



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO SERTÃO
PERNAMBUCANO
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL
CAMPUS SERRA TALHADA**

MATHEUS GOMES DA SILVA

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE TIJOLOS ECOLÓGICOS
VAZADOS EM SERRA TALHADA – PE**

SERRA TALHADA

2023

MATHEUS GOMES DA SILVA

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE TIJOLOS ECOLÓGICOS
VAZADOS EM SERRA TALHADA – PE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, campus Serra Talhada, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Oto Lima De Albuquerque Neto.

Coorientador: Prof. Me. Elivelthon Carlos do Nascimento.

SERRA TALHADA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

S586 Silva, Matheus Gomes da.

Avaliação do desempenho térmico de tijolos ecológicos vazados em Serra Talhada – PE /
Matheus Gomes da Silva. - Serra Talhada, 2023.
80 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) -Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, Campus Serra Talhada, 2023.
Orientação: Prof. Msc. Oto Lima De Albuquerque Neto.
Coorientação: Msc. Elevelthon Carlos do Nascimento.

1. Engenharia civil. 2. Conforto térmico. 3. Eficiência energética. 4. EnergyPlus. 5. Tijolo
solo-cimento. I. Título.

CDD 624

MATHEUS GOMES DA SILVA

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE TIJOLOS ECOLÓGICOS
VAZADOS EM SERRA TALHADA – PE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, Campus Serra Talhada, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: 15 de Dezembro de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Oto Lima de
Albuquerque
Neto:07962132400

Assinado de forma digital por
Oto Lima de Albuquerque
Neto:07962132400
Dados: 2023.12.19 22:26:17
-03'00'

Prof. Me. Oto Lima De Albuquerque Neto
Orientador (IFSertãoPE – Campus Serra Talhada)



Documento assinado digitalmente
ELIVELTHON CARLOS DO NASCIMENTO
Data: 19/12/2023 19:21:56-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Me. Elivelthon Carlos do Nascimento
Coorientador e Examinador Interno (IFSertãoPE – Campus Serra Talhada)



Documento assinado digitalmente
KALLINY KELLY DA SILVA CUNHA
Data: 19/12/2023 15:51:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profª. Me. Kalliny Kelly da Silva Cunha
Examinadora Interna (IFSertãoPE – Campus Serra Talhada)



Documento assinado digitalmente
JAILLY MOREIRA XAVIER
Data: 19/12/2023 16:07:29-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profª. Me. Jailly Moreira Xavier
Examinadora Externa (Centro Universitário FIS – UniFIS)

AGRADECIMENTOS

A Deus por minha vida, que com sua infinita misericórdia me ajudou a chegar até aqui.
Sem Ele nada seria possível;

A minha família, meus pais e minhas irmãs, por todo incentivo e apoio incondicional;

Aos amigos da turma, essa trajetória não teria sido a mesma sem vocês, sempre lembrarei de todos;

Aos meus orientadores por toda ajuda e empenho;

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

EPÍGRAFE

“Provai e vede que o Senhor é bom; bem-aventurado o homem que nele confia.”

Salmos 34:8

RESUMO

Em lugares com clima caracterizado por altas temperaturas e baixa umidade, garantir o conforto térmico em edificações é um desafio para a engenharia civil. A eficiência energética está intrinsecamente ligada ao desempenho térmico, na arquitetura refere-se à capacidade da edificação oferecer conforto térmico, visual e acústico, com o menor consumo de energia possível. A avaliação do desempenho térmico envolve analisar como a edificação responde a fatores como temperatura, umidade, ventilação, insolação e ação dos ocupantes. Os materiais utilizados nas vedações podem influenciar suas características de isolamento térmico, materiais leves e vazados tendem a conduzir menos calor que os mais densos. No âmbito da construção civil, há uma busca por materiais inovadores que causem o menor impacto ambiental possível e promovam conforto térmico e eficiência energética. O principal objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho térmico de tijolos ecológicos vazados na cidade de Serra Talhada-PE, abordando aspectos específicos como o cálculo da transmitância térmica das paredes para avaliação do desempenho segundo parâmetros estabelecidos pela NBR 15575-4:2021, e a realização de simulação computacional, com o software EnergyPlus®, em uma Habitação de Interesse Social (HIS), situada na zona bioclimática 7, construída com tijolos ecológicos, tijolos maciços e blocos cerâmicos. Os resultados evidenciaram que os tijolos ecológicos atendem bem os requisitos estabelecidos pela norma para transmitância térmica que foi de $0,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ para uma condutividade de $0,9 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. O tijolo ecológico destaca-se por seus vazados que proporcionam uma maior resistência térmica para a parede e redução da sua transmitância. A simulação computacional revelou as melhorias no desempenho térmico que as paredes com tijolos ecológicos proporcionaram para a HIS, como um aumento de 11,4% no percentual de horas de ocupação da Unidade Habitacional (UH) dentro da faixa de temperatura operativa (PHFT_{UH}), uma redução de $2,2^\circ\text{C}$ na temperatura operativa anual máxima da UH (Tomáx_{UH}) e uma diminuição de $2,096,8 \text{ kWh/ano}$ (35%) na carga térmica total da UH (CgTT_{UH}) em comparação com o modelo de referência com paredes de concreto. A HIS com tijolos ecológicos atendeu ao nível mínimo de desempenho, na condição de ventilação natural. Os resultados obtidos evidenciam os tijolos ecológicos como uma escolha construtiva vantajosa, promovendo eficiência energética e conforto térmico em Serra Talhada-PE.

Palavras-chave: conforto térmico; eficiência energética; EnergyPlus; tijolo solo-cimento; transmitância térmica.

ABSTRACT

In places characterized by high temperatures and low humidity, ensuring thermal comfort in buildings poses a challenge for civil engineering. Energy efficiency is intrinsically linked to thermal performance in architecture, referring to the building's ability to provide thermal, visual, and acoustic comfort with the least possible energy consumption. Evaluating thermal performance involves analyzing how the building responds to factors such as temperature, humidity, ventilation, solar radiation, and occupant behavior. The materials used in enclosures can influence their thermal insulation characteristics, with lightweight and perforated materials tending to conduct less heat than denser ones. In the field of construction, there is a search for innovative materials that cause minimal environmental impact while promoting thermal comfort and energy efficiency. The main objective of this work was to evaluate the thermal performance of perforated ecological bricks in the city of Serra Talhada-PE, addressing specific aspects such as calculating the thermal transmittance of the walls to evaluate performance according to parameters established by NBR 15575-4:2021, and conducting computational simulation with EnergyPlus® software in a social housing unit (HIS) located in bioclimatic zone 7, constructed with ecological bricks, solid bricks, and ceramic blocks. The results showed that ecological bricks meet the standards for thermal transmittance, which was $0.73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ for a conductivity of $0.9 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. Ecological bricks stand out for their perforations, providing greater thermal resistance to the wall and reducing its transmittance. Computational simulation revealed improvements in thermal performance that walls with ecological bricks provided for the HIS, such as an 11.4% increase in the percentage of hours of occupancy within the operable temperature range (PHFTUH), a 2.2°C reduction in the annual maximum operable temperature of the UH (TomáxUH), and a decrease of 2,096.8 kWh/year (35%) in the total thermal load of the UH (CgTTUH) compared to the reference model with concrete walls. The HIS with ecological bricks met the minimum performance level under natural ventilation conditions. The results highlight ecological bricks as an advantageous construction choice, promoting energy efficiency and thermal comfort in Serra Talhada-PE.

Keywords: thermal comfort; energy efficiency; EnergyPlus; soil-cement brick; thermal transmittance.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Tipos de tijolos de solo-cimento.....	18
Figura 2 - Camada de argamassa assentamento dos tijolos.....	20
Figura 3 - Procedimentos de avaliação do desempenho térmico.....	28
Figura 4 - Mapa do Zoneamento Bioclimático Brasileiro.....	31
Figura 5 - Interface do software EnergyPlus.....	34
Figura 6 - Etapas da avaliação.....	36
Figura 7 - Localização do Município de Serra Talhada-PE.....	37
Figura 8 - Tijolo Ecológico.....	41
Figura 9 - Planta baixa e cortes da HIS.....	43
Figura 10 - Áreas de Permanência Prolongada e Transitória.....	43
Figura 11 - Perspectiva da HIS.....	44
Figura 12 - Detalhe construtivo da parede de tijolo ecológico.....	48
Figura 13 - Detalhe construtivo das paredes. a) Bloco cerâmico; b) Tijolo maciço.....	50
Figura 14 - Dados inseridos no arquivo IDF da variação com tijolo ecológico.....	51
Figura 15 - Resultados do PHFT para a UH de cada variação.....	55
Figura 16 - Resultados da Tomax para a UH de cada variação.....	56
Figura 17- Resultados da CgTT para a UH de cada variação.....	57
Figura 18 - Seções de fluxo de calor do tijolo ecológico.....	68
Figura 19 - Camadas de fluxo de calor do tijolo ecológico.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados dimensionais dos tijolos ecológicos.	41
Tabela 2 - Dimensões, áreas de elementos transparentes e tipo das esquadrias da HIS.	45
Tabela 3 - Propriedades térmicas dos materiais construtivos do modelo de referência.	45
Tabela 4 - Parâmetros de simulação: ocupação, cargas internas e ventilação.	46
Tabela 5 - Variações do sistema construtivo das paredes.	47
Tabela 6 - Propriedades térmicas das variações do sistema construtivo das paredes.	50
Tabela 7 - Propriedades de emissividade e absorvância dos materiais expostos.	51
Tabela 8 - Propriedades térmicas dos materiais construtivos.	52
Tabela 9 - Verificação do atendimento das propriedades térmicas calculadas.	53
Tabela 10 - Intervalo de propriedades com variação com condutividade do solo-cimento.	54
Tabela 11 - Dimensões e propriedades térmicas do sistema de tijolo ecológico.	67
Tabela 12 - Dimensões e propriedades térmicas do sistema de bloco cerâmico.	74
Tabela 13 - Dimensões e propriedades térmicas do sistema de tijolo maciço.	75
Tabela 14 - Análise Dimensional dos tijolos ecológicos.	77
Tabela 15 - Índice de Absorção de Água dos tijolos ecológicos.	77
Tabela 16 - Resistência à Compressão dos tijolos ecológicos aos 28 dias.	78
Tabela 17 - Dados do arquivo climático para Serra Talhada.	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APP	Ambiente de Permanência Prolongada
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar-condicionado
CgTT	Carga Térmica Total
DOE	U.S. Department of Energy's
EPW	EnergyPlus Weather
HIS	Habitação de Interesse Social
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDF	Input Data File
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
ISO	International Organization for Standardization
LabEEE	Laboratório de Eficiência Energética em Edificações
PHFT	Percentual de Horas de Ocupação Dentro da Faixa de Temperatura Operativa
SVVE	Sistemas de Vedações Verticais Externas
Tomáx	Temperatura Operativa Anual Máxima
TBS	Temperatura de Bulbo Seco
UH	Unidade Habitacional
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
ZB	Zona Bioclimática

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Divisão das partes da NBR 15575 (ABNT, 2021).	27
Quadro 2 - Recomendações construtivas da NBR 15575 para as zonas bioclimáticas.	28
Quadro 3 - Faixas de temperaturas operativas para a determinação do $PHFT_{APP}$	29
Quadro 4 - Divisão das partes da NBR 15220 (ABNT, 2005).	30
Quadro 5 - Aberturas para ventilação.	31
Quadro 6 - Recomendações construtivas da NBR 15220.	32
Quadro 7 - Faixa de temperatura operativa para a determinação do $PHFT_{APP}$ no intervalo 2.	39
Quadro 8 - Critério de avaliação de desempenho térmico da envoltória quanto ao $PHFT_{UH}$	39
Quadro 9 - Critério de avaliação de desempenho térmico da envoltória quanto ao $CgTT_{UH}$	40
Quadro 10 - Níveis de desempenho da HIS com tijolo ecológico.	58

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15-16
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	Objetivo Geral	17
1.1.2	Objetivos Específicos	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18-34
2.1	TIJOLO DE SOLO-CIMENTO.....	18-19
2.1.1	Alvenaria com tijolos solo-cimento	19-20
2.2	DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES	20-21
2.2.1	Elementos de Vedação	21-26
2.3	NORMAS TÉCNICAS DE DESEMPENHO TÉRMICO.....	26
2.3.1	NBR 15575 (2021): Edificações Habitacionais – Desempenho	27-29
2.3.2	NBR 15220 (2005): Desempenho térmico de edificações	30-32
2.4	ENERGYPLUS®	32-34
3	METODOLOGIA	35-36
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	36-37
3.2	AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO	38-40
3.2.1	Tijolos avaliados	40-41
3.2.2	Residência simulada	42-45
3.2.2.1	Modelo utilizado.....	42
3.2.2.2	Descrição da edificação.....	42-45
3.2.3	Características do modelo de referência	45-46
3.2.4	Variações no modelo de referência	47-52
3.2.4.1	Cálculo das propriedades das variações	47-49
3.2.4.2	Propriedades obtidas das variações	49-52
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	53-59
4.1	AVALIAÇÃO PELO PROCEDIMENTO SIMPLIFICADO	53-54
4.2	AVALIAÇÃO PELO PROCEDIMENTO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	55-59
4.2.1	Percentual de horas de ocupação da UH dentro da faixa de temperatura operativa (PHFT_{UH})	55
4.2.2	Temperatura operativa anual máxima (Tomá_{XUH})	56

4.2.3	Carga térmica total (CgTT _{UH}).....	56-58
4.2.4	Níveis de desempenho.....	58-59
5	CONCLUSÃO	60-61
5.1	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	61
	REFERÊNCIAS	62-66
	APÊNDICE A - CÁLCULO DAS PROPRIEDADES TERMO FÍSICAS DOS SISTEMAS CONSTRUTIVOS DE PAREDES	67-76
	APÊNDICE B - ANÁLISES DOS TIJOLOS: ANÁLISE DIMENSIONAL, ÍNDICE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.	77-79
	APÊNDICE C - DADOS DO ARQUIVO CLIMÁTICO	80

1 INTRODUÇÃO

No árido cenário do Sertão Pernambucano, onde o clima frequentemente se caracteriza por altas temperaturas e baixas taxas de umidade, a busca pelo conforto térmico em edificações desafia os limites da engenharia civil. Nesse contexto, não há como negar que a eficácia energética da edificação está ligada com seu desempenho térmico, proporcionando a melhoria do desempenho térmico das edificações, alinhando o conforto térmico dos habitantes com o mínimo consumo de energia possível (MENDES, 2021).

A eficiência energética na arquitetura refere-se à capacidade particular de uma edificação de fornecer aos ocupantes conforto térmico, visual e acústico enquanto utiliza a menor quantidade de energia possível. Conseqüentemente, um edifício é considerado mais eficiente em termos energéticos em comparação com outro se conseguir oferecer as mesmas condições ambientais desejadas, mas com um consumo de energia reduzido (LAMBERTS, DUTRA e PEREIRA, 2014).

A avaliação do desempenho térmico de edificações envolve analisar como ela responde às condições ambientais externas e ao uso pelos ocupantes, comparando os resultados com critérios pré-definidos. Sendo o desempenho térmico influenciado por fatores como temperatura, umidade, ventilação, insolação e ação dos ocupantes, incluindo o uso de sistemas de iluminação e climatização. Além do ganho de calor das superfícies e a geração interna (LAMBERTS et al., 2010).

A NBR 15575 (ABNT, 2021), em seu item 11, tem o objetivo de avaliar o desempenho térmico de edificações quando operadas com ventilação natural e com o uso de sistemas de condicionamento de ar, realizando nesta avaliação, a análise da carga térmica da edificação. De acordo com a norma, o desempenho térmico de habitações é influenciado por diversos fatores, incluindo as características de seus componentes (paredes e coberturas), as áreas envidraçadas e de ventilação, as cargas térmicas internas (geradas por pessoas, iluminação e equipamentos), a operação das aberturas e as condições climáticas da cidade onde estão localizadas.

A avaliação do desempenho térmico da NBR 15575 oferece a opção de escolha entre dois procedimentos: o simplificado e o de simulação computacional (KRELLING et al., 2020). O procedimento simplificado compara as características geométricas e as propriedades térmicas dos Sistemas de Vedações Verticais Externas (SVVE) e das coberturas, com os valores de referência desses parâmetros. Por outro lado, o procedimento de simulação computacional avalia o desempenho térmico anual da envoltória da edificação usando um modelo real e um

modelo de referência, permitindo a avaliação em níveis mínimo, intermediário e superior, conforme estabelecido pela NBR 15575-1 (ABNT, 2021b).

Conforme Makrygiannis e Karalis (2023), as características de isolamento térmico de uma parede de um edifício podem ser influenciadas pelo tipo de tijolos empregados em sua construção. A condutividade térmica dos tijolos, ou seja, sua capacidade de transmitir calor através do material, pode variar. Tijolos sólidos compostos por materiais densos podem apresentar uma maior capacidade de condução térmica em comparação com tijolos vazados feitos de materiais leves. Consequentemente, tijolos sólidos facilitam uma maior transferência de calor pela parede. Por outro lado, tijolos vazados, caracterizados por bolsas de ar internas, fornecem uma camada isolante e mitigam a transferência de calor através da parede.

