacidade de conduzir maior ou menor quantidade de calor por unidade de tempo” (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA 2014, p.210).

O Quadro 03 apresenta a condutividade térmica dos materiais utilizados para a presente pesquisa. Os dados apresentados do tijolo ecológico foram fornecidos pelo INTI (2015) e os dados do tijolo maciço cerâmico e da argamassa comum foram extraídos da norma NBR 15220-2 (ABNT, 2005b).

Quadro 03 - Condutividade térmica dos materiais.

Material	δ (W/m C°)
Tijolo ecológico, densidade de 1408 kg/m ³	0,43
Tijolo maciço cerâmico, densidade de 1600 kg/m ³	0,90
Argamassa comum 2000 kg/m ³	1,15

Fonte: NBR 15220-2(ABNT,2005b); INTI (2015).

De acordo com o Quadro 03, percebe-se que quanto menor a densidade da massa menor é a condutividade térmica do material.

A resistência térmica (R) de um material “é sua propriedade de resistir à passagem do calor”. Esta propriedade depende da sua espessura, “quanto maior espessura, maior será a resistência que esse material oferece à passagem de calor” (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA 2014, p.210). Os autores afirmam que quanto maior for a condutividade térmica de um material, maior será a quantidade de calor transferida entre as suas superfícies e, conseqüentemente, menor será a sua resistência térmica.

A resistência térmica (R) é determinada pela Equação (5), conforme estabelecido pela NBR 15220-2 (ABNT, 2005a):

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (m^2 \text{ C}^\circ / W) \quad \text{Equação (5)}$$

Onde:

e: é a espessura da camada;

λ : é a condutividade térmica do material da camada.

Conforme a norma NBR 15220-2 (ABNT,2005b, p.2), “a resistência térmica de superfície a superfície de um componente plano constituído de camadas homogêneas e não homogêneas, perpendiculares ao fluxo de calor”, e está determinada pelas Equações (6) e (7):

$$Rt = \frac{Aa+Ab.....An}{\frac{Aa}{Ra} + \frac{Ab}{Rb} + \dots + \frac{An}{Rn}} \quad \text{Equação (6)}$$

$$RT = Rse + Rt + Rsi \quad \text{Equação (7)}$$

Onde:

Rt: é a resistência térmica de superfície a superfície.

Rse e Rsi: são as resistências superficiais externa e interna, cujos valores constam na norma. Aa, Ab,An: são as áreas de cada seção;

Ra, Rb,Rn: são as resistências térmicas de superfície a superfície para cada seção.

Para Lamberts et al. (2010, p.22), a transmitância térmica (U) é a característica do material que está relacionada “à permissão da passagem de energia, medida em $W/m^2 C^\circ$ ”. A transmitância térmica está vinculada à espessura do componente e à condutividade térmica dos seus materiais constituintes, e “representa sua capacidade de conduzir maior a menor quantidade de energia por unidade de área e de diferença de temperatura”.

De acordo com Lamberts; Dutra; Pereira (2014), a propriedade mais importante para realizar uma avaliação do desempenho térmico em materiais opaco é a transmitância térmica.

“A transmitância térmica (U) é o inverso da resistência térmica (R)”, conforme Equação (8), definida como o “fluxo de calor que, na unidade de tempo e por unidade de área, passa por meio do componente” (NBR 15220-1/ABNT, 2005b, p.2):

$$U = \frac{1}{R} \quad W/(m^2C^\circ) \quad \text{Equação (8)}$$

Conforme apontam Lamberts; Dutra; Pereira (2014), a capacidade térmica (C) é outra característica térmica dos materiais construtivos e indica sua maior ou menor capacidade em reter calor. Um material de grande capacidade térmica necessita de uma grande quantidade de calor para variar de um grau de temperatura seus componentes por unidade de área. Os autores

confirmam que por meio da obtenção do valor de capacidade térmica se pode avaliar o quanto um material pode colaborar em termos de inércia térmica para um ambiente.

O cálculo da capacidade térmica total (CT) está expressado na Equação (9):

$$CT = \sum e_i \cdot c_i \cdot \rho_i \quad \text{Equação (9)}$$

Onde:

λ =condutividade térmica (W/m. C°),

ρ =densidade (kgm³),

c =calor específico (kJkg C°).

Portanto, a capacidade térmica vai depender da espessura da camada (e), da densidade da mesma (ρ) e do calor específico (c).

Segundo a norma NBR 15220-2 (ABNT, 2005b, p.2) “a capacidade térmica de um componente plano constituído de camadas homogêneas e não homogêneas perpendiculares ao fluxo de calor é calculada pela Equação (10)”:

$$C_t = \frac{A_a + A_b \dots A_n}{\frac{A_a}{C_a} + \frac{A_b}{C_b} \dots \frac{A_n}{C_n}} \quad \text{Equação (10)}$$

Onde:

CTa, CTb, ..., CTn: são as capacidades térmicas do componente para cada seção (a, b, ..., n); Aa, Ab, ..., An: são as áreas de cada seção.

Outra das propriedades importantes para avaliar o desempenho térmico dos materiais é a inércia térmica que, pode ser estimada pela capacidade térmica. A inércia térmica depende das características térmicas da envolvente e dos componentes construtivos internos. Esta propriedade térmica permite passar o calor de um extremo ao outro e retém uma parte desse calor no seu interior. Quanto maior a inércia térmica, maior calor acumulado e este pode ser devolvido ao interior quando o material estiver submetido ao pico da temperatura extrema. (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA 2014).

Da mesma forma, o atraso térmico (ω) aponta quanto tempo o calor levará para atravessar o material, ou seja, indica o tempo transcorrido entre uma variação térmica em um meio e sua manifestação na superfície oposta de um componente construtivo (LAMBERTS et al., 2010).

O cálculo do atraso térmico de um elemento heterogêneo é determinado na norma NBR 15220-2 (ABNT,2005b), por meio da Equação (11):

$$\omega = 1,382. Rt\sqrt{B1} + B2 \text{ horas} \quad \text{Equação (11)}$$

Onde:

Rt: é a resistência térmica de superfície a superfície do componente;

B1: é dado pela Equação (12);

Bo: é dado pela Equação (13);

B2: é dado pela Equação (14);

$$B1 = 0,226. \frac{Bo}{Rt} \quad \text{Equação (12)}$$

Onde: Bo é dado pela expressão

$$Bo = Ct - Ctext \quad \text{Equação (13)}$$

Onde:

Ct é a capacidade térmica total do componente;

Ctext é a capacidade térmica da camada externa do componente.

$$B2 = 0,205x \left(\frac{\lambda.p.c.) \text{ ext}}{Rt} \right) x Rext \left(\frac{Rt - Rext}{10} \right) \quad \text{Equação (14)}$$

O fator solar (FS) de materiais opacos segundo a NBR 15220-1 (ABNT,2005, p.3), “é quociente da taxa de radiação solar transmitida através de um componente opaco pela taxa da radiação solar total incidente sobre a superfície externa do mesmo”. O fator solar (FS) é determinado pela Equação (15):

$$FS = 4. U . \alpha \quad \text{Equação (15)}$$

Os elementos construtivos têm comportamentos diferentes em relação à radiação térmica incidente, transmitindo, refletindo ou absorvendo e reemitindo esta radiação para o interior. A radiação incidente num material construtivo terá uma parcela refletida, uma absorvida e, se for um material translúcido, também terá uma parcela transmitida diretamente para o ambiente interior (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

De acordo com esses autores, a principal característica da absorvidade de um material está na cor superficial. Um material escuro absorverá a maior parte da radiação incidente, enquanto que um material claro absorverá menos.

A norma NBR 15220 (ABNT, 2005) contém os valores referentes à emissividade e absorvância das cores dos materiais de construção.

2.3.2 Inércia térmica e absorvância dos componentes da envoltória

Considerando-se os aspectos tratados nos itens anteriores, percebe-se a importância do estudo da inércia térmica e a absorvância nos componentes da envoltória.

Segundo Manioglu e Yilmaz (2006), a envoltória do edifício é considerado o elemento fundamental para o condicionamento passivo, além de ser o fator principal para a definição do clima interno, responsável pelos fluxos de calor em seu interior, e, portanto, determinante para o desempenho térmico.

Na pesquisa de Yilmaz (2007), ratifica-se essa ideia ao afirmar que, dentre todos os parâmetros que afetam o conforto térmico e a conservação de energia nas edificações, entre eles, a orientação do edifício, distância entre edifícios, forma do edifício e propriedades termofísicas do envelope do edifício, este último é o mais importante. Isso acontece porque o envelope é o responsável por separar o ambiente externo do interno.

De acordo com Dornelles (2008), a redução do consumo de energia com sistemas de refrigeração em uma edificação pode estar vinculada ao ganho de calor solar por meio de seu envelope, o qual depende da radiação solar incidente e da cor da superfície, que está estipulada pela absorvância.

Outros estudos assinalam, também, alguns fatores que interferem na inércia térmica da edificação. A exemplo de Brito; Akutsu (2015) que demonstraram a importância na escolha da cor da superfície externa e quanto essa influência no aquecimento do recinto. Os autores concluíram que tintas brancas absorvem menos radiação solar em relação às cores escuras.

Dornelles et al. (2011), na simulação computacional de coberturas de edifícios com tintas brancas, demonstraram que em coberturas de edificações localizadas em climas quentes no Brasil, a utilização de tintas brancas de alta refletância solar é um método muito eficiente de reduzir o desconforto térmico.

Conforme Givoni (1994), a utilização de cores refletivas na envoltória da edificação é a característica arquitetônica de controle climático mais eficaz; assim a aplicação de cores claras nas superfícies é a maneira mais viável de minimizar as cargas térmicas das edificações, dando maior efetividade no verão.

Segundo Oliveira (2015), o sistema construtivo exerce uma forte influência no desempenho da edificação. Portanto, os edifícios devem apresentar propriedades térmicas que proporcionem o desempenho térmico mínimo para cada zona bioclimática se adequar às condições climáticas naturais. Para isso, é necessário seguir a normativa brasileira.

2.4 NORMAS TÉCNICAS DE DESEMPENHO TÉRMICO NO BRASIL

As normas aplicáveis à habitação vigentes no Brasil são: a norma NBR 15220 (ABNT, 2005) - Desempenho térmico de edificações e a NBR 15575 (ABNT, 2013) - Edificações habitacionais de até cinco pavimentos, que tratam de diversos requisitos de desempenho de edifícios habitacionais (estrutural, acústico, alumínio, entre outros), e dentro desses assuntos, encontra-se o desempenho térmico.

As normas de desempenho térmico buscam atender às exigências dos usuários, estabelecem requisitos e critérios e são complementares a outras normas. Visam de um lado incentivar o desenvolvimento tecnológico, e do outro, orientar a avaliação da eficiência técnica e econômica das inovações tecnológicas (LAMBERTS et al., 2010).

2.4.1 NBR 15220: Desempenho térmico de edificações (ABNT, 2005)

De acordo com Lamberts et al. (2010), o estabelecimento do desempenho é analisado por meio da definição de requisitos, critérios e métodos de avaliação, permitindo a clara mensuração do seu cumprimento. Dessa forma, a norma NBR 15220-3 (ABNT, 2005c) foi dividida em cinco partes (Quadro 04).

Quadro 04 - Divisão das partes da NBR 15220-3/ABNT, 2005c. Desempenho térmico de edificações.

NBR 15220/2005: Desempenho térmico de edificações	
Parte 1 —————>	Definições, símbolos e unidades;
Parte 2 —————>	Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar;
Parte 3 —————>	Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social;
Parte 4 —————>	Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida;
Parte 5 —————>	Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo método fluximétrico.

Fonte: NBR 15220-3 (ABNT, 2005c). Adaptado.

Na parte 3 da referida norma apresenta-se o Zoneamento Bioclimático Brasileiro e as diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. De acordo com essa classificação, o Brasil foi dividido em oito zonas bioclimáticas.

A classificação das zonas Bioclimáticas brasileiras foi 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 03.

Figura 03 - Mapa do Zoneamento Bioclimático Brasileiro.

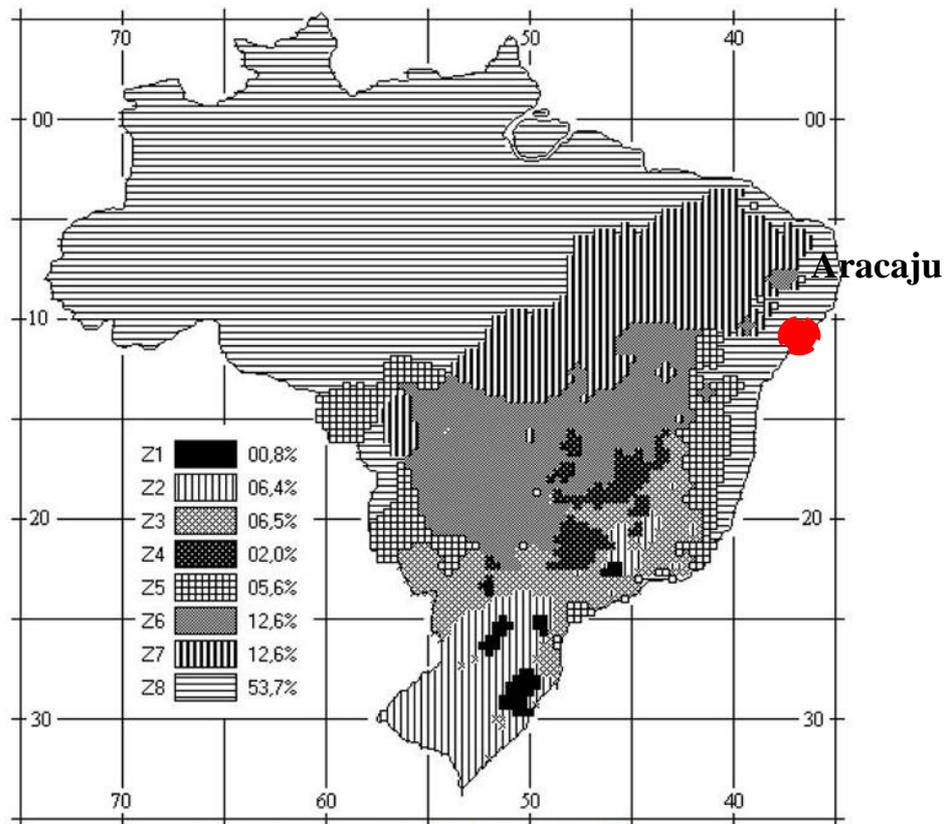


Figura 1 - Zoneamento bioclimático brasileiro.

Fonte: NBR 15220-3 (ABNT, 2005c).

Para cada zona bioclimática existe uma diretriz construtiva específica e a avaliação é realizada com base na verificação do atendimento de cada parâmetro identificado pela norma NBR 15220-3 (ABNT, 2005), a saber: o tamanho das aberturas para ventilação, a proteção das aberturas, as vedações externas (parede e cobertura, informando o tipo, leve ou pesada, refletora ou isolada) e as estratégias de condicionamento térmico passivo (LAMBERTS et al., 2010).

Lamberts et al. (2010) apontam que esta norma conta com as recomendações e diretrizes que expressam e visam à otimização do desempenho térmico, e que são fundamentadas em estratégias de adaptação da edificação ao clima.

Na norma NBR 15220-3 (ABNT, 2005c) encontram-se os valores limites referentes ao fator solar, atraso térmico e transmitância térmica para os elementos construtivos (Quadro 05), assim como, é indicado o percentual de área de piso com relação às aberturas para ventilação, classificando-as em pequenas, médias ou grandes (Quadro 06).

Quadro 05 - Transmitância térmica, atraso térmico e fator de calor solar admissíveis para cada tipo de vedação.

Vedação externa	Transmitância térmica – $U(W/m^2_k)$	Atraso térmico – φ (horas)	Fator Solar – FS (%)
Parede leve	$U \leq 3,00$	$\varphi \leq 4,3$	$FS \leq 5,0$
Parede leve refletora	$U \leq 3,60$	$\varphi \leq 4,3$	$FS \leq 4,0$
Parede pesada	$U \leq 2,20$	$\varphi \geq 6,5$	$FS \leq 3,5$
Cobertura leve isolada	$U \leq 2,20$	$\varphi \leq 3,3$	$FS \leq 6,5$
Cobertura leve refletora	$U \leq 2,3$ FT	$\varphi \leq 3,3$	$FS \leq 6,5$
Cobertura pesada	$U \leq 2,00$	$\varphi \geq 6,5$	$FS \leq 6,5$

Fonte: NBR 15220-3 (ABNT, 2005c).

Quadro 06 - Aberturas para ventilação para as Zonas Bioclimáticas (ZBs).

Aberturas para ventilação	A (em % da área do piso)
Pequenas	$10\% < A > 15\%$
Médias	$15\% < A > 25\%$
Grandes e sombreadas.	$A > 40\%$

Fonte: NBR 15220-3 (ABNT, 2005c)

Conforme Frota; Schiffer (2001), a oscilação diária e anual da temperatura e umidade relativa, a quantidade de radiação solar incidente, o grau de nebulosidade do céu, a predominância da época, o sentido dos ventos e índices pluviométricos são as variáveis climáticas que mais interferem no desempenho térmico das edificações.

Segundo Araújo et al. (2010), o Município de Aracaju gira ao redor de quatro sistemas meteorológicos (Alísios de SE, Zona de Convergência Intertropical - ZCIT, Sistema Equatorial Amazônico – SEA e Frente Polar Atlântico - FPA), que em conjunto com a posição geográfica e a proximidade da cidade com o mar, criam um típico clima quente, que varia do úmido ao subúmido.

A cidade está situada na costa do Nordeste brasileiro, com latitude: $-10^\circ 54' 40''$, e longitude: $-37^\circ 04' 18''$. A sua característica climática é quente e úmida, de baixa amplitude térmica, com médias anuais de $26,3^\circ\text{C}$ de temperatura do ar e $77,7\%$ de umidade relativa. De acordo com a NBR 15220-3 (ABNT, 2005), a cidade de Aracaju encontra-se dentro da Zona Bioclimática 8 (ZB8).

Cada zona bioclimática tem a sua condição climática própria, e diante da necessidade da utilização de tecnologias construtivas que propiciarão o conforto do usuário da edificação, é de suma importância a avaliação do desempenho térmico do material aplicado em cada zona, a fim de aferir o seu comportamento com o clima específico.

Assim, considerando que a essência desta pesquisa é a avaliação do desempenho térmico de alvenarias em tijolos ecológicos produzidos com resíduos estabilizados, parte-se do estudo

da NBR 15220 (ABNT, 2005), com o detalhamento dos métodos de cálculo das propriedades térmicas dos componentes construtivos, até a análise do desempenho térmico da edificação, por meio dos dados obtidos e dos parâmetros comparativos com as determinações da NBR 15575 (ABNT, 2013).

2.4.2 NBR 15575 (ABNT, 2013): Edificações Habitacionais-Desempenho

A norma NBR 15575 (ABNT, 2013) refere-se aos sistemas que compõem as edificações habitacionais, independentemente dos seus materiais constituintes e do sistema construtivo utilizado.

A referida norma foi elaborada pelo Comitê Brasileiro da Construção Civil e está dividida em 6 partes (Quadro 07). Nas partes 1, 4 e 5, a norma faz menção ao desempenho térmico.

Quadro 07 - Descritivo das partes da NBR 15575 (ABNT, 2013).

NBR 15575/2013: Edificações Habitacionais- Desempenho	
Parte 1	Requisitos gerais;
Parte 2	Requisitos para os sistemas estruturais;
Parte 3	Requisitos para os sistemas de pisos;
Parte 4	Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas;
Parte 5	Requisitos para os sistemas de coberturas;
Parte 6	Requisitos para os sistemas hidrossanitários.

Fonte: NBR 15575 (ABNT,2013).

Para os diferentes sistemas construtivos a norma define os requisitos mínimos que devem ser atendidos, referentes à classificação de desempenho mínimo. No caso das vedações externas, os requisitos mínimos apresentam-se na Tabela 01.

Tabela 01- Recomendações construtivas para a ZB8.

ZB8	Fator Solar (%)	Atraso Térmico (ϕ)	Transmitância-U $W/(m^2 C^\circ)$	Nível de Classificação do desempenho
Vedação externa	$FS \leq 4,0$	$\phi \leq 4,3$	$U < 3,7 \alpha \leq 0,6$ $U \leq 2,5 \alpha \geq 0,6$	MÍNIMO

Fonte: adaptado de NBR 15575-1 (ABNT, 2013c).

As formas de avaliação do desempenho térmico das edificações foram determinadas no item 11 da NBR 15575-1 (ABNT, 2013a). A norma estipula um nível de classificação por meio de dois procedimentos: primeiramente, o procedimento simplificado (normativo), atendendo aos requisitos e critérios para os sistemas de vedação e coberturas, conforme as partes 4 e 5 da norma NBR 15575. No caso em que a avaliação de transmitância térmica e capacidade térmica, conforme os critérios e métodos estipulados nas referidas partes da norma, resultem em desempenho térmico insatisfatório, cabe ao projetista avaliar o desempenho térmico da edificação como um todo pelo método da simulação computacional.

O segundo procedimento é o de medição, que consiste na verificação do atendimento aos requisitos e critérios estabelecidos na NBR 15575-1, por meio da realização de medições em edificações ou protótipos construídos. É importante ressaltar que esse método é apenas informativo.

A simulação computacional permite analisar os projetos arquitetônicos, assim como também, os estudos de *retrofit* para edifícios existentes. O método de simulação computacional da resultados próximos a realidade das condições locais (OLIVEIRA, 2015).

Ainda de acordo com a autora, o *EnergyPlus*®, é um dos *softwares* utilizados para aplicação da simulação computacional. Este *software* é utilizado especialmente em estudos científicos e consultorias de projetos com ênfase na eficiência energética e desempenho térmico.

2.5 ENERGYPLUS®

De acordo com Lamberts et al. (2010, apud BARBOSA, 2003), existem alternativas para a avaliação do desempenho térmico de edificações, sendo uma dessas a simulação computacional do sistema construtivo. A análise dos resultados das simulações computacionais deve ser verificada junto aos limites ou parâmetros de conforto térmico do usuário. Esses resultados podem ser comparados com os valores referenciais das normas técnicas brasileiras citadas nos itens anteriores.

Conforme citado, a norma NBR 15575-1 (ABNT, 2005a) estipula as formas de avaliação e para os procedimentos com simulação computacional a norma orienta o uso do *software EnergyPlus*®.

O *EnergyPlus*® analisa as cargas térmicas provenientes dos componentes construtivos da edificação, possibilitando a avaliação do desempenho térmico do envelope da edificação,

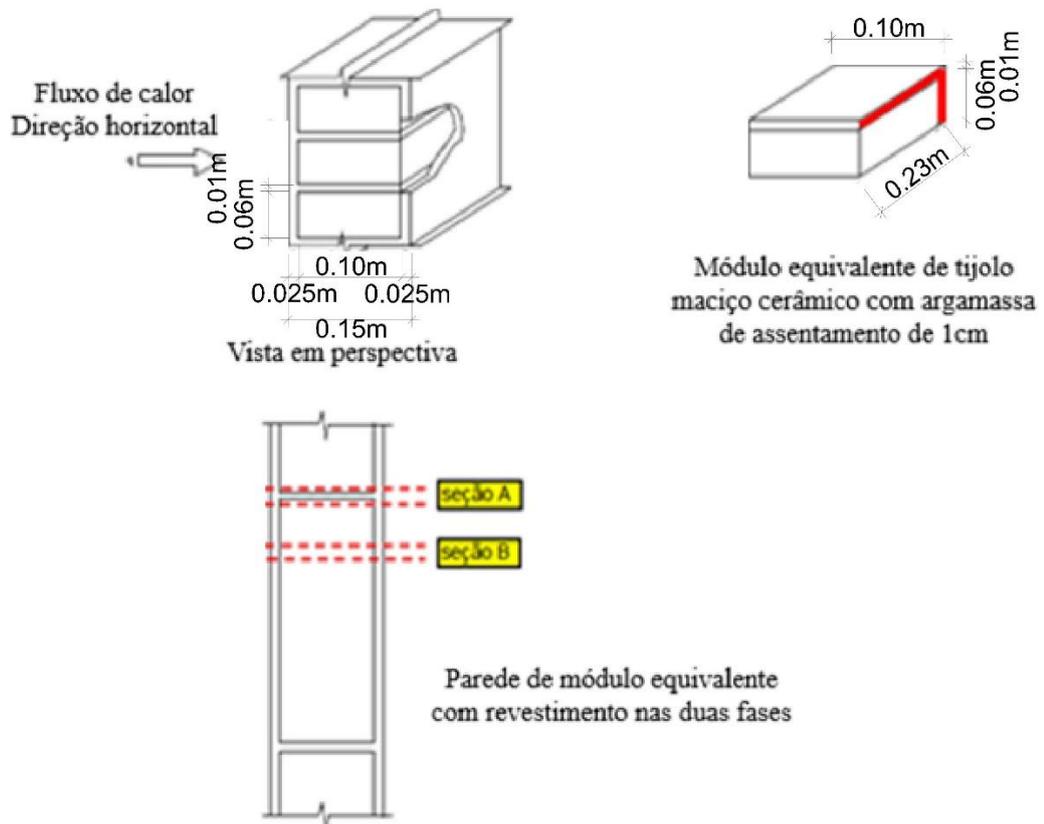
seja em edificações com ventilação natural ou artificial (BATISTA; LAMBERTS; WESTHPAL, 2005).

Segundo Weber et al. (2017), o *software* O *EnergyPlus*® trabalha com base nos princípios de equilíbrio térmico, o programa trabalha cada ambiente como uma zona térmica. O usuário do *EnergyPlus*® é o responsável de fazer o detalhamento das características da geometria da edificação, dos elementos de construção, e dos componentes dos sistemas existentes, assim como determina os padrões de uso referentes a cada zona térmica e o sistema construtivo.

De acordo com Weber et al. (2017), o principal cuidado com a simulação computacional está nos dados de entrada que são inseridos no programa *EnergyPlus*®. A exemplo das paredes, o programa dispõe os materiais da parede em camadas em série. Isso gera perda de informação necessárias para uma correta quantificação energética. Por esse motivo, é necessária a determinação de um modelo equivalente aos componentes construtivos mais comumente encontrados no Brasil, tabelados na NBR 15220-2 (ABNT, 2005b), já que no programa de simulação *EnergyPlus*® o sistema de parede é modelado por camadas com propriedades uniformes e é necessário calcular as propriedades termofísicas da combinação do modelo equivalente.

Os procedimentos realizados para a determinação do elemento construtivo equivalente devem ser realizados de forma que a Capacidade Térmica Total (CT) e a Resistência Térmica Total (RT) sejam próximas, ou iguais, ao modelo de referência (Figura 05).

Figura 04-Modulo equivalente de parede de tijolos maciços cerâmicos rebocados em ambas as faces.



Fonte: NBR 15220-2 (ABNT, 2005b). Adaptada.

Os procedimentos para os cálculos da transmitância térmica total (UT) - Equação (8), da resistência térmica total (RT) - Equação (7) e da capacidade térmica total (CT) referente à Equação (9) são os mesmos considerados pela NBR 15220-2 (ABNT, 2005b). Ainda assim, para o uso do *EnergyPlus*®, as argamassas, sejam de assentamento ou de revestimento, não são consideradas. Conforme apontam Weber et al. (2017), se o usuário quiser considerar as camadas de revestimento, é preciso realizar o cálculo do modelo equivalente com argamassa de revestimento e argamassa de assentamento.

O *EnergyPlus*® é o *software* recomendado pela norma NBR 15575-1 (ABNT, 2013a) para simulação computacional, considerando que a norma americana ASHRAE Standard 140 (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*) (ASHRAE, 2009), ao avaliar a capacidade de programas computacionais desenvolvidos para o cálculo de desempenho termo energético de edificações, incluiu, dentro deles, o *EnergyPlus*®.

2.6 ASHRAE STANDARD 140: MÉTODO BESTEST- CASO 600

O método *Building Energy Simulation Test* (BESTEST) surgiu devido à dificuldade de validar programas de simulação, com o intuito de avaliar a precisão destes. Trata-se de um método promovido pela *International Energy Agency* (IEA), por meio do qual o utilizador pode simular programas distintos com a finalidade de avaliar o nível de precisão da ferramenta/software utilizado (REBELO, 2013).

Segundo Scarduelli; Lamberts; Westphal (2005), o método BESTEST foi aparado pela organização americana *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE) no lançamento da norma para validação de programas de simulação do desempenho térmico de edificações, em 2009, a *ASHRAE Standard 140* (ASHRAE, 2009). A norma traz um detalhamento de cada caso a ser simulado e fornece os resultados obtidos em 8 (oito) programas internacionais, considerados “estados-da-arte” em simulação térmica de edificações. Os autores ainda afirmam que a *ASHRAE Standard 140*, além de ser utilizada como instrumento de validação de programas, pode ser adotada como material de referência para a utilização da ferramenta de simulação.

No total são 40 casos apresentados na norma *ASHRAE Standard 140*, nos quais foram testadas todas as variáveis possíveis, como: o ganho de calor dado pela radiação direta, a massa térmica, sombreamento aplicado nas janelas, as zonas ensolaradas, o efeito do solo, a ventilação noturna, a programação e o ajuste da temperatura de controle de aquecimento e resfriamento (WESTPHAL; LAMBERTS, 2004).

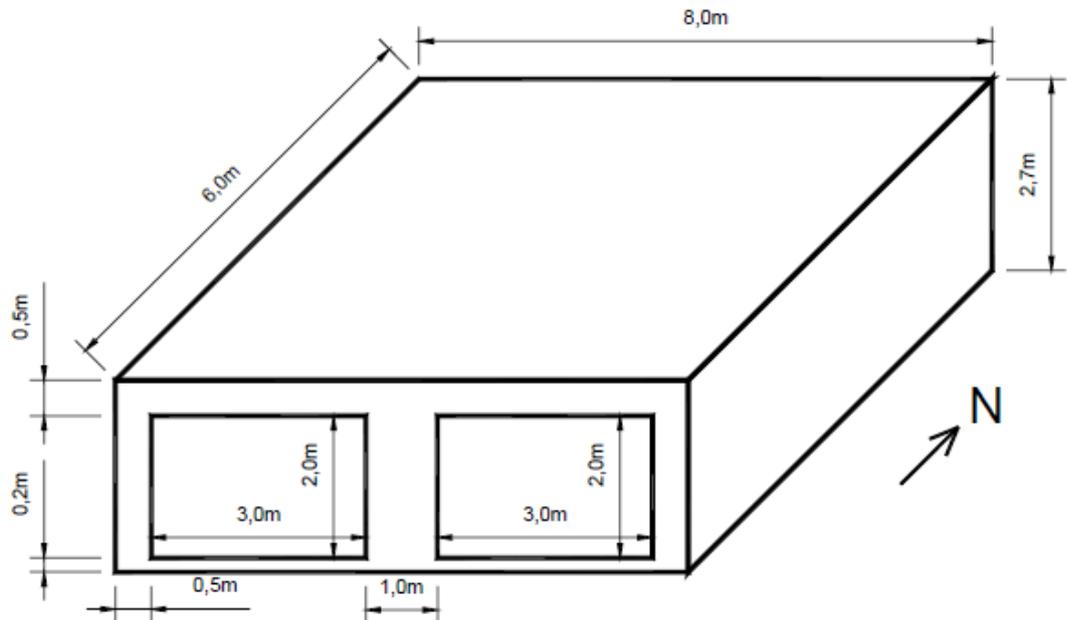
Consoante Westphal; Lamberts (2004), a norma *ASHRAE Standard 140* (ASHRAE, 2009) estipula dois modelos de casos base para protótipos de modelagem, um com código 600 para paredes leves e outro com código 900 para paredes pesadas.

Na presente pesquisa, por conter um material de estudo (tijolo ecológico) com características que se encaixam nos parâmetros das paredes leves, foi estudada a edificação do Caso 600 (Figura 06), cuja edificação possui uma área total de 48,00m² e a fachada principal voltada para o sul, o modelo contém duas janelas de 3mx2m. Conforme com as especificações apontadas na pesquisa de Westphal; Lamberts (2004), o caso 600 não possui usuário e nem potência instalada em equipamentos, foi estipulada uma potência instalada de iluminação de 200W e taxa de infiltração de 0,018m³/s.

Para o sistema de condicionamento de ar foi considerado o de tipo ideal (*purchased air*). Esse tipo de mecanismo permite retirar ou adicionar calor ao ambiente de acordo com a

necessidade, de modo que mantém a temperatura interna controlada. Além disso, o sistema fornece carga parcial referente a cada zona térmica do modelo (WESTPHAL; LAMBERTS, 2004).

Figura 05 - Caso base de protótipo de modelagem: do caso 600.



Fonte: Scarduelli; Lambert; Westphal (2005).

Outras das especificações apontadas pelos pesquisadores Westphal; Lamberts (2004), sobre o caso 600, são as paredes, piso e cobertura, em que foram utilizados materiais com baixa densidade. A parede é constituída por camada externa de madeira, camada de isolante térmico com espessura de 0,066m e uma camada de reboco, dando como resultado uma transmitância térmica total de $0,514 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ C}^\circ)$. O piso também contém uma camada de madeira, isolamento térmico com resistência térmica total igual a $25.075 (\text{m}^2 \text{ C}^\circ) / \text{W}$, resultando em uma transmitância térmica total de $0,039 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Por sua vez, a cobertura está formada por uma camada de madeira, uma camada de isolamento térmico com espessura de 0,11m e o reboco, formando um sanduíche, resultando no valor de $0,318 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ C}^\circ)$ de transmitância térmica. As duas janelas são compostas por duas camadas de vidro separadas por uma câmara de ar. A absorvância das paredes e coberturas à radiação solar inserida no Caso 600 é de 0,70. (WESTPHAL; LAMBERTS, 2004).

Dessa forma, considerando que a presente pesquisa se baseia em simulação por meio do software *EnergyPlus*®, serão utilizadas as características da geometria do protótipo de modelagem, caso 600, do método BESTEST, desenvolvido pela Norma ASHRAE *Standard*

140, tendo em vista a necessidade de utilização de paredes leves para adequação da edificação na ZB8, e que a pesquisa será realizada isenta de condicionamento de ar, conforme adiante detalhado na estratégia metodológica adotada.

3 MATERIAL DE ESTUDO: TIJOLO ECOLÓGICO PRODUZIDO COM RSU

A importância do estudo sobre o tijolo ecológico produzidos com RSUs estabilizados, já fabricado na Argentina, assenta-se na inexistência de pesquisa no Brasil acerca das propriedades do tijolo ecológico produzido com a utilização da fração de matéria orgânica tratada com o processo mecânico-biológico. O interesse da pesquisa está no desempenho térmico do material na zona bioclimática 8, uma vez que possui um alto grau de sustentabilidade.

Para a realização deste capítulo, foi necessário colher informações da visita realizada na planta TMB, na CEAMSE e na fábrica de tijolos ecológicos. Todos os dados referentes ao tijolo ecológico e à fabricação dele foram fornecidos pela Coordinación Ecológica Área Metropolitana Sociedad Del Estado (CEAMSE).

3.1 COORDINACIÓN ECOLÓGICA ÁREA METROPOLITANA SOCIEDAD DEL ESTADO (CEAMSE)

A produção de resíduos é uma característica de toda comunidade humana, portanto, sua disposição final tende a ser um problema à medida que as aglomerações urbanas crescem em tamanho. A cidade de Buenos Aires não foi uma exceção nesse sentido: desde sua fundação em 1580 e até o século XIX, os resíduos foram despejados nos poços que as casas tinham para esse fim ou em terrenos baldios (CEAMSE, 2018).

Conforme a empresa, em 1930, a cidade tinha três usinas de incineração municipais localizadas nos bairros de Barracas, Flores e Chacarita, enquanto ainda havia uma dúzia de lixões a céu aberto, onde o lixo era queimado indiscriminadamente. Os problemas desse tipo de gestão de resíduos pioraram nas décadas seguintes com o uso generalizado de incineradores por grandes geradores (estabelecimentos industriais, hotéis) e prédios de apartamentos.

Com o objetivo de evitar a contaminação ambiental que essas práticas produziam em 1976, a intendência de Buenos Aires proibiu a incineração de resíduos e fechou as usinas que ainda estavam ativas. A nova estratégia para a gestão de resíduos sólidos urbanos na região metropolitana foi usar aterro, para o qual foi criada a empresa estatal: Coordenação Ecológica da Área Metropolitana Sociedade do Estado (CEAMSE), composto pelos governos da cidade e da província Buenos Aires, que começou a cuidar do transporte de resíduos das áreas de coleta e fazer sua disposição final (CEAMSE, 2018).

Acompanhando as mudanças ocorridas em grande parte do mundo em termos de gestão de resíduos sólidos urbanos, no final da década de 1990, a CEAMSE incorporou o conceito de “complexo ambiental” para transformar o que eram zonas de disposição final controlada em áreas onde o lixo recebe um conjunto de processos que tendem a reciclar os resíduos, para que possam retornar ao circuito produtivo e onde a tecnologia permite não apenas reduzir o impacto ambiental, mas, também, aproveitar os gases da matéria orgânica em decomposição para gerar energias renováveis (CEAMSE, 2018).

3.2 PROCESSOS DE TRATAMENTO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Existem alternativas tecnológicas para reduzir a disposição de resíduos em aterro sanitário. Essas alternativas são posteriores à coleta e separação dos resíduos e objetivam diminuir a quantidade de resíduos enviados aos aterros sanitários. Deve-se levar em consideração que, qualquer que seja o método de tratamento, existe um material de rejeito que deverá ser depositado em aterro sanitário, cuja quantidade depende da eficácia do tratamento (CEAMSE, 2018)

Ainda de acordo com a empresa (CEAMSE, 2018), o procedimento com Tratamento Mecânico Biológico (TMB) é uma tecnologia que já é usada na Europa e nos Estados Unidos e recentemente se juntou ao CEAMSE do grupo Roggio⁸. É uma estação de tratamento de resíduos que combina um centro de classificação mecânica com um tratamento biológico, como a compostagem ou digestão anaeróbica. Em uma planta TMB, separam-se os resíduos úmidos (material orgânico) dos resíduos secos (papel, plásticos e vidro). Os resíduos secos são carregados em um sistema de esteiras transportadoras, e logo se recuperam os de metais por ímãs (Figura 06).

Figura 06- Processo de separação mecânica dos resíduos sólidos urbanos.



Fonte: Acervo pessoal.

⁸ O Grupo Roggio atua desde 1994 no CEAMSE, prestando serviços como a construção dos módulos para o descarte final de resíduos, manutenção e operação dos resíduos, bem como projeção e execução de outros serviços e obras (CEAMSE, 2018).

Os resíduos úmidos (Figura 07a) passam por um processo de tratamento em "biorreatores"(Figura 07b), em que eles são mantidos em um ambiente controlado por aproximadamente 21 dias para gerar um material estabilizado, sendo esse material o rejeito que pode ser usado como cobertura para o aterro sanitário. No final do processo, de cada 1000 toneladas que entram, pouco mais de 400 toneladas são destinadas para disposição final, logrando-se uma vida mais longa dos aterros sanitários (CEAMSE, 2018).

Durante o processo de digestão em biorreatores é gerado biogás que pode ser usado para produzir eletricidade e calor (Figura 07c).

Figura 07 - Processo de tratamento biológico dos resíduos sólidos urbanos.

a) Resíduos úmidos



b) Material orgânico sendo aplicado nos biorreatores



c) Material em tratamento por 21 dias



Fonte: Acervo pessoal.

3.3 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DO TIJOLO ECOLÓGICO

De acordo com a visita na CEAMSE, a fabricação de tijolo ecológico é outra das alternativas que se destina a diminuir a quantidade de resíduos enviados aos aterros sanitários. O Projeto do “Tijolo ecológico⁹” é uma iniciativa da empresa, destinado a aproveitar a fração fina e orgânica dos resíduos sólidos urbanos estabilizados para a produção de tijolos (Figura 08). Estes são produzidos a partir da mistura e combinação de tais resíduos com outros materiais utilizados na construção (cal, cimento e areia) (CEAMSE, 2018).

⁹ Tijolo ecológico: tijolo produzido com resíduos sólidos urbanos estabilizados.

Figura 08 - Resíduos sólidos urbanos estabilizados.



Fonte: Acervo pessoal.

Conforme CEAMSE (2018), na fábrica de “Tijolos Ecológicos”, o desperdício orgânico que já foi tratado é recebido, e realizado um novo processo, que consiste no esmagamento fino para, em seguida, ser peneirado até atingir o tamanho apropriado para uso posterior na fabricação de tijolos (Figura 9a).

Ainda de acordo com a empresa, após o peneiramento, misturam-se todos os materiais secos (resíduos estabilizados, cal, cimento e areia) e se adiciona água para amassar e homogeneizar (Figura 9b). Uma vez alcançada a consistência adequada, o tijolo é formado por preenchimento mecânico de moldes. Finalmente, os tijolos elaborados podem secar, em torno de 20 dias, tempo em que o material adquire dureza e resistência (Figura 9c).

Figura 9 - Sequência da fabricação do tijolo com o aditivo de cal, areia e cimento.

a) resíduos estabilizados peneirados

b) resíduos estabilizados peneirados com cal, cimento e areia

c) tijolos elaborados com 20 dias de secagem



Fonte: Acervo pessoal.

Assim, o tijolo ecológico produzido pela CEAMSE, na Argentina, possui propriedades sustentáveis, já que os rejeitos que iriam ao aterro sanitário formam parte da matéria prima do

material, gerando uma redução nos “gases efeito estufa” dos aterros sanitários e, por sua vez, uma redução no impacto ambiental.

De acordo com CEAMSE (2018), na argentina os tijolos se encontram habilitados para o uso industrial ou para fins sociais. Na figura 10 apresentasse o local onde são fabricados os tijolos ecológicos dentro do CEAMSE.

Figura 10- Fábrica de tijolos ecológicos.



Fonte: Acervo pessoal.

3.4 APRESENTAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, MECÂNICAS E TÉRMICAS DO TIJOLO ECOLÓGICO

Depois da fabricação do tijolo ecológico (Figura 11), a CEAMSE levou para o laboratório as amostras do material para que fossem realizados os devidos ensaios. Os ensaios das propriedades físicas, mecânica e térmicas foram executados pelo Instituto Nacional de Tecnologia¹⁰(INTI), da Argentina.

Figura 11: Tijolo Ecológico finalizado.

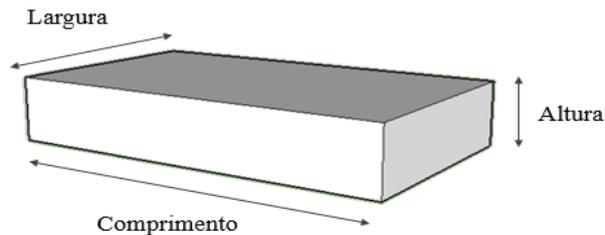


Fonte: Acervo pessoal.

¹⁰ O Instituto Nacional de Tecnologia Industrial (INTI) é um órgão argentino criado pelo Decreto-Lei 17.138 de 27 de dezembro de 1957, no marco do surgimento de um conjunto de instituições nacionais destinadas a movimentar, de maneira planejada, o investimento público, ciência, tecnologia e esportes. É uma entidade autárquica que atua no âmbito do Ministério da Produção e do Trabalho, cuja missão é acompanhar e promover o crescimento das PMEs argentinas, promovendo o desenvolvimento industrial federal por meio da inovação e da transferência de tecnologia.

As propriedades físicas do material se baseiam no ensaio realizado segundo o método INTI, seguindo o esquema de medidas (comprimento, largura e altura) indicado na Figura 12. Foram localizados os pontos de referência e determinadas as medidas com base nestes.

Figura 12- Esquema de medição segundo o método INTI.



Fonte: INTI (2015). Adaptado.

No Quadro 08 encontram-se o resultado do processamento de dados físicos do material

Quadro 08 - Dimensões nominais do tijolo ecológico.

Comprimento (m)	Largura(m)	Altura (m)
0,25	0,12	0,05

Fonte: INTI, (2015). Adaptado.

A medição da condutividade térmica do material foi realizada de acordo com o método de ensaio das propriedades da transmissão de calor em regime estacionário mediante o medidor de caudal térmico, seguindo os delineamentos estabelecidos nas normas: ISO 8302 (*Thermal insulation. Determination of steady-state thermal resistance and related properties. Guarded hot plate apparatus*), ASTM C 177 (*standard Test Method for Steady Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by means of the Guarded Hot Plate Apparatus*), e IRAM 11559 (*Determinación de la conductividad térmica y propiedades conexas em régimen estacionário. Método de la placa caliente com guarda*).

As propriedades térmicas assim como as propriedades físicas, são as propriedades relevantes para a realização da pesquisa. No Quadro 09 apresentam-se as propriedades físicas e térmicas do tijolo ecológico e do tijolo maciço cerâmico.

Quadro 09 - Propriedades térmicas do tijolo ecológico.

Propriedades	Tijolo ecológico	Tijolo maciço cerâmico
Altura m	0,05	0,06
Largura m	0,12	0,10
Comprimento m	0,25	0,22
Área m²	0,0125	0,0132
Densidade kg/m³	1408	1600
Condutividade W/(m K)	0,43	0,90
Calor específico cp kJ/(kg K)	1,00	0,92
Resistência m²K/W	0,28	0,10
Transmitância W/(m² K)	3,58	10,00

Fonte: INTI (2015); NBR 15270-1 (ABNT, 2017a). Adaptado.

4 MÉTODO DE TRABALHO

O método de trabalho apresentado é destinado ao estudo do desempenho térmico de edificações construídas com tijolos ecológicos produzidos com RSUs estabilizados. Por meio da composição de um sistema de parede equivalente para a envoltória e por intermédio de simulação computacional, foi viável a avaliação do desempenho térmico das edificações.

A execução física de uma célula com os tijolos ecológicos ficou impossibilitada devido às condições financeiras e trâmites burocráticos da alfândega para o transporte internacional do material. Nesta pesquisa foram analisadas as temperaturas do ar internas das zonas térmicas, de acordo com as variações realizadas na envoltória e o comportamento térmico dos materiais.

Conforme apresentada na revisão bibliográfica, a norma NBR 15575-1 (ABNT, 2013a) indica a simulação computacional como processo válido para analisar o comportamento térmico da envoltória nas edificações.

Para a execução das simulações computacionais, foi selecionado o *software EnergyPlus*®. O programa foi escolhido pela indicação da norma e também por ser o programa mais utilizado na área de desempenho térmico por pesquisadores de diferentes países, como, também, por estar amparado pela norma americana *ASHRAE Standard 140*, como mencionado na revisão da literatura.

De acordo com Mazzafero; Silva; Ghisi (2014), para ter sucesso na simulação computacional é necessário cumprir dois requisitos fundamentais: a correta inserção dos dados de entrada e, por outro lado, uma adequada interpretação dos dados de saída.

Para a avaliação do desempenho térmico do tijolo ecológico foi preciso realizar simulações com diferentes protótipos, por tanto foi necessário dividir o processo em etapas.

4.1 DESCRIÇÃO DAS ETAPAS

Para realizar a avaliação do desempenho térmico perante uma simulação computacional, faz-se necessário a modelagem de um protótipo digital, assim como um protótipo físico para medição *in loco*.

Em razão do método BESTEST ser utilizado por vários simuladores, adotou-se como modelo referência o “caso 600”, para realizar o protótipo de modelo digital para a simulação e, assim, avaliar o desempenho térmico do tijolo ecológico. Com esse protótipo, pretendeu-se

analisar a diferença de temperatura do ar interna em relação a temperatura do ar externa, já que o protótipo conta com uma única zona térmica.

Devido ao fato de que o tijolo ecológico tem um propósito social, aplicado em habitações de baixa renda na Argentina e utilizado para autoconstrução, foi necessário realizar simulações de um protótipo de habitação de interesse social (HIS) no Brasil, a fim de que as simulações apresentassem resultados mais condizentes com a realidade, e assim poder analisar o desempenho térmico do material com as características climáticas do local.

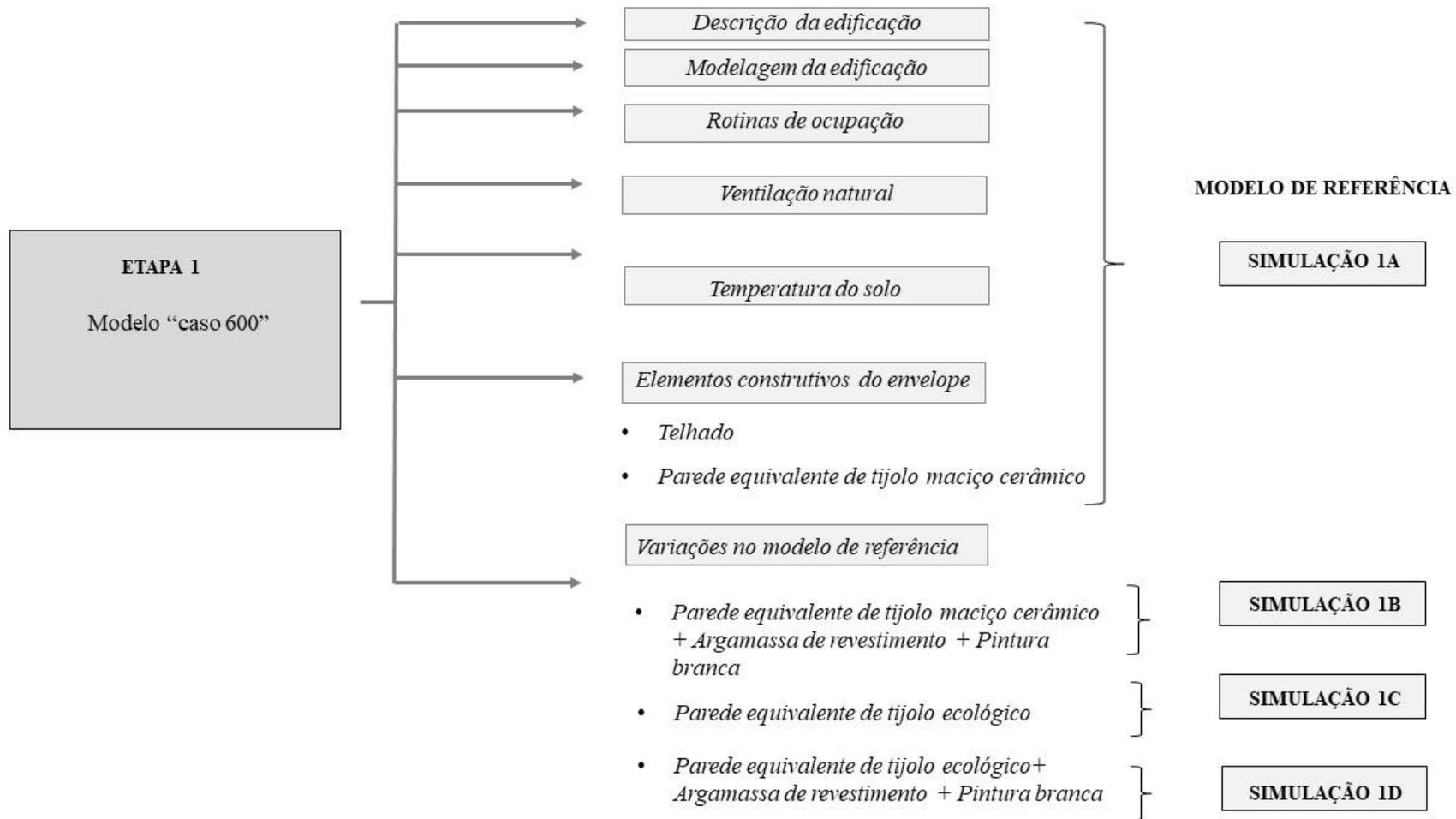
Conforme mencionado na revisão da literatura, a pesquisa de o desempenho térmico do material melhora com a aplicação de argamassa como revestimento e com a aplicação de pintura de cor de baixa absorvância (branca, amarela ou verde claro) nas paredes exteriores (CHENG; NG; GIVONI, 2005). Por esse motivo, foram feitas algumas variações na envoltória do modelo referência, como a aplicação da argamassa de revestimento e a pintura de cor branca para verificar a melhoria no desempenho.

Como mencionado, o tijolo ecológico é fabricado com os rejeitos que iriam para o aterro sanitário e não geram impactos negativos no processo de fabricação, fator que não acontece com o tijolo maciço cerâmico. Esses dois materiais têm propriedades físicas semelhantes, por esse motivo, o tijolo maciço cerâmico foi escolhido para realizar o comparativo. Portanto, realizou-se a simulação da edificação com a aplicação de um sistema de parede equivalente com o tijolo maciço cerâmico e, logo, outra simulação com a aplicação de argamassa de revestimento e pintura branca. Por fim, foi realizado o comparativo com o tijolo ecológico.

Para realizar as modelagens digitais dos protótipos foi necessário dividir o processo em duas etapas:

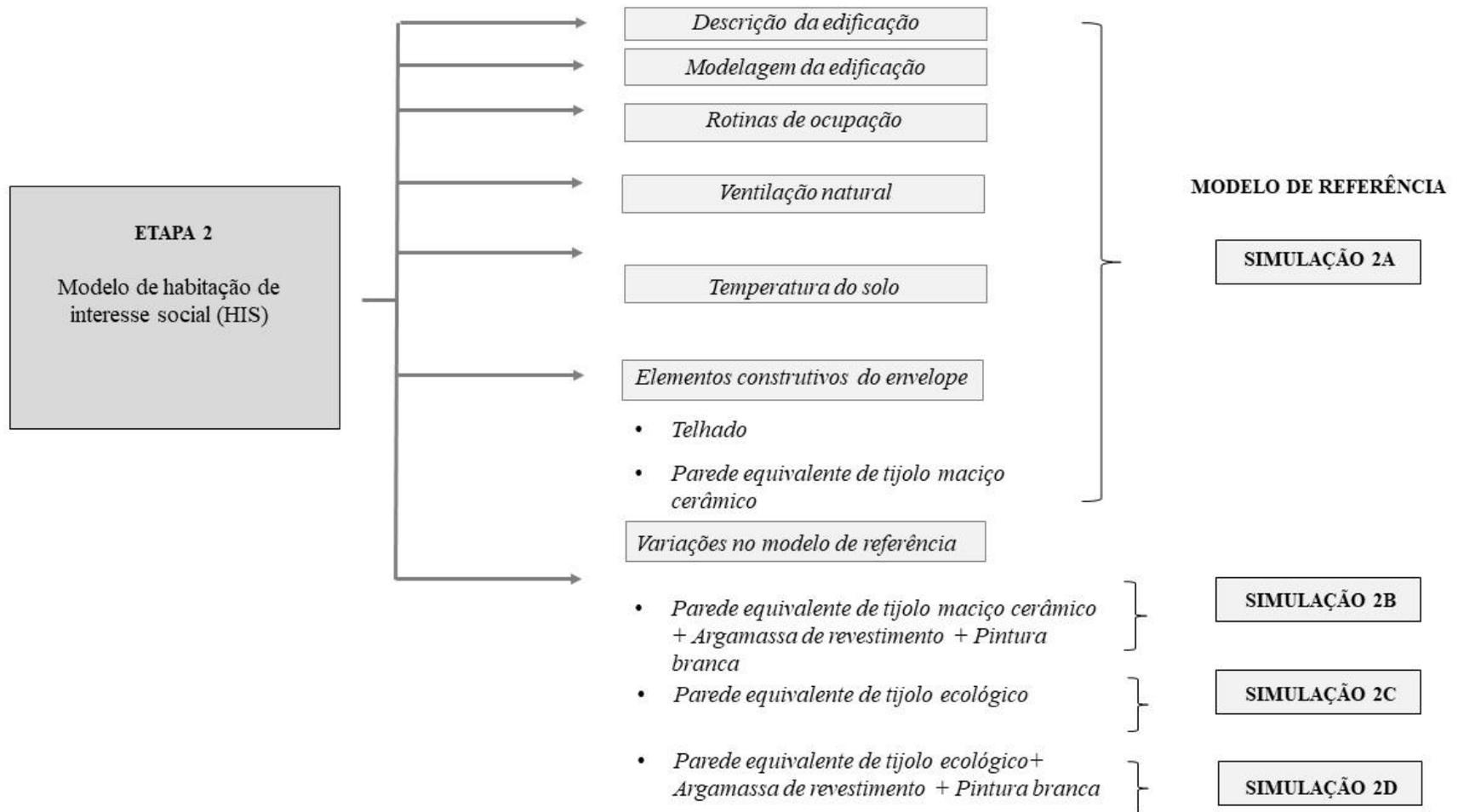
- Etapa 1: Modelo “caso 600”. (Figura 13);
- Etapa 2: Modelo Habitação de Interesse Social (HIS) (Figura 14).

Figura 13 - Esquema da etapa 1: Modelo “caso 600”.



Fonte: A autora.

Figura 14 - Esquema da etapa 2: Modelo “Habitação de interesse social (HIS).



Fonte: A autor

4.1.1 ETAPA 1: Modelo “caso 600”

Nesta etapa foi criado um modelo do “caso 600” aplicando as propriedades térmicas do tijolo maciço cerâmico como elemento construtivo da envoltória no clima de Aracaju/SE, no dia típico de verão. Esse modelo serve como modelo referência para todas as simulações realizadas para o “caso 600”.

Conforme apresentada na revisão bibliográfica, a célula modelo BESTEST, desenvolvida pela Norma *ASHRAE Standard 140*, avalia a capacidade de programas computacionais desenvolvidos para o cálculo de desempenho termo energético de edificações. O protótipo pode ser adotado como material de referência para simulações computacionais, uma vez que esta apresenta a descrição detalhada de cada caso a ser simulado e fornece os resultados obtidos em diversos programas de simulação computacional (MELO; LAMBERTS, 2008).

A seguir apresentam-se todos os procedimentos realizados na simulação 1A.

4.1.1.1 Modelagem da edificação

O “caso 600” é modelo base adotado, sendo proveniente da norma *ASHRAE Standard 140*. Para a execução dos modelos, foi preciso utilizar diferentes *softwares* computacionais. O *software AutoCad®* 2018, para desenhar a planta baixa e o *software SketchUp®* (TRIMBLE, 2018), para modelar a geometria, enquanto que o *plug-in Euclide®*, acoplado ao *SketchUp®*, para viabilizar a definição das características físicas e térmicas de cada superfície.

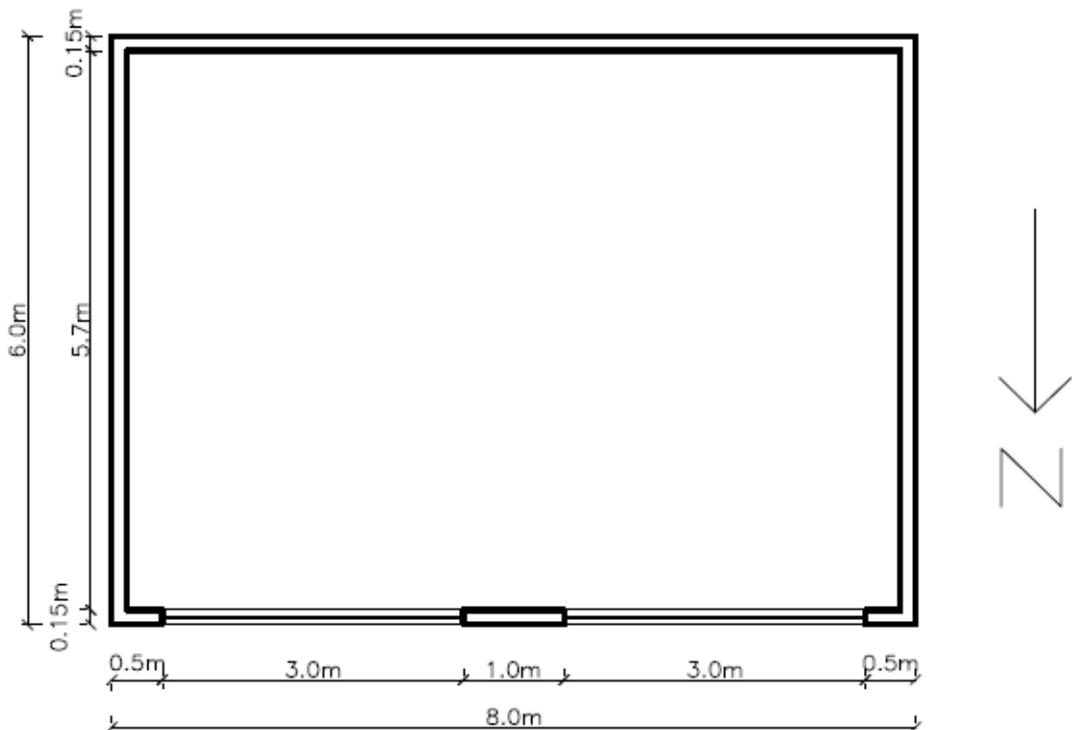
A modelagem foi iniciada com a criação de uma única zona térmica em razão da geometria da edificação. Após isso, foram definidos os tipos e as propriedades das superfícies que delimitam cada zona térmica de acordo com a norma americana *ASHRAE Standard 140*. As duas janelas foram desenhadas de acordo com o modelo estabelecido na norma *ASHRAE Standard 140*. As trocas de ar são controladas pelo usuário do programa com a característica de ventilação natural. O contato com o solo foi levado em consideração, sendo que a temperatura do solo foi obtida utilizando dados presentes nos arquivos climáticos, em conjunto com o pré-processador *Slab*. A cobertura, por sua vez, foi representada respeitando a geometria real do “caso 600” da norma *ASHRAE Standard 140*, como pode ser observado na Figura 06, do “caso 600” na revisão bibliográfica.

4.1.1.2 Descrição da edificação

O modelo é constituído por um único ambiente e possui duas janelas, orientadas a norte. As suas dimensões são iguais a 6m x 8m por 2,7m de pé-direito.

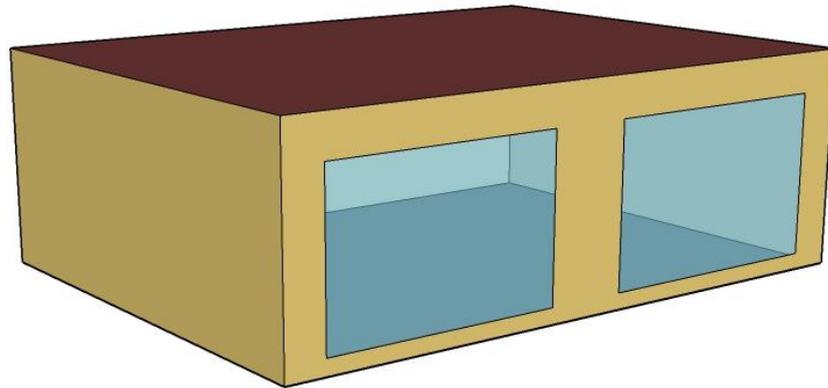
Com base nos trabalhos dos pesquisadores Batista; Lamberts; Westphal (2005), Carlo e Lamberts (2007); Melo e Lamberts (2008); Westphal e Lamberts (2004); Rebelo (2013); Scarduelli; Lambert; Westphal (2005), que trabalharam com simulações utilizando como protótipo o “caso 600”, foi reproduzida a planta baixa da edificação (Figura 15) no *software AutoCad®*, bem como foi realizada a modelagem da única zona térmica no *software SketchUp®* (Figura 16).

Figura 15 - Planta Baixa do modelo caso 600.



Fonte: A autora.

Figura 16- Perspectiva do modelo caso 600.



Fonte: A autora.

A geometria do protótipo “caso 600” é simples e retangular, somando uma área total de 48 m². A orientação da edificação foi analisada com a fachada onde se localizam as janelas orientadas para norte. Foi utilizado o arquivo climático do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) do ano 2015, da cidade de Aracaju/SE (zona bioclimática 8), disponibilizado pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

4.1.1.3 Rotinas de ocupação

Nesta pesquisa, assim como na pesquisa de Batista; Lamberts; Westphal (2005), não foi considerada a ocupação de pessoas, sendo estipulada uma carga interna fixa igual a 200W durante às 24h diárias no dia típico de verão (21 de dezembro). Além disso, considerando que a edificação foi analisada na cidade de Aracaju, localizada na ZB 8, não foi realizada a simulação no inverno por determinação da norma NBR 15575-1 (ABNT, 2013a).

4.1.1.4. Ventilação natural

Por meio do *SketchUp*®, associado ao *plug-in Euclid*®, foram modeladas as aberturas pelas quais ocorrerá a ventilação da edificação, sendo que o “caso 600” tem duas janelas. Posteriormente, a ventilação foi detalhada no *EnergyPlus*®, por meio da inserção de dados, especificando cada parâmetro.

Melo et al. (2008) descrevem no manual de simulação computacional o objeto "*AirflowNetwork:SimulationControl* ", presente no *EnergyPlus*®. Esse objeto possibilita controlar a ventilação natural, considerando as trocas de ar entre o interior e o exterior da edificação, assim como as trocas de ar entre as zonas térmicas.

Ainda de acordo com os autores, o objeto "*AirflowNetwork:MultiZone:Surface*" permite controlar, individualmente, a ventilação natural em cada abertura contida no modelo, deixando que algumas aberturas estejam sempre abertas, sempre fechadas ou sendo controladas, por meio de padrões de abertura e por parte do usuário.

Portanto, o ambiente não possui nenhum tipo de sistema de condicionamento artificial e as taxas de renovações de ar assumidas são resultantes da infiltração e ventilação natural. De acordo com o estudo de Oliveira (2015), aplicou-se 5 renovações de ar/hora.

4.1.1.5 Temperatura do solo

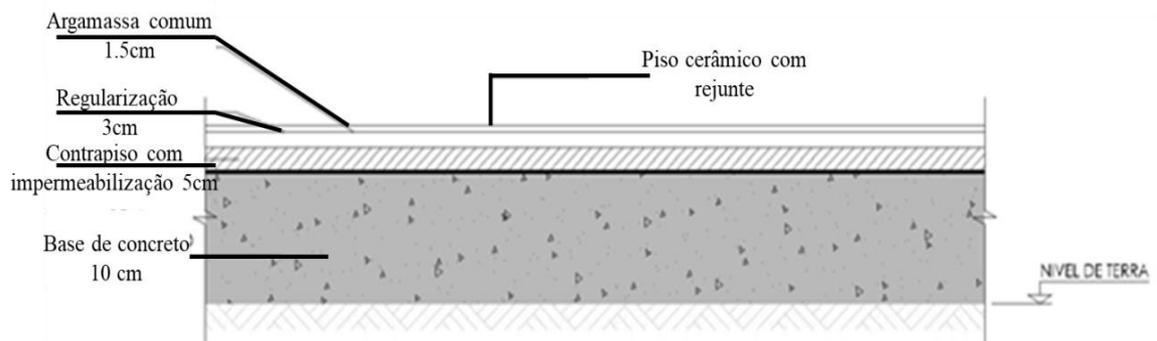
Um dos parâmetros mais importantes, em edificações térreas, para a realização da simulação computacional, é a temperatura do solo. Mazzafero; Silva; Ghisi (2014) apontam que a consideração da atuação da temperatura do solo é relevante, já que as trocas de calor entre o piso e o solo influenciam diretamente nas temperaturas internas da edificação.