Na construção civil, com a utilização de materiais inovadores capazes de gerar o menor impacto possível ao meio ambiente e que estimulem o conforto térmico e a eficiência energética. O tijolo solo-cimento (tijolo ecológico), se destaca entre os materiais inovadores da construção civil (CAMPOS, WEBER e BORGA, 2017). O tijolo solo-cimento, também chamado de tijolo ecológico, é uma mistura de solo, água e cimento Portland (EUPHROSINO et al., 2022).

O tijolo solo-cimento não apenas apresenta uma opção econômica, mas também compartilha características físico-mecânicas similares aos tijolos convencionais. Sua aceitação crescente na construção civil é atribuída à sua natureza ecologicamente correta (ZACARIAS et al., 2022). Entre as suas propriedades destacam-se, a baixa condutividade térmica, e os vazados internos, que, quando empregados em alvenarias, criam câmaras de ar ao longo das paredes, reduzindo ainda mais sua capacidade de condução de calor (CAMPOS, WEBER e BORGA, 2017).

Nesse contexto, os tijolos ecológicos emergem como uma solução ecologicamente correta que coopera para a otimização do desempenho térmico das edificações. Com suas características especiais, esses tijolos têm o potencial de influenciar significativamente a capacidade de uma construção de resistir às intempéries do clima, promovendo um bom desempenho térmico para as edificações. Dessa forma, o objetivo principal deste trabalho está na avaliação do desempenho térmico de tijolos ecológicos, a partir dos requisitos estabelecidos na ABNT NBR 15575:2021, para o procedimento simplificado e de simulação computacional realizado em uma habitação de interesse social situada na zona bioclimática 7.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar o desempenho térmico de tijolos ecológicos vazados na cidade de Serra Talhada-PE, utilizando o procedimento simplificado e de simulação computacional, estabelecidos pela NBR 15575:2021.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Determinar a transmitância térmica de tijolos ecológicos vazados, de acordo com o método de cálculo determinado pela NBR 15220-2:2022.
- Observar o desempenho térmico dos tijolos por meio dos parâmetros estabelecidos pela NBR 15575-4:2021 para Sistemas de Vedações Verticais Externas (SVVE).
- Observar o desempenho térmico dos tijolos em uma edificação com a realização de simulação computacional em Serra Talhada-PE.
- Comparar o desempenho térmico da edificação com paredes de tijolos ecológicos, maciços e blocos cerâmicos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

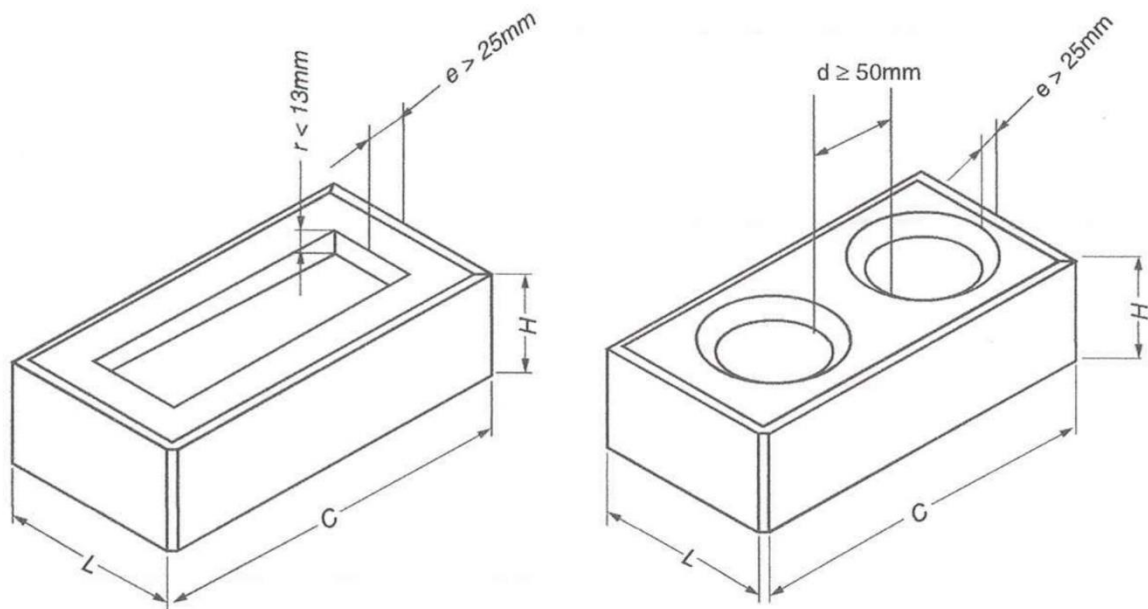
2.1 TIJOLO DE SOLO-CIMENTO

A norma NBR 8491 (ABNT, 2012) define o tijolo de solo-cimento como um componente de alvenaria que deve ser feito a partir de uma mistura controlada de solo, cimento Portland, água e, se necessário, aditivos e pigmentos, com o objetivo de produzir um material de construção resistente e, possivelmente, esteticamente personalizado. Essa norma estabelece os critérios e requisitos técnicos para a fabricação e uso desse tipo de tijolo.

Segundo Euphrosino et al. (2022), o cimento atua como aglomerante, estabilizando o solo e melhorando suas propriedades. Entre suas vantagens, destacam-se a ausência de queima durante a fabricação, reduzindo as emissões de CO₂, a facilidade de obtenção dos materiais, promovendo o desenvolvimento sustentável.

Ainda de acordo com a referida norma, são determinados dois tipos de tijolos solo-cimento (Figura 1), classificados como maciços, “tijolo cujo volume total seja igual ou superior a 85% do seu volume total aparente”, e como vazados, “tijolo com furos verticais, cujo volume total seja inferior a 85% do seu volume total aparente” (NBR 8491, ABNT, 2012, p.1).

Figura 1 - Tipos de tijolos de solo-cimento



Fonte: NBR 8491 (ABNT, 2012). Adaptado.

A norma NBR 10833 (ABNT, 2013) estabelece os requisitos para fabricação dos tijolos de solo cimento com prensa manual ou hidráulica. De acordo com a norma, para realizar a

fabricação dos tijolos deve ser realizado a mistura de solo-cimento de forma manual ou mecânica, após a mistura do solo com o cimento deve ser adicionada água gradativamente até atingir a umidade ideal de trabalho, em seguida, a mistura é transferida para o molde para realização da prensagem. Por fim os tijolos precisam ser mantidos úmidos por sete dias para a adequada cura, e só poderão ser utilizados após 14 dias da sua fabricação.

O tijolo de solo-cimento é uma alternativa de baixo custo para enfrentar a carência habitacional, uma vez que sua montagem por encaixe dispensa grandes pilares, tornando a construção mais ágil. Essa opção pode resultar em redução de custos, tanto a curto quanto a longo prazo. Além disso, a fabricação desses tijolos geralmente requer menos água, contribuindo para a redução do consumo de recursos naturais e da poluição ambiental (ROCHA; FURTADO NETO, 2020).

Os tijolos de solo-cimento, conhecidos como tijolos ecológicos, são uma alternativa alinhada ao desenvolvimento sustentável, caracterizando-se por baixo consumo de energia na extração da matéria-prima e ausência de poluição ou resíduos em seu processo produtivo (ECOTERM, 2023). Dessa forma, o uso de tijolos de solo-cimento não apenas atende às necessidades habitacionais, mas também promove práticas mais sustentáveis na construção civil (MOTTA et al., 2014).

De acordo com Oliveira (2020), as paredes construídas com tijolos de solo-cimento prensados podem apresentar comportamento térmico e durabilidade equivalentes às construídas com tijolos ou blocos cerâmicos. O autor ainda destaca que uma das vantagens do tijolo solo-cimento é que este apresenta um excelente isolamento térmico.

2.1.1 Alvenaria com tijolos solo-cimento

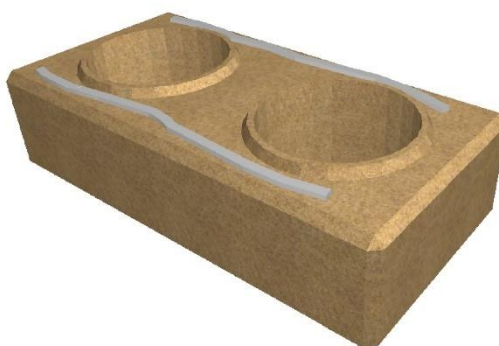
O tijolo de solo-cimento destaca-se pelo formato auto encaixável, facilitando o assentamento com pouco uso de argamassa e dispensando acabamentos como reboco e pintura. A aplicação de um impermeabilizante nas paredes é suficiente para proteção contra as condições climáticas. Além disso, os furos nos tijolos facilitam a instalação de redes hidráulicas e elétricas, evitando a necessidade de quebrar as paredes e reduzindo o desperdício de material. A parte estrutural envolve armaduras e grautes posicionados nos furos, criando colunas de sustentação para paredes e lajes. Blocos canaletas de solo-cimento são utilizados em vergas, contravergas, com concretagem horizontal (EUPHROSINO et al., 2022).

Segundo Ciceri (2016), a primeira fiada de tijolos pode ser assentada sobre a fundação usando uma argamassa feita da mesma mistura de solo-cimento dos tijolos. Esta argamassa

podendo também ser complementada com cal ou outro agente químico que retém água e reduz a retração.

De acordo com Silva (2013), os tijolos das fiadas subsequentes podem ser assentados usando uma fina camada de material adesivo (Figura 2), como cola branca, argamassa industrializada ou até mesmo massa de solo-cimento, geralmente a mesma usada na fabricação dos tijolos.

Figura 2 - Camada de argamassa assentamento dos tijolos.



Fonte: Autor.

Ciceri (2016), também ressalta que em alguns casos, os tijolos de solo-cimento podem ser assentados sem argamassa, mas ainda requerem uma vedação nas juntas, que pode ser realizada usando uma cola à base de PVC.

As edificações em alvenaria com tijolos de solo-cimento podem utilizar revestimentos ou optar por utilizar tijolos aparentes. Além disso, quando é utilizado revestimento, as paredes de solo-cimento requerem menos material (CICERI, 2016).

2.2 DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES

A avaliação do desempenho térmico de uma edificação implica avaliar sua reação física às condições externas e ao comportamento dos ocupantes. Isso envolve comparar os resultados com critérios pré-definidos, considerando variáveis climáticas, manipulação de elementos pelos usuários e ganhos de calor. Podendo então, o comportamento térmico ser influenciado por fatores como ventilação, insolação, temperatura, umidade, ganhos de calor e renovação de ar (LAMBERTS et al., 2010).

Em 2013, a norma NBR 15575, que trata do desempenho de edificações residenciais, foi implementada com o propósito de definir os requisitos dos usuários para ambientes habitacionais. Essa norma estabelece critérios para o desempenho térmico, com o objetivo de

assegurar condições térmicas adequadas para que os usuários possam realizar suas atividades de forma confortável (KRELLING et al., 2020).

Para avaliar o desempenho térmico de uma edificação, é possível empregar o procedimento de simulação computacional. Esse método avalia o comportamento da envoltória da edificação em comparação com um modelo de referência que possui a mesma envoltória, mas com características de referência, conforme NBR 15575-1 (ABNT, 2021b).

De acordo com Mendes (2023), a avaliação de desempenho térmico utilizando simulação computacional oferece vantagens significativas em comparação com outros métodos. Uma vez que o uso de procedimentos simplificados, como os definidos pela NBR 15575 (ABNT, 2021), que prescrevem limites mínimos e permitem avaliações com base em um "checklist", que por ser considerado simplista pode não refletir a realidade da construção. E uma outra abordagem que envolve a avaliação experimental, requer a instalação de equipamentos (como termopares) no ambiente interno e externo da edificação, demandando tempo e recursos, podendo ser realizada apenas após a conclusão da construção.

Dessa forma segundo o autor, a simulação computacional é uma alternativa eficiente, pois ela envolve a criação de um modelo computacional que avalia as interações dinâmicas entre o clima externo, a envoltória do edifício, a ocupação, os equipamentos mecânicos internos e os sistemas de climatização.

O autor ainda descreve que as simulações computacionais permitem investigar estratégias para otimizar a eficiência energética dos edifícios durante a fase de projeto. Além disso, esse método economiza recursos, tempo e mão de obra, tornando-se uma abordagem mais versátil e eficaz para a avaliação do desempenho térmico das edificações.

2.2.1 Elementos de Vedação

Os elementos de vedação são constituídos em sua maior parte por elementos opacos, segundo Lamberts; Dutra e Pereira (2014), os materiais e elementos de construção respondem termicamente com base em suas propriedades térmicas. Ainda segundo os autores, em fechamentos opacos, a transferência de calor ocorre quando há uma diferença entre as temperaturas das superfícies interna e externa, mantendo o sentido do fluxo de calor sempre ocorrendo da superfície mais quente para a mais fria.

A transmitância térmica (U) é uma das principais propriedades utilizadas para avaliação de desempenho térmico de sistemas de vedações verticais pelo procedimento simplificado na NBR 15575-4 (ABNT, 2021c).

Segundo Lamberts et al. (2010, p.22), a transmitância térmica é uma propriedade dos componentes construtivos que determina a quantidade de energia térmica que pode passar através deles por unidade de área. Ela é medida em $W/m^2 \cdot K$ e está diretamente relacionada à espessura do componente e à condutividade térmica dos materiais utilizados em sua construção. De acordo com o autor, ela “representa sua capacidade de conduzir maior ou menor quantidade de energia por unidade de área e de diferença de temperatura”.

A transmitância térmica (U) definida como o “inverso da resistência térmica total”, é determinada pela Equação (1), conforme estabelecido pela NBR 15220-2 (ABNT, 2022).

$$U = \frac{1}{R_{tot}} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

U é a transmitância térmica ($W/m^2 \cdot K$);

R_{tot} é a resistência térmica total ($m^2 \cdot K/W$).

A NBR 15220-1 (ABNT, 2005a, p.1), define a resistência térmica (R) como sendo o “quociente da diferença de temperatura verificada entre as superfícies de um elemento ou componente construtivo pela densidade de fluxo de calor”.

De acordo com Lamberts; Dutra e Pereira (2014), a resistência térmica de um material corresponde à sua capacidade de resistir à passagem de calor. Conforme a espessura de um material aumenta, sua resistência térmica também aumenta.

A resistência térmica (R) é determinada pela Equação (2), conforme descrito pela NBR 15220-2 (ABNT, 2022):

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

R é a resistência térmica ($m^2 \cdot K/W$);

d é a espessura da camada de material do componente (m).

λ é a condutividade térmica do material ($W/m \cdot K$).

De acordo com a NBR 15220-2 (ABNT, 2022), a resistência térmica total, R_{tot} , de um componente plano da edificação que possui camadas termicamente homogêneas e perpendiculares ao fluxo de calor, deve ser calculada a partir da seguinte equação:

$$R_{tot} = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se} \quad \text{Equação (3)}$$

Onde:

- R_{tot} é a resistência térmica total ($m^2 \cdot K/W$);
 R_{si} é a resistência superficial interna ($m^2 \cdot K/W$);
 $R_1, R_2 \dots R_n$ são as resistências térmicas de cada camada ($m^2 \cdot K/W$);
 R_{se} é a resistência superficial externa ($m^2 \cdot K/W$).

Porém, conforme ressaltado por CB3E (2022), é comum que componentes sejam compostos por diferentes materiais. Portanto, a norma orienta o cálculo da resistência equivalente de duas formas, calculando o R_{upper} e o R_{lower} . Sendo o R_{upper} a resistência equivalente das seções (em série em relação ao fluxo de calor) e o R_{lower} a resistência equivalente das camadas (paralelo ao fluxo de calor).

Assim, de acordo com a NBR 15220-2 (ABNT, 2022), a resistência térmica total, R_{tot} , de um componente que consiste em camadas termicamente homogêneas e não homogêneas paralelas à superfície, deve ser calculada como a média aritmética dos limites superior (R_{upper}) e inferior (R_{lower}) da resistência, conforme a seguinte equação:

$$R_{tot} = \frac{R_{upper} + R_{lower}}{2} \quad \text{Equação (4)}$$

Onde:

- R_{tot} é a resistência térmica total ($m^2 \cdot K/W$);
 R_{upper} é o limite superior da resistência térmica ($m^2 \cdot K/W$);
 R_{lower} é o limite inferior da resistência térmica ($m^2 \cdot K/W$).