Em consonância com a pesquisa de Mazzafero; Silva; Ghisi (2014) foram considerados os valores médios mensais de temperatura do solo, sendo esses valores oferecidos pelo arquivo climático de referência da cidade em questão (TRY - *Test Reference Year*). Logo, empregou-se o pré-processador *Slab*, acoplado ao *EnergyPlus*®, que permite conseguir as temperaturas médias mensais da laje da edificação.

O pré-processador *Slab* funciona com a aplicação dos seguintes parâmetros: as propriedades dos materiais que estão em contato com solo com e sem isolamento, as propriedades da edificação, e as condições de contorno (MAZZAFERO; SILVA; GHISI, 2014).

Para isso, nesta pesquisa, foi criado o *Slab* inserindo os seguintes objetos: base de concreto de 0,10 m, contrapiso com impermeabilização de 0,05 m, regularização com 0,03 m de argamassa comum e piso cerâmico com rejunte (Figura 17). O *Slab* foi montado pelo tipo *site: GroundDomain:Slab*.

Figura 17 - Composição do piso da edificação do caso 600.



Fonte: A autora.

Portanto, foi inserido como dado de entrada a temperatura do solo que se encontra no arquivo climático da cidade de Aracaju/SE no objeto *Site:GroundTemperature:BuildingSurface*. Nessa simulação, o *EnergyPlus®* avalia a intervenção das temperaturas do solo nas temperaturas internas da edificação. É importante frisar que a adição do *Slab* em pavimentos térreos faz com que os dados sejam mais próximos a realidade.

4.1.1.6 Elementos construtivos do envelope

A presente pesquisa compreende o estudo do desempenho térmico do envelope de uma edificação. O tipo de parede do envelope utilizado no estudo é parede simples leve, conforme com a norma NBR 15220 (ABNT, 2005).

A vedação vertical do modelo de referência foi realizada com o tijolo maciço cerâmico, com o objetivo de comparar o desempenho térmico dos tijolos (tijolo maciço cerâmico vs tijolo ecológico). O tijolo cerâmico maciço tem propriedades físicas similares ao ecológico, porém as propriedades térmicas são diferentes. (Tabela 02).

As informações referentes ao tijolo ecológico, como propriedades físicas e térmicas foram fornecidas pela CEAMSE, responsável pela fabricação do material. O INTI ARGENTINA foi o responsável pelos ensaios de laboratório (Tabela 02).

Tabela 02 - Dimensões e propriedades termo físicas do tijolo maciço cerâmico e do tijolo ecológico.

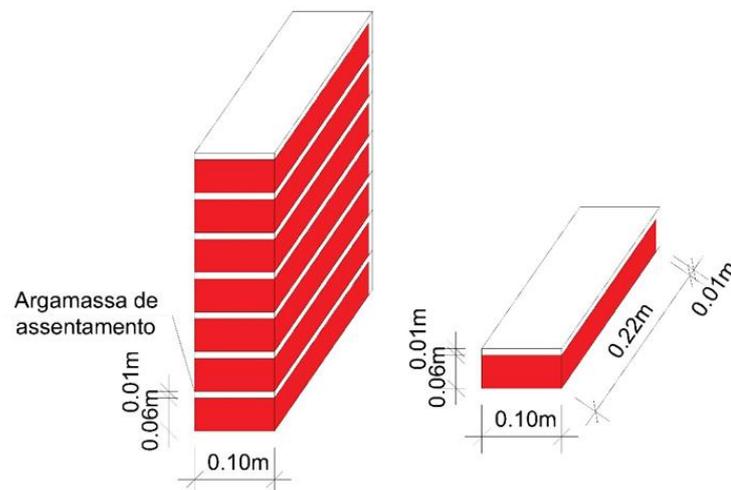
Propriedade	Tijolo maciço cerâmico	Tijolo ecológico
Altura m	0,06	0,05
Largura m	0,10	0,12
Comprimento m	0,22	0,25
Área m ²	0,0132	0,0125
Densidade kg/m ³	1600	1408
Condutividade W/(m C°)	0,90	0,43
Calor específico cp kJ/(kg C°)	0,92	1,00
Resistência m ² C°/W	0,10	0,28
Transmitância W/(m ² C°)	10,00	3,58

Fonte: NBR 15270-1 (ABNT, 2017a); INTI (2015). Adaptado.

A Resistência térmica (R) foi calculada de acordo com a Equação (3) e a Transmitância térmica de acordo com a Equação (4).

O tijolo maciço cerâmico é assentado na menor direção, com argamassa de assentamento de 0,01 m na face superior e posterior, totalizando uma espessura de parede de 0,10 m (Figura 17). Como no programa de simulação *EnergyPlus*®, o sistema de parede é modelado por camadas com propriedades uniformes, é necessário criar um sistema de parede equivalente e calcular as propriedades termofísicas da combinação desse sistema de parede equivalente. Para a pesquisa, foi criado um sistema de parede composto por tijolos maciço cerâmico assentados na menor direção com argamassa de assentamento (Figura 18). Os dados das propriedades térmicas da argamassa de assentamento foram coletados da norma NBR 15220- 2 (ABNT, 2005b) (Tabela 03).

Figura 18 - Sistema de parede equivalente composto por tijolos maciço cerâmico.



Fonte: A autora.

Tabela 03- Propriedades da argamassa de assentamento.

Propriedade	
Densidade kg/m ³	2000
Condutividade W/(m C°)	1,15
Calor específico cp kJ/(kg C°)	1,00
Área argamassa m ²	0,0071

Fonte: NBR 15220-2 (ABNT, 2005b).

Após a coleta de dados, foram calculadas (ver APÊNDICE A) as propriedades termofísicas do sistema de parede equivalente. Os dados das características físicas para realizar os cálculos foram extraídos dos dados fornecidos pela norma NBR 15270-1 (ABNT, 2017a). (Tabela 04). O circuito térmico substituto são duas resistências em paralelo e a resistência total é calculada pela Equação (16): (índice *a* para argamassa de assentamento, *t* para tijolo).

$$\frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_t \frac{A_t}{A_{tot}}} + \frac{1}{R_a \frac{A_a}{A_{tot}}} \rightarrow R_{tot} = \frac{1}{\frac{A_{tot}}{R_t A_t} + \frac{A_{tot}}{R_a A_a}} \quad \text{Equação (16)}$$

Onde:

R_{tot} = Resistência total (m²K/ C°)

R_t = Resistência do tijolo (m²K/ C°)

R_a = Resistência da argamassa (m²K/ C°)

A_t = Área do tijolo (m²)

A_a = Área da argamassa (m²)

A_{tot} = Área total (m²)

As demais propriedades termofísicas, como densidade e calor específico, são calculados pela ponderação da área, como é apresentada na Equação (17):

$$\rho_{tot} = \frac{A_t \rho_t}{A_{tot}} + \frac{A_a \rho_a}{A_{tot}}; \quad c_{p,tot} = \frac{A_t c_{p,t}}{A_{tot}} + \frac{A_a c_{p,a}}{A_{tot}} \quad \text{Equação (17)}$$

Onde:

ρ_{tot} =densidade total (kg/m³),

ρ_t =densidade tijolo (kg/m³),

ρ_a =densidade argamassa(kg/m³),

A_t = Área do tijolo (m²)

A_{tot} = Área total (m²)

A_a = Área da argamassa (m²)

$C_{p,tot}$ = Calor específico total kJ/(kg C°)

$C_{p,t}$ = Calor específico tijolo kJ/(kg C°)

$C_{p,a}$ = Calor específico argamassa kJ/(kg C°)

Tabela 04 - Dimensões e propriedades termo físicas da combinação tijolo maciço cerâmico com argamassa de assentamento.

Propriedade	Tijolo maciço cerâmico
Altura m	0,07
Largura m	0,11
Comprimento m	0,23
Área m ²	0,0203
Percentagem Argamassa %	35
Densidade kg/m ³	1739,9
Condutividade W/(m C°)	0,99
Calor específico cp kJ/(kg C°)	0,95
Resistência m ² C°/W	0,10
Transmitância W/(m ² C°)	9,87

Fonte: NBR 15270-1 (ABNT, 2017a); NBR 15220-2 (ABNT, 2005b).

Para efetuar a simulação computacional, foram inseridos, conforme a Tabela 04, os dados de entrada no *software EnergyPlus*®. Todas as propriedades termofísicas dos componentes construtivos das edificações são inseridas como dados de entrada no *software*. O programa pede como dado de entrada: a espessura do material, a densidade, a condutividade térmica, a rugosidade, o calor específico, a absorvância e emissividade do material.

É importante ressaltar que as últimas duas propriedades (absorvância e emissividade) se referem à superfície exposta da vedação, e são dados de entrada inseridos no *software* (Tabela 05). Para o modelo do caso 600, os dois materiais que ficam expostos são o tijolo e a telha cerâmica.

Tabela 05 - Propriedades de emissividade e absorvância dos materiais expostos ao exterior.

Material	Emissividade (ϵ)	Absorvância (α)
Tijolo ecológico	0,85	0,70
Tijolo maciço cerâmico	0,85	0,70
Telha cerâmica	0,85	0,70

Fonte: NBR 15220-2 (ABNT, 2005b).

4.1.1.7 Variações no modelo de referência

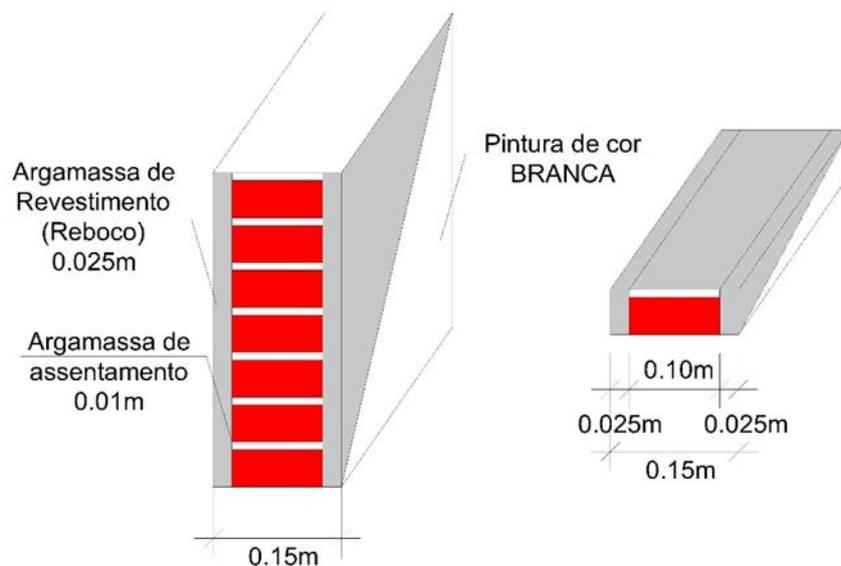
Após ser criado e simulado o modelo padrão de referência, foram realizadas variações dos materiais aplicados na envoltória da edificação, sendo possível obter como consequência

diferentes desempenhos térmicos da edificação. Para isso, foi necessária a realização da simulação 1B, 1C e 1D.

Conforme citado na revisão bibliográfica, o uso das envoltórias com cores claras (branca, amarela e verde claro) é uma das formas mais simples, efetivas e econômicas de reduzir a temperatura interna das edificações em climas quentes e úmidos (CHENG; NG; GIVONI, 2005).

Nesta pesquisa, aplicou-se o acréscimo de argamassa de revestimento e pintura de cor branca com absorvância de 0,20, com a finalidade de verificar a melhoria no desempenho térmico da edificação (simulação 1B). Para conseguir inserir os dados de entrada no *software*, foi preciso criar um sistema de parede equivalente. Na Figura 19 apresenta-se a disposição da camada de revestimento (interna e externa), composta por argamassa de 0,025m de espessura e pintura na cor branca ($\alpha=0,20$), dando uma espessura total da parede de 0,15m.

Figura 19 - Sistema de parede equivalente composto por tijolos maciço cerâmico com revestimento e pintura.



Fonte: A autora.

Os cálculos foram realizados de acordo com Weber et al. (2017), em que os pesquisadores desenvolveram um modelo equivalente de avaliação de propriedades térmicas para a elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos brasileiros para o uso no programa *EnergyPlus*®.

Portanto, para a comparação das variações na envoltória, foram calculadas (ver APÊNDICE A) as propriedades da parede composta por tijolos com e sem argamassa de

assentamento, e com e sem argamassa de revestimento de 0,025m e pintura branca, dos dois lados, incluindo a resistência de convecção. A resistência total é calculada pela Equação (18):

$$R_{p1} = R_{conv,1} + R_{tijolo} + R_{conv,2} \quad \text{Equação (18)}$$

Onde:

R_{p1} = Resistência do tijolo, convecção ($m^2 C^\circ/W$)

$R_{Con,1}$ = Resistências superficiais internas ($m^2 C^\circ/W$)

$R_{conv,2}$ = Resistências superficiais externas ($m^2 C^\circ/W$)

R_{eco} = Resistência do tijolo ($m^2 C^\circ/W$)

$$R_{p2} = R_{conv,1} + R_{tot,2} + R_{conv,2} \quad \text{Equação (19)}$$

Onde:

R_{p2} = Resistência do Tijolo , assentamento, convecção

$R_{Con,1}$ = Resistências superficiais internas ($m^2 C^\circ/W$)

$R_{conv,2}$ = Resistências superficiais externas ($m^2 C^\circ/W$)

R_{tot2} = Resistência do tijolo com argamassa de assentamento ($m^2 C^\circ/W$)

$$R_{p3} = R_{conv,1} + R_{reb} + R_{tot,2} + R_{reb} + R_{conv,2} \quad \text{Equação (20)}$$

Onde:

R_{p3} = Resistência do Tijolo, assentamento, reboco, convecção

$R_{Con,1}$ = Resistências superficiais internas ($m^2 C^\circ/W$)

$R_{conv,2}$ = Resistências superficiais externas ($m^2 C^\circ/W$)

R_{tot2} = Resistência do tijolo com argamassa de assentamento ($m^2 C^\circ/W$)

R_{reb} = Resistência da argamassa de revestimento (reboco) ($m^2 C^\circ/W$)

A resistência térmica total do modelo de referência é obtida por meio da soma da resistência do módulo ($R_{módulo}$) e as resistências superficiais internas (R_{conv1}) e externas (R_{conv2}). Os valores para a resistência térmica da superfície interna (R_{conv1}) e a resistência térmica da superfície externa (R_{conv2}) foram obtidos na NBR 15220- 2 (ABNT, 2005b), e

correspondem respectivamente a 0,04 m². °C/W e 0,13 m². °C/W. A seguir apresentam-se todos os resultados das propriedades térmicas de todas as combinações dos materiais (Tabela 06).

Tabela 06 - Comparação propriedades termo físicas para diferentes sistemas com tijolo maciço cerâmico.

Propriedade	Resistência m ² K/W	Transmitância W/(m ² K)
Tijolo maciço cerâmico, convecção	0,28	3,56
Tijolo maciço cerâmico, argamassa de assentamento, convecção	0,27	3,69
Tijolo maciço cerâmico, argamassa de revestimento, convecção	0,33	3,08
Tijolo maciço cerâmico, argamassa de assentamento, argamassa de revestimento, convecção	0,32	3,18

Fonte: A autora.

Finalmente, na absorvância e emissividade foram adotados valores que representam a cor da superfície externa, e nesse caso foi utilizada a pintura de cor branca (Tabela 07). Esses dados são inseridos diretamente no *software*.

Tabela 07-Propriedades de emissividade e absorvância da pintura branca e argamassa de revestimento.

Material	Emissividade (ϵ)	Absorvância (α)
Argamassa de revestimento	0,85	0,40
Pintura branca	0,85	0,20

Fonte: NBR 15220-2 (ABNT, 2005b).

Outra das variações na envoltória do modelo de referência foi a substituição do tijolo maciço cerâmico pelo tijolo ecológico, com o objetivo de comparar o desempenho térmico dos materiais (simulação 1C). O tijolo cerâmico maciço tem características físicas similares ao ecológico (Tabela 08).

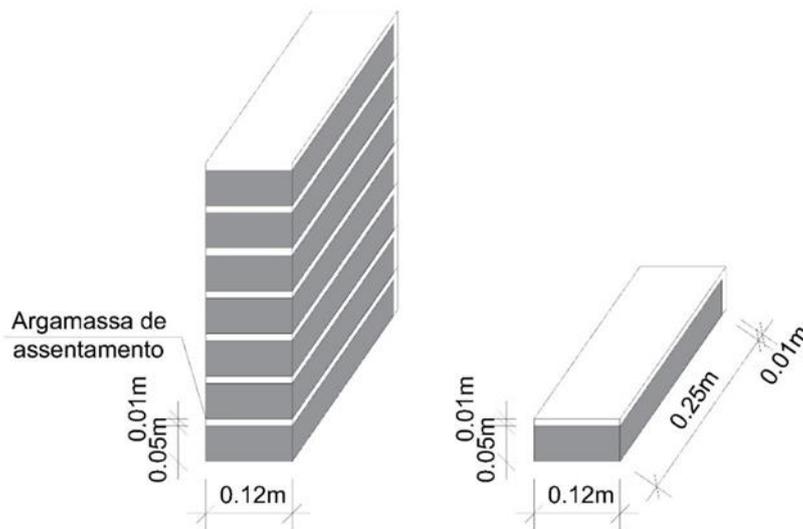
Tabela 08 - Dimensões do tijolo ecológico produzido com rejeitos de RSU e do tijolo maciço cerâmico para vedação das edificações.

Material	Largura (m)	Comprimento (m)	Altura(m)
Tijolo ecológico	0,12	0,25	0,05
Tijolo maciço cerâmico	0,10	0,22	0,06

Fonte: INTI (2015); NBR 15270-1 (ABNT, 2017a). Adaptado.

Para a substituição, foi criado um sistema de parede equivalente com o tijolo ecológico assentado com argamassa na menor direção (Figura 20).

Figura 20- Sistema de parede equivalente com tijolos ecológico.



Fonte: A autora.

Para realizar os cálculos, foram coletados os dados do tijolo ecológico fornecidos pelo INTI (2015) e da argamassa de assentamento da norma NBR 15220- 2 (ABNT, 2005b) (Tabelas 02 e 03), bem como realizados os cálculos (ver APÊNDICE A) de transmitância e resistência térmica da combinação do tijolo com a argamassa de assentamento conforme etapa 1 (Tabela 09).

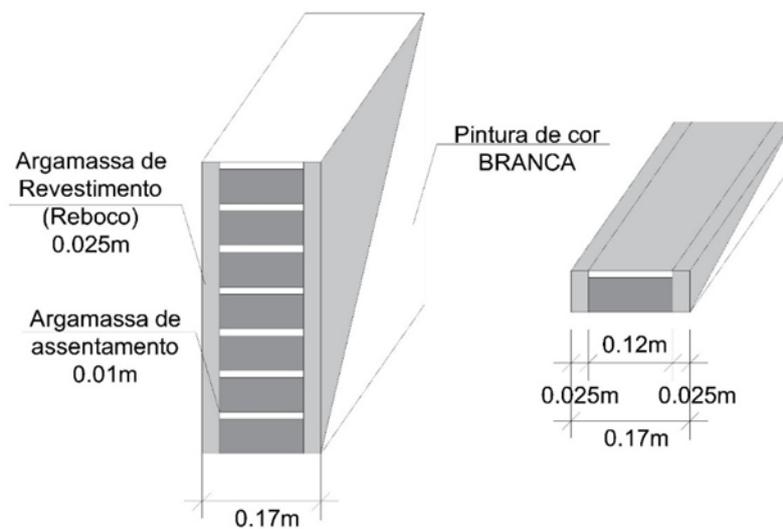
Tabela 09 - Dimensões e propriedades termo físicas da combinação tijolo ecológico com argamassa de assentamento.

Propriedade	Tijolo ecológico
Altura m	0,06
Largura m	0,12
Comprimento m	0,26
Área m ²	0,0186
Percentagem Argamassa %	33
Densidade kg/m ³	1602,2
Condutividade W/(m C°)	0,91
Calor específico cp kJ/(kg C°)	1,00
Resistência m ² C°/W	0,13
Transmitância W/(m ² C°)	7,62

Fonte: INTI (2015). Adaptado.

A partir do modelo de referência, foram executadas variações relacionadas aos materiais utilizados na envoltória da edificação, como argamassa de revestimento e pintura branca para a parede equivalente de tijolo ecológico, como pode ser observado na Figura 21, (simulação 1D).

Figura 21 - Sistema de parede equivalente com tijolos ecológicos com revestimento e pintura.



Fonte: A autora.

Pois foi necessário criar um sistema de parede equivalente (Figura 20) e realizar os cálculos manualmente (ver APÊNDICE A) para inserir no *software* (Tabela 10). O valor de absorvância da pintura de cor branca ($\alpha=0,20$) também foi inserido diretamente no *software*.

Tabela 10- Comparação propriedades termo físicas para diferentes sistemas com tijolos ecológicos.

Combinação dos materiais	Resistência $m^2 C^\circ/W$	Transmitância $W/(m^2 C^\circ)$
Tijolo ecológico, convecção	0,45	2,23
Tijolo ecológico, argamassa de assentamento, convecção	0,30	3,32
Tijolo ecológico, argamassa de revestimento, convecção	0,49	2,03
Tijolo ecológico, argamassa de assentamento, argamassa de revestimento, convecção	0,35	2,90

Fonte: A autora.

4.1.2 ETAPA 2: Modelo de habitação de interesse social (HIS)

Nesta etapa foi criado um modelo do padrão de casa popular brasileira, aplicando as propriedades físicas e térmicas do tijolo maciço cerâmico como elemento construtivo da envoltória no clima de Aracaju/SE no dia típico de verão. Para a modelagem do modelo foi necessário utilizar os dados das propriedades físico térmicas da combinação do tijolo maciço cerâmico com a argamassa de assentamento (parede equivalente). Esse modelo de referência foi realizado perante a simulação 2A que serve como base para as seguintes simulações (2B, 2C e 2D).

Para avaliar a aplicabilidade do material no Brasil é necessário a avaliação do material aplicado em uma residência. Devido ao fato de que o tijolo ecológico é usado na Argentina para fins sociais, é relevante para a pesquisa fazer a avaliação do tijolo em uma habitação de interesse social (HIS).

Nessa etapa, assim como na Etapa 1, foram realizadas variações na envoltória do modelo, como a aplicação da argamassa de revestimento e pintura de cor branca, e aplicação do sistema de parede equivalente com o tijolo ecológico com e sem argamassa de revestimento e pintura de cor branca, a fim de comparar os dois materiais aplicados em uma HIS.

4.1.2.1 Modelagem da edificação

Para modelar a edificação três ferramentas computacionais foram utilizadas. Os programas *AutoCad*® e *SketchUp*® permitiram modelar a geometria e o *plug-in Euclid*® possibilitou definir as características físicas e térmicas de cada superfície. A modelagem foi iniciada com a criação de uma zona térmica para cada cômodo da edificação. Foram definidos os tipos e as propriedades das superfícies que delimitam cada zona térmica. Todos os ambientes, janelas e portas foram desenhados de acordo com o modelo estabelecido pela Caixa Econômica Federal (CEF).

Foi definida a aplicação de ventilação natural, para a troca de ar, controlada pelo usuário. O contato com o solo foi levado em consideração com o uso dos dados presentes nos arquivos climáticos da cidade de Aracaju/SE, em conjunto com o pré-processador *Slab* (acoplado ao *EnergyPlus*).

A cobertura é composta por telha cerâmica sem laje nem forro sob o telhado, sendo muito comum no nordeste brasileiro (NORONHA et al., 2014). Para esse tipo de cobertura,

foram inseridos parâmetros no *EnergyPlus*®, com o objetivo de simular uma parede de ar entre as zonas térmicas.

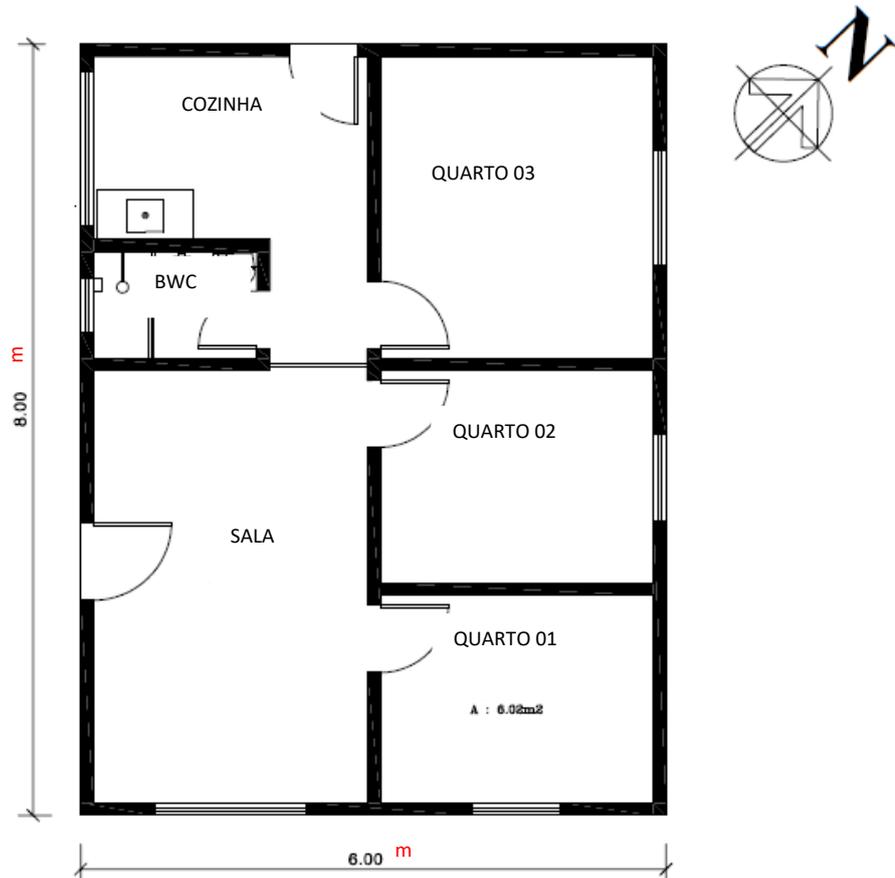
4.1.2.2 Descrição da edificação

Definiu-se a edificação residencial unifamiliar, padrão Caixa Econômica Federal (CEF), para Habitação de Interesse Social (HIS), em fase de projeto, sendo fixada a sua localização na cidade de Aracaju/SE. A edificação tem área construída de 48 m², com dimensões de 6,00m x 8,00m x 2,80m.

Dentro das diferentes tipologias apresentadas pela CEF, foi escolhido esse modelo, pois possui a mesma área (m²) que o modelo do “caso 600”. De acordo com isso, a escolha do modelo com 48 m² é oportuno dentro do cenário da construção de HIS no Brasil.

A partir das informações disponibilizadas pela CEF, foi reproduzida a planta baixa da edificação (Figura 22) no *software AutoCad*® 2015, bem como foi realizada a modelagem de zonas térmicas no *software SketchUp*® (Figura 23 e 24).

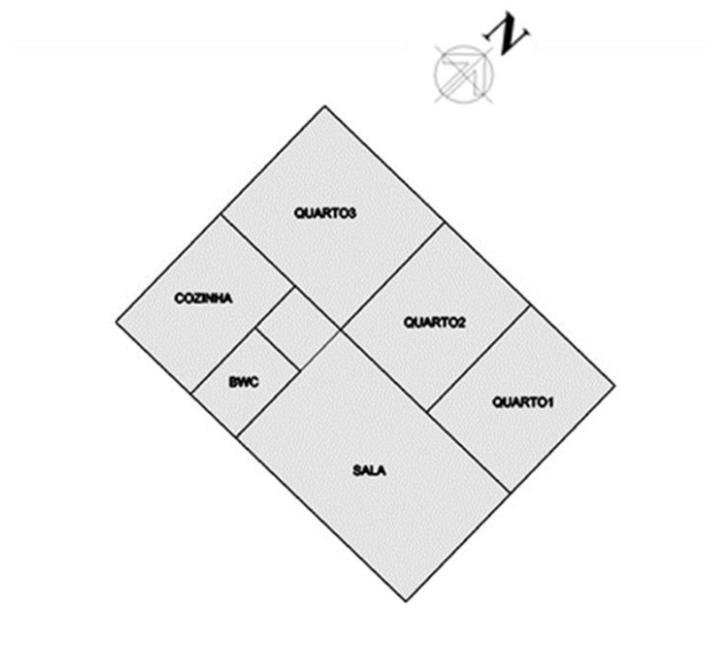
Figura 22- Planta baixa da HIS.



Fonte: CEF, (2017). Adaptada.

Cada um dos ambientes da residência, corresponde a uma zona térmica, totalizando seis zonas térmicas: quarto 01 (zona 01), quarto 02 (zona 02), quarto 03 (zona 03), cozinha (zona 04), sala (zona 05) e o banheiro (zona 06) (Figura 23). Os dados de saída analisados nessa simulação foram os da zona 01, 02, 03 e 05, de acordo como solicitado na norma NBR 15575-1 (ABNT, 2013a).

Figura 23- Esquema das zonas térmica da HIS.



Fonte: A autora.

Figura 24- Perspectiva da HIS.



Fonte: A autora.

A orientação da edificação foi analisada com a maior fachada onde se localizam as janelas dos três dormitórios orientadas para norte.

O protótipo foi simulado utilizando o arquivo climático do INMET da cidade de Aracaju/SE (zona bioclimática 8), durante o mês de dezembro de 2015, disponibilizado pelo LabEEE/UFSC e foi analisado o dia típico de verão, 21 de dezembro, como está estipulado na norma NBR 15220 (ABNT, 2005).

4.1.2.3 Rotinas de ocupação

As cargas térmicas estão determinadas pelos padrões de ocupação e iluminação. Sorgato et al. (2012) estipularam valores padrões de ocupação e iluminação, os quais foram utilizados para a execução da simulação. A seguir serão apresentados os valores adotados para a pesquisa.

Ainda de acordo com a pesquisa de Sorgato et al. (2012), para os quartos, foi estipulado um padrão de ocupação de duas pessoas, entre as 21h e 7h, e sala de estar foi simulada com um padrão de ocupação de 50%, entre as 14h e 18h, e de 100%, entre as 18h e 21h.

Definiu-se uma taxa metabólica para cada atividade desempenhada em cada ambiente, sendo, para os quartos, o valor de calor dissipado de 81 W/pessoa, e para as atividades na sala, o valor de 108 W/ pessoa (SORGATO et al., 2012).

Para a inserção dos elementos de iluminação watts por zona por área de piso, realizou-se um cálculo para cada zona de acordo com a ABNT NBR ISO/CIE 8995-1/2013 e foi estipulada a potência correspondente para cada zona da edificação em estudo e os horários em que a iluminação artificial é utilizada ao longo do dia (Quadro 10).

Quadro 10 - Horários de uso de iluminação artificial no modelo HIS da simulação.

AMBIENTE	POTÊNCIA MÉDIA (W)	HORA								
		06:00	07:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
COZINHA	13,45	x	x	x	x	x	x	x	x	
BWC	7			x	x	x	x	x		
SALA	10,07			x	x	x	x	x		
QUARTOS	9,86	x	x					x	x	x

Fonte: A autora.

Foi estipulada uma potência de uso de iluminação de 9,86 watts para os quartos, 13,45 watts para a cozinha, 7,0 watts para o wc e para a sala uma potência de 10,07 watts.

Para a sala, considerou-se o uso da TV com uma potência de uso de 80 watts, nos horários das 6h, 7h, 12h, 13 h e das 18h às 22 h. Para a cozinha, foi considerado o uso de geladeira com 33,19 watts de potência de uso e fogão com 60 watts nos horários: 6h, 7h, 12h, 13h, 18h, 19h e 21h (Quadro 11).

Quadro 11- Horário de uso de equipamentos.

AMBIENTE	EQUIPAMENTO	POTÊNCIA MÉDIA (W)	HORA								
			06:00	07:00	12:00	13:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00
COZINHA	Geladeira	33,19	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Fogão	60	X	X	X	X	X	X			
SALA	TV	80									
			X	X	X	X	X	X	X	X	X

Fonte: A autora.

Considerou-se o uso de geladeira e fogão como equipamento essencial no ambiente da cozinha e a TV como o equipamento presente em quase todas as residências brasileiras.

4.2.2.4 Ventilação natural

Por meio do *SketchUp*®, associado ao *plug-in Euclid*®, foram modeladas as aberturas pelas quais ocorre a ventilação da edificação: o modelo HIS tem seis janelas. Posteriormente, a ventilação foi detalhada no *EnergyPlus*®, por meio da inserção de dados, especificando cada parâmetro.