O limite superior da resistência térmica, R_{upper} , conforme NBR 15220-2 (ABNT, 2022, p.11), “é determinado assumindo-se um fluxo de calor unidimensional, perpendicular às superfícies do componente”. Conforme a seguinte equação:

$$\frac{1}{R_{upper}} = \frac{f_a}{R_a} + \frac{f_b}{R_b} + \dots + \frac{f_q}{R_q} \quad \text{Equação (5)}$$

Onde:

- R_{upper} é o limite superior da resistência térmica ($m^2 \cdot K/W$);

R_a, R_b, \dots, R_q são as resistências térmicas de ambiente a ambiente para cada seção, calculadas a partir da Equação (3) ($m^2 \cdot K/W$);

f_a, f_b, \dots, f_q são as áreas fracionadas de cada seção (%).

O limite inferior da resistência térmica, R_{lower} , conforme NBR 15220-2 (ABNT, 2022, p.12), “é determinado assumindo-se que todos os planos paralelos à superfície do componente são superfícies isotérmicas Para cada camada térmica não homogênea deve ser calculada a resistência térmica equivalente, R_j , utilizando a Equação a seguir:

$$R_j = \frac{1}{\frac{f_a}{R_{aj}} + \frac{f_b}{R_{bj}} + \dots + \frac{f_q}{R_{qj}}} \quad \text{Equação (6)}$$

Onde:

R_j é a resistência térmica equivalente ($m^2 \cdot K/W$);

$R_{aj}, R_{bj}, \dots, R_{qj}$ são os valores de resistência térmica de cada camada térmica não homogênea de cada seção ($m^2 \cdot K/W$);

f_a, f_b, \dots, f_q são as áreas fracionadas de cada seção (%).

Então o limite mínimo, R_{lower} , pode ser determinado utilizando a Equação (3).

Por fim, deve ser realizada a estimativa de erro relativo máximo (Equação (7)), que conforme CB3E (2022), é realizada para assegurar que a resistência obtida através da análise por seções e a resistência obtida através da análise por camadas não apresentem diferenças significativas em relação à resistência total calculada.

De acordo com a norma NBR 15220-2 (ABNT, 2022, p.13), esta estimativa “pode ser utilizado quando a transmitância térmica calculada precisar atender a critérios específicos de precisão”. Vale ressaltar que o método só é válido para os casos em que a proporção do limite superior (R_{upper}) para o inferior (R_{lower}) não excede 1,5.

Ainda segundo CB3E (2022), quando existe uma diferença significativa nessa proporção ($e \geq 20\%$), indica a presença de pontes térmicas no componente. Nesse caso, a norma NBR 15220-2:2022 não é aplicável, e deve-se adotar a NBR 10211:2022, que orienta o cálculo da transmitância térmica por meio de modelagem numérica para lidar com a presença das pontes térmicas.

$$e = \frac{R_{upper} - R_{lower}}{2 \cdot R_{tot}} \cdot 100 \quad \text{Equação (7)}$$

De acordo com Lamberts et al. (2010), a capacidade térmica (C) é uma propriedade dos componentes construtivos que indica a quantidade de calor necessária para elevar em uma unidade a temperatura de uma unidade de área do componente. Quanto maior a capacidade térmica dos componentes de uma edificação, como paredes e cobertura, maior será sua inércia térmica. Segundo os autores, isso resulta em um amortecimento das variações de temperatura interna em relação aos valores correspondentes no ambiente externo.

A capacidade térmica de um componente conforme NBR 15220-2 (ABNT, 2022), pode ser determinada pela equação a seguir:

$$C = \sum_{j=1}^n \lambda_j \cdot R_j \cdot c_j \cdot \rho_j = \sum_{j=1}^n e_j \cdot c_j \cdot \rho_j \quad \text{Equação (8)}$$

Onde:

- C é a capacidade térmica ($kJ/m^2 \cdot K$);
- λ_j é a condutividade térmica do material da camada ($W/m \cdot K$);
- R é a resistência térmica da camada ($m^2 \cdot K/W$);
- e_j é a espessura da camada (m);
- C_j é o calor específico do material da camada ($kJ/kg \cdot K$);
- ρ_j é a densidade de massa aparente do material da camada (kg/m^3);

Conforme descrito na NBR 15220-2 (ABNT, 2022, p45) “a capacidade térmica de um componente plano constituído de camadas homogêneas e não homogêneas perpendiculares ao fluxo de calor”, sendo calculada pela Equação (9):

$$C_T = \frac{A_a + A_b + \dots + A_n}{\frac{A_a}{C_{Ta}} + \frac{A_b}{C_{Tb}} + \dots + \frac{A_n}{C_{Tn}}} \quad \text{Equação (9)}$$

Onde:

- C_{Tn} é a capacidade térmica do componente da seção n ($kJ/m^2 \cdot K$);
- A_n é a área da seção n (m^2);

A norma NBR 15220 (ABNT, 2005), traz valores de emissividade e absorvência para materiais de construção e cores de pinturas. A NBR 15220-1 (ABNT, 2005a, p.3) define emissividade como sendo o “quociente da taxa de radiação emitida por uma superfície pela taxa de radiação emitida por um corpo negro, à mesma temperatura”. E absorvência como o “quociente da taxa de radiação solar absorvida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície”.

Segundo Lamberts; Dutra e Pereira (2014), os elementos construtivos podem variar em seu desempenho em relação à radiação térmica. Eles podem refletir, absorver ou transmitir essa radiação para o interior, essas frações dependerão da quantidade de radiação incidente em um material e respectivamente de sua refletividade, absorvência e transmissividade. De acordo com os autores, a cor superficial dos materiais de construção é determinante em sua absorvência à radiação solar. Materiais escuros absorvem mais calor, enquanto materiais claros absorvem menos, afetando seu comportamento térmico em relação à radiação solar.

2.3 NORMAS TÉCNICAS DE DESEMPENHO TÉRMICO

De acordo com Lamberts et al. (2010), as normas de desempenho térmico visam garantir que as edificações atendam aos padrões de conforto térmico e eficiência energética. Por um lado, estabelecem requisitos gerais de desempenho para edificações habitacionais e, por outro, concentram-se especificamente no desempenho térmico, fornecendo diretrizes detalhadas para atender aos requisitos necessários.

As normas vigentes no Brasil que estão relacionadas com desempenho térmico de edificações são: a norma NBR 15220 (ABNT, 2005) - Desempenho térmico de edificações, e a NBR 15575 (ABNT, 2021) - Edificações habitacionais-desempenho, que conforme destacado no Guia da Norma de Desempenho (CBIC, 2013), trata de assuntos relativos à segurança (desempenho mecânico, segurança contra incêndio, segurança no uso e operação), habitabilidade (estaqueidade, desempenho térmico e acústico, desempenho lumínico, saúde, higiene e qualidade do ar, funcionalidade e acessibilidade, conforto tátil) e sustentabilidade (durabilidade, manutenibilidade e adequação ambiental).

Dessa forma, as normas técnicas de desempenho térmico são essenciais para garantir que as edificações atendam aos requisitos de conforto térmico, eficiência energética e sustentabilidade, estabelecendo critérios, procedimentos e parâmetros para avaliar o desempenho térmico das edificações.

2.3.1 NBR 15575 (2021): Edificações Habitacionais – Desempenho

A norma NBR 15575 (ABNT, 2021) refere-se aos sistemas que compõem as edificações habitacionais, independentemente dos seus materiais constituintes e do sistema construtivo utilizado, cujo foco é garantir a qualidade, a segurança e o conforto das edificações habitacionais do ponto de vista dos usuários, levando em consideração o desempenho durante sua utilização.

De acordo com Melo (2023), a norma de desempenho estabelece requisitos mínimos de desempenho, garantindo qualidade, segurança, conforto e durabilidade nas habitações. Além disso, auxilia os consumidores na compreensão e escolha de edificações que atendam às suas necessidades, sendo obrigatória para projetos e obras de edificações residenciais unifamiliares e multifamiliares no Brasil.

A norma está dividida em 6 partes (Quadro 1), abordando os requisitos de desempenho térmico nas partes 1, 4 e 5.

Quadro 1- Divisão das partes da NBR 15575 (ABNT, 2021).

NBR 15575:2021: 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 - SVVIE;
Parte 5	Requisitos para os sistemas de coberturas;
Parte 6	Requisitos para os sistemas hidrossanitários.

Fonte: NBR 15575-1 (ABNT, 2021b). Adaptado.

Para avaliação do desempenho térmico da edificação a NBR15575 (ABNT, 2021) exemplifica dois procedimentos de avaliação (Figura 3), o simplificado e o de simulação computacional. O procedimento simplificado avalia os sistemas de vedações verticais externas e de coberturas quanto aos valores de seus parâmetros, como a transmitância térmica, capacidade térmica e o percentual de abertura para ventilação, em relação a valores de referência dos mesmos (Quadro 2), além de valores referentes ao percentual de elementos transparentes. Já em relação às coberturas, é realizado, da mesma forma, a avaliação somente quanto aos valores de transmitância térmica.

Quadro 2 - Recomendações construtivas da NBR 15575 para as zonas bioclimáticas.

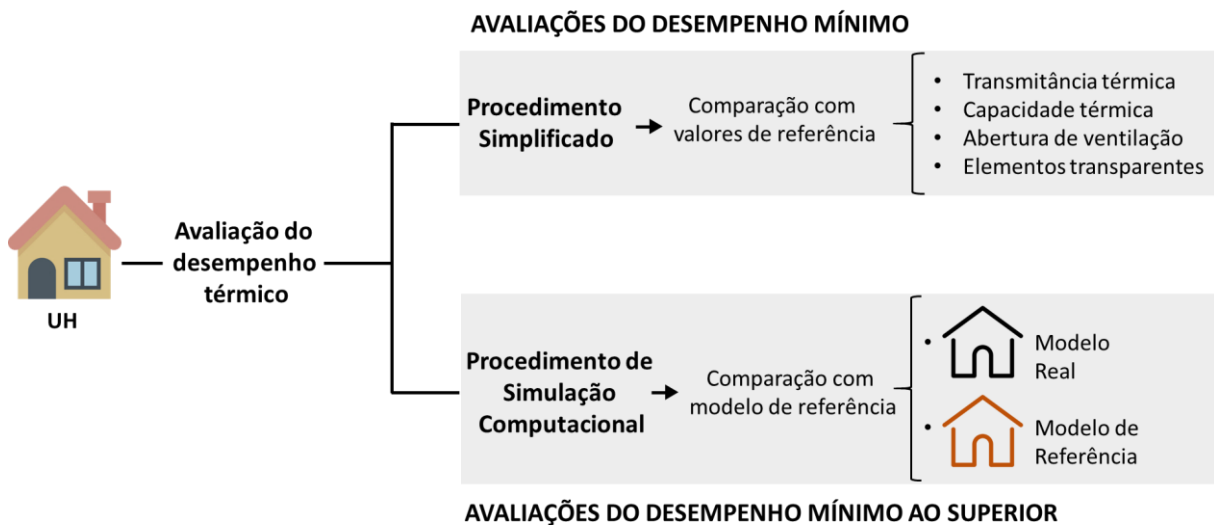
ZB 7	Transmitância térmica (U) W/m ² -K		Capacidade Térmica (CT) kJ/m ² -K	Abertura para ventilação (P _{v, APP}) % (da área do piso)
	Parede Externa	$\alpha_{\text{Par}}^{(a)} \leq 0,6$	$U < 3,7$	$CT \geq 130$
	$\alpha_{\text{Par}}^{(a)} > 0,6$	$U \leq 2,5$		

(a) Absortância à radiação solar da superfície externa da parede.

Fonte: NBR 15575-4 (ABNT, 2021c). Adaptado.

O procedimento de simulação computacional que avalia o desempenho térmico anual da envoltória da edificação em relação a esta envoltória com características de referência, no qual é necessário elaborar um modelo real, com as características e propriedades da edificação avaliada, e um modelo de referência que representa a mesma, porém com características de referência conforme descrito pela NBR 15575-1 (ABNT, 2021b).

Figura 3 - Procedimentos de avaliação do desempenho térmico.



Fonte: LabEEE (2020b).

A norma ainda estabelece níveis de desempenho mínimo, intermediário e superior (os níveis intermediário e superior são de caráter não obrigatório). O procedimento simplificado avalia o desempenho térmico mínimo da Unidade Habitacional (UH), já o procedimento de simulação computacional permite avaliações para a obtenção de todos os níveis de desempenho (mínimo, intermediário e superior).

No nível mínimo, são analisados o percentual de horas de em que a unidade habitacional (UH) encontra-se dentro da faixa de temperatura operativa ($PHFT_{UH}$) e a temperatura operativa anual máxima ($Tomáx_{UH}$) da unidade habitacional do modelo real em comparação com o modelo de referência. O $PHFT_{UH}$ é obtido a partir da avaliação de cada ambiente de permanência prolongada ($PHFT_{APP}$), para a faixa de temperatura operativa (Quadro 3) durante o período de ocupação (NBR 15575-1, ABNT, 2021b).

Nos níveis intermediário e superior são avaliados os mesmos parâmetros, porém com limites diferentes (NBR 15575-1, ABNT, 2021b). E de acordo com a norma, também deve ser realizado o critério da carga térmica total da UH ($CgTT_{UH}$). Para essa avaliação, a simulação é realizada sem o uso de ventilação natural.

Quadro 3 - Faixas de temperaturas operativas para a determinação do $PHFT_{APP}$.

Intervalo de temperaturas externas	Média anual da temperatura externa de bulbo seco (TBS_m)	Faixa de temperatura operativa
Intervalo 1	$TBS_m < 25^{\circ}C$	$18^{\circ}C < T_{OAPP}^{(a)} < 26^{\circ}C$
Intervalo 2	$25^{\circ}C \leq TBS_m < 27^{\circ}C$	$T_{OAPP} < 28^{\circ}C$
Intervalo 3	$TBS_m \geq 27^{\circ}C$	$T_{OAPP} < 30^{\circ}C$

(a) Temperatura operativa do APP. Dentro dos limites desta tabela.

Fonte: NBR 15575-1 (ABNT, 2021b). Adaptado.

Mendes (2023) descreve três métodos de avaliação de desempenho térmico que podem ser utilizados para o procedimento de simulação computacional - Carga Térmica, Graus-Horas/Graus-Dias e Dias Típicos. De acordo com os autores, os métodos da Carga Térmica e Graus-Horas/Graus-Dias podem ser utilizados quando se deseja fazer uma avaliação de forma mais detalhada (ambos), ou quando é necessário a simulação de um sistema de Aquecimento, Ventilação e Ar-condicionado (AVAC), como é o caso do método da Carga Térmica.

A NBR 15575:2021 traz a adoção de simulações anuais, que correspondem aos métodos da carga Térmica e graus-dias/graus-horas, descritos por Mendes (2023). Enquanto o método dos dias típicos era adotado na versão de 2013 da norma.

A simulação computacional desempenha um papel fundamental avaliando as interações dinâmicas entre fatores como clima externo, estrutura do edifício, ocupação, equipamentos internos e sistemas de climatização. Por meio dessas simulações, é possível explorar estratégias para melhorar a eficiência energética dos edifícios ainda na fase de projeto (MENDES, 2023).

Ainda segundo o autor, o software EnergyPlus® é um dos softwares de simulação energética mais utilizado para simulação computacional em estudos. Também é o software recomendado pela NBR 15575-1-1 (ABNT, 2021a).

2.3.2 NBR 15220 (2005): Desempenho térmico de edificações

A norma NBR 15220 (ABNT, 2005), trata do desempenho térmico de edificações e foi dividida em 5 partes, conforme descrito a seguir (Quadro 4).

Quadro 4 - Divisão das partes da NBR 15220 (ABNT, 2005).

NBR 15220:2005: Desempenho térmico de edificações	
Parte 1	Definições, símbolos e unidades;
Parte 2	Componentes e elementos construtivos das edificações - Resistência e transmitância térmica - Métodos de cálculo (ISO 6946:2017 MOD)
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; (cancelada)
Parte 5	Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo método fluximétrico. (cancelada)

Fonte: NBR 15220-1 (ABNT, 2005a); NBR 15220-2 (ABNT, 2022). Adaptado.

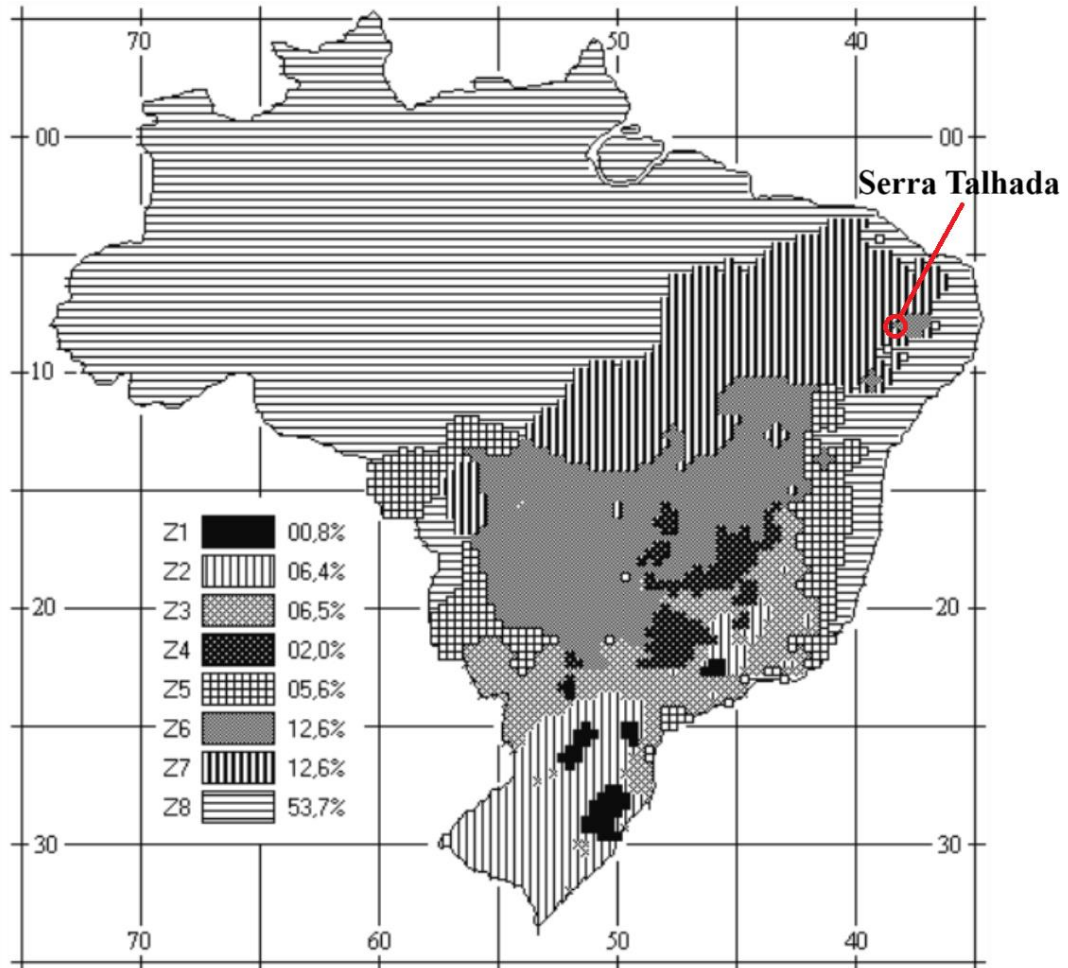
A norma NBR 15220:2005 Parte 2, introduziu um método de cálculo destinado a avaliar tanto a resistência como a transmitância térmica dos elementos construtivos presentes em edifícios. No entanto, em 2022, conforme CB3E (2022), essa norma foi revisada com o objetivo de ajustar o procedimento de cálculo da transmitância térmica de acordo com as diretrizes estabelecidas na norma internacional ISO 6946:2017 Parte 2. Esse processo de atualização demandou a reavaliação dos valores típicos de transmitância térmica aplicáveis aos componentes mais comuns encontrados no mercado da construção civil brasileira, tendo em vista aprimorar a exatidão desses valores e garantir a conformidade com as normas internacionais.

A norma NBR 15220:2005 Parte 3, fornece recomendações para o desempenho térmico de habitações unifamiliares de interesse social durante a fase de projeto. Ela inclui a criação de um zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas específicas, bem como estratégias detalhadas de condicionamento térmico passivo com base em parâmetros e condições locais.

De acordo com a referida norma, o Brasil foi dividido em oito zonas climáticas semelhantes (Figura 4), e para cada uma delas, foi estabelecido um conjunto de recomendações técnicas e construtivas que visam otimizar o desempenho térmico das edificações, adaptando-as às condições climáticas locais. Além disso, a norma utiliza uma carta bioclimática, adaptada

a partir da carta bioclimática de Givoni (1992), conforme descrito por Lamberts et al. (2010), como base para essas recomendações, proporcionando uma abordagem orientada pelo clima para o projeto de habitações de interesse social.

Figura 4 - Mapa do Zoneamento Bioclimático Brasileiro.



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

A norma ainda traz recomendações e diretrizes relativas aos valores limites de aberturas para ventilação (Quadro 5) e quanto aos valores de transmitância térmica, atraso térmico e fator solar relativos às paredes externas e coberturas para as habitações de interesse social (Quadro 6).

Quadro 5 - Aberturas para ventilação.

Aberturas para ventilação	A (Área) (em % da área de piso)
Pequena	$10\% < A < 15\%$
Médias	$15\% < A < 25\%$
Grandes	$A > 40\%$

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

Quadro 6 - Recomendações construtivas da NBR 15220.

Vedações externas		Transmitância térmica – U (W/m ² .K)	Atraso térmico – ϕ (h)	Fator solar – FS (%)
Paredes	Leve	$U \leq 3,00$	$\phi \leq 4,3$	$FS \leq 5,0$
	Leve refletora	$U \leq 3,60$	$\phi \leq 4,3$	$FS \leq 4,0$
	pesada	$U \leq 2,20$	$\phi \geq 6,5$	$FS \leq 3,5$
Coberturas	Leve isolada	$U \leq 2,00$	$\phi \leq 3,3$	$FS \leq 6,5$
	Leve refletora	$U \leq 2,30$. FT	$\phi \leq 3,3$	$FS \leq 6,5$
	Pesada	$U \leq 2,00$	$\phi \geq 6,5$	$FS \leq 6,5$

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

Para determinação das zonas bioclimáticas a NBR 15220-3 (ABNT, 2005c). separa 330 cidades com climas classificados, destacando uma como representante da zona e as demais como referência para uma região específica. Ao analisar a posição da cidade de Serra Talhada no mapa do zoneamento bioclimático brasileiro, surge a dificuldade em determinar se ela está situada na zona bioclimática 6 ou 7. A cidade de Triunfo-PE, que fica próxima à Serra Talhada, é classificada na zona bioclimática 6 nesta região.

Ao comparar as duas cidades, destaca-se que Triunfo apresenta temperaturas mais amenas, enquanto Serra Talhada registra temperaturas mais elevadas, indicando uma melhor adequação à zona bioclimática 7.

Para esta zona bioclimática a norma NBR 15220-3 (ABNT, 2005c) determina as diretrizes quanto a utilização de vedações externas da edificação, as quais, devem utilizar Parede e Cobertura Pesada, com limites de transmitância térmica, atraso térmico e fator solar descritos no Quadro 6.

As partes quatro e cinco desta norma abordam de maneira abrangente e detalhada as técnicas, procedimentos e o equipamento utilizados na medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida e pelo método fluximétrico respectivamente. No entanto estas normas foram canceladas em outubro de 2023.

2.4 ENERGYPLUS®

O EnergyPlus® é um software livre, de código aberto e multiplataforma, desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE) (ENERGYPLUS, 2023).

Segundo Lamberts et al. (2010a), o software foi desenvolvido com a finalidade de estimar as trocas térmicas, níveis de iluminação e consumo de energia em edifícios por meio da modelagem física dessas construções e seus sistemas de ventilação, iluminação, aquecimento e resfriamento. Os autores ainda descrevem que o EnergyPlus® permite a realização de simulações em diferentes climas, usando dados horários de arquivos climáticos. Como resultado, gera uma ampla variedade de dados calculados, incluindo temperaturas internas, temperaturas superficiais, fluxo de calor através dos componentes do edifício, ganhos internos de calor, consumo de energia e trocas de ar, entre outros.

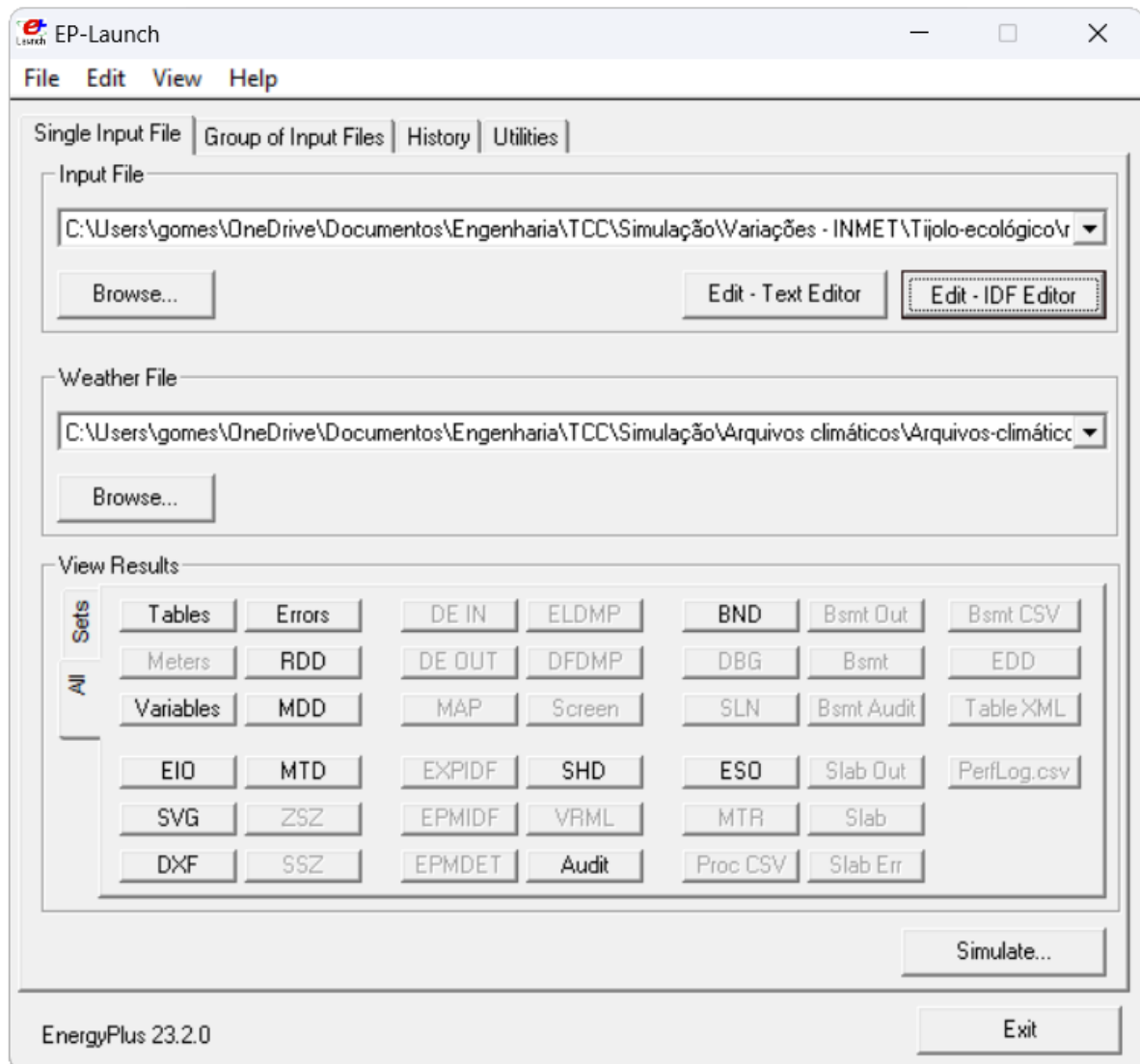
Conforme visto por Mendes (2023), a simulação computacional é uma forma eficiente de realizar a avaliação do desempenho térmico em edificações, pois permitem otimizar a eficiência energética do projeto de edifícios, economizando recursos, tempo e mão de obra, sendo uma abordagem versátil e eficaz. Ainda conforme o autor, com realização da simulação energética, o software (EnergyPlus) é capaz de fornecer previsões sobre diversos aspectos, incluindo carga térmica, temperaturas internas, custos financeiros com energia, dimensionamento de sistemas de AVAC, demanda de iluminação, emissões de dióxido de carbono e outros parâmetros relevantes.

Conforme citado anteriormente, o software EnergyPlus® é recomendado pela NBR 15575-1-1 (ABNT, 2021a), além de ser um dos softwares mais utilizados para simulação energética computacional.

De acordo com Dunel (2020), o software EnergyPlus® opera com base nos princípios de equilíbrio térmico, tratando cada ambiente da edificação como uma zona térmica. Sendo o usuário encarregado de fornecer detalhes sobre a geometria da edificação, os elementos de construção e os componentes dos sistemas, além de definir os padrões de uso para cada zona térmica e o sistema construtivo.

Para realização da simulação o software utiliza dois arquivos de entrada (Figura 5). O arquivo de descrição do modelo de construção, Input Data File (IDF), que é um arquivo de texto simples contendo um conjunto de objetos que representam o edifício e os sistemas associados. E o arquivo climático, EnergyPlus Weather (EPW), o qual também é um arquivo de texto simples que contém informações climáticas (ENERGYPLUS, 2023).

Figura 5 - Interface do software EnergyPlus.



Fonte: Autor.

3 METODOLOGIA

Esta metodologia é destinada à avaliação do desempenho térmico dos tijolos ecológicos. A avaliação foi realizada utilizando o procedimento simplificado que utiliza a comparação com valores de referência e o procedimento de simulação computacional que se baseou no comportamento térmico de uma edificação a qual foi utilizada uma habitação de interesse social (HIS), com paredes construídas com estes tijolos. Ambos os métodos de avaliação são determinados pela NBR 15575 (ABNT, 2021).

No procedimento simplificado, a avaliação se concentrou exclusivamente nos sistemas de vedações verticais externas, quanto aos valores de referência para a transmitância térmica e capacidade térmica, avaliados de acordo com as diretrizes da NBR 15575-4 (ABNT, 2021c). A norma estabelece limites para cada zona bioclimática (Quadro 2), sendo essencial que os sistemas atendam a esses valores para garantir um desempenho térmico adequado.

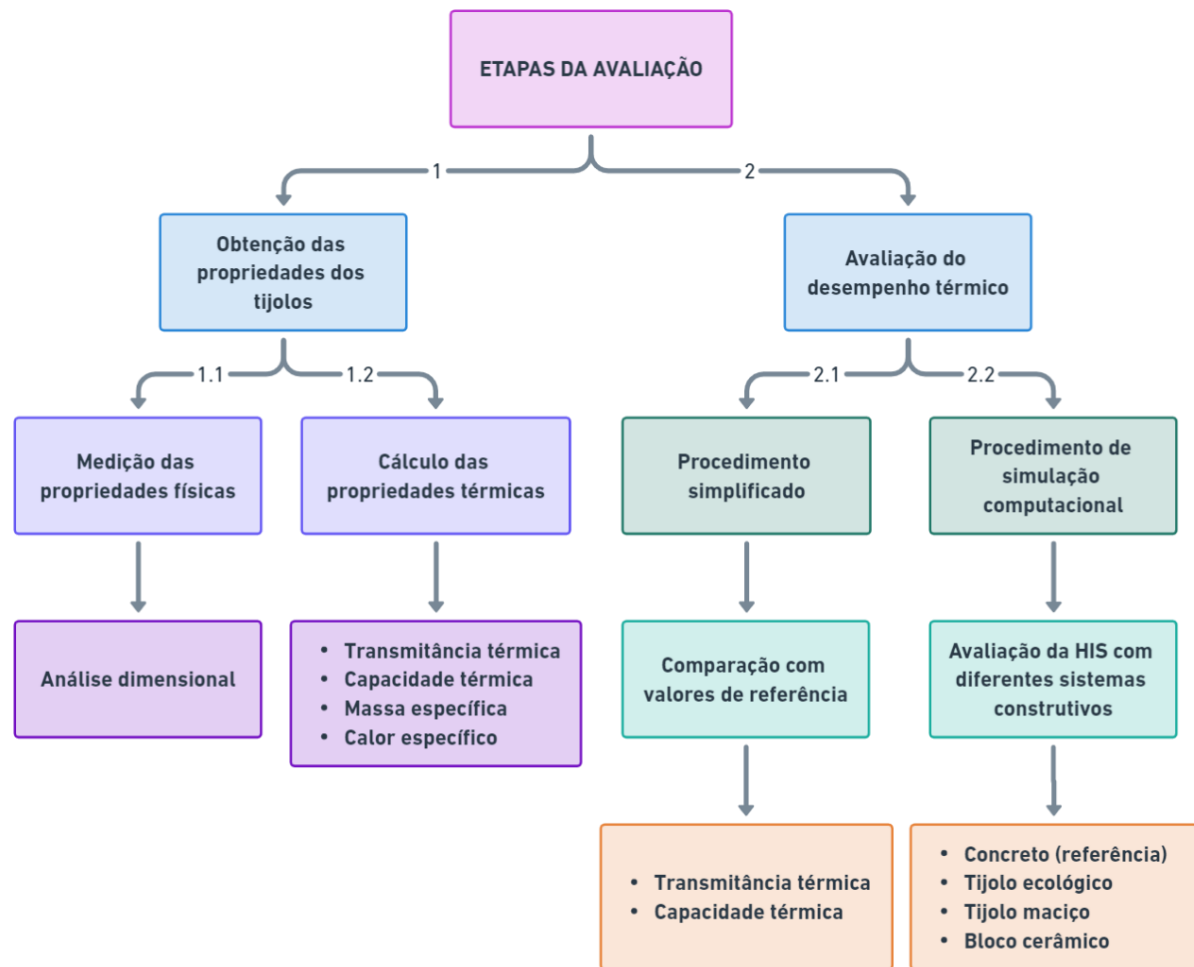
O comportamento térmico da edificação avaliado por meio de simulação computacional analisa o percentual de horas de ocupação dentro da faixa de temperatura operativa ($PHFT_{UH}$), a temperatura operativa anual máxima ($Tomáx_{UH}$), e a da carga térmica total ($CgTT_{UH}$) da unidade habitacional (UH). A avaliação foi realizada comparando as variações realizadas nas paredes que caracterizam a envoltória. Assim, foi possível realizar uma avaliação do comportamento térmico dos materiais estudados. O procedimento para realização da simulação computacional será abordado no tópico 3.1.