Melo et al. (2008) descrevem no manual de simulação computacional o objeto "*AirflowNetwork:SimulationControl* ", presente no *EnergyPlus*®, que possibilita controlar a ventilação natural, considerando as trocas de ar entre o interior e o exterior da edificação, assim como as trocas de ar entre as zonas térmicas.

Ainda de acordo com os autores, o objeto "*AirflowNetwork:MultiZone:Surface*" permite controlar, individualmente, a ventilação natural em cada abertura contida no modelo, permitindo que algumas aberturas estejam sempre abertas, sempre fechadas ou sendo controladas, por meio de padrões de abertura e por parte do usuário.

Portanto, o ambiente não possui nenhum tipo de sistema de condicionamento artificial e as taxas de renovações de ar assumidas são resultantes da infiltração e ventilação natural,

tendo sido estipulada uma rotina de operação de janelas de 5 renovações de ar/hora (OLIVEIRA, 2015).

4.1.2.5 Temperatura do solo

Um dos parâmetros mais importantes, em edificações térreas, para a realização da simulação computacional é a temperatura do solo. A influência da temperatura do solo deve ser considerada porque as trocas de calor entre o piso e o solo interferem diretamente nas temperaturas operativas dos cômodos da edificação (MAZZAFERO; SILVA; GHISI, 2014).

Assim como na pesquisa de Mazzafero; Silva; Ghisi (2014), foram considerados os valores médios mensais de temperatura do solo, fornecidos pelo arquivo climático de referência da cidade de Aracaju/SE e em questão (TRY - *Test Reference Year*) para considerar influência do solo. Logo, utilizou-se o pré-processador *Slab* (termo em inglês que significa laje), integrado ao *EnergyPlus®*, que permite obter as temperaturas médias mensais do solo subjacente à edificação.

O pré-processador *Slab* funciona com a aplicação dos seguintes parâmetros: as propriedades dos materiais (solo e laje em contato com solo), as propriedades da edificação, o isolamento da laje em contato com o solo (caso exista), a modelagem de uma laje equivalente (em casos de lajes com formas não retangulares) e algumas condições de contorno (MAZZAFERO; SILVA; GHISI, 2014). Para isso, nesta pesquisa, foi necessário informar os seguintes parâmetros (objetos): base de concreto de 10 cm, contrapiso com impermeabilização de 5 cm, regularização com 3 cm de argamassa comum e piso cerâmico com rejunte como foi realizado no modelo do caso 600 (ver Figura 17). O *Slab* foi montado pelo tipo *site:GroundDomain:Slab*.

Na simulação inseriram-se as temperaturas do solo (presentes no arquivo climático da localidade de Aracaju/SE) no objeto *Site:GroundTemperature:BuildingSurface*. Nessa simulação, o *EnergyPlus®* leva em consideração a influência das temperaturas do solo nas temperaturas internas da edificação. Vale a pena ressaltar que a adição do *Slab* em pavimentos térreos faz com que os dados sejam mais próximos a realidade.

4.2.2.6 Elementos construtivos do envelope

Nesse modelo de referência foi utilizado o sistema de parede equivalente de tijolo maciço cerâmico assentado na menor direção, como foi usado no modelo do “caso 600” (Figura

17), tendo sido inseridos no *software EnergyPlus®* todos os dados calculados das propriedades termofísicas dos materiais.

4.1.2.7 Variações no modelo de referência

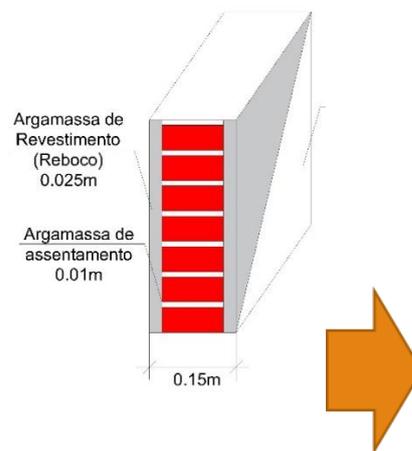
Foram feitas as variações na envoltória, aplicando argamassa de revestimento e pintura branca para melhorar o desempenho térmico (simulação 2B), como foi realizada na etapa anterior. Em seguida, realizou-se a variação do modelo de parede equivalente com a aplicação do tijolo ecológico por meio da simulação 2C, e logo a simulação 2D com a aplicação da parede equivalente de tijolo ecológico com argamassa de revestimento e pintura branca, e assim comparar o desempenho térmico dos materiais na HIS (Figura 25).

Figura 25 – Sequência das variáveis para as simulações.

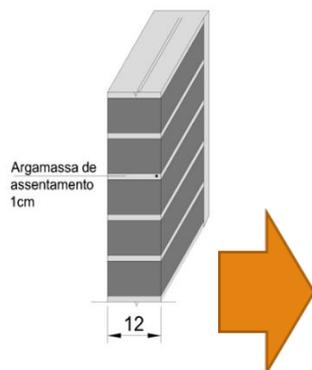
Parede equivalente para simulação 2A



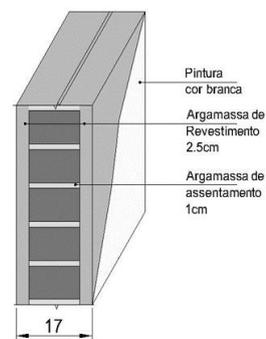
Parede equivalente para simulação 2B



Parede equivalente para simulação 2C



Parede equivalente para simulação 2D



Fonte: A autora.

5 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados das simulações, acompanhados das análises e discussões, de acordo com o método de trabalho.

A simulação foi realizada por meio do programa computacional *EnergyPlus*® e Plugin *Euclid*® no *software SketchUp*®, que necessitou de informações para a alimentação, com parâmetros relacionados aos dados climáticos do local de implantação das edificações, características dos materiais construtivos, as rotinas de ocupação dos usuários e equipamentos (para o caso da HIS), a iluminação e outros fatores que influenciam na avaliação do desempenho do material.

O cuidado com o levantamento dos dados de entrada e os cálculos térmicos realizados para os materiais estudados foi importante para representar com mais precisão a caracterização das edificações, a fim de que as simulações apresentassem resultados mais condizentes com a realidade. Assim, a partir das informações e análise dos resultados obtidos pelos fatores citados acima, foi possível caracterizar o desempenho térmico do tijolo ecológico.

Para a presente pesquisa foram realizadas, no total, 8 (oito simulações), 4 (quatro) para o Caso 600 e 4 (quatro) para a HIS. O caso 600 foi modelado com uma zona térmica em quanto que a HIS foi modelada com 6 zonas térmicas. Para cada zona térmica, o programa *EnergyPlus*® gera como dado de saída temperaturas do ar internas em graus Celsius. Esses dados são gerados em forma de relatórios e planilhas.

Os dados de saída de cada zona térmica foram tratados no *Excel*® por meio de tabelas dinâmicas para a melhor análise dos resultados. A norma NBR 15575-1 (ABNT, 2013a) estabelece que a simulação seja realizada no dia típico de projeto, verão e inverno. Segundo as informações do Anexo da parte 1 da norma, para a ZB8 estipulasse o 21 de dezembro como dia típico de verão, utilizado para a realização das simulações desta pesquisa.

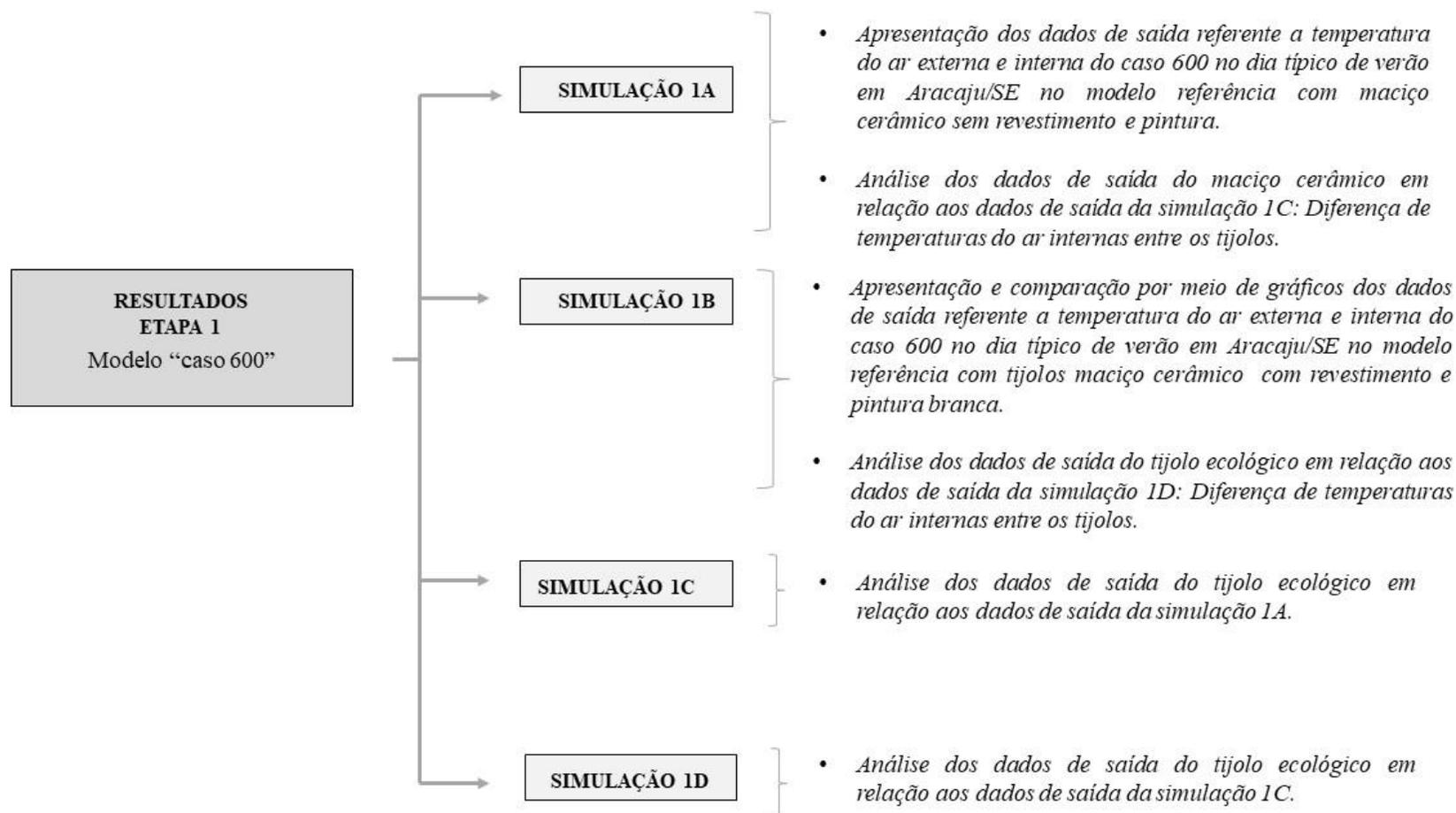
Portanto, para as 8 (oito) simulações foram considerados os dados de saída referentes ao dia típico de verão (21 de dezembro) para a cidade de Aracaju/SE. No caso 600 foi analisada a única zona térmica. Para a HIS, a norma NBR 15575 (ABNT, 2013), exige que todos os recintos da unidade habitacional devem ser simulados, mas a avaliação dos resultados deve ser realizada apenas para os ambientes de longa permanência como: dormitórios e salas.

Foram criados quadros e gráficos apresentando os dados de saída de cada zona termina (para cada simulação de cada etapa) a fim de comparar as temperaturas de ar externa com as internas (Figuras 26 e 27). Como os resultados foram semelhantes e insignificativos entre as edificações modeladas com o tijolo maciço cerâmico e com o tijolo ecológico, foi necessária

uma avaliação das propriedades térmicas das alvenarias com tijolos ecológicos e tijolos maciços cerâmicos, com o fim de observar o desempenho térmico dos materiais.

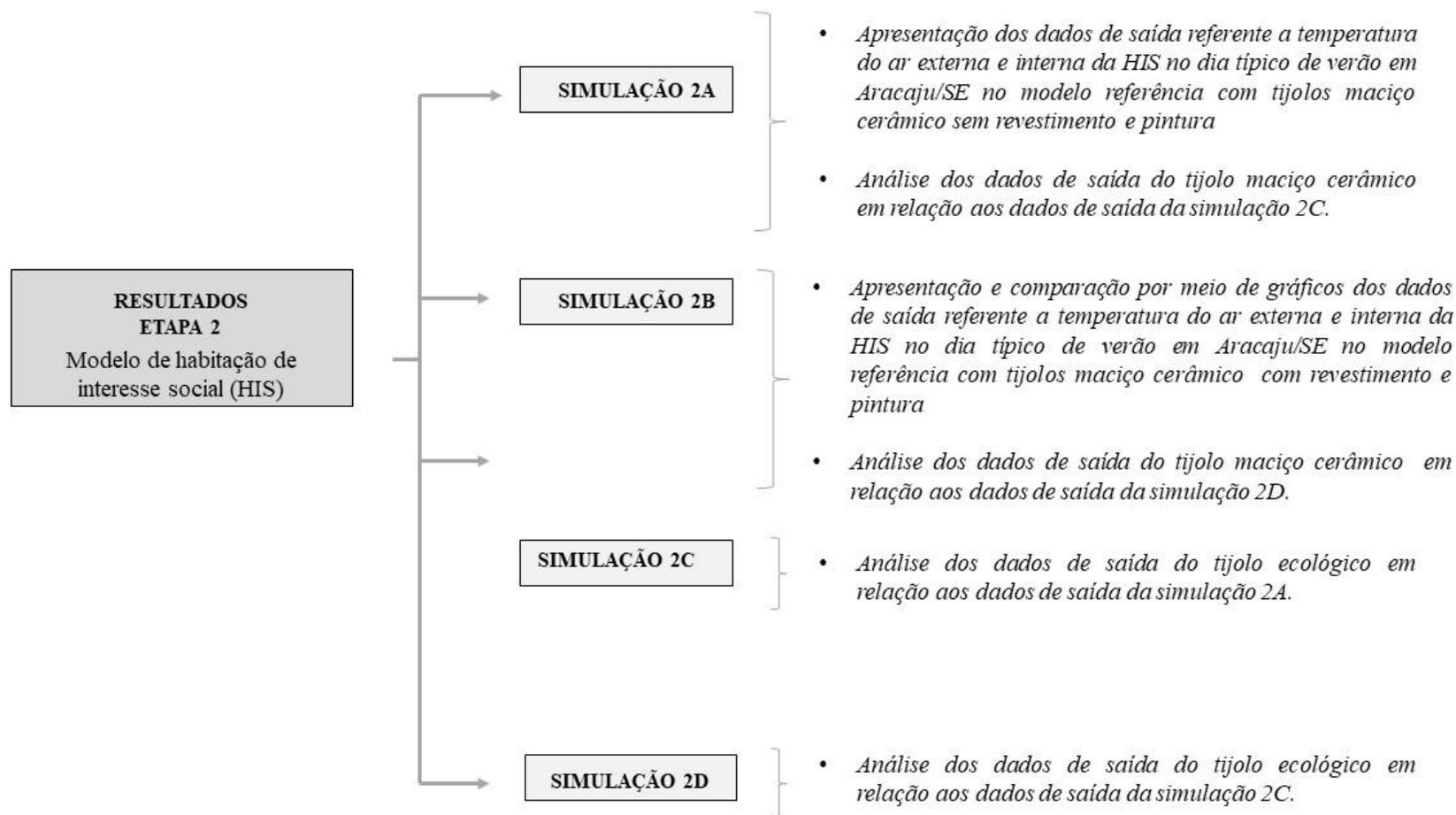
Para isso, foram realizadas todas as combinações possíveis dos materiais por meio dos cálculos no programa *Excel*® (ver APÊNDICE A). Em seguida, analisa-se a as propriedades térmicas dos tijolos, a influência da argamassa de assentamento na parede equivalente, a influência da argamassa de revestimento na parede equivalente e por último a influência da pintura externa de cor branca (Figura 28). Por fim, avalia-se o desempenho térmico das vedações segundo os limites estipulados pela norma NBR 15220 (ABNT, 2005) e NBR 15575 (ABNT, 2013) (Figura 27).

Figura 26 - Esquema da apresentação dos resultados obtidos na etapa 1.



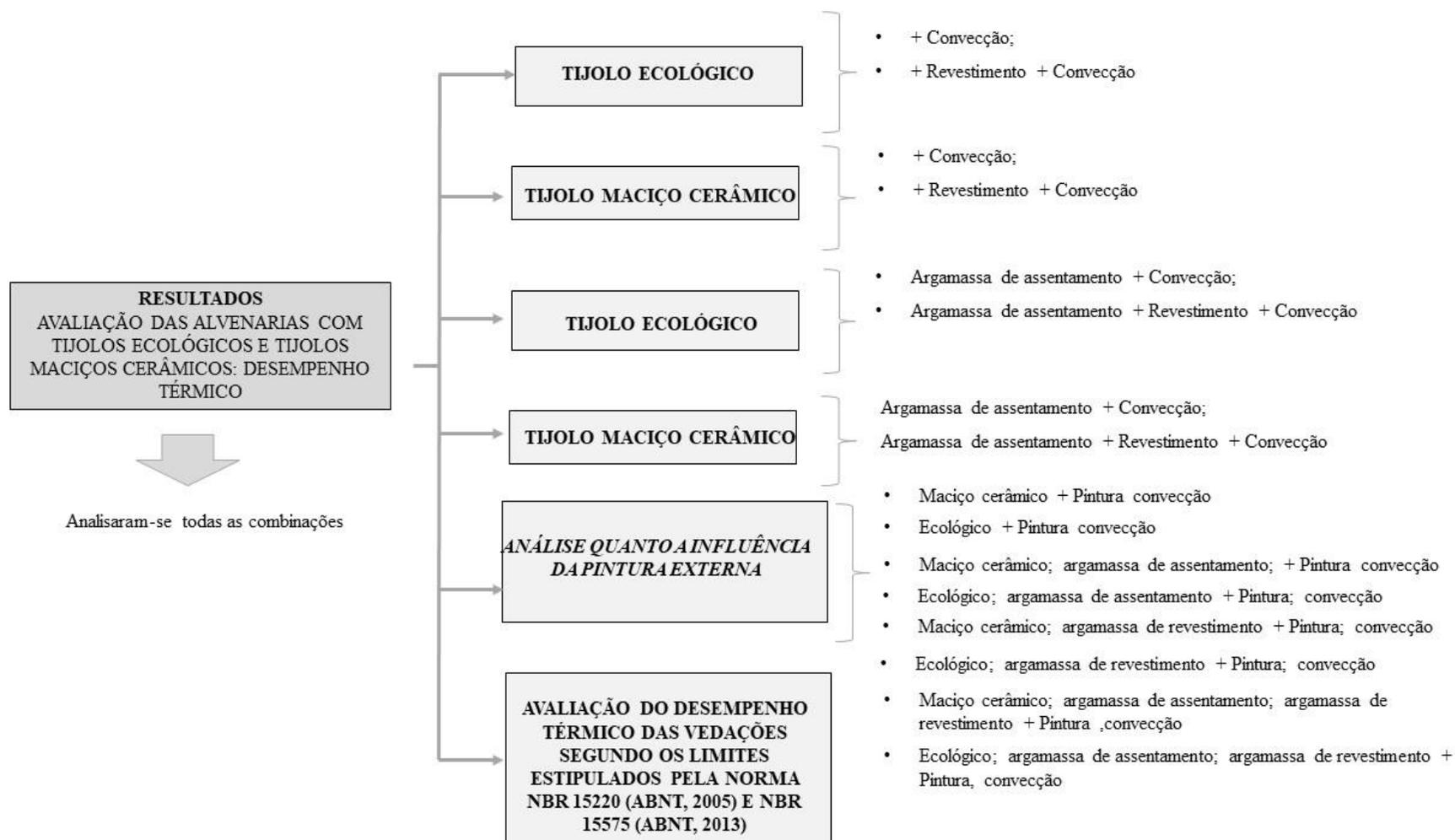
Fonte: A autora.

Figura 27- Esquema da apresentação dos resultados obtidos na etapa 2.



Fonte: A autora.

Figura 28 - Esquema da apresentação dos resultados da avaliação das propriedades térmicas das alvenarias com tijolos ecológicos e tijolos maciços cerâmicos.



Fonte: A autora.

Serão apresentados os gráficos, as tabelas e as considerações obtidas em cada caso estudado.

5.1 RESULTADOS ETAPA 1: MODELO CASO 600

A simulação foi realizada para todo o mês de dezembro de 2015, mas foram analisados apenas os dados referentes ao dia típico de verão, 21 de dezembro, conforme Norma NBR 15220 (ABNT, 2005).

Inicialmente foram coletados os dados do dia 21 de dezembro, e foi criada uma tabela dinâmica no *Excel*® para tratar os dados. Observou-se que o horário mais crítico do dia, para a cidade de Aracaju foi às 15h, chegando a uma temperatura do ar de 30,90°C. Em seguida, tomou-se como parâmetro esse horário crítico para análise das temperaturas do ar internas de cada zona térmica analisada.

O Quadro 12 apresenta todas as temperaturas do ar obtidas no interior da edificação do “caso 600” com tijolo ecológico sem revestimento, referentes à simulação 1A, comparando as temperaturas do ar obtidas no interior da edificação do “caso 600” com tijolo maciço cerâmico sem revestimento, referentes à simulação 1C. Na última coluna do Quadro 12, apresenta-se a diferença de temperatura do ar das duas simulações.

Quadro 12- Temperatura do ar (externa e interna) da simulação com parede equivalente de tijolo maciço cerâmico (1A) e com parede equivalente de tijolo ecológico (1C).

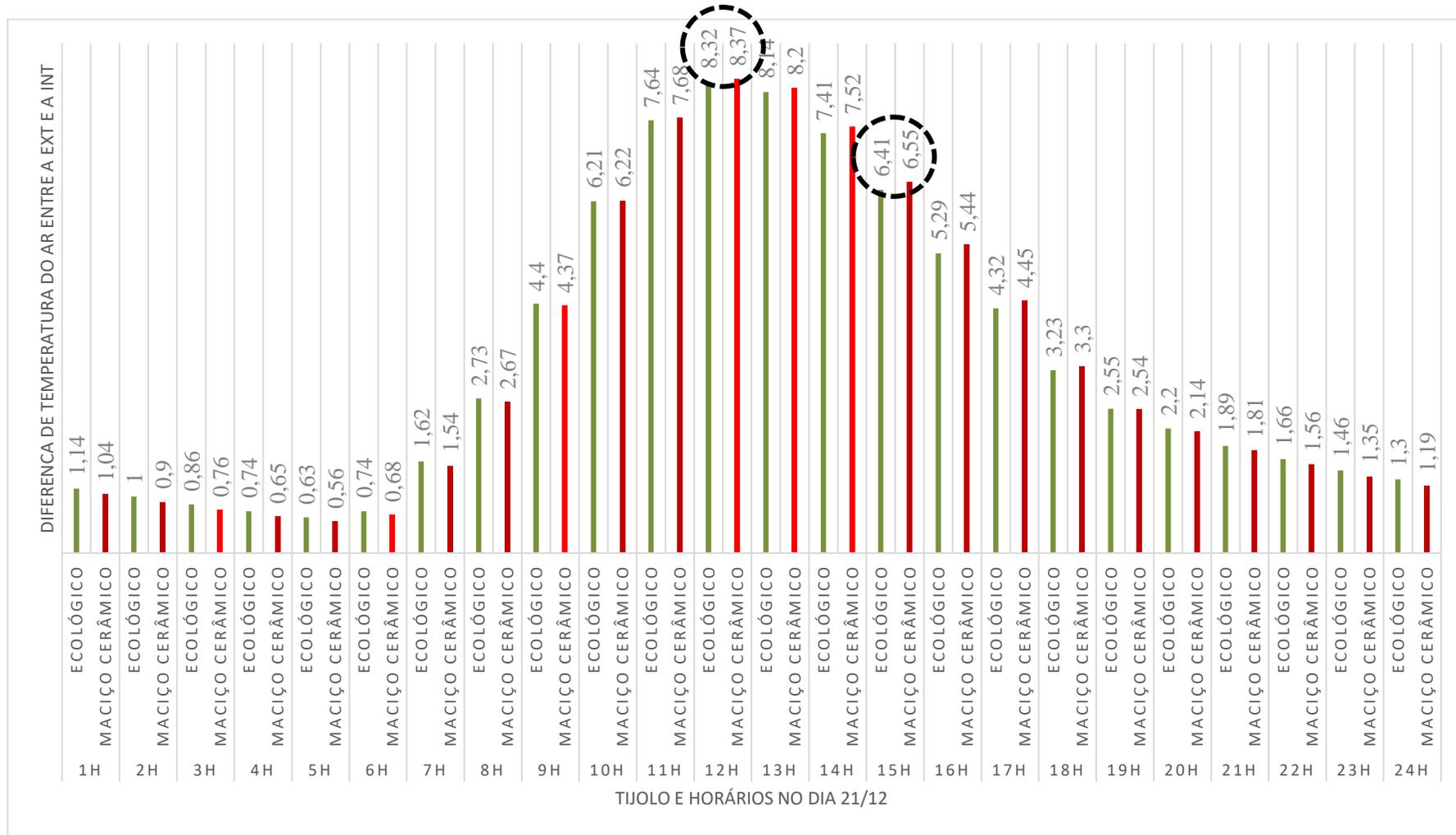
HORA	Tijolo sem revestimento	Temperatura do ar externa da zona térmica	Temperatura do ar interna da zona térmica	Diferença entre a temperatura do ar externa e a interna da zona térmica	Diferença de temperatura do ar entre a zona térmica de tijolo ecológico e a zona térmica de cerâmico.
1h	Ecológico	26,27°C	27,41°C	1,14°C	0,10°C
1h	Maciço Cerâmico	26,27°C	27,31°C	1,04°C	
2h	Ecológico	26,01°C	27,01°C	1,00°C	0,10°C
2h	Maciço Cerâmico	26,01°C	26,91°C	0,90°C	
3h	Ecológico	25,83°C	26,69°C	0,86°C	0,10°C
3h	Maciço Cerâmico	25,83°C	26,59°C	0,76°C	
4h	Ecológico	25,67°C	26,41°C	0,74°C	0,09°C
4h	Maciço Cerâmico	25,67°C	26,32°C	0,65°C	
5h	Ecológico	25,54°C	26,17°C	0,63°C	0,07°C
5h	Maciço Cerâmico	25,54°C	26,10°C	0,56°C	
6h	Ecológico	25,57°C	26,31°C	0,74°C	0,06°C

HORA	Tijolo sem revestimento	Temperatura do ar externa da zona térmica	Temperatura do ar interna da zona térmica	Diferença entre a temperatura do ar externa e a interna da zona térmica	Diferença de temperatura do ar entre a zona térmica de tijolo ecológico e a zona térmica de cerâmico.
6h	Maciço Cerâmico	25,57°C	26,25°C	0,68°C	
7h	Ecológico	25,84°C	27,46°C	1,62°C	} 0,08°C
7h	Maciço Cerâmico	25,84°C	27,38°C	1,54°C	
8h	Ecológico	26,56°C	29,29°C	2,73°C	} 0,06°C
8h	Maciço Cerâmico	26,56°C	29,23°C	2,67°C	
9h	Ecológico	27,55°C	31,95°C	4,40°C	} 0,03°C
9h	Maciço Cerâmico	27,55°C	31,92°C	4,37°C	
10h	Ecológico	28,50°C	34,71°C	6,21°C	} -0,01°C
10h	Maciço Cerâmico	28,50°C	34,72°C	6,22°C	
11h	Ecológico	29,35°C	36,99°C	7,64°C	} -0,04°C
11h	Maciço Cerâmico	29,35°C	37,03°C	7,68°C	
12h	Ecológico	30,00°C	38,32°C	8,32°C	} -0,05°C
12h	Maciço Cerâmico	30,00°C	38,37°C	8,37°C	
13h	Ecológico	30,47°C	38,61°C	8,14°C	} -0,06°C
13h	Maciço Cerâmico	30,47°C	38,67°C	8,20°C	
14h	Ecológico	30,80°C	38,21°C	7,41°C	} -0,11°C
14h	Maciço Cerâmico	30,80°C	38,32°C	7,52°C	
15h	Ecológico	30,90°C	37,31°C	6,41°C	} -0,14°C
15h	Maciço Cerâmico	30,90°C	37,45°C	6,55°C	
16h	Ecológico	30,70°C	35,99°C	5,29°C	} -0,15°C
16h	Maciço Cerâmico	30,70°C	36,14°C	5,44°C	
17h	Ecológico	30,31°C	34,63°C	4,32°C	} -0,13°C
17h	Maciço Cerâmico	30,31°C	34,76°C	4,45°C	
18h	Ecológico	29,81°C	33,04°C	3,23°C	} -0,07°C
18h	Maciço Cerâmico	29,81°C	33,11°C	3,30°C	
19h	Ecológico	29,10°C	31,65°C	2,55°C	} 0,01°C
19h	Maciço Cerâmico	29,10°C	31,64°C	2,54°C	
20h	Ecológico	28,42°C	30,62°C	2,20°C	} 0,06°C
20h	Maciço Cerâmico	28,42°C	30,56°C	2,14°C	
21h	Ecológico	27,90°C	29,79°C	1,89°C	} 0,08°C
21h	Maciço Cerâmico	27,90°C	29,71°C	1,81°C	
22h	Ecológico	27,41°C	29,07°C	1,66°C	} 0,10°C
22h	Maciço Cerâmico	27,41°C	28,97°C	1,56°C	
23h	Ecológico	26,99°C	28,45°C	1,46°C	} 0,11°C
23h	Maciço Cerâmico	26,99°C	28,34°C	1,35°C	
24h	Ecológico	26,61°C	27,91°C	1,30°C	} 0,11°C
24h	Maciço Cerâmico	26,61°C	27,80°C	1,19°C	

Fonte: A autora.

Por meio da análise do Quadro 12 foi possível verificar que os protótipos de tijolo ecológico e de tijolo maciço cerâmico obtiveram valores de temperaturas quase semelhantes, durante o dia todo, existindo apenas uma diferença mínima entre as temperaturas do ar. Observa-se na Figura 28 que no horário das 12h as zonas térmicas obtiveram as temperaturas mais elevadas, com uma diferença de temperatura do ar em relação à temperatura externa, de $8,32^{\circ}\text{C}$ para a zona térmica de tijolos ecológicos e de $8,37^{\circ}\text{C}$ para a zona térmica de tijolo maciço cerâmico. A diferença entre as zonas térmicas simuladas foi quase nula ($0,05^{\circ}\text{C}$). Já no horário crítico do dia, às 15 horas, a zona térmica de tijolos ecológico obteve uma temperatura do ar interna inferior em $0,14^{\circ}\text{C}$ em comparação com a zona térmica de tijolos maciços cerâmicos. Assim, Figura 29 pode ser visualizada a semelhança nas temperaturas e o comportamento dos materiais durante o dia todo.

Figura 29- Diferenças entre a temperatura do ar externa e a interna da zona térmica tijolo ecológico e do tijolo maciço cerâmico sem revestimento durante o dia.

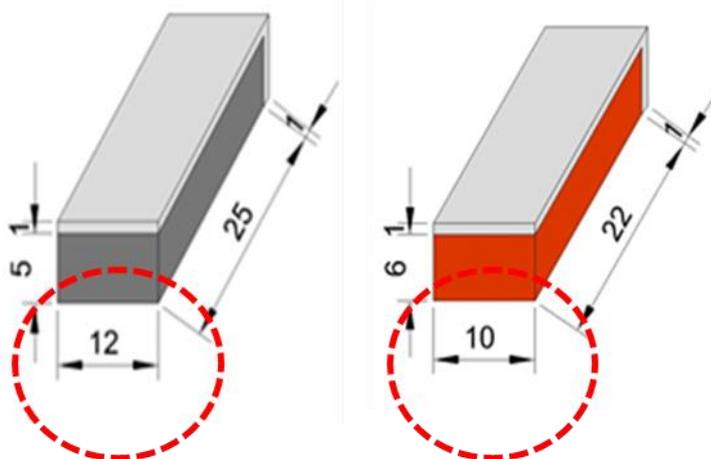


Fonte: A autora.

Quando comparados os resultados dos tijolos no horário mais crítico do dia, às 15 horas, é importante notar que a temperatura interna do protótipo de tijolo ecológico é inferior em $0,14^{\circ}\text{C}$, quando comparado com o maciço cerâmico. Isso é resultado das diferenças nas propriedades termofísicas dos tijolos, **espessura, condutividade térmica e calor específico**.

Souza (2017) afirma na sua pesquisa que, quanto maior a espessura de um material, menor será a densidade de fluxo de calor que passará para o ambiente interno, tendo como consequência um ambiente com temperatura inferior. Esse acontecimento se vê refletido nos tijolos; isso acontece porque, mesmo que os tijolos tenham similitudes nas propriedades físicas, existe uma pequena diferença na geometria que exerce importante ação no desempenho térmico da edificação (Figura 30). Portanto, se o tijolo maciço cerâmico tivesse uma espessura da parede equivalente igual a $0,12\text{m}$ (como a do tijolo ecológico) poderia ter melhorias no desempenho térmico.

Figura 30- Diferenças nas propriedades termofísicas dos tijolos: Espessura



Fonte: INTI (2015); NBR 15270-1 (ABNT, 2017a). Adaptado.