Para o processo de simulação computacional do desempenho térmico, foi utilizado o software EnergyPlus® versão 23.2.0, que de acordo com Mendes (2023), é um dos softwares de simulação energética mais utilizados em estudos. Além de ser recomendado pela NBR 15575-1-1 (ANBT, 2021a), também está de acordo e é validado pela norma americana ASHRAE Standard 140, que especifica os procedimentos de teste para avaliação das capacidades técnicas de softwares que simulam o desempenho de edificações.

Dessa forma, o software permite uma análise detalhada e precisa do comportamento térmico da edificação, o que permite obter resultados confiáveis sobre o desempenho térmico dos tijolos ecológicos.

Para realização da pesquisa, o processo foi dividido em etapas, conforme a Figura 6.

Figura 6 - Etapas da avaliação.



Fonte: Autor.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área na qual foi realizado o estudo compreende o município de Serra Talhada, o qual está localizado no estado de Pernambuco conforme a Figura 7. De acordo com o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), a cidade de Serra Talhada encontra-se localizada na Mesorregião do Sertão Pernambucano e na Microrregião do Pajeú, nas coordenadas 7° 58' 35" Sul e 38° 18' 10" Oeste, possuindo área territorial de 2.980,007 km², sendo o bioma da região é a Caatinga, e de acordo com o censo de 2022, a cidade possui uma população superior a 92 mil habitantes (IBGE, 2022).

Figura 7 - Localização do Município de Serra Talhada-PE.

**Legenda**

- Pernambuco
- Serra Talhada

Fonte: Autor.

A cidade de Serra Talhada apresenta clima caracterizado por altas temperaturas e baixa precipitação, sendo uma área de clima semiárido (BDE, 2017), enquadrando-se na categoria BSh, conforme a classificação de Köppen (1948). Com elevados índices, sua temperatura média anual pode variar entre 25 e 26 °C.

Considerando as características climáticas peculiares da cidade, marcadas por temperaturas médias elevadas, baixa umidade relativa do ar, baixo índice pluviométrico na maior parte do ano e forte insolação, Serra Talhada oferece um ambiente propício para a análise detalhada do desempenho térmico dos tijolos ecológicos em regiões com climas quentes, considerando o uso da simulação computacional e características da zona bioclimática 7, na qual a cidade está inserida.

3.2 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO

Para avaliar o desempenho térmico de uma edificação pode ser realizado o procedimento de simulação computacional, que avalia o desempenho da envoltória da edificação em relação a mesma utilizando características de um modelo de referência, conforme descrito na norma NBR 15575-1 (ABNT, 2021b).

Esse processo consiste em criar um modelo de referência utilizando as propriedades termo físicas dos materiais fornecidos pela NBR 15575-1:2021, e um modelo utilizando as propriedades reais da edificação.

Segundo Krelling et al. (2020), no processo de avaliação do desempenho térmico, o modelo real abrange todas as soluções do projeto, enquanto o modelo de referência mantém a forma da edificação, mas usa características padrão para obter um desempenho a ser superado pelo modelo real.

Para avaliar o desempenho térmico dos tijolos ecológicos, foi utilizado o modelo real com as mesmas propriedades do modelo de referência, exceto as propriedades das paredes. Neste modelo, foi realizada uma mudança específica nas propriedades das paredes, que foram substituídas pelas propriedades dos tijolos ecológicos. Esta abordagem permitiu avaliar como os tijolos ecológicos influenciam a temperatura interna de cada zona térmica da edificação.

A ideia por trás dessa análise é entender a influência e o comportamento dos tijolos ecológicos no desempenho térmico da construção, quando comparados ao modelo de referência e a outros tipos de tijolos comumente utilizados na construção civil.

Conforme descrito na revisão bibliográfica, o procedimento de simulação computacional permite avaliar o desempenho térmico da envoltória em diferentes níveis mínimo, intermediário e superior, analisando o percentual de horas em que a unidade habitacional se encontra dentro da faixa de temperatura operativa ($PHFT_{UH}$), a temperatura operativa anual máxima ($Tomáx_{UH}$), e a da carga térmica total ($CgTT_{UH}$) do modelo real em comparação com o modelo de referência.

O $PHFT_{UH}$ é obtido a partir da média do percentual de horas de ocupação dentro da faixa de temperatura operativa de cada ambiente de permanência prolongada ($PHFT_{APP}$), sendo este determinado pelo tempo em que a temperatura do APP permanece dentro da faixa de temperatura operativa (TO_{APP}), durante o período em que está ocupado, em função do tempo total em que está ocupado, correspondendo a 2920h para salas e 3650h para dormitórios. A faixa de temperatura é determinada pela média anual da temperatura externa de bulbo seco (TBS_m), que para Serra Talhada é de 25,5°C, obtida a partir do arquivo climático, para os anos

de 2009 a 2010, utilizado na simulação disponibilizado pela NBR 15575-1-1 (ABNT, 2021a). Dessa forma, o intervalo que deve ser avaliado é o intervalo 2, conforme o Quadro 7.

Quadro 7 - Faixa de temperatura operativa para a determinação do $PHFT_{APP}$ no intervalo 2.

Intervalo de temperaturas externas	Média anual da temperatura externa de bulbo seco (TBS_m)	Faixa de temperatura operativa
Intervalo 2	$25\text{ °C} \leq TBS_m < 27\text{ °C}$	$T_{OAPP} < 28\text{ °C}$

Fonte: NBR 15575-1 (ABNT, 2021b). Adaptado.

Sendo o $PHFT_{UH}$ avaliado a partir dos critérios estabelecidos para cada nível conforme o Quadro 8.

Quadro 8 - Critério de avaliação de desempenho térmico da envoltória quanto ao $PHFT_{UH}$.

Nível de desempenho	Critério
Mínimo	$PHFT_{UH, Real} > 0,9 \cdot PHFT_{UH, Ref}$
Intermediário	$\Delta PHFT^{(a)} \geq \Delta PHFT_{\min}^{(b)}$
Superior	$\Delta PHFT^{(a)} \geq \Delta PHFT_{\min}^{(b)}$

(a) Incremento do $PHFT_{UH, Real}$ em relação ao $PHFT_{UH, Ref}$.

(b) Incremento mínimo do $PHFT_{UH, Real}$ em relação ao $PHFT_{UH, Ref}$ para cada nível. Os valores são obtidos por meio de ábaco ou determinados por equação estabelecidos pela norma.

Fonte: NBR 15575-1 (ABNT, 2021b). Adaptado.

A $Tomáx_{UH}$ para todos os níveis de desempenho do modelo real deve ser menor ou igual à obtida para o modelo de referência, após somado um valor de tolerância $\Delta Tomáx$ (1 °C para edificações no pavimento térreo), conforme Equação (10):

$$Tomáx_{UH,real} \leq Tomáx_{UH,ref} + \Delta Tomáx \quad \text{Equação (10)}$$

Onde:

$Tomáx_{UH,real}$ é a temperatura operativa anual máxima da UH no modelo real ($^{\circ}\text{C}$);

$Tomáx_{UH,ref}$ é a temperatura operativa anual máxima da UH no modelo referência ($^{\circ}\text{C}$);

$\Delta Tomáx$ é o valor de tolerância da temperatura operativa anual máxima ($^{\circ}\text{C}$).

Para os níveis intermediário e superior, além dos outros critérios, também deve-se realizar a avaliação quanto ao critério da carga térmica total da UH ($CgTT_{UH}$) quando a simulação é realizada sem ventilação natural. Para tanto, as janelas (exceto a janela do banheiro) e portas são consideradas fechadas ao longo do ano. A obtenção da $CgTT_{UH}$ para a ZB7 (Zona Bioclimática 7) se dá por meio do cálculo da carga térmica de refrigeração $CgTR_{UH}$ que possui

temperatura de *setpoint* de 23°C, sendo considerada apenas nos períodos em que o APP está ocupado. Os critérios de avaliação estão descritos no Quadro 9.

Quadro 9 - Critério de avaliação de desempenho térmico da envoltória quanto ao $CgTT_{UH}$.

Nível de desempenho	Critério
Mínimo	Não considera
Intermediário	$RedCgTT_{UH}^{(a)} \geq CgTT_{\min}^{(b)}$
Superior	$RedCgTT_{UH}^{(a)} \geq CgTT_{\min}^{(b)}$

(a) $RedCgTT_{UH}$ é a redução de carga térmica do modelo real ($CgTT_{UH, Real}$) em relação ao modelo de referência ($CgTT_{UH, Ref}$).

(b) $RedCgTT_{UH}$ é a redução mínima $CgTT_{UH, Real}$ em relação à referência ($CgTT_{UH, Ref}$). Com valores estabelecidos na norma.

Fonte: NBR 15575-1 (ABNT, 2021b). Adaptado.

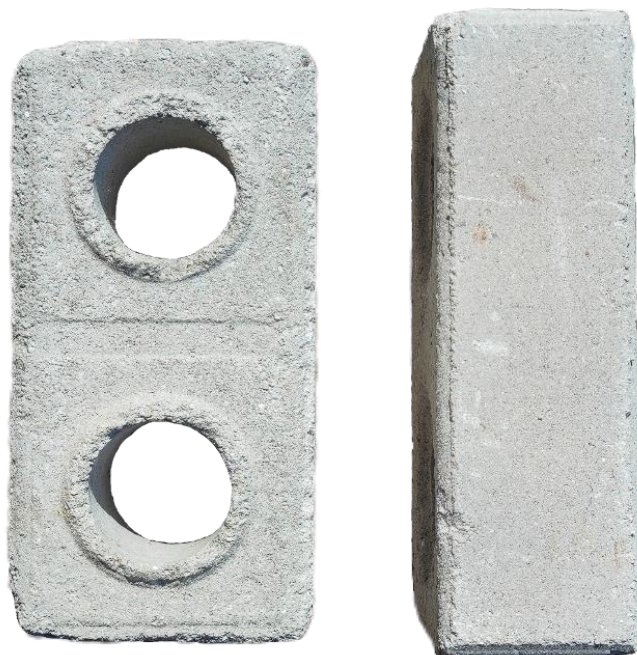
Foi utilizada a planilha de cálculo dos indicadores disponibilizada pelo Laboratório de Eficiência Energética de Edificações (LabEEE, 2020a), para determinação dos resultados e critérios de avaliação da unidade habitacional.

3.2.1 Tijolos avaliados

O foco principal de estudo deste trabalho são os tijolos de solo-cimento vazados. Também conhecidos como tijolos ecológicos por serem são uma alternativa sustentável, apresentarem baixo consumo de energia, de água, ausência de poluição e pouca geração de resíduos em seu processo produtivo (ECOTERM, 2023), além apresentarem um excelente isolamento térmico (OLIVEIRA, 2020).

Os tijolos utilizados como referência (Figura 8) são produzidos em Triunfo-PE. Para produção dos tijolos é utilizado um traço de 7:1 de solo e cimento respectivamente, o solo utilizado é um solo arenoso, o cimento é um cimento Portland CP II-F-32. A Tabela 1 contém as informações referentes às dimensões dos tijolos. O APÊNDICE B contém as informações da análise dimensional, índice de absorção de água e resistência à compressão, referentes aos tijolos avaliados.

Figura 8 - Tijolo Ecológico.



Fonte: Acervo pessoal.

Tabela 1 - Dados dimensionais dos tijolos ecológicos.

TIJOLO SOLO CIMENTO COLETADO NA REGIÃO DE TRIUNFO - PE						
Tijolo	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)	Vazados (mm)	Massa Seca (g)	Densidade (kg/m ³)
B1	250,2	125,69	75,98			
	251,4	125,52	75,83	58,8	3439,32	1748
	250,4	125,01	75,16			
Médias	250,67	125,41	75,66	-	-	-
B2	251,2	125,62	75,53			
	250,8	125,42	75,35	58,9	3420,59	1741
	250	125,66	75,61			
Médias	250,67	125,57	75,50		-	-
B3	250	125,48	76,08			
	251	125,47	75,03	58,9	3427,51	1748
	251	125,3	75,26			
Médias	250,67	125,42	75,46	-	-	-
Médias Gerais	250,7	125,5	75,5	58,9	3429,1	1746

Fonte: Acervo pessoal.

Para comparar o desempenho da alvenaria com tijolos ecológicos, foram utilizados tijolos maciços e blocos cerâmicos com argamassa de revestimento.

3.2.2 Residência simulada

3.2.2.1 Modelo utilizado

Para avaliação do desempenho térmico foi utilizado uma Habitação de Interesse Social (HIS) utilizada como referência para o Brasil em avaliações de desempenho energético, conforme Triana et al. (2015) e Callejas et al. (2022). O modelo da edificação é disponibilizado pelo LabEEE (LAMBERTS, MELO *et al.*, 2023), a partir do projeto hab.labEEE.

O projeto hab.labEEE (LAMBERTS, MELO *et al.*, 2023b), conduzido pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE) da UFSC, tem como objetivo avaliar os requisitos que podem aperfeiçoar o desempenho termo energético de conjuntos habitacionais de Habitação de Interesse Social, levando em consideração o papel dos usuários em diferentes zonas bioclimáticas. Visando a criação de soluções mais eficientes e confortáveis para a população.

O projeto disponibiliza cinco modelos de referência para tipologias comuns em programas habitacionais brasileiros até 2022. Cada tipologia inclui um projeto modelado no software Revit e pranchas técnicas com informações sobre o modelo de referência, modelo de simulação e resultados para cidades representativas de diferentes zonas bioclimáticas do Brasil (LAMBERTS, MELO *et al.*, 2023a).

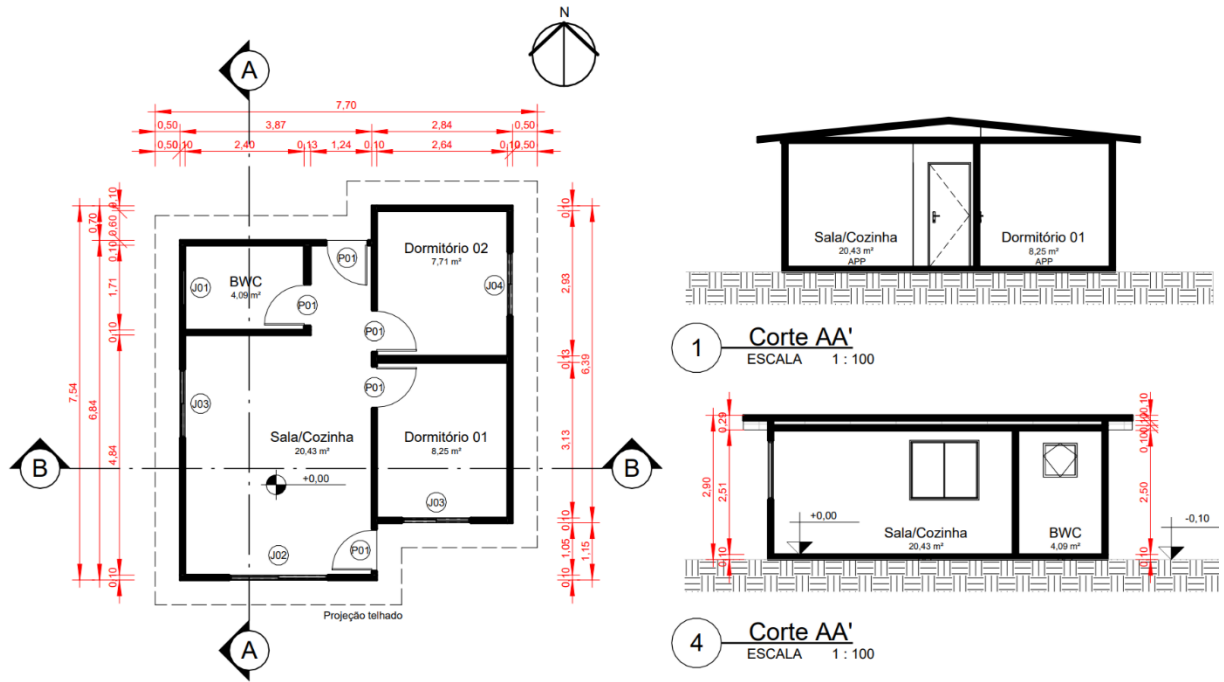
Neste trabalho foi utilizado o modelo 04 - Unifamiliar Térrea Isolada, disponibilizado pelo hab.labEEE, fixando sua localização na cidade de Serra Talhada-PE, que conforme descrito na revisão bibliográfica, encontra-se na Zona Bioclimática 7 (ZB7) estando localizada nas coordenadas geográficas 7°58'35"S e 38°18'10"O.