Com relação à condutividade térmica de um material Lamberts; Dutra; Pereira (2014, p.210) apontam que “quanto maior for o valor da condutividade térmica, maior será a quantidade de calor transferida entre as superfícies dos materiais”. Se bem que o tijolo ecológico tem uma condutividade térmica menor ($0,43\text{W/mK}$), quando aplicada a argamassa de assentamento, a condutividade térmica aumenta ($0,91\text{W/mK}$), chegando quase ao valor da condutividade térmica da parede equivalente do tijolo maciço cerâmico ($0,99\text{W/mK}$), por esse acontecimento é que não se tem uma grande diferença de temperaturas do ar internas, porque as quantidades de calor transmitidas são semelhantes (Figura 31).

Figura 31- Diferenças nas propriedades termofísicas dos tijolos: Condutividade térmica

Condutividade tijolo ecológico 0,43 W/(m °C)

Condutividade parede equivalente de tijolo ecológico 0,91 W/(m °C)

Condutividade tijolo maciço cerâmico 0,90 W/(m °C)

Condutividade parede equivalente de tijolo maciço cerâmico 0,99 W/(m °C)

Condutividade da argamassa de assentamento 1,15 W/(m °C)

Fonte: INTI (2015); NBR 15220 (ABNT, 2005). Adaptado.

De acordo com a definição da norma NBR 15220-1(ABNT, 2005, p.2), o calor específico de um material “é o quociente da capacidade térmica pela massa”, e a capacidade térmica é definida como “a quantidade de calor necessária para variar em uma unidade a temperatura de um sistema”. No que se refere ao atraso térmico, a norma NBR 15220-1(ABNT, 2005, p.2) define que é o “tempo transcorrido entre uma variação térmica em um meio e sua manifestação na superfície oposta de um componente construtivo submetido a um regime periódico de transmissão de calor”, e, na presente pesquisa, verificou-se que os materiais inseridos com maior valor de calor específico obtiveram um valor maior no atraso térmico. Porém, o pico de maior temperatura foi atingido na simulação com a parede equivalente de tijolo maciço cerâmico (simulação 1C) que adotou um menor valor para o calor específico, revelando uma tendência de quanto menor o calor específico, maior a temperatura do ambiente.

No caso da simulação 1B, em que foi realizada a primeira variação com o acréscimo da argamassa e pintura de cor branca ($\alpha=0,20$), é possível observar no Quadro 13 que a temperatura do ar interna no horário mais crítico (15h) teve uma redução de 1.54°C, quando comparado com modelo simulado 1A (sem revestimento e pintura), e no horário das 17h chegou a ter uma diferença de temperatura de 1,84 °C.

Quadro 13 - Temperatura do ar (externa e interna) da simulação com parede equivalente de tijolo ecológico sem revestimento e pintura (1C) e da simulação com parede equivalente de tijolo ecológico com revestimento e pintura (1D).

HORA	Tijolo	Revestimento e pintura branca ($\alpha=0,20$)	Temperatura do ar externa da zona térmica	Temperatura do ar interna da zona térmica	Diferença entre a temperatura do ar externa e a interna da zona térmica	Diferença de temperatura do ar entre a zona térmica de tijolo ecológico sem revestimento e pintura e a zona térmica de tijolo ecológico com revestimento e pintura.
1h	Ecológico	Sem	26,27°C	27,41°C	1,14°C	} 0,09°C
1h	Ecológico	Com	26,27°C	27,32°C	1,05°C	
2h	Ecológico	Sem	26,83°C	27,01°C	0,18°C	} -0,80°C
2h	Ecológico	Com	26,01°C	26,99°C	0,98°C	
3h	Ecológico	Sem	25,83°C	26,69°C	0,86°C	} -0,03°C
3h	Ecológico	Com	25,83°C	26,72°C	0,89°C	
4h	Ecológico	Sem	25,67°C	26,41°C	0,74°C	} -0,06°C
4h	Ecológico	Com	25,67°C	26,47°C	0,80°C	
5h	Ecológico	Sem	25,54°C	26,17°C	0,63°C	} -0,08°C
5h	Ecológico	Com	25,54°C	26,25°C	0,71°C	
6h	Ecológico	Sem	25,57°C	26,31°C	0,74°C	} -0,08°C
6h	Ecológico	Com	25,57°C	26,39°C	0,82°C	
7h	Ecológico	Sem	25,84°C	27,46°C	1,62°C	} -,04°C
7h	Ecológico	Com	25,84°C	27,50°C	1,66°C	
8h	Ecológico	Sem	26,56°C	29,29°C	2,73°C	} 0,06°C
8h	Ecológico	Com	26,56°C	29,23°C	2,67°C	
9h	Ecológico	Sem	27,55°C	31,95°C	4,40°C	} 0,39°C
9h	Ecológico	Com	27,55°C	31,56°C	4,01°C	
10h	Ecológico	Sem	28,50°C	34,71°C	6,21°C	} 0,84°C
10h	Ecológico	Com	28,50°C	33,87°C	5,37°C	

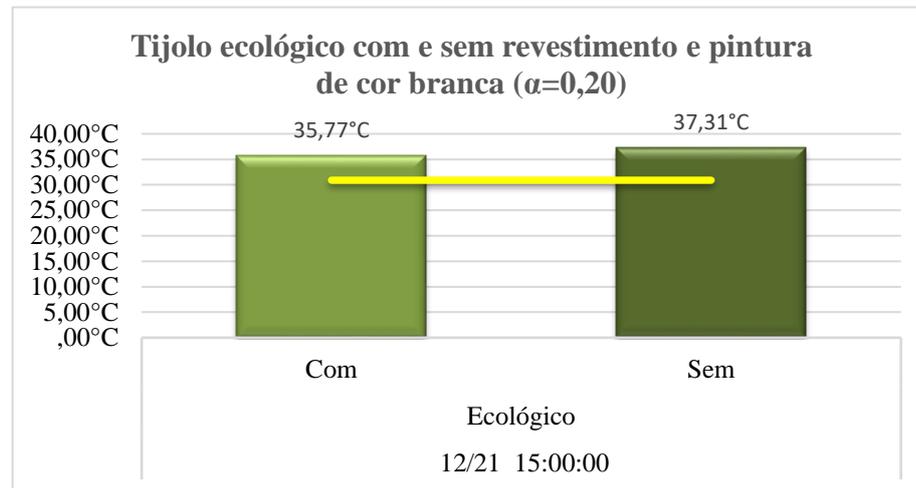
HORA	Tijolo	Revestimento e pintura branca ($\alpha=0,20$)	Temperatura do ar externa da zona térmica	Temperatura do ar interna da zona térmica	Diferença entre a temperatura do ar externa e a interna da zona térmica	Diferença de temperatura do ar entre a zona térmica de tijolo ecológico sem revestimento e pintura e a zona térmica de tijolo ecológico com revestimento e pintura.
11h	Ecológico	Sem	29,35°C	36,99°C	7,64°C	} 1,06°C
11h	Ecológico	Com	29,35°C	35,93°C	6,58°C	
12h	Ecológico	Sem	30,00°C	38,32°C	8,32°C	} 1,28°C
12h	Ecológico	Com	30,00°C	37,04°C	7,04°C	
13h	Ecológico	Sem	30,47°C	38,61°C	8,14°C	} 1,33°C
13h	Ecológico	Com	30,47°C	37,28°C	6,81°C	
14h	Ecológico	Sem	30,80°C	38,21°C	7,41°C	} 1,36°C
14h	Ecológico	Com	30,80°C	36,85°C	6,05°C	
15h	Ecológico	Sem	30,90°C	37,31°C	6,41°C	} 1,54°C
15h	Ecológico	Com	30,90°C	35,77°C	4,87°C	
16h	Ecológico	Sem	30,70°C	35,99°C	5,29°C	} 1,77°C
16h	Ecológico	Com	30,70°C	34,22°C	3,52°C	
17h	Ecológico	Sem	30,31°C	34,63°C	4,32°C	} 1,84°C
17h	Ecológico	Com	30,31°C	32,79°C	2,48°C	
18h	Ecológico	Sem	29,81°C	33,04°C	3,23°C	} 1,58°C
18h	Ecológico	Com	29,81°C	31,46°C	1,65°C	
19h	Ecológico	Sem	29,10°C	31,65°C	2,55°C	} 1,29°C
19h	Ecológico	Com	29,10°C	30,36°C	1,26°C	
20h	Ecológico	Sem	28,42°C	30,62°C	2,20°C	} 0,96°C
20h	Ecológico	Com	28,42°C	29,66°C	1,24°C	
21h	Ecológico	Sem	27,90°C	29,79°C	1,89°C	} 0,69°C
21h	Ecológico	Com	27,90°C	29,10°C	1,20°C	
22h	Ecológico	Sem	27,41°C	29,07°C	1,66°C	} 0,47°C

HORA	Tijolo	Revestimento e pintura branca ($\alpha=0,20$)	Temperatura do ar externa da zona térmica	Temperatura do ar interna da zona térmica	Diferença entre a temperatura do ar externa e a interna da zona térmica	Diferença de temperatura do ar entre a zona térmica de tijolo ecológico sem revestimento e pintura e a zona térmica de tijolo ecológico com revestimento e pintura.
22h	Ecológico	Com	27,41°C	28,60°C	1,19°C	
23h	Ecológico	Sem	26,99°C	28,45°C	1,46°C	} 0,31°C
23h	Ecológico	Com	26,99°C	28,14°C	1,15°C	
24h	Ecológico	Sem	26,61°C	27,91°C	1,30°C	} 0,18°C
24h	Ecológico	Com	26,61°C	27,73°C	1,12°C	

Fonte: A autora.

Na Figura 32 é apresentada a diferença de temperaturas do ar internas das alvenarias com e sem revestimento, às 15h.

Figura 32 - Comparação da temperatura do ar externa com a interna do caso 600 simulado com tijolos ecológicos com revestimento e pintura às 15h.



Conforme se observa na Figura 30, o acréscimo da argamassa de revestimento no modelo equivalente se mostrou como uma variável que contribui positivamente para o desempenho térmico. Isso pode ser constatado pela inércia térmica, cuja propriedade é fundamental para avaliar o desempenho térmico. De acordo com a revisão da literatura e, segundo Lamberts; Dutra; Pereira (2014), a inércia térmica pode ser estimada pela propriedade térmica anteriormente mencionada, a capacidade térmica. E em razão do acréscimo da argamassa de revestimento, observa-se o aumento da capacidade térmica nas alvenarias rebocadas, já que teve um aumento na espessura da camada.

Vale a pena ressaltar que, quanto maior a inércia térmica maior calor retido, e esse pode ser devolvido ao interior quando o material estiver submetido ao pico da temperatura extrema (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

Em relação aos resultados da influência da pintura externa, constatou-se que todos os elementos, sejam os tijolos com ou sem argamassa de assentamento, sejam rebocados ou não, se estes são pintados com cor branca, têm o fator solar com resultados positivos para o desempenho térmico da edificação.

Portanto, observa-se o que já foi citado no capítulo 2: a principal característica da absorvidade de um material está dada pela cor superficial. Um material escuro absorverá a

maior parte da radiação incidente enquanto que um material claro absorverá menos (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

No próximo Quadro 14, apresentam-se os resultados referentes à simulação 1B com relação à simulação 1D, ou seja, os resultados das temperaturas de ar obtidas no interior do ambiente do “caso 600” com a parede equivalente de tijolos ecológicos com revestimento e pintura branca ($\alpha=0,20$) e os da parede equivalente com tijolo maciço cerâmico com revestimento e pintura branca ($\alpha=0,20$). Neste quadro, na última coluna, apresentam-se os valores referentes às diferenças de temperatura entre os materiais e pode-se observar que as diferenças são nulas, ou seja, não tiveram diferenças de temperaturas. O tijolo cerâmico maciço foi o mais beneficiado com a aplicação da argamassa de revestimento e com a pintura branca ($\alpha=0,20$) nos horários mais críticos.

Quadro 14 - Temperatura do ar (externa e interna) da simulação de parede equivalente de tijolo maciço cerâmico com revestimento e pintura (1B) e a simulação de parede equivalente de tijolo ecológico com revestimento e pintura (1D).

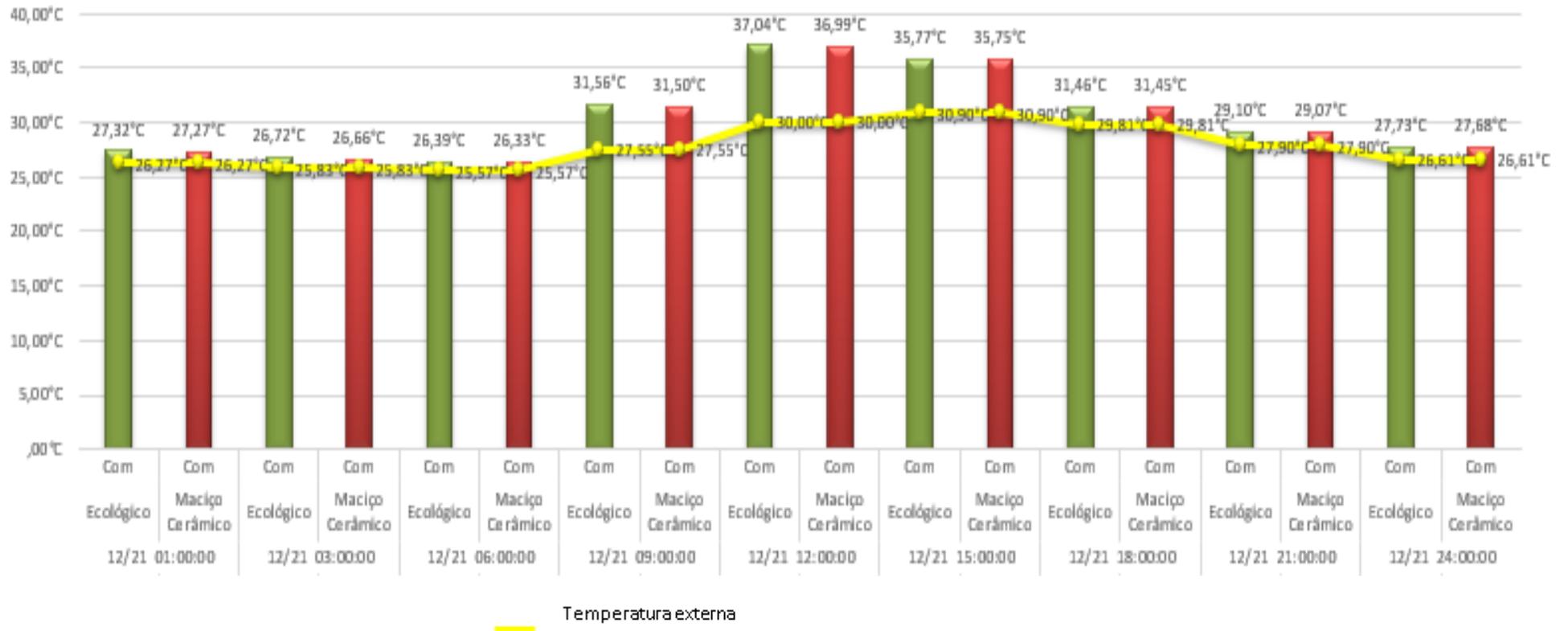
Hora	Tijolo com revestimento e pintura ($\alpha=0,20$)	Temperatura do ar externa da zona térmica	Temperatura do ar interna da zona térmica	Diferença entre a temperatura do ar externa e a interna da zona térmica	Diferença de temperatura do ar entre as zonas térmicas (ecológico e cerâmico)
1h	Ecológico	26,27°C	27,32°C	1,05°C	0,05°C
1h	Maciço Cerâmico	26,27°C	27,27°C	1,00°C	
2h	Ecológico	26,01°C	26,99°C	0,98°C	0,05°C
2h	Maciço Cerâmico	26,01°C	26,94°C	0,93°C	
3h	Ecológico	25,83°C	26,72°C	0,89°C	0,06°C
3h	Maciço Cerâmico	25,83°C	26,66°C	0,83°C	
4h	Ecológico	25,67°C	26,47°C	0,80°C	0,06°C
4h	Maciço Cerâmico	25,67°C	26,41°C	0,74°C	
5h	Ecológico	25,54°C	26,25°C	0,71°C	0,06°C
5h	Maciço Cerâmico	25,54°C	26,19°C	0,65°C	
6h	Ecológico	25,57°C	26,39°C	0,82°C	0,06°C
6h	Maciço Cerâmico	25,57°C	26,33°C	0,76°C	
7h	Ecológico	25,84°C	27,50°C	1,66°C	0,05°C
7h	Maciço Cerâmico	25,84°C	27,45°C	1,61°C	
8h	Ecológico	26,56°C	29,23°C	2,67°C	0,06°C
8h	Maciço Cerâmico	26,56°C	29,17°C	2,61°C	
9h	Ecológico	27,55°C	31,56°C	4,01°C	0,06°C
9h	Maciço Cerâmico	27,55°C	31,50°C	3,95°C	

Hora	Tijolo com revestimento e pintura ($\alpha=0,20$)	Temperatura do ar externa da zona térmica	Temperatura do ar interna da zona térmica	Diferença entre a temperatura do ar externa e a interna da zona térmica	Diferença de temperatura do ar entre as zonas térmicas (ecológico e cerâmico)
10h	Ecológico	28,50°C	33,87°C	5,37°C	0,06°C
10h	Maciço Cerâmico	28,50°C	33,81°C	5,31°C	
11h	Ecológico	29,35°C	35,93°C	6,58°C	0,06°C
11h	Maciço Cerâmico	29,35°C	35,87°C	6,52°C	
12h	Ecológico	30,00°C	37,04°C	7,04°C	0,05°C
12h	Maciço Cerâmico	30,00°C	36,99°C	6,99°C	
13h	Ecológico	30,47°C	37,28°C	6,81°C	0,05°C
13h	Maciço Cerâmico	30,47°C	37,23°C	6,76°C	
14h	Ecológico	30,80°C	36,85°C	6,05°C	0,04°C
14h	Maciço Cerâmico	30,80°C	36,81°C	6,01°C	
15h	Ecológico	30,90°C	35,77°C	4,87°C	0,02°C
15h	Maciço Cerâmico	30,90°C	35,75°C	4,85°C	
16h	Ecológico	30,70°C	34,22°C	3,52°C	0,01°C
16h	Maciço Cerâmico	30,70°C	34,21°C	3,51°C	
17h	Ecológico	30,31°C	32,79°C	2,48°C	0,01°C
17h	Maciço Cerâmico	30,31°C	32,78°C	2,47°C	
18h	Ecológico	29,81°C	31,46°C	1,65°C	0,01°C
18h	Maciço Cerâmico	29,81°C	31,45°C	1,64°C	
19h	Ecológico	29,10°C	30,36°C	1,26°C	0,01°C
19h	Maciço Cerâmico	29,10°C	30,35°C	1,25°C	
20h	Ecológico	28,42°C	29,66°C	1,24°C	0,02°C
20h	Maciço Cerâmico	28,42°C	29,64°C	1,22°C	
21h	Ecológico	27,90°C	29,10°C	1,20°C	0,03°C
21h	Maciço Cerâmico	27,90°C	29,07°C	1,17°C	
22h	Ecológico	27,41°C	28,60°C	1,19°C	0,04°C
22h	Maciço Cerâmico	27,41°C	28,56°C	1,15°C	
23h	Ecológico	26,99°C	28,14°C	1,15°C	0,04°C
23h	Maciço Cerâmico	26,99°C	28,10°C	1,11°C	
24h	Ecológico	26,61°C	27,73°C	1,12°C	0,05°C
24h	Maciço Cerâmico	26,61°C	27,68°C	1,07°C	

Fonte: A autora.

Na Figura 33, também, pode-se visualizar essa igualdade nas temperaturas do ar internas obtidas no caso 600 com as paredes equivalentes revestidas e pintadas de branco de absorvância igual a 0,20.

Figura 33- Comparação das temperaturas do ar (externa e interna) da simulação de parede equivalente de tijolo maciço cerâmico com revestimento e pintura (1B) e a simulação de parede equivalente de tijolo ecológico com revestimento e pintura (1D).



Fonte: A autora.

5.2 MODELO DE HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL (HIS)

A simulação 2A utilizando o modelo de referência da HIS foi realizada em todos os recintos da unidade habitacional, mas a avaliação dos resultados se deu apenas para dormitórios e salas. O Quadro 15 apresenta as temperaturas do ar externa e interna das zonas térmicas, sala e quartos, da HIS no dia típico de verão em Aracaju/SE no modelo referência com tijolos ecológicos sem revestimento e pintura, enquanto o Quadro 16 apresenta as temperaturas do ar externa e interna das zonas térmicas, sala e quartos, da HIS no dia típico de verão em Aracaju/SE, no modelo referência com tijolos maciços cerâmicos sem revestimento e pintura.

Quadro 15- Temperatura do ar externa e interna das zonas térmicas, sala e quartos, da HIS com tijolos ecológicos sem revestimento e pintura ($\alpha=0,20$).

Hora	Temperatura do ar externa	Temperatura do ar Sala	Temperatura do ar Quarto 01	Temperatura do ar Quarto 02	Temperatura do ar Quarto 03	Tijolo	Revestimento e pintura branca ($\alpha=0,20$)
1h	26,27°C	28,43°C	29,26°C	29,48°C	28,96°C	Ecológico	Sem
2h	26,01°C	28,06°C	28,95°C	29,20°C	28,64°C	Ecológico	Sem
3h	25,83°C	27,75°C	28,69°C	28,96°C	28,37°C	Ecológico	Sem
4h	25,67°C	27,47°C	28,44°C	28,72°C	28,13°C	Ecológico	Sem
5h	25,54°C	27,23°C	28,21°C	28,51°C	27,91°C	Ecológico	Sem
6h	25,57°C	27,13°C	28,12°C	28,40°C	27,80°C	Ecológico	Sem
7h	25,84°C	27,89°C	28,52°C	28,70°C	28,10°C	Ecológico	Sem
8h	26,56°C	28,75°C	28,55°C	28,55°C	28,12°C	Ecológico	Sem
9h	27,55°C	29,61°C	29,57°C	29,23°C	28,96°C	Ecológico	Sem
10h	28,50°C	30,97°C	30,94°C	30,28°C	30,14°C	Ecológico	Sem
11h	29,35°C	32,24°C	32,22°C	31,41°C	31,39°C	Ecológico	Sem
12h	30,00°C	33,13°C	33,12°C	32,27°C	32,35°C	Ecológico	Sem
13h	30,47°C	34,13°C	33,67°C	32,82°C	32,96°C	Ecológico	Sem
14h	30,80°C	34,50°C	33,92°C	33,11°C	33,28°C	Ecológico	Sem
15h	30,90°C	34,22°C	33,84°C	33,06°C	33,29°C	Ecológico	Sem
16h	30,70°C	33,93°C	33,48°C	32,76°C	33,06°C	Ecológico	Sem
17h	30,31°C	33,42°C	32,96°C	32,33°C	32,66°C	Ecológico	Sem
18h	29,81°C	32,80°C	32,33°C	31,85°C	32,12°C	Ecológico	Sem
19h	29,10°C	32,61°C	31,62°C	31,31°C	31,44°C	Ecológico	Sem
20h	28,42°C	32,00°C	30,96°C	30,80°C	30,78°C	Ecológico	Sem
21h	27,90°C	31,47°C	30,41°C	30,37°C	30,24°C	Ecológico	Sem

Hora	Temperatura do ar externa	Temperatura do ar Sala	Temperatura do ar Quarto 01	Temperatura do ar Quarto 02	Temperatura do ar Quarto 03	Tijolo	Revestimento e pintura branca ($\alpha=0,20$)
22h	27,41°C	30,35°C	30,48°C	30,53°C	30,18°C	Ecológico	Sem
23h	26,99°C	29,73°C	30,11°C	30,23°C	29,79°C	Ecológico	Sem
24h	26,61°C	28,89°C	29,74°C	29,91°C	29,42°C	Ecológico	Sem

Fonte: A autora.

Quadro 16- Temperatura do ar externa e interna das zonas térmicas, sala e quartos, da HIS com tijolos maciços cerâmico sem revestimento e pintura ($\alpha=0,20$).

Hora	Temperatura externa	Temperatura do ar Sala	Temperatura do ar Quarto 01	Temperatura do ar Quarto 02	Temperatura do ar Quarto 03	Tijolo	Revestimento e pintura branca ($\alpha=0,20$)
1h	26,27°C	28,37°C	29,19°C	29,45°C	28,90°C	Maciço Cerâmico	Sem
2h	26,01°C	27,99°C	28,88°C	29,15°C	28,57°C	Maciço Cerâmico	Sem
3h	25,83°C	27,68°C	28,60°C	28,89°C	28,30°C	Maciço Cerâmico	Sem
4h	25,67°C	27,40°C	28,34°C	28,65°C	28,05°C	Maciço Cerâmico	Sem
5h	25,54°C	27,15°C	28,11°C	28,43°C	27,82°C	Maciço Cerâmico	Sem
6h	25,57°C	27,05°C	28,00°C	28,31°C	27,70°C	Maciço Cerâmico	Sem
7h	25,84°C	27,81°C	28,42°C	28,61°C	28,00°C	Maciço Cerâmico	Sem
8h	26,56°C	28,68°C	28,48°C	28,47°C	28,04°C	Maciço Cerâmico	Sem
9h	27,55°C	29,57°C	29,57°C	29,16°C	28,91°C	Maciço Cerâmico	Sem
10h	28,50°C	30,98°C	31,02°C	30,24°C	30,13°C	Maciço Cerâmico	Sem
11h	29,35°C	32,28°C	32,35°C	31,39°C	31,41°C	Maciço Cerâmico	Sem
12h	30,00°C	33,18°C	33,26°C	32,27°C	32,39°C	Maciço Cerâmico	Sem
13h	30,47°C	34,18°C	33,80°C	32,86°C	33,01°C	Maciço Cerâmico	Sem

Hora	Temperatura externa	Temperatura do ar Sala	Temperatura do ar Quarto 01	Temperatura do ar Quarto 02	Temperatura do ar Quarto 03	Tijolo	Revestimento e pintura branca ($\alpha=0,20$)
14h	30,80°C	34,59°C	34,05°C	33,17°C	33,37°C	Maciço Cerâmico	Sem
15h	30,90°C	34,34°C	33,97°C	33,14°C	33,42°C	Maciço ceramico	Sem
16h	30,70°C	34,07°C	33,61°C	32,86°C	33,21°C	Maciço Cerâmico	Sem
17h	30,31°C	33,56°C	33,06°C	32,45°C	32,82°C	Maciço Cerâmico	Sem
18h	29,81°C	32,90°C	32,40°C	31,96°C	32,25°C	Maciço Cerâmico	Sem
19h	29,10°C	32,68°C	31,66°C	31,40°C	31,52°C	Maciço Cerâmico	Sem
20h	28,42°C	32,01°C	30,96°C	30,87°C	30,81°C	Maciço Cerâmico	Sem
21h	27,90°C	31,46°C	30,38°C	30,41°C	30,23°C	Maciço Cerâmico	Sem
22h	27,41°C	30,33°C	30,44°C	30,54°C	30,16°C	Maciço Cerâmico	Sem
23h	26,99°C	29,68°C	30,05°C	30,22°C	29,75°C	Maciço Cerâmico	Sem
24h	26,61°C	28,83°C	29,89°C	29,36°C	30,14°C	Maciço Cerâmico	Sem

Fonte: A autora.

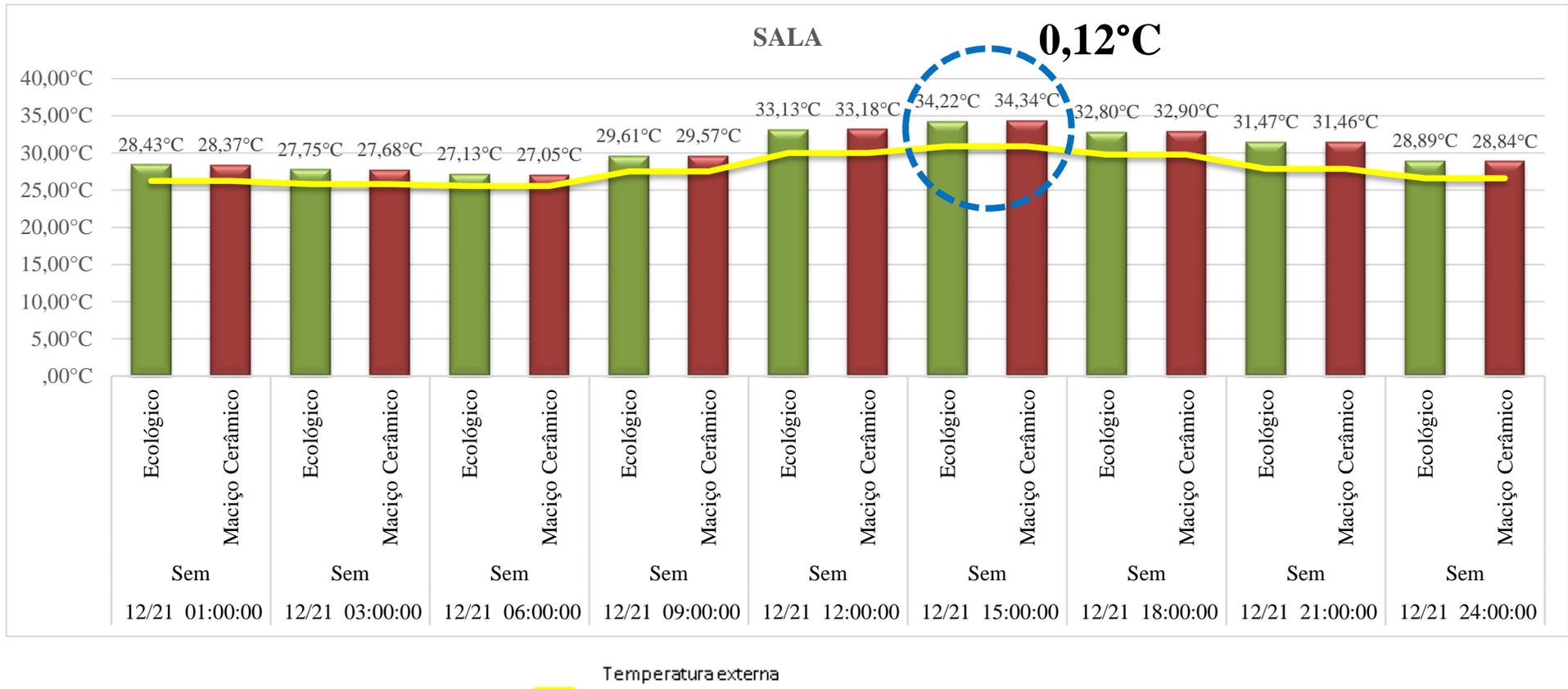
A seguir serão apresentados os resultados obtidos nesta pesquisa. Todos os gráficos são referentes ao dia 21 de dezembro de 2015, nos horários de 1h, 3h, 6h, 9h, 12h, 15h, 18h, 21h e 24h. Os dois primeiros gráficos mostram os valores de temperatura média do ar externa para cada horário do dia típico de verão, e os valores de temperatura média do ar interna simulados na edificação com alvenaria de tijolo ecológico e alvenaria de tijolos maciços cerâmicos, sem revestimento e pintura.

Essa simulação adotou o valor de temperatura externa igual a 26,27°C para a 1 h, 25,83°C para 3h, 25,57°C para 6h, 27,55°C para 9h, 30,00°C para 12h, 30,90°C para 15h,

29,81°C para 18h, 27,90°C para 21h e 26,61°C para 24h, que constam nos arquivos climáticos TRY.

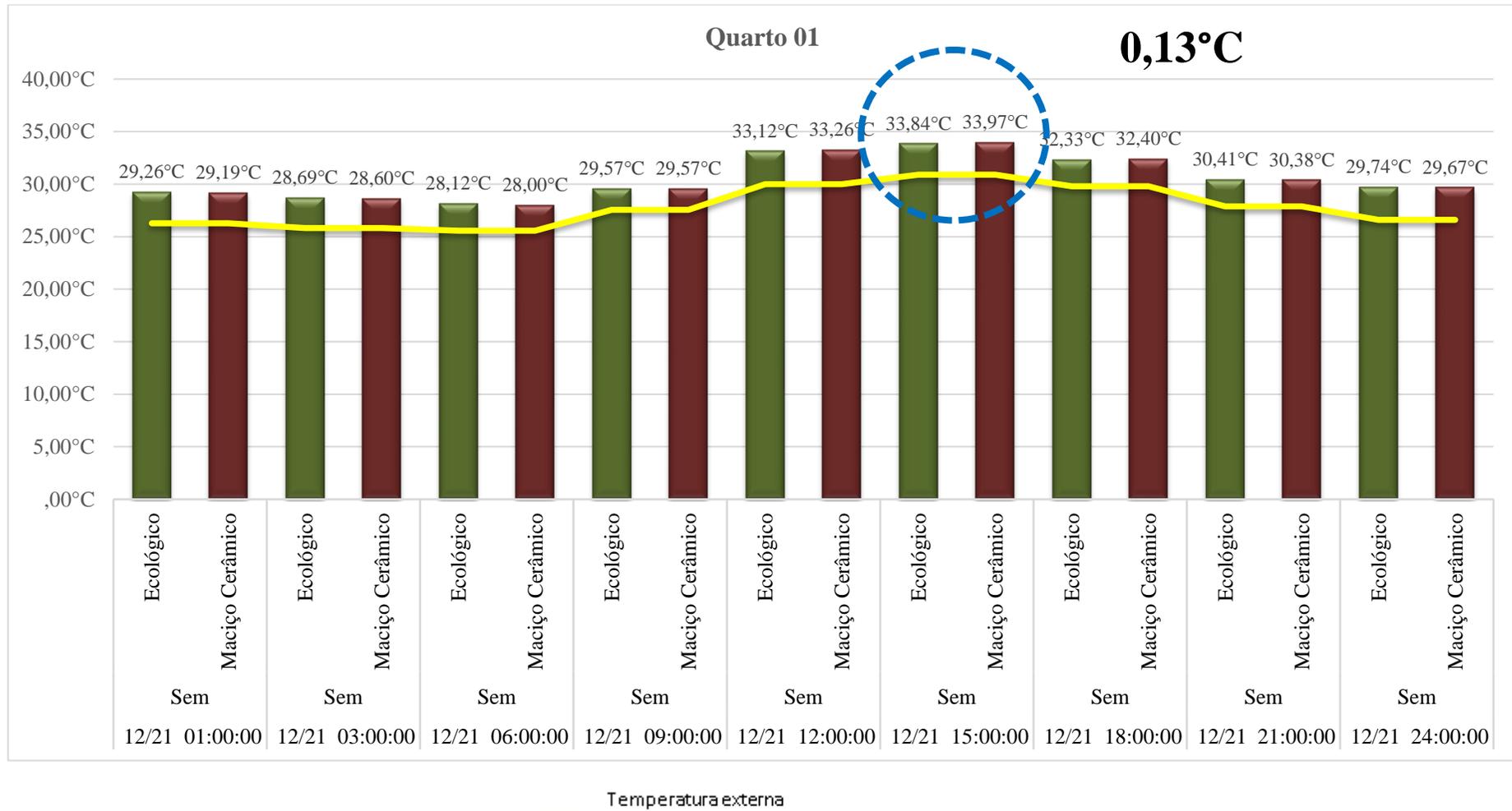
Na Figura 34 observam-se os valores para o ambiente da sala e nas Figuras 35, 36 e 37 os valores são referentes aos quartos.

Figura 34- Comparação da temperatura do ar interna da zona térmica da sala.



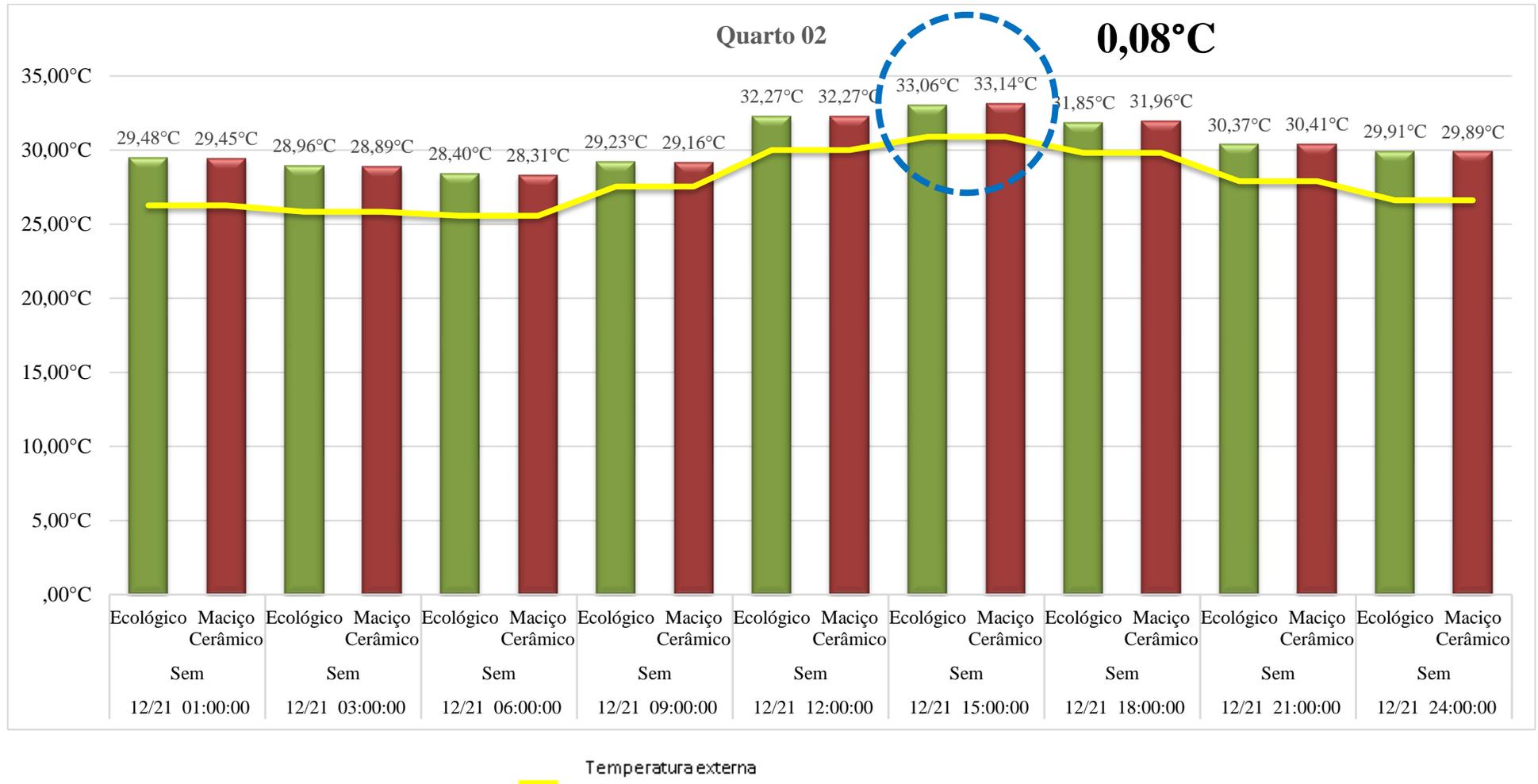
Fonte: A autora.

Figura 35- Comparação da temperatura do ar interna da zona térmica do quarto 01.



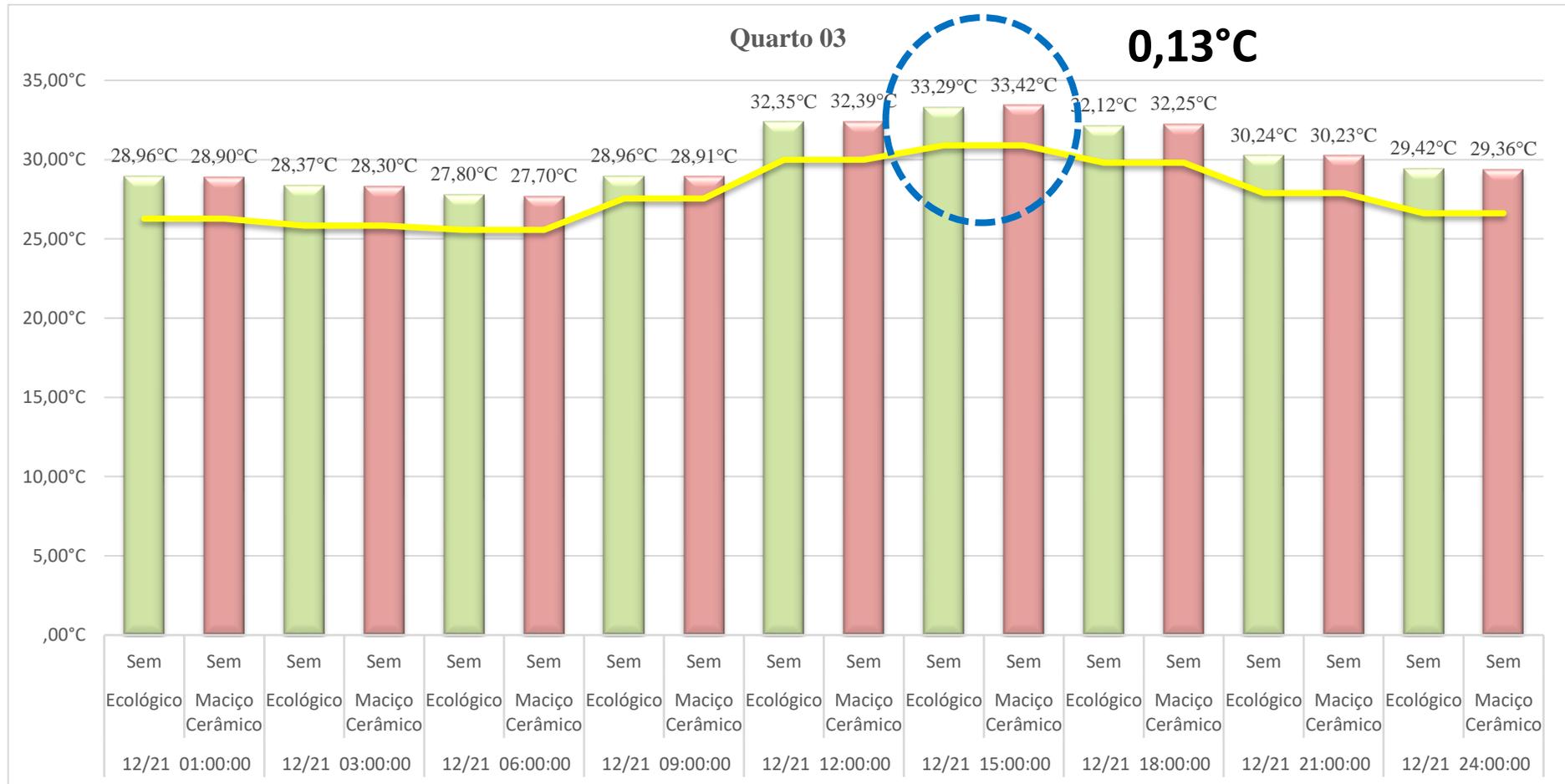
Fonte: A autora.

Figura 36 - Comparação da temperatura do ar interna da zona térmica do quarto 02.



Fonte: A autora.

Figura 37- Comparação da temperatura do ar interna da zona térmica do quarto 03.



Fonte: A autora.

A temperatura do ar externa vai aumentando paulatinamente e por consequência a sua temperatura do ar interna também, por tanto a temperatura máxima alcançada nas duas simulações (2Ae 2C) aconteceu às 15 h. Isso ocorre porque, nos materiais opacos, como os tijolos, é preciso considerar o armazenamento do calor durante a transmissão, na qual a massa vai aquecendo, faixa por faixa, provocando o atraso térmico.

Observou-se que às 06 h foram registradas as menores temperaturas, resultado que era esperado, pois o sol nasce na face leste e as janelas dos protótipos estão posicionadas na fachada norte. A maior diferença de temperatura é das 12h às 15h, quando a temperatura aumenta notavelmente em relação às demais. Por meio da análise dos gráficos foi possível verificar que os protótipos de tijolo ecológico e de tijolo maciço cerâmico obtiveram valores de temperaturas quase semelhantes, entre as 01h às 09h, existindo, no entanto, uma diferença mínima entre as temperaturas internas dos ambientes no início do dia.

É importante considerar que existe uma redução da temperatura interna do protótipo de tijolo ecológico quando comparado com o maciço cerâmico, de 0,12°C para a sala, de 0,13°C para o quarto 01e 03 e de 0,09°C quarto 02; isso aconteceu às 15 horas, no horário mais crítico da edificação, beneficiando ao tijolo ecológico (Figuras 34, 35, 36 e 37).

O Quadro 17 apresenta as temperaturas do ar obtidas no interior da HIS em um dia típico de verão em Aracaju/SE no modelo referência com tijolos ecológicos com revestimento e pintura de cor branca ($\alpha=0,20$), e, o último gráfico, apresentam-se os valores de temperatura do ar interna na sala, no dia típico de verão em Aracaju/SE, com o tijolo ecológico com revestimento e pintura de cor branca ($\alpha=0,20$).

Quadro 17- Temperatura do ar externa e interna das zonas térmicas, sala e quartos, da HIS com tijolos ecológicos com revestimento e pintura ($\alpha=0,20$).

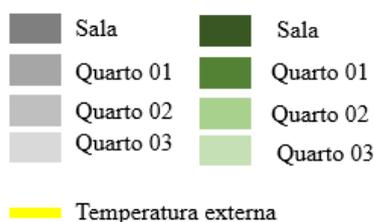
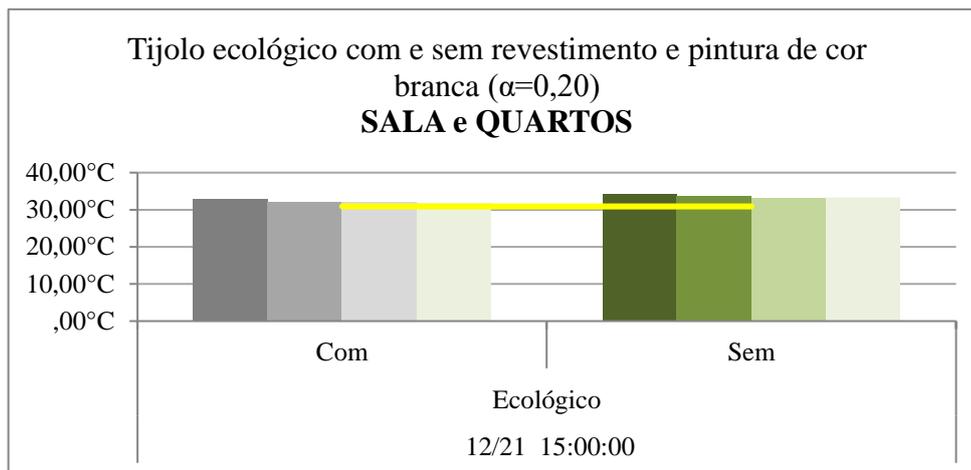
Hora	Temperatura externa	Temperatura do ar Sala	Temperatura do ar Quarto 01	Temperatura do ar Quarto 02	Temperatura do ar Quarto 03	Tijolo	Revestimento
1h	26,27°C	28,00°C	28,86°C	29,03°C	28,56°C	Ecológico	Com
2h	26,01°C	27,73°C	28,65°C	28,83°C	28,33°C	Ecológico	Com
3h	25,83°C	27,50°C	28,46°C	28,66°C	28,14°C	Ecológico	Com
4h	25,67°C	27,29°C	28,29°C	28,50°C	27,97°C	Ecológico	Com
5h	25,54°C	27,11°C	28,13°C	28,36°C	27,80°C	Ecológico	Com
6h	25,57°C	27,05°C	28,10°C	28,31°C	27,75°C	Ecológico	Com
7h	25,84°C	27,83°C	28,51°C	28,64°C	28,08°C	Ecológico	Com
8h	26,56°C	28,65°C	28,39°C	28,43°C	28,03°C	Ecológico	Com

Hora	Temperatura externa	Temperatura do ar Sala	Temperatura do ar Quarto 01	Temperatura do ar Quarto 02	Temperatura do ar Quarto 03	Tijolo	Revestimento
9h	27,55°C	29,37°C	29,13°C	29,01°C	28,70°C	Ecológico	Com
10h	28,50°C	30,53°C	30,13°C	29,95°C	29,68°C	Ecológico	Com
11h	29,35°C	31,46°C	30,92°C	30,84°C	30,62°C	Ecológico	Com
12h	30,00°C	32,13°C	31,51°C	31,52°C	31,35°C	Ecológico	Com
13h	30,47°C	32,97°C	31,91°C	31,91°C	31,78°C	Ecológico	Com
14h	30,80°C	33,24°C	32,09°C	32,09°C	31,98°C	Ecológico	Com
15h	30,90°C	32,94°C	31,99°C	31,99°C	31,89°C	Ecológico	Com
16h	30,70°C	32,54°C	31,63°C	31,63°C	31,52°C	Ecológico	Com
17h	30,31°C	31,93°C	31,09°C	31,10°C	30,99°C	Ecológico	Com
18h	29,81°C	31,32°C	30,57°C	30,61°C	30,46°C	Ecológico	Com
19h	29,10°C	31,45°C	30,08°C	30,14°C	29,96°C	Ecológico	Com
20h	28,42°C	31,05°C	29,66°C	29,74°C	29,53°C	Ecológico	Com
21h	27,90°C	30,70°C	29,33°C	29,43°C	29,19°C	Ecológico	Com
22h	27,41°C	29,58°C	29,68°C	29,78°C	29,39°C	Ecológico	Com
23h	26,99°C	29,07°C	29,48°C	29,60°C	29,16°C	Ecológico	Com
24h	26,61°C	28,35°C	29,23°C	29,37°C	28,91°C	Ecológico	Com

Fonte: A autora.

Comparando a edificação simulada com alvenaria de tijolo ecológico sem revestimento com a simulação de alvenaria de tijolo ecológico com revestimento e pintura de cor branca, verifica-se que o tijolo com revestimento e pintura tem um melhor desempenho térmico, chegando a uma diferença de 1,28°C na sala, 1,85°C no quarto 01, 1,06°C no quarto 02 e 1,40°C no quarto 03, às 15h (Figura 38).

Figura 38 - Comparação da temperatura do ar externa com a interna da HIS simulado com tijolos ecológicos com revestimento e pintura de cor branca ($\alpha=0,20$) às 15h.



Fonte: A autora.

Os resultados desta pesquisa indicam, por conseguinte, que para climas quentes, como é o caso da ZB-8, recomenda-se que a alvenaria em tijolos ecológicos seja revestida e tenha a sua superfície externa pintada com cores claras, a fim garantir melhores condições de conforto térmico.

As temperaturas internas do ar na HIS foram inferiores às do CASO 600, isso aconteceu por causa da divisão das zonas térmicas, a ventilação cruzada dos ambientes, e as variáveis construtivas da HIS. Mas, mesmo assim, a diferença foi nula quando comparadas às temperaturas internas das simulações revestidas com argamassa e pintadas de branco ($\alpha=0,20$).

Na Tabela 11 é apresentado o resumo das diferenças entre as temperaturas internas de ar que se obtiveram nas simulações com tijolos ecológicos e com tijolos maciços cerâmicos, no CASO 600 e na HIS.

Tabela 11: Diferença de temperatura interna do ar entre os ambientes simulados com tijolos maciços cerâmicos e com tijolos ecológicos.

Hora	simulação	Diferença de temperatura entre tijolos	Revestimento
15h	CASO 600	0,14°C	sem
15h	CASO 600	0,02°C	com
15h	HIS Sala	0,12°C	sem
15h	HIS Sala	0 °C	com

15h	HIS Quarto 01	0,13°C	sem
15h	HIS Quarto 01	0,01°C	com
15h	HIS Quarto 02	0,08°C	sem
15h	HIS Quarto 02	0,01°C	com
15h	HIS Quarto 03	0,13°C	sem
15h	HIS Quarto 03	0,01°C	com

Fonte: A autora.

Como pode ser observado na Tabela 11, as diferenças de temperaturas entre os materiais (tijolo ecológico e tijolo maciço cerâmico) foram mínimas nos casos da parede equivalente sem revestimento e pintura branca ($\alpha=0.20$). Para as simulações com paredes revestidas e pintadas de branco ($\alpha=0.20$), considera-se que as diferenças de temperaturas de ar obtidas no interior dos ambientes para os dois materiais foram praticamente nulas, chegando a ser nula na simulação na HIS, especificamente no ambiente da sala (0°C), na qual a temperatura do ar interna foi a mesma para o tijolo maciço cerâmico e para o tijolo ecológico.

Os pesquisadores Santos et.al (2015), analisaram as diferenças de temperaturas de ar internas entre uma edificação construída com bloco de concreto e outra construída com bloco cerâmico. Os edifícios foram monitorados durante os períodos de inverno e de verão. Nos resultados, os autores apresentam semelhanças nas temperaturas do ar interno. Tanto para o inverno quanto para o verão a diferença entre a edificação construída de bloco cerâmico com a edificação de bloco concreto foi de 0,07°C.

A respeito dos resultados encontrados, autores ressaltam que as “diferenças de temperaturas entre os edifícios construídos com os dois tipos de blocos são reduzidas. Isso indica que o tipo de bloco tem pouca influência no comportamento térmico das edificações estudadas, tanto no período de inverno como no verão” (SANTOS et al. 2015, p.1043).

Outra pesquisa realizada para comparar as diferenças de temperaturas de ar internas entre dois materiais diferentes foi a de Castro et al. (2015). O trabalho dos autores consistiu na execução de duas células-teste, uma de alvenaria de blocos cerâmicos e a outra de alvenaria de tijolo de solo-cimento, com a realização de medições *in loco*. Como resultado da pesquisa, a temperatura interna das células de tijolos cerâmicos chegou a 38,2°C, enquanto que na célula de tijolo solo-cimento atingiu um valor máximo de 34,9°C, “totalizando uma diferença de 3,3°C, que pode ser claramente perceptível ao corpo humano e que influencia no conforto ambiental interno”(CASTRO et al. 2015, p.7).

Portanto, diante das pesquisas apresentadas e considerando os valores mínimos das diferenças de temperaturas entre os materiais (tijolo ecológico e tijolo maciço cerâmico), pode se concluir que tais diferenças de temperatura obtidas no interior das edificações são tão

reduzidas ao ponto de possuírem pouca influência no comportamento térmico das edificações, já que se aproximam dos resultados obtidos na citada pesquisa de Santos et al. (2015).

Conforme os resultados apresentados nas simulações realizadas, foi necessária uma avaliação das alvenarias (de tijolos ecológicos de tijolos maciços cerâmicos), com o fim de entender o comportamento térmico dos materiais e a razão das diferenças reduzidas obtidas. Para isso, foram realizadas todas as combinações possíveis de todos os elementos utilizados na parede equivalente para poder entender o comportamento térmico dos materiais. Logo, foi realizada uma comparação desses valores com os da norma NBR 15220 (ABNT, 2005) e NBR 15575 (ABNT, 2013), obtendo-se os resultados apresentados.

5.3 AVALIAÇÃO DAS ALVENARIAS COM TIJOLOS ECOLÓGICOS E TIJOLOS MACIÇOS CERÂMICOS: DESEMPENHO TÉRMICO

A seguir são apresentadas as análises comparativas entre do tijolo ecológico e o tijolo maciço cerâmico de acordo com o método de trabalho utilizado e a comparação com as normas NBR 15220 (ABNT, 2005) e NBR 15575 (ABNT, 2013), tratadas na revisão da literatura. Para análise, foi necessário formatar um quadro comparativo com todas as combinações possíveis das variáveis analisadas, como pode ser observado na Tabela 12.

Tabela 12- Propriedades térmicas calculadas das diferentes combinações.

Combinação dos sistemas	Resistencia m^2K/W	Transmitância $W/(m^2K)$	Capacidade Térmica $kJ/(m^2K)$	Atraso Térmico h
Maciço cerâmico convecção	0,28	3,56	147,2	2,95
Ecológico convecção	0,45	2,23	168,96	5
Maciço cerâmico; argamassa de assentamento; convecção	0,27	3,69	162,17	2,95
Ecológico; argamassa de assentamento; convecção	0,3	3,32	187,13	3,61
Maciço cerâmico; argamassa de revestimento; convecção	0,32	3,08	247,2	3,79
Ecológico; argamassa de revestimento; convecção	0,49	2,03	268,96	5,52
Maciço cerâmico; argamassa de assentamento; argamassa de revestimento ,convecção	0,315	3,18	263,41	3,82

Combinação dos sistemas	Resistencia m²K/W	Transmitância W/(m²K)	Capacidade Térmica kJ/(m²K)	Atraso Térmico h
Ecológico; argamassa de assentamento; argamassa de revestimento, convecção	0,345	2,9	277,53	4,26

Fonte: A autor.

Nos próximos itens serão analisadas cada uma das variáveis em relação ao desempenho térmico dos materiais.

5.3.1 Análise das propriedades térmicas

A seguir apresenta-se a análise das propriedades térmicas, Resistência Total (RT), Transmitância Total (UT), Capacidade Térmica Total (CT) e Atraso Térmico do tijolo ecológico e do tijolo maciço cerâmico. Para isso, foi necessário realizar uma combinação de todas as variáveis possíveis, sem considerar a argamassa de assentamento, para poder avaliar apenas o tijolo ecológico.

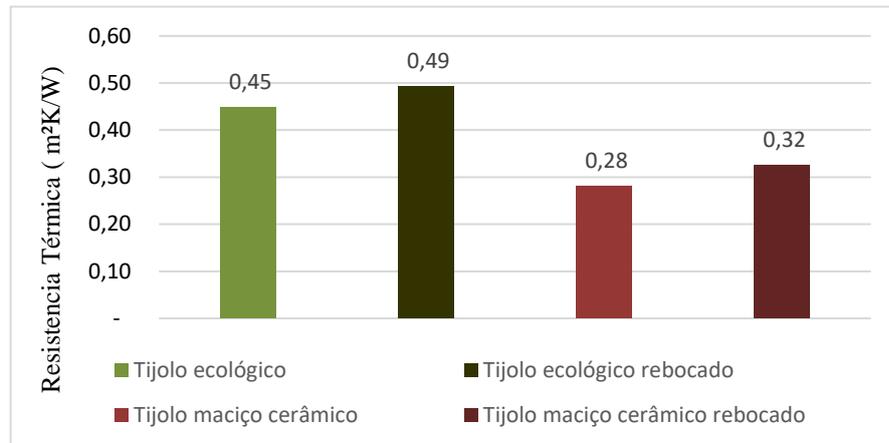
- Tijolo (ecológico e maciço cerâmico) + Convecção;
- Tijolo (ecológico e maciço cerâmico) + Revestimento + Convecção

Os valores apresentados na Tabela 12 são os valores referentes às propriedades térmicas Resistência Total (RT), Transmitância Total (UT), Capacidade Térmica Total (CT) e Atraso Térmico. Os cálculos foram executados conforme estabelecido na norma NBR 15220-2 (ABNT, 2005b). A Tabela 12 apresenta todas as alternativas que foram aplicadas no sistema equivalente de construção (alvenaria com tijolos ecológicos sem e com revestimento, assim como, as alvenarias com tijolos maciços cerâmicos).

As Figuras 39, 40, 41 e 42 mostram a alteração nos valores das propriedades térmicas, em função do tijolo ecológico e do tijolo maciço cerâmico, e da alvenaria rebocada ou não. Esses gráficos apresentam os valores das propriedades dos tijolos sem argamassa de assentamento.

Dessa forma, considerando os aspectos citados na revisão da literatura, foi analisada a Resistência térmica (R) do material (Figura 38), e constatou-se que o tijolo ecológico sem argamassa de assentamento tem a Resistência Térmica (R) mais elevada em comparação com o tijolo maciço cerâmico, e, segundo Lamberts; Dutra; Pereira (2014), resistiria mais à passagem do calor, já que a propriedade depende da sua espessura, sendo que, quanto maior espessura, maior será a resistência que o material oferece à passagem de calor.

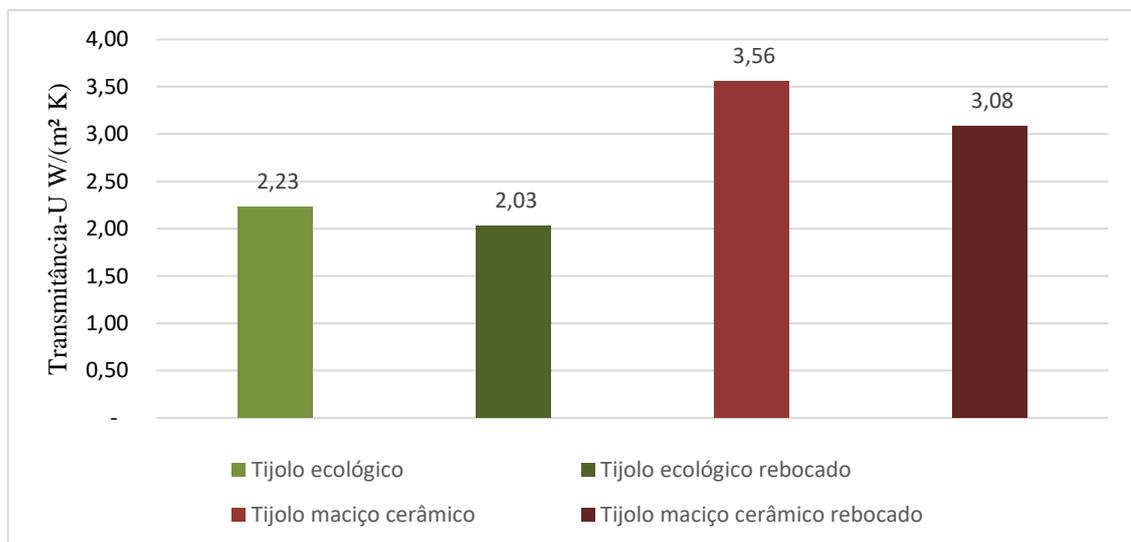
Figura 39- Resistência térmica alvenarias sem argamassa de assentamento.



Fonte: A autora.

Considerando que a transmitância térmica (U) “é o inverso da resistência térmica (R)” segundo a norma NBR 15220 (ABNT, 2005), verifica-se na Figura 39, que a transmitância térmica do tijolo ecológico é menor quando comparada ao tijolo maciço cerâmico.

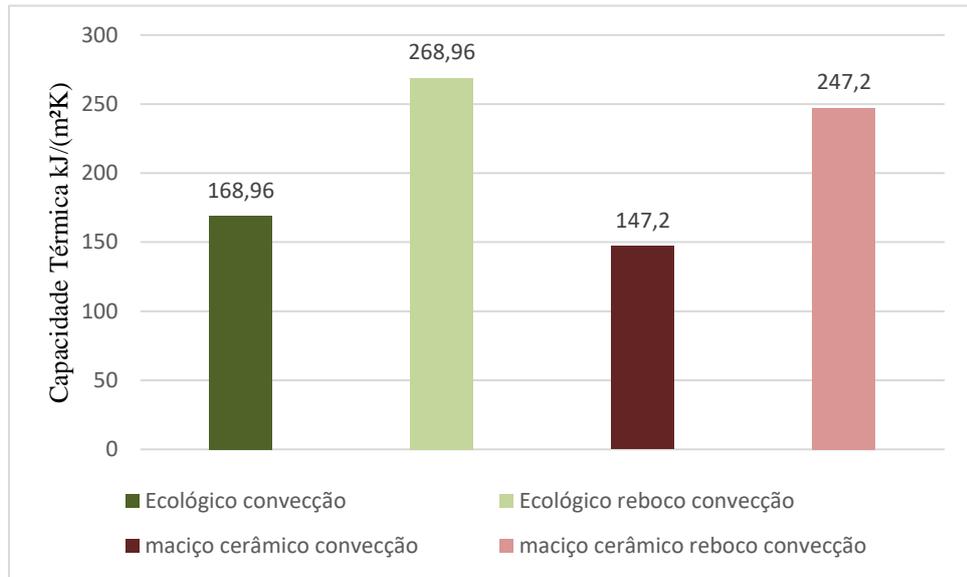
Figura 40 - Transmitância térmica alvenarias sem argamassa de assentamento.



Fonte: A autora.

Conforme o apontamento de Lamberts; Dutra; Pereira (2014), a capacidade térmica (C) é outra propriedade dos materiais construtivos e indica sua maior ou menor capacidade em reter calor. Portanto, quanto maior for a capacidade térmica, maior deverá ser a quantidade de calor a ser fornecida para provocar uma determinada elevação de temperatura.

Figura 41 - Capacidade térmica alvenarias sem argamassa de assentamento.

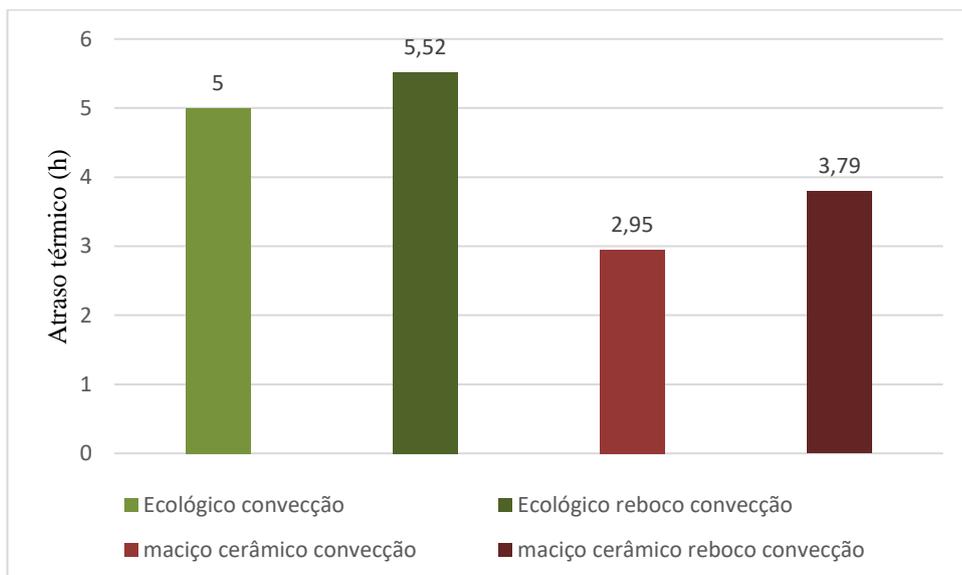


Fonte: A autora.