Todas as informações detalhadas da edificação serão descritas a seguir.

3.2.2.2 Descrição da edificação

O modelo disponibilizado é uma edificação térrea composta por diferentes ambientes, incluindo Sala/Cozinha (20,43m²), Dormitório 01 (8,25m²), Dormitório 02 (7,71m²) e Banheiro (4,09m²). O pé-direito possui 2,5 metros. O sistema de cobertura possui um design de duas águas com beirais de 0,50 metros. As demais dimensões podem ser observadas na Figura 9.

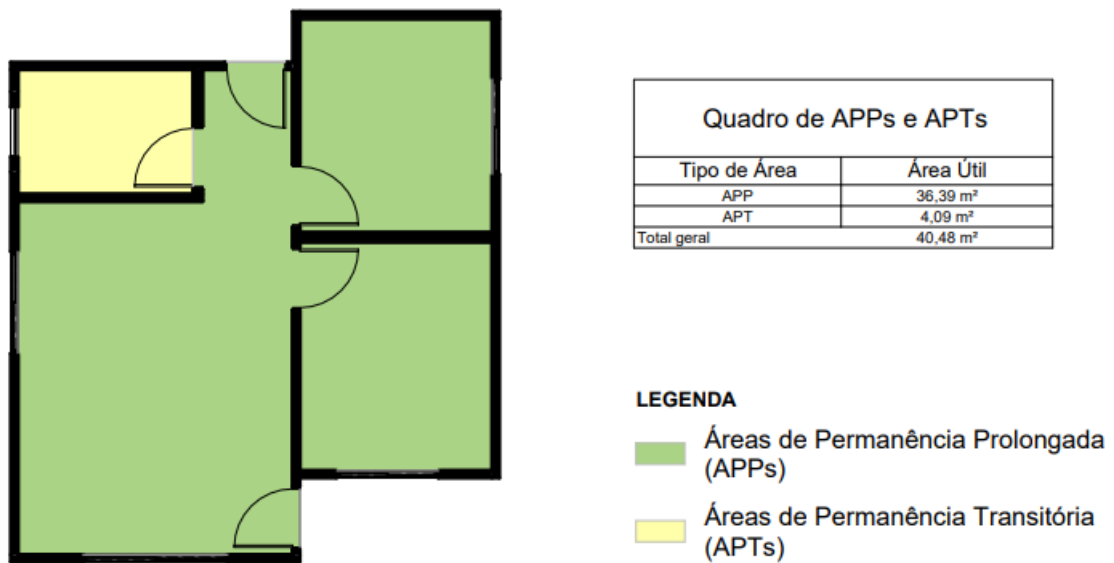
Figura 9 - Planta baixa e cortes da HIS.



Fonte: Lamberts, Melo *et al.* (2023a). Adaptado.

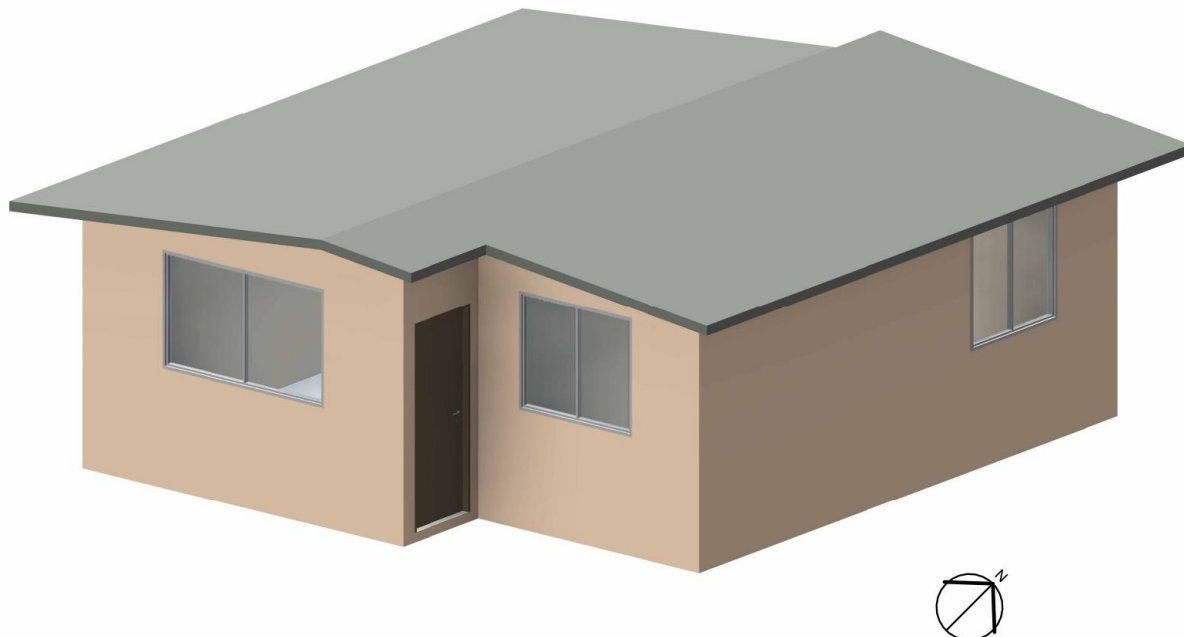
A Figura 10 apresenta os ambientes de permanência prolongada (APPs) e os ambientes de permanência transitória (APTs) da HIS com suas respectivas áreas. A Figura 11 Apresenta o modelo da HIS em perspectiva.

Figura 10 - Áreas de Permanência Prolongada e Transitória.



Fonte: Lamberts, Melo *et al.* (2023a). Adaptado.

Figura 11 - Perspectiva da HIS.



Fonte: Lamberts, Melo *et al.* (2023a). Adaptado.

Para realização das simulações foi utilizado o modelo de simulação disponibilizado pelo hab.labEEE, os autores do projeto disponibilizam o arquivo de entrada do EnergyPlus com as características para o modelo de referência descritas no item 11 da ABNT NBR 15575:2021.

O modelo contém as características dos sistemas construtivos, áreas de abertura, equipamentos, ocupação e ventilação. Elementos de sombreamento não são considerados, mesmo sendo representados no projeto. Para padronizar o modelo que referência as janelas dos banheiros são do tipo "basculante" com dimensões de 0,60 x 0,60m. Todas as portas são do tipo "de abrir" com dimensões de 0,80 x 2,10m (LAMBERTS, MELO *et al.*, 2023a). As dimensões e áreas das demais esquadrias estão na Tabela 2.

A simulação foi realizada considerando o modelo da edificação com orientação da fachada frontal voltada para o norte, conforme a Figura 9.

Para a simulação, foi utilizado o arquivo climático fornecido para o EnergyPlus para a cidade de Serra Talhada-PE (zona bioclimática 7). Os dados climáticos contidos no arquivo são provenientes do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), os arquivos são disponibilizados pela NBR 15575-1-1 (ABNT, 2021a) para o ano meteorológico típico. Os dados climáticos são referentes ao período de 2009 a 2010. O APÊNDICE C contém algumas dados do arquivo climático.

Tabela 2 - Dimensões, áreas de elementos transparentes e tipo das esquadrias da HIS.

Ambiente	Sala/Cozinha		Dormitório 1	Dormitório 2
Esquadria	J2	J3	J3	J4
Dimensões (m)	2,00 x 1,20	1,40 x 1,20	1,40 x 1,20	1,31 x 1,20
Área (m ²)	2,07	1,41	1,41	1,31
Tipologia	De correr com duas folhas em vidro transparente			

Fonte: Lamberts, Melo *et al.* (2023a); NBR 15575-1 (ABNT, 2021b). Adaptado.

As características do modelo de referência descritas pela NBR 15575:2021 e demais considerações serão descritas no próximo tópico.

3.2.3 Características do modelo de referência

De acordo com a NBR 15575-1 (ABNT, 2021b), o modelo de referência deve adotar paredes e pisos de concreto com espessura de 10cm. A cobertura deve possuir telha de 6mm, camada de ar e laje de 10cm. As propriedades térmicas destes elementos estão descritas na Tabela 3.

Tabela 3 - Propriedades térmicas dos materiais construtivos do modelo de referência.

Elemento	Cond. Térm. (W/m.K)	Espessura (cm)	Calor esp. (J/kg.K)	Absortância	Emissividade	Massa esp. (kg/m ³)
Paredes e Pisos						
Paredes externas	1,75	10	1000	0,58	0,90	2200
Paredes internas	1,75	10	1000	0,50	0,90	2200
Pisos	1,75	10	1000	0,50	0,90	2200
Cobertura						
Telha referência	0,65	0,6	840	0,65	0,90	1700
Ático	Câmara de ar resistência térmica de 0,21 m ² .K/W					
Laje	1,75	10	1000	0,50	0,90	2200

Fonte: NBR 15220-1 (ABNT, 2005a); Lamberts, Melo *et al.* (2023a). Adaptado.

As características das aberturas e dos elementos transparentes do modelo de referência devem estar de acordo com os requisitos estabelecidos na NBR 15575-1:2021.

O modelo disponibilizado pelo hab.labEEE (LAMBERTS, MELO *et al.*, 2023a), possui as janelas de correr das unidades habitacionais (UH) com área de elementos transparentes igual a 17% da área de piso dos ambientes de permanência prolongada (APP) (Figura 10). Foram consideradas aberturas para ventilação de 45% de todas as janelas, em todos os APPs.

O perfil de ocupação e cargas internas e ventilação estão indicados na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros de simulação: ocupação, cargas internas e ventilação.

Ganhos internos de calor			
Ocupação			
Padrão de ocupação		Calor produzido por uma pessoa⁽¹⁾	
Dormitórios	22h-8h	Dormitórios	81 w
Sala	14h-18h (50%)	Sala	108 w
Sala	18h-22h (100%)	Fração radiante	0,30
Sistema de iluminação			
Padrão de uso		Calor produzido pela iluminação	
Dormitórios	6h-8h e 22h-00h	Densidade de potência instalada (DPI)	5 W/m ²
Sala	16h-22h	Fração radiante	0,32
		Fração visível	0,23
Equipamentos elétricos			
Padrão de uso		Calor produzido por equipamentos	
Sala	14h-22h	Carda internas - Sala	120 W
		Fração radiante	0,30
Ventilação Natural			
Padrão de abertura (Janelas)		Fração de abertura	
Temperatura interna	$\geq 19\text{ }^{\circ}\text{C}^{(2)}$	Janelas (45%) Portas ⁽³⁾ (100%)	45%
		Coefficiente de descarga da abertura (C_d)	0,6

(1) Pessoa com 1,80 m² de área de superfície corporal.

(2) Apenas quando habitação estiver ocupada e a temperatura interna for superior à externa.

(3) Portas internas entre os APP e APT, com exceção das portas de banheiros, que devem ser consideradas sempre fechadas.

Fonte: NBR 15220-1 (ABNT, 2005a); Lamberts, Melo *et al.* (2023a). Adaptado.

O modelo também considera o contato da laje do piso com o solo, levando em consideração a influência da temperatura do solo no desempenho térmico da edificação.

De acordo com Dunel (2020), considerar a temperatura do solo é fundamental, pois as trocas de calor entre o piso da edificação e o solo afetam diretamente as temperaturas internas da construção.

3.2.4 Variações no modelo de referência

A fim de realizar a avaliação, por meio da simulação computacional, do desempenho térmico dos tijolos ecológicos em comparação com diferentes sistemas, foram realizadas variações nos materiais da envoltória da edificação, considerando as variações do sistema construtivo da alvenaria utilizando o tijolo ecológico, tijolo maciço e bloco cerâmico com argamassa de revestimento, conforme Tabela 5.

Tabela 5 - Variações do sistema construtivo das paredes.

Sistema de parede	Simulação	Dimensões (cm)
Parede de referência (concreto)	A	-
Tijolo ecológico	B	12,5 x 7,5 x 25,0
Tijolo maciço	C	10,0 x 6,0 x 22,0
Bloco cerâmico	D	9,0 x 19,0 x 19,0

Fonte: PBE Edifica (2022); Autor.

3.2.4.1 Cálculo das propriedades das variações

Para obter as propriedades para a avaliação e realizar as simulações considerando as variações das paredes do envelope da edificação é necessário calcular as propriedades para o sistema de parede equivalente.

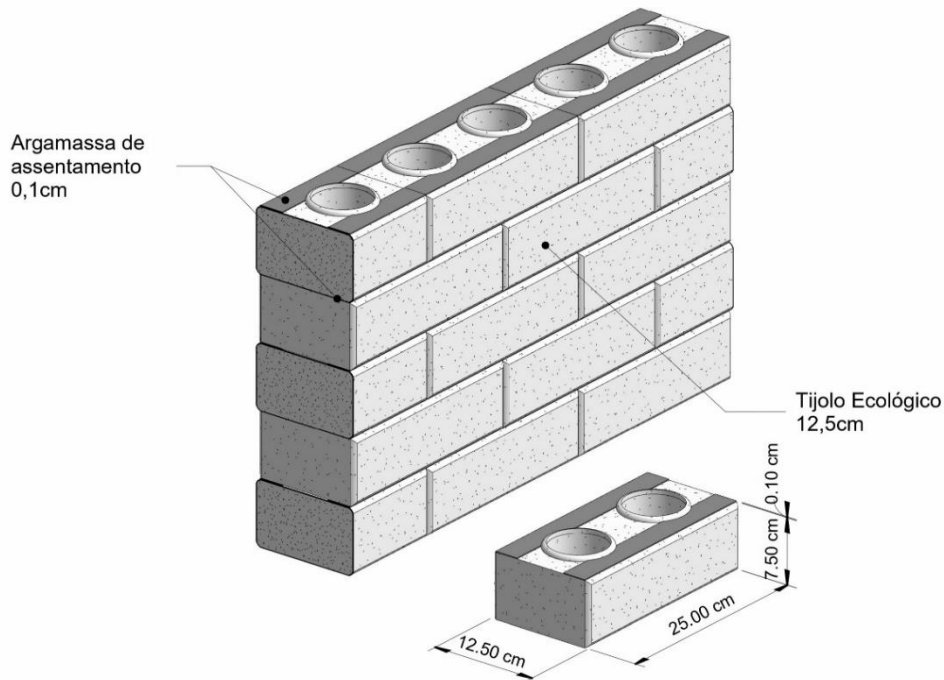
Conforme destacado por Dunel (2020), uma vez que para a simulação, o sistema de parede é modelado por camadas com propriedades uniformes, não é possível adicionar as propriedades do tijolo ecológico vazado e da argamassa de assentamento separadamente no software EnergyPlus, sendo necessário calcular as propriedades térmicas desta combinação.

Como nesta pesquisa foi realizada a avaliação do desempenho térmico dos tijolos ecológicos vazados, é importante considerar também a influência dos vazios dos tijolos, sendo considerada esta camada de ar no cálculo.

Como visto na revisão bibliográfica, os tijolos ecológicos podem ser assentados com ou sem a utilização de uma fina camada de argamassa de assentamento ou material adesivo. Para a realização deste trabalho as paredes de tijolos ecológicos foram consideradas com a utilização de argamassa de assentamento com (1mm) na base dos tijolos, a partir de informações cedidas pela empresa que produz os tijolos.

Dessa forma, foi realizado o cálculo das propriedades térmicas do sistema parede de tijolos ecológicos (Figura 12) de acordo com a NBR 15220-2 (ABNT, 2022). Os cálculos do procedimento descrito a seguir estão no APÊNDICE A.

Figura 12 - Detalhe construtivo da parede de tijolo ecológico.



Fonte: Autor.

Conforme visto na revisão bibliográfica, a norma orienta o cálculo da resistência térmica equivalente calculando o R_{upper} e o R_{lower} . Para o tijolo ecológico vazado, o R_{upper} foi determinado utilizando a Equação (11):

$$R_{upper} = \frac{1}{\frac{f_A}{R_A} + \frac{f_B}{R_B} + \frac{f_C}{R_C} + \frac{f_D}{R_D}} \quad \text{Equação (11)}$$

Onde:

- R_{upper} é o limite superior da resistência térmica ($m^2 \cdot K/W$);
- R_A, R_B, R_C são as resistências térmicas das seções A, B e C ($m^2 \cdot K/W$);
- f_A, f_B, f_C são as áreas fracionadas das seções A, B e C (%).