De acordo a Figura 40, nota-se que a capacidade térmica do tijolo ecológico sem argamassa de assentamento é menor que a capacidade térmica do tijolo maciço cerâmico sem argamassa de assentamento. Dessa forma, verifica-se que a capacidade térmica depende da espessura da camada, da densidade da mesma e do calor específico.

Conforme a Figura 42, o atraso térmico do tijolo ecológico sem argamassa de assentamento é maior, ou seja, o calor tardará mais tempo em atravessar o material.

Figura 42 - Atraso térmico alvenarias sem argamassa de assentamento.



Fonte: A autora.

Em seguida, executou-se a análise das propriedades térmicas (Resistência térmica, Transmitância térmica, capacidade térmica e atraso térmico) quanto a influência da argamassa de assentamento nas propriedades térmicas dos sistemas de parede equivalente com tijolo maciço cerâmico e com tijolo ecológico (alvenarias). Para isso, foi necessário criar as combinações dos tijolos com argamassa de assentamento e com argamassa de revestimento.

5.3.2 Análise das propriedades térmicas quanto a influência da argamassa de assentamento e a influência da argamassa de revestimento.

A seguir apresenta-se a análise das propriedades térmicas do tijolo ecológico e do tijolo maciço cerâmico. Para isso, foi necessário realizar uma combinação das seguintes variáveis:

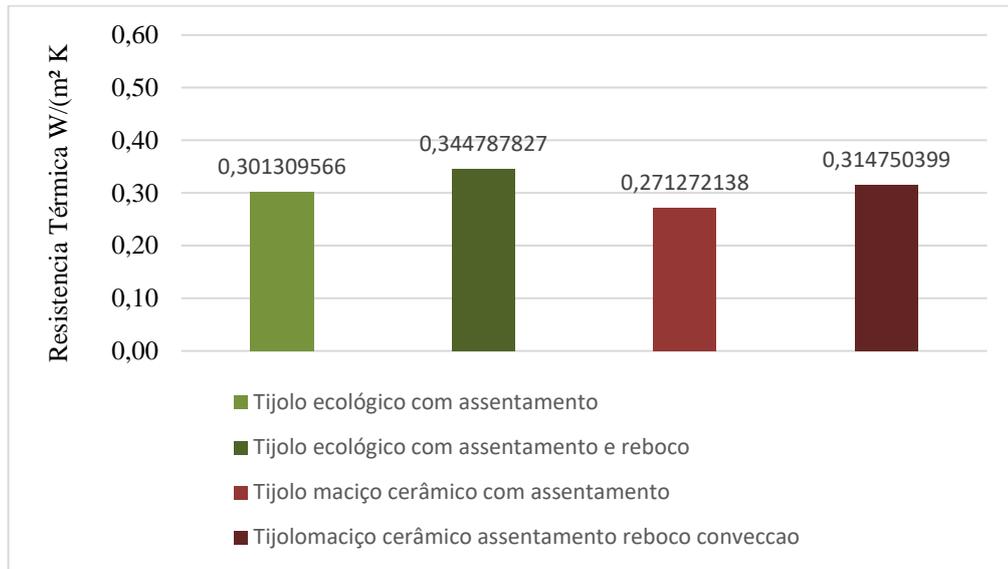
- Tijolo (ecológico e maciço cerâmico) + Assentamento + Convecção;
- Tijolo (ecológico e maciço cerâmico) + Assentamento + Revestimento + Convecção

A Figura 43, apresenta os resultados referente à Resistência Térmica (R) dos tijolos com argamassa de assentamento, e denota-se que tanto o tijolo ecológico quanto o maciço cerâmico obtiveram resistências menores em comparação aos tijolos sem argamassa de assentamento, uma vez que o acréscimo da argamassa diminui a resistência térmica da parede provocando uma diminuição na capacidade de isolamento térmico.

Na medida que foram realizadas as variações na envoltória, foram também modificando as propriedades térmicas dos componentes, já que todas estas propriedades estão relacionadas entre si.

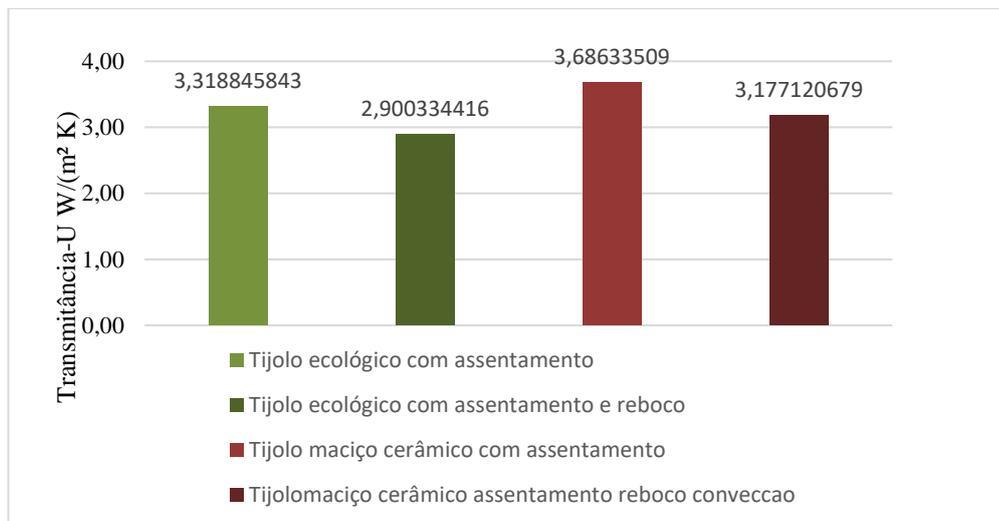
Assim como na Figura 40, na Figura 42, apresentam-se os valores referentes a transmitância térmica (U) e nota-se que com o acréscimo da argamassa de assentamento teve seu valor modificado.

Figura 43- Resistência térmica alvenarias com argamassa de assentamento.



Fonte: A autora.

Figura 44- Transmitância térmica alvenarias com argamassa de assentamento.



Fonte: A autora.

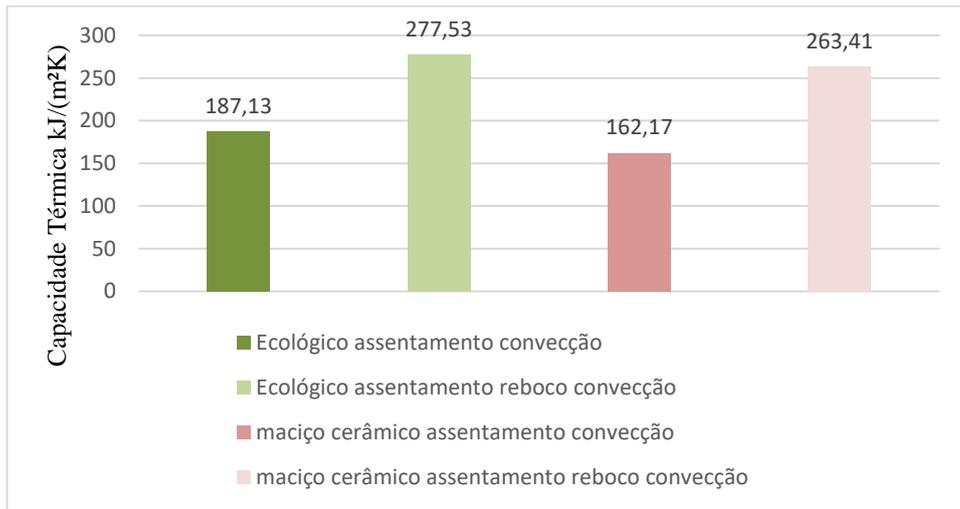
Tanto a capacidade térmica quanto o atraso térmico tiveram seus valores alterados com o acréscimo da argamassa de assentamento. É visível notar que essa variável alterou negativamente o comportamento térmico do envelope.

Segundo Simões et al. (2010), considerar a argamassa de assentamento entre os elementos constitutivos da envoltória opaca é fundamental para o desempenho térmico das edificações, já que a argamassa de assentamento, em geral, apresenta piores propriedades

térmicas em comparação com as unidades de alvenaria. Isso prejudica o desempenho térmico do sistema, como é possível observar nessa análise da influência argamassa de assentamento.

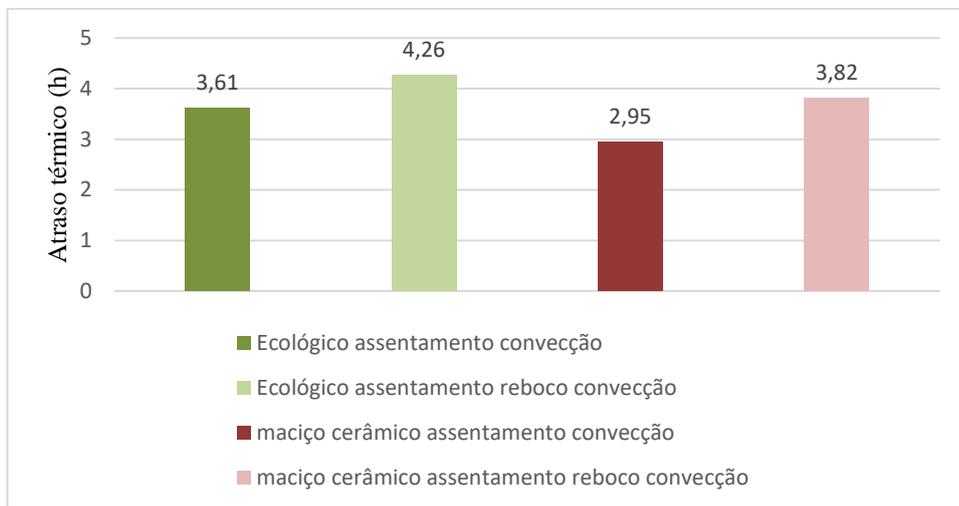
Na Figuras 45 apresenta-se, os valores da capacidade térmica e na Figura 46 os valores referentes ao atraso térmico.

Figura 45 - Capacidade térmica alvenarias com argamassa de assentamento.



Fonte: A autora.

Figura 46- Atraso térmico alvenarias com argamassa de assentamento.



Fonte: A autora.

Considerando que existem outros tipos de argamassa de assentamento como é o caso da argamassa celular, cuja condutividade térmica é menor em comparação a argamassa comum (Tabela 13), a aplicação de uma argamassa celular para assentamento melhoraria nas condições de desempenho térmico, aumentando a resistência térmica em comparação com a parede equivalente de tijolos assentadas com argamassa comum.

Tabela 13-Condutividade térmica e Resistencia térmica da argamassa comum e da argamassa celular.

Material	Condutividade térmica W/m°C (δ)	Resistencia térmica m²°C /W
Argamassa comum	1,15	0,10
Argamassa celular	0,40	0,30

Fonte: NBR 15220 (ABNT, 2005).

Com o acréscimo da argamassa de revestimento no modelo equivalente, constatou-se que essa variável contribuiu positivamente para o desempenho térmico.

Isso ocorre em razão da inercia térmica, cuja propriedade é fundamental para avaliar o desempenho térmico. Conforme citado na revisão da literatura e, segundo Lamberts; Dutra; Pereira (2014), a inercia térmica pode ser estimada pela capacidade térmica. Em razão do acréscimo da argamassa de revestimento, nota-se o aumento da capacidade térmica nas alvenarias rebocadas, isso porque teve um aumento na espessura da camada.

Vale a pena ressaltar que, quanto maior inercia térmica maior calor retido, e este pode ser devolvido ao interior quando o material estiver submetido ao pico da temperatura extrema (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

Em seguida, executou-se a análise do fator solar quanto a influência da pintura externa de cor branca, ($\alpha=0,20$), nas propriedades térmicas dos sistemas de parede equivalente (alvenarias).

5.3.3 Análise quanto a influência da pintura externa

A seguir apresenta-se a análise das propriedades térmicas do tijolo ecológico e do tijolo maciço cerâmico. Para isso, foi necessário realizar uma combinação das seguintes variáveis:

- Tijolo (ecológico e maciço cerâmico) + com e sem Pintura + Convecção;
- Tijolo (ecológico e maciço cerâmico) + Assentamento + com e sem Pintura + Convecção;
- Tijolo (ecológico e maciço cerâmico) + Revestimento + com e sem Pintura + Convecção
- Tijolo (ecológico e maciço cerâmico) + Assentamento + Revestimento + Pintura+ Convecção.

Vale a pena ressaltar que para os cálculos referentes às combinações dos tijolos apenas revestidas com argamassa de revestimento, ou seja, sem pintura, foi utilizado uma absorvância igual a 0,40 para a pintura branca, uma absorvância igual a 0,20 para o tijolo maciço cerâmico, e para o ecológico, uma absorvância igual a 0,70, segundo a norma NBR 15220 (ABNT, 2005).

Na Tabela 14 apresentam-se todos os valores das combinações possíveis analisando a absorvância da combinação dos tijolos sem pintura branca e com pintura branca, dos tijolos com argamassa de assentamento com e sem pintura branca, dos tijolos com argamassa de revestimento com e sem pintura, dos tijolos com argamassa de assentamento e argamassa de revestimento com e sem pintura branca ($\alpha=0,20$).

Tabela 14 - Valores do fator solar das combinações possíveis das variáveis analisadas.

Combinação dos sistemas	Fator Solar %	Fator Solar com pintura %
Maciço cerâmico convecção	10,32	2,85
Ecológico convecção	6,24	1,78
Maciço cerâmico; argamassa de assentamento; convecção	10,69	2,95
Ecológico; argamassa de assentamento; convecção	9,4	2,66
Maciço cerâmico; argamassa de revestimento; convecção	4,93	2,46
Ecológico; argamassa de revestimento; convecção	3,25	1,62
Maciço cerâmico; argamassa de assentamento; argamassa de revestimento; convecção	5,08	2,54
Ecológico; argamassa de assentamento; argamassa de revestimento; convecção	4,64	2,32

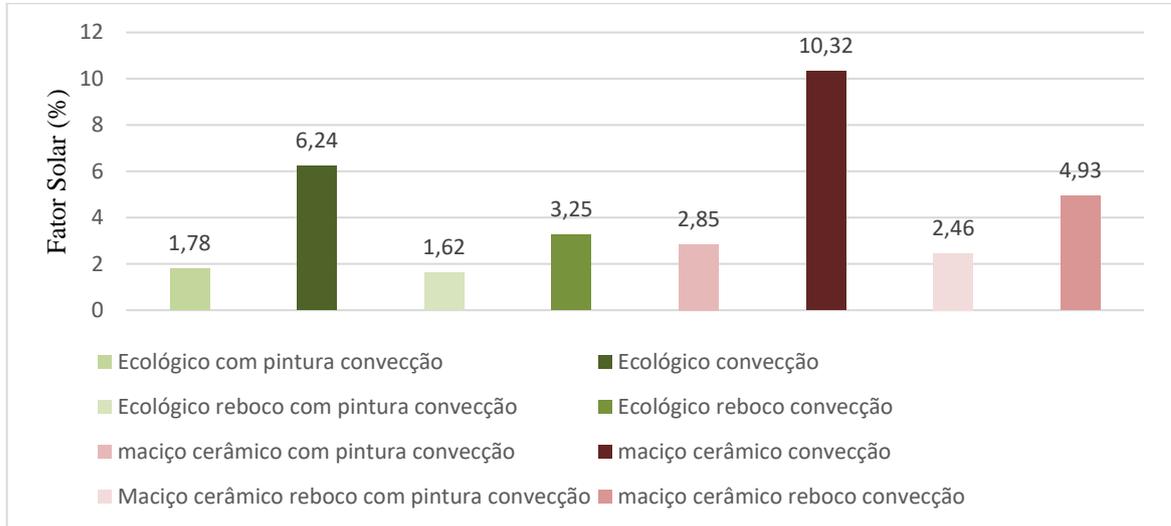
Fonte: A autora.

Para a propriedade do fator solar pode ser visualizado que em todas as combinações a sua variação em função do acréscimo da pintura externa é satisfatória.

De acordo com o citado no capítulo 2, segundo a norma NBR 15220 (ABNT, 2005), o fator solar de materiais opacos "é quociente da taxa de radiação solar transmitida através de um componente opaco pela taxa da radiação solar total incidente sobre a superfície externa do

mesmo”. Nota-se, na Figura 47, que o Fator Solar do tijolo ecológico sem argamassa de assentamento é menor que o Fator Solar do tijolo maciço cerâmico.

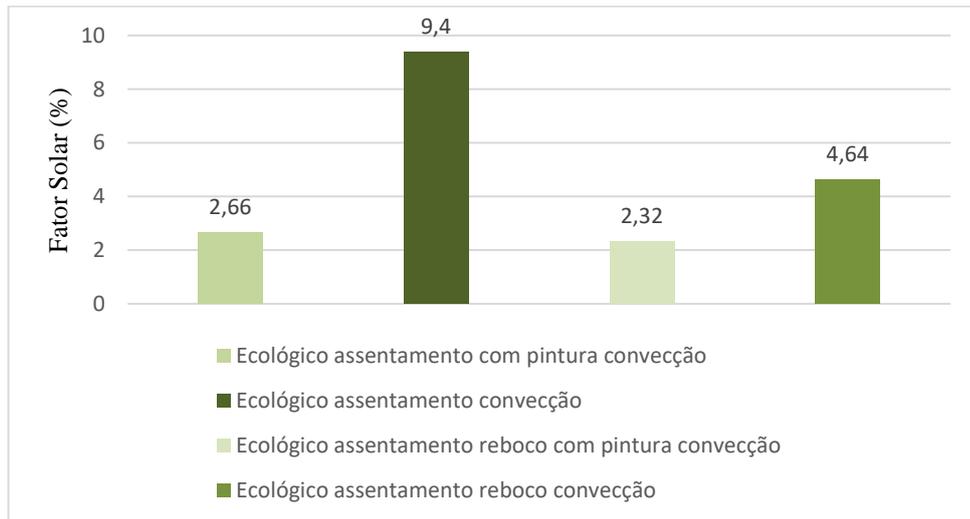
Figura 47- Fator solar alvenarias sem argamassa de assentamento.



Fonte: A autora.

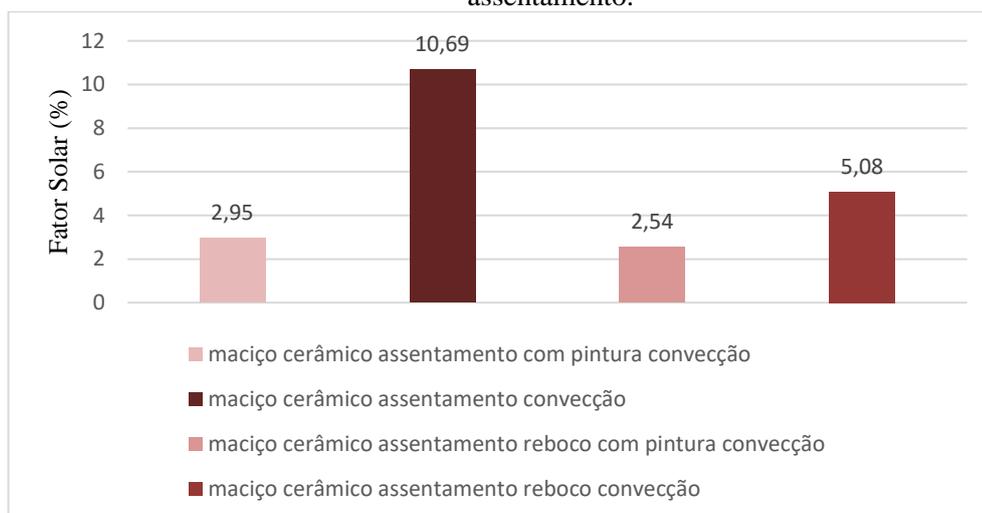
Nas Figuras 48 e 49 apresentam-se os valores referentes ao fator solar.

Figura 48 - Fator solar de alvenarias de tijolos ecológicos com argamassa de assentamento.



Fonte: A autora.

Figura 49- Fator solar de alvenarias de tijolos maciços cerâmicos com argamassa de assentamento.



Fonte: A autora.

Para a propriedade do fator solar pode ser visualizado que em todas as combinações a sua variação em função do acréscimo da pintura externa.

O Fator solar teve seus valores alterados com o acréscimo da argamassa de assentamento. É visível notar que essa variável alterou negativamente o comportamento térmico do envelope.

Em relação aos resultados da influência da pintura externa, constatou-se que todos os elementos, sejam os tijolos sem argamassa de assentamento ou com, sejam rebocados ou não, se estão pintados com cor branca, têm o fator solar com resultado positivo para o desempenho térmico da edificação.

Portanto, constata-se o que foi citado no capítulo 2: a principal característica da absorvidade de um material está dada pela cor superficial. Um material escuro absorverá a maior parte da radiação incidente enquanto que um material claro absorverá menos (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

5.3.4 Avaliação do desempenho térmico das vedações segundo os limites estipulados pela norma NBR 15220 (ABNT, 2005) e NBR 15575 (ABNT, 2013)

Na Tabela 15 apresentam-se todos os valores mínimos requeridos pela norma NBR 15220 (ABNT, 2005) e pela norma NBR 15575 (2013) referentes às propriedades térmicas, assim como os valores referentes aos cálculos realizados para todas as combinações das

variáveis aplicadas no modelo equivalente de referência, tanto para o tijolo ecológico como para o tijolo maciço cerâmico. Todos os dados extraídos das normas são referentes a ZB-8.

Tabela 15- Valores calculados de transmitância térmica, fator solar e atraso térmico e as recomendações das normas NBR15220(2005) e NBR 15575(2013).

Combinação de Materiais	NBR 15220			NBR 15575
	Transmitância- U W/(m ² K)	Fator Solar (%)	Atraso Térmico (φ)	Transmitância-U W/(m ² K)
VALORES DE REFERÊNCIA	U <3,6	FS ≤4,0	φ ≤4,3	U <3,7 α ≤0,6 U ≤2,5 α ≥0,6
Maciço cerâmico, convecção	3,56	10,32	2,95	3,56*
Ecológico, convecção	2,23	6,24	5,00	2,23*
Maciço cerâmico, argamassa de assentamento, convecção	3,69	10,69	2,95	3,69*
Ecológico, argamassa de assentamento, convecção	3,32	9,40	3,61	3,32*
Maciço cerâmico, reboco, convecção	3,08	4,93	3,79	3,08**
Ecológico, reboco, convecção	2,03	3,25	5,52	2,03**
Maciço cerâmico, argamassa de assentamento, reboco, convecção	3,18	5,08	3,82	3,18**
Ecológico, argamassa de assentamento, argamassa de revestimento, convecção	2,90	4,64	4,2	2,90**

*α=0.70 tijolos

**α=0.40 argamassa de revestimento

Fonte: A autora.

De acordo com a Tabela 14, observa-se que todas as variáveis aplicadas (combinações dos sistemas) têm valores inferiores ao valor limite estipulado na norma NBR 15220 (ABNT, 2005) referentes à propriedade de transmitância térmica.

Com relação ao Fator Solar, todas as combinações apresentam valores superiores ao valor estipulado pela norma, mas pode ser observado que nas alvenarias rebocadas e pintadas o Fator Solar é inferior. Portanto, pode ser observado que, para todos os casos, se as alvenarias são pintadas com cores claras o fator solar diminui, mas se as alvenarias são rebocadas e pintadas elas se classificam como leves refletoras tendo seu $FS \leq 4$, como estipula a norma NBR 15220 (ABNT, 2005).

A norma NBR 15575 (ABNT, 2013) determina, para a ZB-8, valores limites de transmitância térmica (U) que dependem dos valores da absorptância. Nota-se, por meio da Tabela 12, que as alvenarias não rebocadas e sem pintura não alcançaram o desempenho térmico mínimo exigido pela norma. Isso porque apresentaram valores de transmitância térmica superiores ao limite, e, portanto, são consideradas inapropriadas para a ZB-8. As alvenarias rebocadas não pintadas, rebocadas e pintadas alcançaram o desempenho térmico estabelecido pela norma.

De acordo com os resultados apresentados, os valores do tijolo ecológico sem a argamassa de revestimento cumprem com os requerimentos da norma NBR 15575 (ABNT, 2013), mas em relação à norma 15220 (ABNT, 2005) o Fator solar é a propriedade que não cumpre com os valores limites, ainda assim, as combinações apresentam valores inferiores quando comparados com o tijolo maciço cerâmico.

6 CONCLUSÕES

De acordo com os apontamentos realizados na revisão da literatura e os resultados obtidos nesta pesquisa, constata-se que a correta escolha dos elementos construtivos constituintes do envelope da edificação aliada a uma correta orientação da edificação e consideração dos fatores externos a edificação, influenciam no desempenho térmico da edificação e, por sua vez, no conforto térmico do usuário.

Entretanto, foi determinado como parâmetro a atuação das variáveis dos valores das propriedades termofísicas no comportamento térmico dos ambientes analisados durante o período do dia 21 de dezembro (dia típico de verão). De acordo com o método utilizado, esse comportamento térmico se deve, exclusivamente, a essa variação realizada. Consoante o apresentado, destacam-se algumas das comprovações da pesquisa quanto às propriedades termofísicas da alvenaria de tijolos ecológicos produzidos com rejeitos de RSUs:

- A espessura do material, o calor específico, a absorvância e a condutividade térmica foram as propriedades que mais influenciaram no desempenho térmico da edificação. Constatou-se que o tijolo ecológico, por ter maior espessura e maior calor específico e menor condutividade térmica, logrou uma maior otimização do desempenho térmico da edificação em comparação com o tijolo cerâmico maciço. Mas isso quando o tijolo ecológico é comparado apenas sem a aplicação da argamassa de assentamento.

- A influência da argamassa de assentamento interfere negativamente no desempenho térmico da alvenaria, já que o material está disposto em camadas paralelas ao tijolo, provocando uma diminuição na resistência térmica da parede. Portanto, o desempenho do tijolo ecológico diminui quando se incorpora a argamassa de assentamento na execução da parede equivalente.

- Em todas as simulações realizadas, verificou-se que as maiores temperaturas foram atingidas nos ambientes quando a vedação foi simulada sem revestimentos, apresentando uma diferença de +1,5°C em relação à vedação com revestimento.

- Entre as paredes equivalentes de tijolos ecológicos e tijolos maciços cerâmicos revestidas e pintadas de branco, com uma absorvância igual a 0,20, não existe variação considerável na temperatura do ar interna dos ambientes, isso porque as propriedades térmicas dos materiais igualam, provocando quase o mesmo desempenho térmico.

- Portanto, de acordo com os resultados das simulações apresentadas no presente trabalho, pode-se concluir que as edificações (na ZB-8) revestidas com argamassa comum e pintadas de branco ($\alpha=0,20$) têm melhor desempenho térmico e brindam um melhor conforto térmico aos usuários.

Pode-se concluir que, mesmo com uma diferença mínima de temperatura interna do ar entre os protótipos, o protótipo construído com tijolo ecológico contribuiu para melhores condições quanto ao desempenho térmico nos horários mais críticos do dia, pois proporcionou menores temperaturas internas e, conseqüentemente, menor ganho de calor. Portanto, o tijolo ecológico apresenta melhores propriedades térmicas para o clima de Aracaju/SE.

Além disso, esse tipo de tijolo é produzido sem queima, o que provoca uma menor emissão de gases efeito estufa, e se revela uma alternativa mais econômica, sendo, por isso, mais acessível à população de baixa renda e utilizado com mais facilidade nos mutirões de autoconstrução.

O tijolo ecológico, portanto, mostra-se como uma alternativa viável do tijolo maciço cerâmico, considerando não apenas a sua característica ambiental, como, também, de acordo com os resultados obtidos, pela inexistência de perda para fins de conforto térmico.

7 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

De acordo com tudo o exposto neste trabalho, nota-se como é importante a escolha correta dos elementos construtivos, especificamente dos elementos que integram o envelope da edificação, pois estes irão proporcionar um bom desempenho térmico a edificação. Entretanto, para cada clima e conjunto de parâmetros, há envelopes mais apropriados. Algumas sugestões para a continuação deste trabalho estão descritas abaixo:

- a) Avaliar o desempenho térmico do tijolo ecológico em climas frios;
- b) Avaliar o desempenho térmico do tijolo ecológico com argamassa celular;
- c) Avaliar o desempenho térmico do tijolo ecológico com pintura de cor vermelha e azul;
- d) Fabricar o tijolo ecológico com resíduos sólidos urbanos tratados mecanicamente e biologicamente no Brasil e fazer a avaliação do desempenho térmico do novo material;
- e) Avaliar o tijolo ecológico para uso de pavimentação em praças.

REFERÊNCIAS

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Estimativas dos custos para viabilizar a universalização da destinação adequada de resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo: Abrelpe, 2015. Disponível em: http://www.abrelpe.org.br/panorama_apresentacao.cfm. Acesso em: 28 ago. 2017.

ARAÚJO, H, M; SOUZA A, C.; COSTA, J; SANTOS, G, J. O Clima de Aracaju na Interface com a Geomorfologia de Encostas. **Scientia Plena**, vol. 6, num. 8. São Cristóvão, SE.2010.

ARGENTINA. Ley 25916. **Gestión de residuos domiciliarios**, Sancionada: Agosto 4 de 2004. Disponível em: <http://www0.unsl.edu.ar/~atissera/Leyes%20Nacionales/Ley%20PPMM%2025916%20Residuos%20Domiciliarios.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2019.

ASHRAE. ASHRAE 90.1-1989: AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS **Energy standard for buildings except low-rise residential buildings**. Atlanta, GA, 1989.

ASHRAE 140-2009 - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Handbook of fundamentals**. Atlanta, 2009.

ASHRAE 55 - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy Atlanta**, 2013.

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

_____. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR15220-1: Desempenho térmico de edificações – Parte 1: Definições, símbolos e unidades**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005a.

_____. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR15220-2: Desempenho térmico de edificações – Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005b.

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

_____. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15575: Edificações habitacionais de até cinco pavimentos**. Rio de Janeiro: 2013.

_____. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15575-1: Edificações Habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013a.

_____. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15575-4:** Edificações Habitacionais — Desempenho Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas. Rio de Janeiro: ABNT, 2013b.

_____. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15270-1:** Componentes cerâmicos - Blocos e tijolos para alvenaria. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

_____. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5413:** Iluminação de interiores. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

ASHRAE. AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs.** Atlanta, 2017.

BARBOSA, M. J. *et al.* Aperfeiçoamento e desenvolvimento de novos métodos de avaliação de desempenho para subsidiar a elaboração e revisão de normas técnicas. *In:* ROMAN, H. R.; BONIN, L.C. (Ed.) **Coletânea Habitare**, v. 3, Normatização e certificação na construção habitacional, 2003.

BATISTA, J.O; LAMBERTS, R; WESTPHAL, F, S. Avaliação de desempenho térmico de componentes construtivos utilizando o EnergyPlus. *In:* Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 2005. **Anais ENCAC**, 2005.

BRANDÃO, I; GUTIERREZ, R, A. Novos regimes de políticas de resíduos na América Latina: Brasil e Argentina em perspectiva comparada. *In:* **40º Encontro Anual da Associação Nacional de Pós-Graduação em Ciências Sociais**, 2016.

BRASIL. [Constituição (1988)]. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988.** Brasília, DF: Presidência da República, [2018]. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Constituicao/Constituicao.htm. Acesso em: 27 jun. 2017.

_____. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos.** Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 28 ago. 2017.

_____. Lei nº 6.938, de agosto de 1981. **Institui a Política Nacional do Meio Ambiente.** Disponível em: http://www.oas.org/dsd/fida/laws/legislation/brazil/brazil_6938.pdf. Acesso em: 28 ago. 2017.

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. **Cerâmica**. vol.61 n.358, São Paulo Abril. /junho 2015

BRITO, A. C.; AKUTSU. M. Contribuição da cor da cobertura na melhoria do desempenho térmico de habitação no período de verão. *In:* Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído. **Anais ENCAC**, 2015.

CBIC. CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. **Desempenho de Edificações Habitacionais**: Guia orientativo para atendimento à norma ABNT NBR 15575, 2013. Fortaleza: Gadioli Cipolla Comunicação, 2013.

CARVALHO, S. R. A.; SANTOS, S. V.; MELO, M. C.; GURGEL, Q. R.; OLIVEIRA, C. O. C. Desigualdades em saúde: condições de vida e mortalidade infantil em região do nordeste do Brasil. **Rev. Saúde Pública**, 2015.

CARLO, J.; LAMBERTS, R. **O papel da volumetria no desempenho energético da edificação**. ENCAC-ELACAC, 2007.

CASTRO. S.A.O.A; MONTEIRO. Z.C.I; FRANCO. C.L; MATHEUS. C; LABAKI, CH.L. **Estudo do conforto térmico em células-teste de alvenaria**. ENCAC-ELACAC, 2015.

CEAMSE. Coordinación Ecológica Área Metropolitana Sociedad del Estado. **Lei n. 1854**. Buenos Aires, 2007. Disponível em: <http://www.ceamse.gov.ar/wp-content/uploads/2012/06/1854.pdf>. Acesso em: 27 jun. 2017.

CEAMSE. Coordinación Ecológica Área Metropolitana Sociedad del Estado. **Decreto n. 639/007/ Lei n. 1854**. Ciudad Autonoma de Buenos Aires, Argentina: 2007. Disponível em: <http://www.ceamse.gov.ar/wp-content/uploads/2012/06/Decreto639-760.pdf>. Acesso em: 27 jun. 2017.

CEAMSE. **Coordinación Ecológica Área Metropolitana Sociedad del Estado**. Ciudad Autonoma de Buenos Aires: 2018. (Material com acesso restrito).

CEMPRE. Compromisso Empresarial para Reciclagem. Ciclossoft, 2016. **Radiografando a Coleta Seletiva**. Disponível em: <http://cempre.org.br/ciclossoft/id/8>. Acesso em: 28 de ago. 2018.

CHENG, V.; NG, E.; GIVONI, B. Effect of Envelope Colour and Thermal Mass on Indoor Temperatures in Hot Humid Climate. **Solar Energy**, v.78, n.1, p. 528- 534, 2005.

CIUDAD AUTONOMA DE BUENOS AIRES. Ley n° 1854, de 24 de noviembre de 2005. **Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos**. Disponível em: https://www.buenosaires.gob.ar/areas/leg_tecnica/sin/normapop09.php?id=81508&qu=c&cp&rl=1&rf&im&mot_toda&mot_frase&mot_alguna. Acesso em: 28 jan. 2019.

CIUDAD AUTONOMA DE BUENOS AIRES. Ley n° 4859, diciembre de 2013. **Modifica Ley n° 1854/05 Art. 1 de la Ley 4859**, modifica el Capítulo IV de la Ley 1854, artículos 11 a 15. Disponível em: https://www.buenosaires.gob.ar/areas/leg_tecnica/sin/normapop09.php?id=237251&qu=c&ft=0&cp&rl=1&rf&i. Acesso em: 28 jan. 2019.

DORNELLES, K.A. **Absortância solar de superfícies opacas**: métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e pva. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação da Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, São Paulo, 2008.

DORNELLES, K. A. et al. **Desempenho térmico de tintas brancas com microesferas cerâmicas para uso em coberturas de edifícios**. ENCAC-ELACAC, 2011.

ENERGYPLUS. **United States Department of Energy**. Disponível em: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>. Acesso em: 30 set. 2018.

FERREIRA, T. M. A.; NEVES, L. S.; DIAS F. M. Correlação entre as propriedades físicas e mecânicas de tijolos produzidos com lama ferruginosa retirada do rio doce – MG. *In: 23º CBECiMat. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*. 04 a 08 de Novembro de 2018, Foz do Iguaçu, 2018.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto térmico**. 6ª ed. São Paulo: Nobel, 2001.

GHISI, E.; GOSCH, S.; LAMBERTS, R. Electricity end-uses in the residential sector of Brazil. **Energy Policy**, v. 35, p. 4107-4120, 2007.

GIVONI, B. Confort, climate analysis and building design guidelines. **Energy and Buildings**, v. 18, p. 11-23, 1992.

GIVONI, B. **Passive and low energy cooling of buildings**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1994.

GOMES, C. S. M. H.; OLIVEIRA, C.; BRESCIANI, P. L.; PEREIRA, S. R. Política nacional de resíduos sólidos: perspectivas de cumprimento da lei 12.305/2010 nos municípios brasileiros, municípios paulistas e municípios da região do abc. **Rev. Adm. UFSM**, Santa Maria, v. 7, Edição Especial, p. 93-110, nov. 2014.

GRIGOLETTI, G. de C. **Caracterização de impactos ambientais de indústrias de cerâmica vermelha do estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 2001. Disponível em: <http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/1753/000307557.pdf?sequence=1>. Acesso em: 25 jan. 2019.

GUTIÉRREZ, R. A. (Ed.). **Avances hacia la gestión integral de residuos en la Región Metropolitana de Buenos Aires**. Buenos Aires: EPyG/UNSAM, 2015.

INTI. **Instituto Nacional de Tecnologia Industrial**. Argentina, 2015. (Material com acesso restrito).

KOWALTOWSKI, D.C.C.K.; LABAKI, L.C.O. **Projeto Arquitetônico e o Conforto Ambiental: Necessidade de uma Metodologia**. São Paulo: Universidade Estadual de Campinas, 1993.

LAMBERTS, R. et al. (Ed.). **Casa eficiente: Bioclimatologia e desempenho térmico**. Florianópolis: UFSC/LabEEE. 2010. v.1.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F.O.R. **Eficiência energética na arquitetura**. 3ªed. São Paulo: Editora Eletrobras/Procel, 2014.

MANIOGLU, G.; YILMAZ, Z. Economic Evaluation of the Building Envelope and Operation Period of Heating System in Terms of Thermal Comfort. **Energy and Buildings**, v.38, n.1, p. 266-272, 2006.

MARQUES, T.H.T. **Influência das propriedades térmicas da envolvente opaca no desempenho de habitações de interesse social em São Carlos, SP.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2013.

MAZZAFERRO, L.; SILVA, A.S.; GHISI, E. Influência de elementos construtivos do envelope no desempenho térmico de edificações unifamiliares. *In: Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis.* Portugal, 2014.

MELO, A.P; LAMBERTS, R. **Análise da influência do desempenho térmico dos fechamentos opacos através do balanço térmico.** ENTAC, 2008.

MELO, M; LAMBERTS R; VERSAGE, R; SORGATO M. **Manual de simulação computacional de edifícios naturalmente ventilados no programa EnergyPlus.** Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil. Florianópolis, 2008.

MIRANDA, L. F. R.; ANGULO, S. C.; CARELI, E. D. A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008. **Ambiente Construído**, 9. Antac. Ed. jan./mar., 2009. Porto Alegre, 2009.

NORONHA, L. L.; MEDEIROS, A, F.; BARBOSA, N.; BEZERRA, U.T. Gesso e resíduos de saco de cimento: propriedades térmicas de elementos construtivos para forro. *In: Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis.* Portugal, 2014.

NUNES, M. B. Impactos ambientais na indústria da cerâmica vermelha. Dossiê técnico. **Rede de Tecnologia e Inovação- REDETEC**, Rio de Janeiro, 2012.

OLIVEIRA, D. R. **Classificação do desempenho térmico da envoltória de habitação popular em concreto armado.** Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2015.

PALMA, L.; NASCIMENTO, F. L. A aceitação de produtos que utilizam matéria-prima reciclada em sua composição. **REAd-Ed 48.** Vol 11, n. 6, nov-dic. Porto Alegre, 2005.

PEREIRA, D. C. A influência do envelope no desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares ocupadas e ventiladas naturalmente. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

PRADO FILHO, R. H. Impactos Sociais e Ambientais das Olarias. **Qualidade Online.**12 Outubro, 2014. Disponível em: <https://qualidadeonline.wordpress.com/2014/10/12/impactos-sociais-e-ambientais-das-olarias/>. Acesso em: 16 nov. 2018.

REBELO, C. D. A. **Avaliação do desempenho higrotérmico de coberturas jardim.** Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia do Porto. Portugal, 2013.

ROCHA, D. L. Uma análise da coleta seletiva em Teixeira de Freitas – Bahia. **Revista Caminhos de Geografia**, 13(44),2012. p. 140-155.

SANTOS JR, E. L.; LIED, E. B.; ACERGO, C. V.; FAQUIM, V.; FRARE, P. R.; MOREJON, C. F. M. Avaliação de Impacto Ambiental da Indústria Cerâmica Estrutural como Ferramenta

da Produção Mais Limpa. *In: 6th International Workshop Advances in Cleaner Production*. Academic Work, São Paulo, 2017.

SANTOS, J. C. P.; KOTHE, K.K.; MOHAMAD, G.; VAGHETTI, M. A.; RIZZATTI, E. **Comportamento térmico de fechamentos em alvenaria estrutural para a Zona Bioclimática 2 brasileira** revista *Matéria*, v.20, n.4, pp. 1030 – 1047, 2015.

SANTOS M.; NASCIMENTO, F. P.; JUNIOR, R. L.; REIS, F. M.; WALKER, A. R. Utilização de Garrafas PET na Produção de Tijolos de Concreto: uma Proposta Sustentável para a Indústria da Construção Civil. *In: XIV SEGET*. Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia. 26 e 27 out. Rio de Janeiro, 2017.

SANTOS, T.; ROVARIS, N. R. S. Cenário brasileiro da gestão dos resíduos sólidos urbanos e coleta seletiva. Simpósio Internacional de Gestão de Projetos, Inovação e Sustentabilidade, **Anais do VI SINGEP**, São Paulo, 2017.

SCARDUELLI, F. A.; LAMBERTS, R.; WESTPHAL, F. S. Aplicação do método BESTEST no EnergyPlus para treinamento em simulação do desempenho térmico de edificações. **ENCAC-ELACAC**, 2005.

SELUR. Sindicato das Empresas de Limpeza Urbana. **Gestão da Limpeza Urbana Um investimento para o futuro das cidades**, Abril de 2010. Disponível em: <https://selur.org.br/publicacoes/>Acesso em: 03 fev. 2019.

SIMÕES, N.; COELHO, D.; MARTINS, S.; TADEU, A. Influência das Juntas de Argamassa no Desempenho Térmico de Paredes de Alvenaria. *In: 3 ° Congresso Português de Argamassas de Construção*. Lisboa, 2010.

SORGATO, M. J. et al. **Nota técnica referente à avaliação para a norma de desempenho NBR 15575 em consulta pública**. Universidade Federal de Santa Catarina. LABEEE - Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, 2012.

SOUSA, J. R. de. **Influência da utilização do lixo orgânico urbano como fonte de biofertilizante e composto para o desenvolvimento de ipê-mirim** (*Tecoma stans*) com duas lâminas de irrigação. 2012. Tese (doutorado). Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal, 2012. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/100800>. Acesso em: 25 jan. 2019.

SOUZA, A. P. B. de. **Problemática dos resíduos sólidos urbanos dispostos em terrenos baldios na cidade de Campina Grande** – Paraíba. 2011. 80 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Naturais. Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2011.

SOUZA R, C. **Avaliação do desempenho térmico de vedações em blocos de concreto produzidos com lã de rocha**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2017.

TRIMBLE. **Transforming the way the world works**. Disponível em: <https://www.trimble.com/Buildings/SketchUp/>. Acesso em: 30 set. 2018.

WEBER, F. S. et al. **Desenvolvimento de um modelo equivalente de avaliação de propriedades térmicas para a elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos brasileiros para o uso no programa EnergyPlus.** Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico Departamento de Engenharia Civil, 2017.

WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R. **Simulação térmica e energética de edificações a partir de dados climáticos simplificados:** validação através do método BESTEST. Ambiente Construído, Porto Alegre, 2004.

YILMAZ, Z. **Evaluation of Energy Efficient Design Strategies for Different Climatic Zones: Comparison of Thermal Performance of Buildings** in Temperate-Humid and Hot-Dry Climate. Energy and Buildings, v.39, n.1, 2007.

ZUBILLAGA, M.S. El destino de los residuos sólidos urbanos de la ciudad de Buenos Aires. Breve diagnóstico y algunas alternativas. **Rev Agronomía y ambiente.** Facultad de Agronomía, Universidade de Buenos Aires, 2013.

APÊNDICE A - CÁLCULO DAS PROPRIEDADES TERMO FÍSICAS DOS SISTEMAS DE PAREDE COM TIJOLO CONVENCIONAL MACIÇO E TIJOLO ECOLÓGICO

Foram calculadas as propriedades termo físicas de dois sistemas de parede. Um composto de tijolo convencional maciço com argamassa de assentamento e um composto de tijolo ecológico com argamassa de assentamento.

1) SISTEMA DE PAREDE EQUIVALENTE DE TIJOLOS ECOLÓGICOS SEM ARGAMASSA DE REVESTIMENTO E PINTURA BRANCA.

Tabela 16- Dimensões e propriedades termo físicas dos materiais constituintes do sistema de parede equivalente (tijolo ecológico + argamassa de assentamento).

Variáveis	Legenda	Valores	Unidades
e eco	Espessura do tijolo ecológico	0,12	m
heco	Altura do tijolo ecológico	0,05	m
Leco	Comprimento do tijolo ecológico	0,25	m
Aeco	Área do tijolo ecológico	0,0125	m ²
δeco	Condutividade do tijolo ecológico	0,43	W/(m K)
Ceco	Calor específico do tijolo ecológico	1,00	kJ/(kg K)
peco	Densidade do tijolo ecológico	1408	kg/m ³
Reco	Resistencia do tijolo ecológico	0,28	m ² K/W
Rsint	Resistencia térmica superficial interna	0,13	m ² K/W
Rsext	Resistencia térmica superficial externa	0,04	m ² K/W
α	Absortância a radiação solar para superfícies externas.	0,70	%
Fseco	Fator solar do tijolo ecológico		%
φeco	Atraso térmico do tijolo ecológico		horas
Ueco	Transmitância do tijolo ecológico	3,58	W/(m ² K)
e ass	Espessura da argamassa de assentamento	0,01	m
Lass	Comprimento da camada de argamassa de assentamento	0,12	m
Aass	Área da argamassa de assentamento	0,0061	m ²
δass	Condutividade da argamassa de assentamento	1,15	W/(m K)
Cass	Calor específico da argamassa de assentamento	1,00	kJ/(kg K)

Variáveis	Legenda	Valores	Unidades
R _{ass}	Resistencia da camada de assentamento	0,10	m ² K/W
U _{ass}	Transmitancia argamassa de assentamento	9,58	W/(m ² K)
F _{sass}	Fator solar da argamassa de assentamento		%
φ _{ass}	Atraso térmico da argamassa de assentamento		horas

Fonte: A autora.

Como no programa de simulação *EnergyPlus*, o sistema de parede é modelado por camadas com propriedades uniformes é necessário calcular as propriedades termo físicas da combinação de tijolo com argamassa. O circuito térmico substituto são duas resistências em paralelo e a resistência total é calculada por (índice a para argamassa, t para tijolo):

$$\frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_t \frac{A_t}{A_{tot}}} + \frac{1}{R_a \frac{A_a}{A_{tot}}} \rightarrow R_{tot} = \frac{1}{\frac{A_{tot}}{R_t A_t} + \frac{A_{tot}}{R_a A_a}} \quad \text{Equação (16)}$$

$$R_{tot} = \frac{1}{\frac{0,0186}{0,28 \cdot 0,0125} + \frac{0,0186}{0,10 \cdot 0,0061}}$$

$$R_{tot} = 0,13 \text{ m}^2 \text{ K/W}$$

A transmitância térmica será:

$$U_{tot} = \frac{1}{R_{tot}} \rightarrow U = \frac{1}{0,13} \quad \text{Equação (8)}$$

$$U_{tot} = 7,62 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$$

As demais propriedades termo físicas como densidade e calor específico são calculados pela ponderação da área:

$$\rho_{tot} = \frac{A_t \rho_t}{A_{tot}} + \frac{A_a \rho_a}{A_{tot}}; \quad c_{p,tot} = \frac{A_t c_{p,t}}{A_{tot}} + \frac{A_a c_{p,a}}{A_{tot}} \quad \text{Equação (17)}$$

$$\rho_{tot} = \frac{0,0125.1408}{0,0186} + \frac{0,0061.2000}{0,0186}; \quad c_{p,tot} = \frac{0,0125.1,00}{0,0186} + \frac{0,0061.1,00}{0,0186}$$

$$\rho_{tot} = 1602,15 \frac{kg}{m^3}; \quad c_{p,tot} = 1,00 kJ/(kg K)$$

A seguir apresentam-se todos os valores das dimensões e propriedades físicas da parede

Tabela 17 – Dimensões e propriedades termo físicas da combinação tijolo com argamassa de assentamento.

Variáveis	Propriedade	Valores	Unidades
Atot	Altura total	0,06	m
etot	Espessura total	0,12	m
Ltot	Comprimento total	0,26	m
Área tot	Área total	0,0186	m ²
%ass	Percentagem Argamassa	67	%
ρtot	Densidade total	1602,2	kg/m ³
δtot	Condutividade total	0,91	W/(m K)
Ctot	Calor específico total	1,00	kJ/(kg K)
Rtot1	Resistência total	0,13	m ² K/W
Utot1	Transmitância total	7,62	W/(m ² K)

Fonte: NBR 15270-1 (ABNT, 2017). Adaptado.

2) SISTEMA DE PAREDE EQUIVALENTE DE TIJOLOS ECOLÓGICOS COM ARGAMSSA DE REVESTIMENTO E PINTURA BRANCA.

Aplica-se a Equação 21 para calcular a resistência do reboco de dentro (Rrebd) e a resistência do reboco de fora (Rrebf).

$$Rrebd = \frac{erebd}{\delta reb}; \quad Rrebf = \frac{A_t rebf}{\delta reb} \quad \text{Equação (21)}$$

$$Rrebd = \frac{0,025}{1,15}; \quad Rrebf = \frac{0,025}{1,15}$$

$$Rrebd = 0,022 \frac{m^2 K}{W}; \quad Rrebf = 0,022 m^2 K/W$$

Logo, com o valor obtido da Rtot aplica-se a Equação 22.

$$Rparede = Rrebd + Rrebf + Rtot \quad \text{Equação (22)}$$

$$R_{parede} = 0,022 + 0,022 + 0,13$$

$$R_{parede} = 0,175 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$U_{parede} = \frac{1}{R_{parede}} \rightarrow U = \frac{1}{0,175}$$

$$U_{parede} = 5,72 \text{ W/(m K)}$$

$$R_{tot} = R_{sint} + R_{tot,1} + R_{sext} \quad \text{Equação (23)}$$

$$R_{tot} = 0,13 + 0,175 + 0,04$$

$$R_{tot} = 0,35 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$U_{tot} = \frac{1}{R_{tot}} \rightarrow U = \frac{1}{0,35} \quad \text{Equação (24)}$$

$$U_{tot} = 2,90 \text{ W/(m K)}$$

Tabela 18- Dimensões e propriedades termo físicas da argamassa de revestimento.

Variáveis	Propriedade	Valores	Unidades
erebd	Espessura reboco dentro	0,025	m
erebf	Espessura reboco fora	0,025	m
δreb	Condutividade reboco	1,15	m
Rrebod	Resistência dentro	0,022	m ²
Rreb f	Resistencia fora	0,022	%
Rparede	Resistencia parede	0,175	kg/m ³
Uparede	Transmitancia parede	5,72	W/(m K)
Rtot ₂	Resistencia total	0,34	
Utotal ₂	Transmitancia total		m ² K/W

Fonte: A autora.

Tabela 19- Comparação propriedades termo físicas para diferentes sistemas.

Símbolo	Legenda da combinação	Resistência m ² K/W	Transmitância W/(m ² K)
R P1	Tijolo ecológico convecção	0,45	2,23
R P2	Tijolo ecológico + assentamento + convecção	0,30	3,32
R P3	Tijolo ecológico +reboco+ convecção	0,49	2,03
R tot	Tijolo ecológico + assentamento +reboco+ convecção	0,35	2,90

Fonte: A autora.

3) SISTEMA DE PAREDE EQUIVALENTE DE TIJOLOS MACIÇOS CERÂMICOS SEM ARAGAMASSA DE REVESTIMENTO E PINTURA BRANCA

Tabela 20 - Dimensões e propriedades termo físicas dos materiais constituintes do sistema de parede equivalente (tijolo ecológico + argamassa de assentamento).

Variáveis	Legenda	Valores	Unidades
e eco	Espessura do tijolo ecológico	0,10	m
heco	Altura do tijolo ecológico	0,06	m
Leco	Comprimento do tijolo ecológico	0,22	m
Aeco	Área do tijolo ecológico	0,0132	m ²
δeco	Condutividade do tijolo ecológico	0,90	W/(m K)
Ceco	Calor específico do tijolo ecológico	0,92	kJ/(kg K)
peco	Densidade do tijolo ecológico	1600	kg/m ³
Reco	Resistencia do tijolo ecológico	0,11	m ² C/W
Rsint	Resistencia térmica superficial interna	0,9	m ² K/W
Rsext	Resistencia térmica superficial externa	0,04	m ² K/W
α	Absortância a radiação solar para superfícies externas.	0,70	%
Fseco	Fator solar do tijolo ecológico		%
φeco	Atraso térmico do tijolo ecológico		horas
Ueco	Transmitância do tijolo ecológico		W/(m ² K)
e ass	Espessura da argamassa de assentamento	0,01	m
Lass	Comprimento da camada de argamassa de assentamento	0,12	m
Aass	Área da argamassa de assentamento	0,0071	m ²
δass	Condutividade da argamassa de assentamento	1,15	W/(m K)
Cass	Calor específico da argamassa de assentamento	1,00	kJ/(kg K)
pass	Densidade da argamassa de assentamento	2000	kg/m ³
Rass	Resistencia da camada de assentamento	0,09	m ² K/W
Uass	Transmitancia argamassa de assentamento	11,5	W/(m ² K)

Fonte: A autora.

Como no programa de simulação *EnergyPlus*, o sistema de parede é modelado por camadas com propriedades uniformes, é necessário calcular as propriedades termo físicas da combinação de tijolo com argamassa. O circuito térmico substituto são duas resistências em paralelo e a resistência total é calculada por (índice a para argamassa, t para tijolo):

$$\frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_t \frac{A_t}{A_{tot}}} + \frac{1}{R_a \frac{A_a}{A_{tot}}} \rightarrow R_{tot} = \frac{1}{\frac{A_{tot}}{R_t A_t} + \frac{A_{tot}}{R_a A_a}} \quad \text{Equação (136)}$$

$$R_{tot} = \frac{1}{\frac{0,0203}{0,11 \cdot 0,0132} + \frac{0,0203}{0,10 \cdot 0,0071}}$$

$$R_{tot} = 0,10 m^2 K/W$$

A transmitância térmica será:

$$U_{tot} = \frac{1}{R_{tot}} \rightarrow U = \frac{1}{0,10} \quad \text{Equação (8)}$$

$$U_{tot} = 9,87 W/(m^2 K)$$

As demais propriedades termo físicas como densidade e calor específico são calculadas pela ponderação da área:

$$\rho_{tot} = \frac{A_t \rho_t}{A_{tot}} + \frac{A_a \rho_a}{A_{tot}}; \quad c_{p,tot} = \frac{A_t c_{p,t}}{A_{tot}} + \frac{A_a c_{p,a}}{A_{tot}} \quad \text{Equação (17)}$$

$$\rho_{tot} = \frac{0,0132 \cdot 1600}{0,0203} + \frac{0,0071 \cdot 2000}{0,0203}; \quad c_{p,tot} = \frac{0,0125 \cdot 0,92}{0,0203} + \frac{0,0061 \cdot 0,92}{0,0203}$$

$$\rho_{tot} = 1739,90 \frac{kg}{m^3}; \quad c_{p,tot} = 0,95 kJ/(kg K)$$

A seguir apresentam-se todos os valores das dimensões e propriedades físicas da parede.

Tabela 21 - Dimensões e propriedades termo físicas da combinação tijolo com argamassa de assentamento.

Variáveis	Propriedade	Valores	Unidades
Atot	Altura total	0,07	m
etot	Espessura total	0,10	m
Ltot	Comprimento total	0,29	m
Área tot	Área total	0,0203	m ²
%ass	Porcentagem Argamassa	65	%
ρtot	Densidade total	1739,90	kg/m ³
δtot	Condutividade total	0,99	W/(m K)
Ctot	Calor específico total	0,95	kJ/(kg K)
Rtot1	Resistência total	0,10	m ² K/W
Utot1	Transmitância total	9,87	W/(m ² K)

Fonte: A autora.

4) SISTEMA DE PAREDE EQUIVALENTE DE TIJOLOS MACIÇOS CERÂMICOS COM ARGAMASSA DE REVESTIMENTO E PINTURA BRANCA

$$R_{rebd} = \frac{erebd}{\delta_{reb}}; R_{rebf} = \frac{A_t rebf}{\delta_{reb}} \quad \text{Equação (21)}$$

$$R_{rebd} = \frac{0,025}{1,15}; R_{rebf} = \frac{0,025}{1,15}$$

$$R_{rebd} = 0,022 \frac{m^2 K}{W}; R_{rebf} = 0,022 m^2 K/W$$

$$R_{parede} = R_{rebd} + R_{rebf} + R_{tot} \quad \text{Equação (22)}$$

$$R_{parede} = 0,022 + 0,022 + 0,10$$

$$R_{parede} = 0,145 m^2 K/W$$

$$U_{parede} = \frac{1}{R_{parede}} \rightarrow U = \frac{1}{0,145} \quad \text{Equação (23)}$$

$$U_{parede} = 6,91 W/(m K)$$

Equação (24)

$$R_{tot} = R_{sint} + R_{tot,1} + R_{sext}$$

$$R_{tot} = 0,13 + 0,145 + 0,04$$

$$R_{tot} = 0,31 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$U_{tot} = \frac{1}{R_{tot}} \rightarrow U = \frac{1}{0,31}$$

$$U_{tot} = 3,18 \text{ W/(m K)}$$

Tabela 22- Dimensões e propriedades termo físicas da argamassa de revestimento.

Variáveis	Propriedade	Valores	Unidades
erebd	Espessura reboco dentro	0,025	m
erebf	Espessura reboco fora	0,025	m
δreb	Condutividade reboco	1,15	m
Rrebod	Resistência dentro	0,022	m ²
Rrebf	Resistencia fora	0,022	%
Rparede	Resistencia parede	0,145	kg/m ³
Uparede	Transmitancia parede	6,91	W/(m K)
Rtot2	Resistencia total	0,31	kg/m ³
Utotal2	Transmitancia total	3,18	m ² K/W

Fonte: A autora.

Para comparação foram calculadas ainda as propriedades de diferentes paredes compostas por tijolos com e sem argamassa de assentamento e com e sem reboco de 2,5 cm dos dois lados incluindo a resistência de convecção:

Para resistência térmica superficial interna considerou-se 0,13 m²K/W e para a resistência térmica superficial externa 0,04 m²K/W

A resistência total é calculada com base da Equação 25:

$$R_{p1} = R_{sint} + R_{eco} + R_{sext} \quad \text{Equação (25)}$$

$$R_{p1} = 0,04 + 0,11 + 0,13$$

$$R_{p1} = 0,28 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$R_{p2} = R_{sint} + R_{tot} + R_{sext} \quad \text{Equação (26)}$$

$$R_{p2} = 0,04 + 0,10 + 0,13$$

$$R_{p2} = 0,27 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$R_{p3} = R_{sint} + R_{rebod} + R_{tot,1} + R_{rebof} + R_{sext} \quad \text{Equação (27)}$$

$$R_{p3} = 0,04 + 0,022 + 0,11 + 0,022 + 0,13$$

$$R_{p3} = 0,32m^2K/W$$

Tabela 23 - Comparação propriedades termo físicas para diferentes sistemas.

Símbolo	Legenda da combinação	Resistência m ² K/W	Transmitância W/(m ² K)
R P1	Tijolo maciço cerâmico + convecção	0,28	3,56
R P2	Tijolo maciço cerâmico + assentamento + convecção	0,27	2,23
R P3	Tijolo maciço cerâmico +reboco+ convecção	0,32	3,08
R tot	Tijolo maciço cerâmico + assentamento +reboco+ convecção	0,31	3,18

Fonte: A autora.

A) Cálculo do atraso térmico por meio da NBR 15220-2 (ABNT, 2005b)

O cálculo do atraso térmico de um elemento heterogêneo é determinado na norma NBR 15220-2 (ABNT,2005) por meio da Equação (11):

$$\omega = 1,382 \cdot Rt\sqrt{B1} + B2 \text{ horas} \quad \text{Equação (11)}$$

Onde:

Rt: é a resistência térmica de superfície a superfície do componente;

B1: é dado pela Equação (12);

B1: é dado pela Equação (13);

$$B1 = 0,226 \cdot \frac{Bo}{Rt} \quad \text{Equação (12)}$$

Onde: Bo é dado pela expressão

$$Bo = Ct - Ctext \quad \text{Equação (13)}$$

Onde:

Ct é a capacidade térmica total do componente;

C_{text} é a capacidade térmica da camada externa do componente.

$$B2 = 0,205x \left(\frac{\lambda \cdot \rho \cdot c \cdot ext}{Rt} \right) x Rext \left(\frac{Rt - Rext}{10} \right) \quad \text{Equação (14)}$$

B) Cálculo da capacidade térmica por meio da NBR 15220-2 (ABNT, 2005b)

C) O cálculo da capacidade térmica (C) está expressado na Equação 9:

$$CT = \sum e_i \cdot c_i \cdot \rho_i \quad \text{Equação (9)}$$

Onde:

λ =condutividade térmica (W/m.K),

ρ =densidade (kgm³),

c =calor específico (kJkgK).

Portanto, a capacidade térmica vai depender da espessura da camada (e), da densidade da mesma (ρ) e do calor específico (c).

Segundo a norma NBR 15220 (ABNT, 2005), “a capacidade térmica de um componente plano constituído de camadas homogêneas e não homogêneas perpendiculares ao fluxo de calor é calculada pela Equação (10)”:

$$Ct = \frac{Aa + Ab \dots An}{\frac{Aa}{Ca} + \frac{Ab}{Cb} \dots \frac{An}{Cn}} \quad \text{Equação (10)}$$

Onde:

CTa , CTb , ..., CTn : são as capacidades térmicas do componente para cada seção (a, b, ..., n); Aa , Ab , ..., An : são as áreas de cada seção.

D) Cálculo do fator solar por meio da NBR 15220-2 (ABNT,2005b)

O fator solar (FS) de materiais opacos, segundo a NBR 15220-1 (ABNT,2005b, p.2), “é quociente da taxa de radiação solar transmitida através de um componente opaco pela taxa da

radiação solar total incidente sobre a superfície externa do mesmo”. O fator solar é determinado pela Equação (15):

$$FS = 4 \cdot U \cdot \alpha \quad \text{Equação (15)}$$

Foram utilizados os seguintes fatores de absorvância no cálculo do fator solar.

Tabela 24 - Valores de absorvância para os materiais utilizados.

Material	Absorvância
Tijolo	0,70
Tijolo Eco	0,70
Argamassa de revestimento (reboco)	0,40
Tinta branca	0,20

Fonte: NBR 15270-1 (ABNT, 2017a). Adaptado.

Tabela 25- resultados dos cálculos extraídos do Excel.

	Tijolo Maciço cerâmico	Tijolo Ecológico
Altura m	0,06	0,05
Largura m	0,22	0,25
Espessura m	0,1	0,12
Área m ²	0,0132	0,0125
Densidade kg/m ³	1600	1408
Condutividade W/mK	0,9	0,43
cp kJ/(kg K)	0,92	1
Absorvância	0,725	0,7
Resistencia m ² K/W	0,11	0,28
Transmitância W/(m ² K)	9,00	3,58
Capacidade térmica kJ/(m ² K)	147,20	168,96
Atraso térmico (apenas tijolo) h	2,95	5,00
Altura Argamassa m	0,01	0,01
Densidade kg/m ³	2000	2000
Condutividade W/mK	1,15	1,15
cp kJ/(kg K)	1	1
Absorvância	0,725	0,725
Resistencia m ² K/W	0,09	0,10
Capacidade térmica kJ/(m ² K)	200,00	240,00
Altura (incl Argamassa) m	0,07	0,06
Largura (incl Argamassa) m	0,29	0,31
Área (incl Argamassa) m ²	0,0203	0,0186
Área Argamassa m ²	0,0071	0,0061
Porcentagem Argamassa	0,65	0,67

Resistencia (incl Argamassa) m²K/W	0,10	0,13
Condutividade W/(mK)	0,99	0,91
Transmitância W/(m²K)	9,87	7,62
cp kJ/(kg K)	0,95	1,00
Capacidade térmica kJ/(m²K)	162,17	187,13
Atraso térmico tijolo, Assentamento h	2,95	3,61
Argamassa Revestimento		
Espessura dentro m	0,025	0,025
Espessura fora m	0,025	0,025
Condutividade W/mK	1,15	1,15
Resistencia dentro m²K/W	0,022	0,022
Resistencia fora m²K/W	0,022	0,022
Resistencia parede <i>sem</i> assentamento m²K/W	0,155	0,323
Resistencia parede <i>com</i> assentamento m²K/W	0,145	0,175
Transmitância W/(m²K)	6,91	5,72
Resistencia Convecção fora m²K/W	0,04	0,04
Resistencia Convecção dentro m²K/W	0,13	0,13
Resistencia total m²K/W	0,31	0,34
Transmitância W/(m²K)	3,18	2,90
Capacidade térmica dentro kJ/(m²K)	50	50
Capacidade térmica fora kJ/(m²K)	50	50
Atraso térmico (apenas reboco, dentro) h	0,759	0,759
Atraso térmico (apenas reboco, fora) h	0,759	0,759
Absortância	0,4	0,4
Absortância tinta branca	0,2	0,2
 Cálculo igual norma (reboco + tijolo em série, paralelo ao reboco + argamassa)		
Resistencia Reboco + Tijolo	0,15	0,32
Resistencia Reboco + Argamassa	0,13	0,15
Resistencia Parede	0,15	0,23
Transmitância	6,89	4,30
Resistencia Convecção fora	0,04	0,04
Resistencia Convecção dentro	0,13	0,13
Resistencia total	0,32	0,40
Transmitância	3,17	2,48
Para cálculo do atraso térmico		
B0 Tijolo + Argamassa	0,00	0,00
B1 Tijolo + Argamassa	0,00	0,00
B2 Tijolo + Argamassa	404,85	374,69
B1 Tijolo + Reboco	288,29	153,42
B2 Tijolo + Reboco	25,79	0,00
B0 Tijolo + Argamassa + Reboco	213,41	227,53

B1 Tijolo + Argamassa + Reboco	333,21	294,20
B2 Tijolo + Argamassa + Reboco	30,74	17,36

Fonte: A autora.