Para o R_{lower} , é calculada a resistência térmica equivalente, R_j , de cada camada térmica não homogênea. O tijolo ecológico foi separado em 3 camadas e calculada as resistências R_1 e R_3 de acordo com a Equação (12) e R_2 conforme Equação (13).

$$R_j = \frac{1}{\frac{f_A + f_B}{R_{A,j}} + \frac{f_C + f_D}{R_{C,j}}} \quad \text{Equação (12)}$$

Onde:

- R_j É a resistência térmica da camada ($m^2 \cdot K/W$);

$R_{A,j}, R_{C,j}$ São as resistências térmicas das camadas das seções A e C ($m^2 \cdot K/W$);
 f_A, f_B, f_C, f_D são as áreas fracionadas das seções A, B, C e D (%).

$$R_2 = \frac{1}{\frac{f_A}{R_{A,2}} + \frac{f_B + f_D}{R_{B,2}} + \frac{f_C}{R_{C,2}}} \quad \text{Equação (13)}$$

Onde:

R_2 É a resistência térmica da camada ($m^2 \cdot K/W$);

$R_{A,j}, R_{B,j}, R_{C,j}$ São as resistências térmicas das camadas das seções A, B e C ($m^2 \cdot K/W$);

f_A, f_B, f_C, f_D São as áreas fracionadas das seções A, B, C e D (%).

Então, determina-se o R_{lower} é de acordo do com a Equação (14).

$$R_{lower} = R_{si} + R_1 + R_2 + R_2 + R_{se} \quad \text{Equação (14)}$$

A resistência térmica total equivalente é obtida por meio da média aritmética dos limites superior (R_{upper}) e inferior (R_{lower}) da resistência conforme Equação (4).

Os valores para a resistência térmica da superfície interna (R_{si}) e a resistência térmica da superfície externa (R_{se}), utilizados na determinação do R_{upper} e R_{lower} , foram obtidos na NBR 15220-2 (ABNT, 2005b), e correspondem a $0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{°C}/\text{W}$ e $0,13 \text{ m}^2 \cdot \text{°C}/\text{W}$ respectivamente.

3.2.4.2 Propriedades obtidas das variações

A Tabela 6 apresenta todos os resultados das propriedades térmicas dos tijolos ecológicos. Os valores referentes aos sistemas construtivos de bloco cerâmico e tijolo maciço foram adotados de CB3E (2022), os autores realizaram o recálculo dos valores típicos de transmitância térmica dos componentes mais comuns no mercado da construção civil no Brasil, utilizando o método de cálculo determinado pela NBR 15220-2:2022.

O cálculo foi realizado a partir de componentes que compõem o Anexo V do RAC (Requisitos para Avaliação da Conformidade) da INI (PBE EDIFICA, 2022). O sistema de parede com bloco cerâmico possui blocos de $9,0 \times 19,0 \times 19,0 \text{ cm}$ com $2,5 \text{ cm}$ de argamassa de revestimento e 1 cm de argamassa de assentamento. E o sistema com tijolo cerâmico possui tijolos com $10,0 \times 6,0 \times 22,0 \text{ cm}$ sem argamassa de revestimento e 1 cm de argamassa de assentamento conforme detalhes da Figura 13.

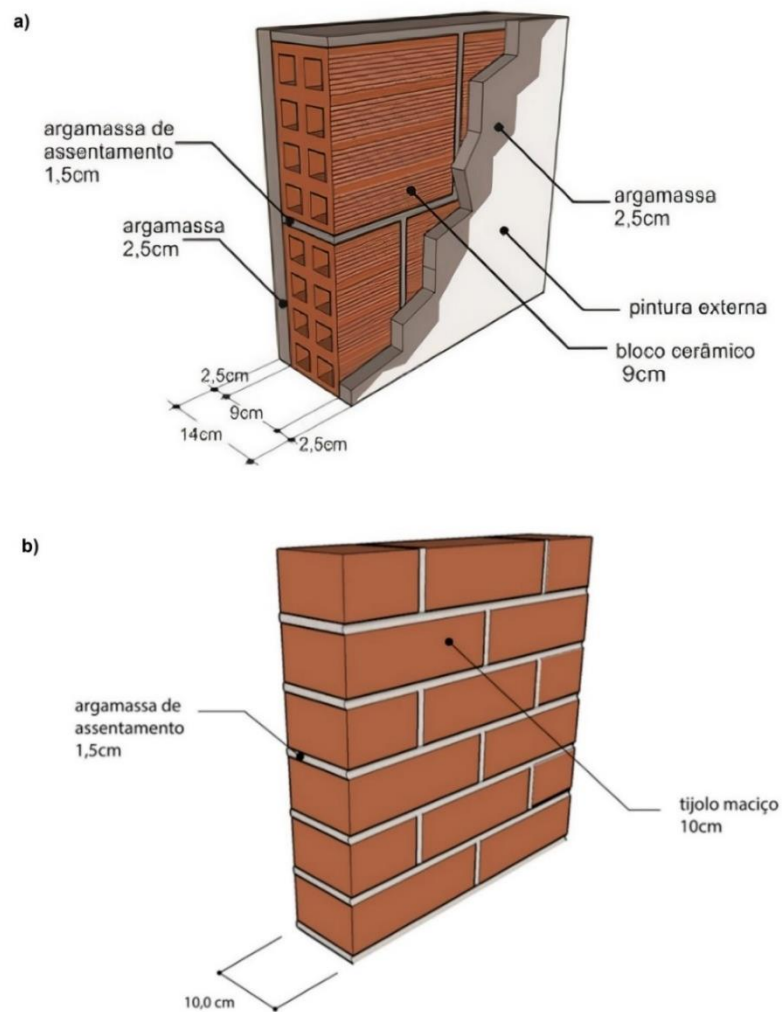
Tabela 6 - Propriedades térmicas das variações do sistema construtivo das paredes.

Sistema de parede	Resistência (m^2K/W)	Transmitância (W/m^2K)
Concreto (modelo de referência)	0,227	4,40
Tijolo ecológico	0,341	2,93
Tijolo maciço	0,279	3,58
Bloco cerâmico ^(a)	0,392	2,55

(a) Sem argamassa de revestimento.

Fonte: CB3E, (2022); Autor.

Figura 13 - Detalhe construtivo das paredes. a) Bloco cerâmico; b) Tijolo maciço.



Fonte: PBE Edifica, (2022). Adaptado.

Para realizar a simulação computacional com todas as variações das paredes, os dados de entrada correspondentes a essas variações (Tabela 8) foram inseridos no software EnergyPlus®, criando um arquivo de entrada para cada simulação. Todas as propriedades termo físicas dos sistemas construtivos da edificação são inseridas como dados de entrada no software.

Conforme descrito por Dunel (2020), o programa utiliza como dados de entrada informações como a espessura do material, densidade, condutividade térmica, rugosidade, calor específico, absorvância e emissividade. A autora destaca que a absorvância e emissividade se relacionam à superfície exposta da vedação e são inseridas como dados de entrada no software.

Os tijolos utilizados como referência utilizam um solo que possui a coloração bem clara (Figura 8), dessa forma para obtenção da absorvância da superfície, os sistemas de parede com estes tijolos foram considerados com utilização de pintura branca, os valores de absorvância e emissividade utilizados para estes componentes estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Propriedades de emissividade e absorvância dos materiais expostos.

Sistema de parede	Absorvância (ϵ)	Emissividade (α)
Tijolo ecológico (Pintura branca)	0,20	0,90
Tijolo maciço (Tijolo aparente)	0,65	0,85
Bloco cerâmico (Pintura branca)	0,20	0,90

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

A Figura 14 ilustra a inserção dos dados no arquivo IDF do tijolo ecológico com o IDF Editor do EnergyPlus. Os valores das propriedades termo físicas das variações no sistema construtivo, utilizados para realizar as simulações, estão detalhados na Tabela 8.

Figura 14 - Dados inseridos no arquivo IDF da variação com tijolo ecológico.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5
Name		ref_fibro_telha_	ref_concreto_	ref_porta_mac	ref_concreto_	par_tijolo_ecologico_12.5cm
Roughness		MediumRough	Rough	MediumSmooth	Rough	Rough
Thickness	m	0,006	0,1	0,03	0,1	0,125
Conductivity	W/m-K	0,65	1,75	0,15	1,75	0,73
Density	kg/m3	1700	2200	650	2200	1747
Specific Heat	J/kg-K	840	1000	2300	1000	1000
Thermal Absorptance		0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Solar Absorptance		0,65	0,58	0,5	0,5	0,2
Visible Absorptance		0,65	0,58	0,5	0,5	0,2

Fonte: Autor.

Tabela 8 - Propriedades térmicas dos materiais construtivos.

Sistema	Espessura (cm)	Cond. Térm. (W/m.K)	Calor esp. (J/kg.K)	Massa esp. (kg/m ³)	
Simulação A Parede de referência: painel de concreto	10	1,75	1000	2200	
Simulação B Tijolo ecológico com 0,1 cm de argamassa de assentamento	12,5	0,73 ^(a)	1000 ^(a)	1747 ^(a)	
Simulação C Tijolo maciço com 1,5 cm de argamassa de assentamento	10	0,92 ^(a)	940 ^(a)	1950 ^(a)	
Simulação D	Argamassa de revestimento	2,5	1,00	1000	1800
	Bloco cerâmico com 1,5cm de argamassa de assentamento	9	0,405 ^(a)	931 ^(a)	1370 ^(a)
	Argamassa de revestimento	2,5	1,00	1000	1800

(a) Valores equivalentes para o sistema, calculados conforme NBR 15220-2 (ABNT, 2022).

Fonte: NBR ISO 10456 (ABNT, 2022a); CB3E (2022); Autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 AVALIAÇÃO PELO PROCEDIMENTO SIMPLIFICADO

A seguir será apresentada a avaliação do desempenho térmico das vedações verticais, considerando os limites mínimos estabelecidos pelas normas NBR 15575-4 (ABNT, 2021c). Os valores correspondem às propriedades térmicas, incluindo os cálculos para todas as variações no modelo equivalente de referência, para o tijolo ecológico, tijolo maciço e bloco cerâmico.

A Tabela 9 apresenta os valores mínimos para a zona bioclimática 7, juntamente com os valores das variações. Nota-se, todos os sistemas de parede apresentam atendimento aos requisitos da norma para capacidade térmica, com o tijolo maciço apresentando a maior capacidade térmica (158) seguido do tijolo ecológico (154) e o bloco cerâmico menor (151) capacidade térmica.

Tabela 9 - Verificação do atendimento das propriedades térmicas calculadas.

Sistema	Transmitância (U) W/m ² ·K		Capacidade Térmica (CT) kJ/m ² ·K
Valores de referência	$\alpha \leq 0,6$	$U \leq 3,7$	CT ≥ 130
	$\alpha > 0,6$	$U \leq 2,5$	
Tijolo ecológico		2,93	154
Tijolo maciço		3,58	158
Bloco cerâmico ^(a)		2,26	151

(a) Com argamassa de revestimento.

Fonte: PBE Edifica, (2022); Autor.

Como observado na revisão bibliográfica, a capacidade térmica é uma propriedade dos componentes construtivos que indica a quantidade de calor necessária para elevar em uma unidade a temperatura de uma unidade de área do componente. Assim, quanto maior capacidade térmica do componente, maior sua inércia térmica, e maior será o amortecimento dos picos de temperatura interna em relação ao ambiente externo (LAMBERTS et al., 2010).

No tocante a transmitância térmica quando a absorvância é menor que 0,6, tanto as paredes com tijolo ecológico quanto com e bloco cerâmico, atendem os requisitos da norma, uma vez que a absorvância das superfícies externas destes, foram consideradas como 0,2 (pintura branca). Já o tijolo maciço por ser considerado como tijolo aparente apresenta uma

absortância de 0,65, não se encaixando nesse intervalo. Mas também não atende o requisito da transmitância para superfícies com absortância maior que 0,6.

Vale ressaltar que para a transmitância quando a absortância é maior que 0,6, a parede com blocos cerâmicos é a que se aproxima mais do atendimento, mesmo não estando dentro dos requisitos, mas nenhum dos sistemas estaria em conformidade com o determinado pela norma para zona bioclimática 7 neste intervalo.

De acordo com Lamberts et al. (2010), a transmitância térmica está diretamente relacionada à espessura do componente e à condutividade térmica dos materiais utilizados em sua construção. Essa é a propriedade dos componentes construtivos que determina a quantidade de energia térmica que pode passar através deles por unidade de área, tendo grande influência no desempenho térmico das paredes.

Para o tijolo ecológico o atendimento aos requisitos transmitância da norma se dá com materiais cuja condutividade térmica é no máximo 1,9 W/m.K para superfícies com absortância $\leq 0,6$ e condutividade de 0,6 W/m.K para superfícies com absortância $> 0,6$.

De maneira geral, é possível observar que os tijolos ecológicos, assim como os blocos cerâmicos, apresentam uma redução na sua condutividade equivalente devido à presença de vazios de ar, resultando em uma transmitância térmica inferior para as paredes. Essa característica faz com que as paredes construídas com tijolos ecológicos estejam em conformidade com os limites estabelecidos pela norma, evidenciando um desempenho térmico satisfatório para as edificações que os utilizam.

A Tabela 10 apresenta as propriedades de uma parede com tijolos ecológicos com a variação da condutividade do material do tijolo para o intervalo de 0,6 e 1,1 (W/m.K) considerando os intervalos descritos por Silva e Milani (2022) e pela NBR 15220-2 (ABNT, 2005b). Os cálculos foram realizados utilizando a mesma metodologia descrita no APÊNDICE A.

Tabela 10 - Intervalo de propriedades com variação com condutividade do solo-cimento.

Condutividade do solo-cimento	Resistência (m^2K/W)	Transmitância (W/m^2K)
0,6	0,402	2,486
0,7	0,377	2,654
0,8	0,357	2,801
0,9	0,341	2,931
1	0,328	3,046
1,1	0,318	3,149

Fonte: Autor.

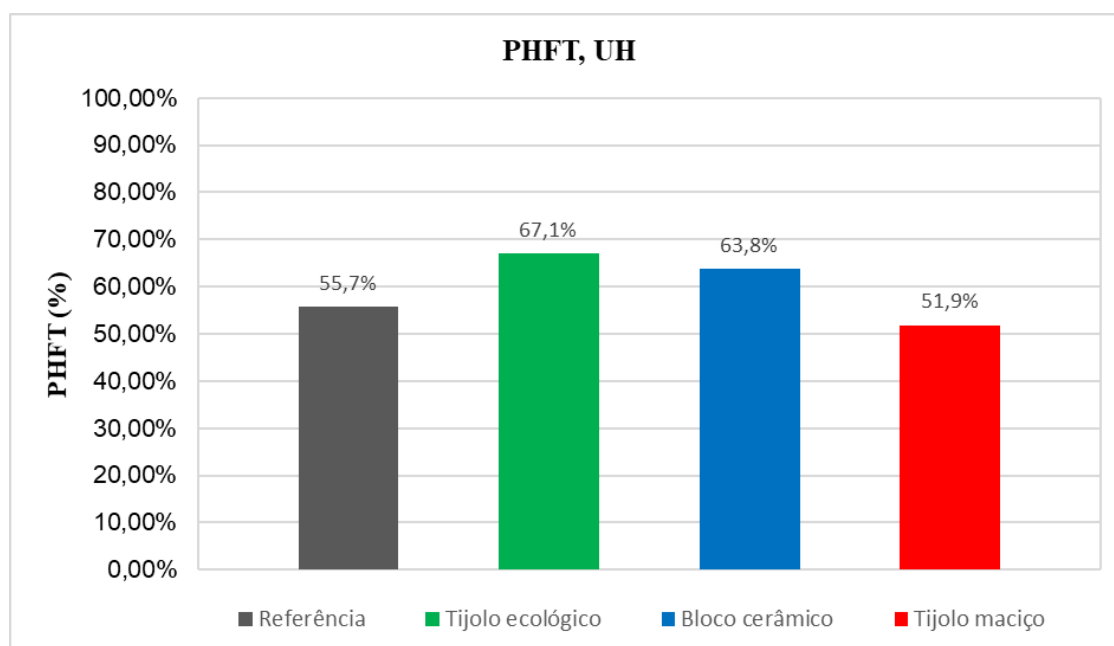
4.2 AVALIAÇÃO PELO PROCEDIMENTO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Nesta etapa será analisado o percentual de horas de ocupação dentro da faixa de temperatura operativa (PHFT_{UH}), a temperatura operativa anual máxima (Tomáx_{UH}), e a carga térmica total (CgTT_{UH}) da unidade habitacional (UH) do modelo com tijolos ecológicos em comparação com o modelo de referência, tijolo maciço e bloco cerâmico, que corresponde às simulações B, A C e D respectivamente. Também será avaliado o desempenho geral da HIS com tijolos ecológicos a partir dos níveis de desempenho determinados pela NBR 15575:2021. Os resultados foram obtidos a partir da planilha de cálculo dos indicadores (LabEEE, 2020a).

4.2.1 Percentual de horas de ocupação da UH dentro da faixa de temperatura operativa (PHFT_{UH})

Conforme pode-se observar na Figura 15, o modelo construído com tijolos ecológicos apresenta um PHFT_{UH} de 67,1%, para o intervalo 2 que corresponde a temperaturas menores que 28°C, enquanto o modelo de referência, que possui paredes de concreto, apresenta um PHFT_{UH} de 55,7%, representando um aumento de 11,4% no PHFT da HIS em comparação com o modelo de referência. Em relação aos modelos com bloco cerâmico e tijolo maciço, que apresentam respectivamente um PHFT_{UH} de 63,8% e 51,9%, o modelo com tijolo ecológico apresenta um desempenho superior, estando o modelo com bloco cerâmico mais próximo, com uma diferença de apenas 3,3%.

Figura 15 - Resultados do PHFT para a UH de cada variação.

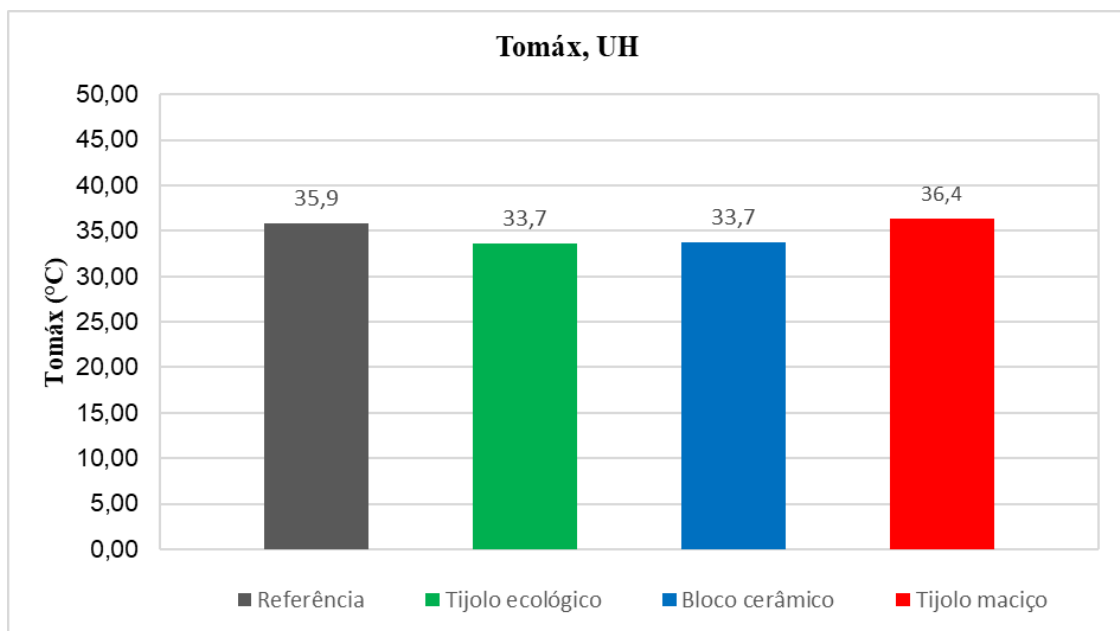


Fonte: Autor.

4.2.2 Temperatura operativa anual máxima ($Tomáx_{UH}$)

Os resultados referentes à temperatura operativa anual máxima da unidade habitacional ($Tomáx_{UH}$) demonstrado na Figura 16, obteve desempenho geral semelhantes ao $PHFT_{UH}$, porém com o tijolo ecológico e o bloco cerâmico as mesmas temperaturas máximas ($33,7^{\circ}C$). Em comparação com o modelo de referência ($35,9^{\circ}C$), ambos apresentam uma redução de $2,2^{\circ}C$ na $Tomáx_{UH}$, que representa uma redução de 6%. Já em comparação com o tijolo maciço, o ecológico apresenta uma diferença de temperatura $2,7^{\circ}C$.

Figura 16 - Resultados da $Tomáx$ para a UH de cada variação.

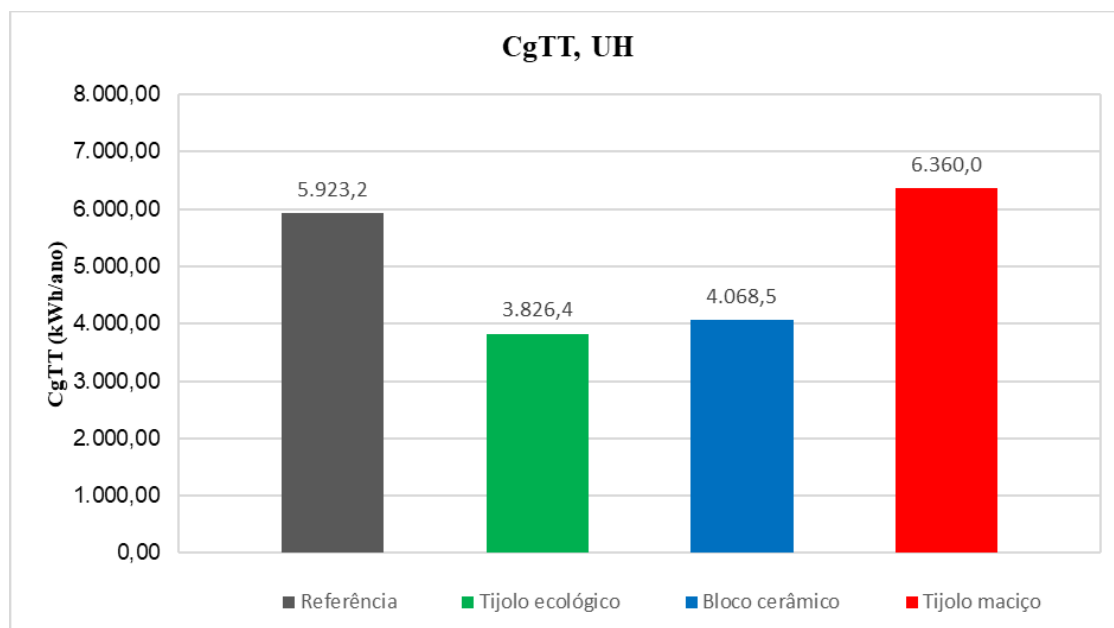


Fonte: Autor.

4.2.3 Carga térmica total ($CgTT_{UH}$)

Carga térmica total ($CgTT_{UH}$), assim como nos resultados anteriores, o tijolo ecológico obteve o desempenho mais satisfatório apresentando uma carga térmica de $3826,4$ kWh/ano, que resulta em uma diferença de $2,096,8$ kWh/ano (35%) quando comparado ao modelo de referência ($5923,2$ kWh/ano), além de uma diferença de $242,1$ kWh/ano e $2,533,6$ kWh/ano quando comparado com os modelos com bloco cerâmico e tijolo maciço respectivamente (Figura 17).

Figura 17- Resultados da CgTT para a UH de cada variação.



Fonte: Autor.

No geral, em todos os resultados anteriores, observa-se uma melhora no desempenho térmico da HIS quando utilizando os tijolos ecológicos em comparação com o modelo de referência que utiliza parede de concreto. Quando comparado aos outros modelos, o modelo com tijolo ecológico apresenta um desempenho muito próximo ao obtido pelo bloco cerâmico e superior ao tijolo maciço, que obteve o desempenho mais desfavorável entre todas as variações de modelos avaliados.

Entre os resultados de cada sistema, esperava-se que o modelo com bloco cerâmico apresentasse o melhor desempenho, pois possui a menor transmitância térmica equivalente entre todos ($2,26 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ com argamassa de revestimento), mas apresentou em alguns pontos, mesmo que mínimo, um desempenho inferior ao tijolo ecológico com transmitância superior ($2,93 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$). Dentre os fatores que podem ter causado esse resultado está a sua capacidade térmica inferior, que segundo Lamberts et al. (2010), quanto menor ela for, mais a edificação será afetada pelos picos de temperatura externa, pois menor será amortecimento dos picos. E a argamassa de revestimento, que por ter condutividade térmica maior, pode ter afetado o desempenho geral da parede na simulação, uma vez que ela é inserida separadamente como uma camada no EnergyPlus.

O sistema com tijolo maciço apresentou o pior desempenho entre as variações, este fato se dá por sua maior transmitância térmica ($3,58 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) e pela maior absorvância à radiação solar da sua superfície (0,65). No estudo feito por Dunel (2022), verifica-se que as edificações

estudadas com paredes pintadas de branco, com menor absorvância (0,20), obtiveram um melhor desempenho térmico. Assim percebe-se que os materiais que compõem as camadas das paredes afetam significativamente seu desempenho, dependendo das condições em que estão inseridas.

4.2.4 Níveis de desempenho

A partir do Quadro 10 observa-se que a HIS com tijolos ecológicos atende ao nível mínimo na condição de ventilação natural, atendendo aos requisitos $Tomá_{UH}$ e $PHFT_{UH}$. O nível Intermediário não foi atendido, mesmo atendendo o nível intermediário para $RedCgTT$, pois seria necessário um $\Delta PHFT$ (11,4%) igual ou superior a 12,7% ($\Delta PHFT_{mín}$), para atendimento do $PHFT_{UH}$ no nível intermediário. Para que a edificação seja classificada como nível intermediário é necessário que ambos os critérios sejam atendidos, e para o atendimento ao nível superior, além dos critérios dos outros níveis seria preciso uma $RedCgTT$ (35,4%) maior que 55%.

Quadro 10 - Níveis de desempenho da HIS com tijolo ecológico.

Níveis	Critério			Alcançado	Atendimento
Mínimo	PHFT UH	$PHFT_{UH,real} >$	50,1%	67,1%	Atende ao Nível Mínimo
	Tomáx UH	$Tomá_{UH,real} \leq$	37,9	33,7	Atende ao Nível Mínimo
	Tomín UH	$Tomín_{UH,real} \geq$	20,3	21,1	Critério não avaliado Na ZB 7
Intermediário	PHFT UH	$\Delta PHFT \geq$	12,7%	11,4%	Não Atende ao Nível Intermediário
	CgTT UH	$RedCgTT \geq$	0%	35,4%	Atende ao Nível Intermediário
Superior	PHFT UH	$\Delta PHFT \geq$	12,7%	11,4%	Não Atende ao Nível Superior
	CgTT UH	$RedCgTT \geq$	55,0%	35,4%	Não Atende ao Nível Superior
Nível da edificação	Nível Mínimo:				Atende ao Nível Mínimo
	Nível Intermediário:				Não atende ao Nível Intermediário
	Nível Superior:				Não Atende ao Superior

Fonte: Autor.

Destaca-se que para esta avaliação, visando observar o desempenho térmico dos tijolos ecológicos, foram utilizadas nas variações as mesmas características construtivas do modelo de referência determinado pela NBR 15575-1 (ABNT, 2021b), variando apenas as propriedades referentes às paredes para compor as variações com cada tipo de tijolo avaliado.

Para alcançar níveis de desempenho superiores em casos de análise de uma edificação real em fase de projeto, haveria uma necessidade de melhorias no uso dos outros elementos que compõem a envoltória da edificação, como o telhado, utilização de sombreamento, e uma melhor adequação da ventilação natural com áreas de aberturas maiores. Conforme destaca Krelling et al. (2020), a definição das exigências de cada nível visa incentivar o mercado da construção civil a buscar resultados superiores. Além de cumprir as normativas, atingir os níveis Intermediário ou Superior atua como um selo de qualidade do projeto em termos de desempenho térmico.

5 CONCLUSÃO

Com base nas informações obtidas na revisão bibliográfica e nos resultados deste trabalho, bem como destacado por Dunel (2020), é evidente que diversos fatores podem impactar o desempenho térmico de uma edificação. Entre esses fatores, destaca-se o material que compõe sua envoltória e a cor da superfície externa das paredes, os quais exercem uma influência significativa na quantidade de calor absorvido. Essas considerações ressaltam a importância de escolher cuidadosamente os materiais de construção ao projetar edificações, visando otimizar o desempenho térmico e conseqüentemente a eficiência energética do ambiente construído, contribuindo para ambientes mais confortáveis e sustentáveis.

Os resultados obtidos mostram que os tijolos ecológicos atendem aos requisitos estabelecidos pela NBR 15575:2021, apresentando, em alguns pontos, vantagens em relação a outros sistemas construtivos, como tijolos maciços e blocos cerâmicos.

A transmitância térmica, crucial para entender a eficiência energética, revelou que, para superfícies com absorvância $\leq 0,6$, os tijolos ecológicos atenderam aos requisitos normativos, destacando-se pela sua eficácia mesmo em comparação com tijolos maciços e blocos cerâmicos. Com a simulação computacional observa-se com maior riqueza de detalhes o desempenho da edificação, mostrando melhorias significativas no percentual de horas de ocupação dentro da faixa de temperatura operativa (PHFT), na temperatura operativa anual máxima (Tomax) e na carga térmica total (CgTT) da HIS com tijolos ecológicos quando comparado ao modelo de referência com paredes de concreto.

Os resultados da simulação computacional revelaram que a HIS com tijolos ecológicos apresenta desempenho próximo, mas ainda superior a outras variações de materiais, apresentando um aumento de 11,4% no percentual de horas de ocupação dentro da faixa de temperatura operativa, comparando com modelo de referência com paredes de concreto. A temperatura operativa anual máxima foi reduzida em 2,2°C (6%) em comparação ao modelo de referência, com resultado equivalente para o bloco cerâmico. A carga térmica total registrou uma diminuição de 35% em relação ao modelo de referência, destacando a eficácia dos tijolos ecológicos na minimização do impacto térmico na unidade habitacional.

Os tijolos ecológicos demonstraram ser uma opção eficiente para a construção de edificações, contribuindo para a redução da carga térmica, aumento do conforto térmico e atendimento aos requisitos estabelecidos pelas normas vigentes. A análise dos níveis de desempenho evidenciou que a HIS com tijolos ecológicos atendeu ao nível mínimo na condição de ventilação natural.

A principal dificuldade enfrentada durante esta pesquisa reside na obtenção das propriedades termo físicas dos materiais, principalmente no que diz respeito ao solo-cimento. Em geral, para uma definição mais precisa dessas propriedades, seria necessário realizar experimentos diretos. No entanto, essa etapa não pôde ser realizada durante o desenvolvimento do trabalho, levando à utilização de valores encontrados na literatura.

É importante salientar que para esta pesquisa, os elementos estruturais da edificação não foram analisados, considerando apenas a influência das vedações no desempenho térmico.

Em suma, os resultados desta pesquisa podem servir para compreensão da viabilidade e eficácia dos tijolos ecológicos como uma escolha construtiva vantajosa em termos de desempenho térmico, oferecendo uma alternativa sustentável e termicamente eficiente para a construção civil em Serra Talhada, apresentando atendimento aos requisitos normativos, promovendo a adoção de práticas construtivas mais responsáveis e alinhadas com as demandas ambientais e de conforto térmico.

5.1 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Durante o trabalho, observou-se que os elementos estruturais, que são inseridos nos vazados do tijolo ecológico ocupando o espaço dos vazios de ar nessas áreas, podem influenciar no desempenho térmico dos tijolos. A forma de detalhamento dos componentes para a simulação computacional com o EnergyPlus pode exercer influência no desempenho final da edificação analisada. Além disso, é importante notar que, na Zona Bioclimática 7, não há consideração de temperaturas baixas devido ao clima predominantemente mais quente nessa região.

Dessa forma deixa-se como sugestão para trabalhos futuros:

- Avaliar a influência dos elementos estruturais no desempenho térmico de edificações com tijolos ecológicos vazados.
- Realizar a caracterização da condutividade térmica do solo-cimento de forma experimental.
- Investigar como diferentes formas de detalhamento dos componentes, especialmente em relação à simulação computacional com o EnergyPlus, podem influenciar o desempenho final da edificação, seus reflexos em condições reais.
- Avaliar o desempenho dos tijolos ecológicos vazados em climas frios.

REFERÊNCIAS

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

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15220-1:** Desempenho térmico de edificações – Parte 1: Definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro: ABNT, 2005a.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15220-2:** Desempenho térmico de edificações – Parte 2: Componentes e elementos construtivos das edificações — Resistência e transmitância térmica — Métodos de cálculo (ISO 6946:2017 MOD). Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15220-2:** 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.

ABNT. 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.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15575:** Edificações Habitacionais — Desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15575-1-1:** Edificações habitacionais — Desempenho Parte 1-1: Base-padrão de arquivos climáticos para a avaliação do desempenho térmico por meio do procedimento de simulação computacional Rio de Janeiro: ABNT, 2021a.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15575-1:** Edificações Habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2021b.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15575-4:** Edificações Habitacionais — Desempenho Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas — SVVIE. Rio de Janeiro: ABNT, 2021c.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8491:** Tijolo de solo-cimento — Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 10456**: Materiais e produtos de construção — Propriedades higrotérmicas — Valores e procedimentos de projeto tabulados para determinar valores térmicos declarados e de projeto. 2022a.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10833**: Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica — Procedimentos. Rio de Janeiro, 2012. Versão corrigida: 2013.

BASE DE DADOS DO ESTADO (BDE). **Tipologia climática**. 2017. Disponível em: http://www.bde.pe.gov.br/visualizacao/Visualizacao_formato2.aspx?codFormatacao=706&CodigoInformacao=633&Cod=1. Acesso em: 20 dez. 2023.

CALLEJAS, I. J. A; DURANTE, L. C; GUARDA, E. L. A; QUEIRÓZ, H. S. Parede monolítica em Solo-Cimento Autoadensável: Potencialidades para o desempenho térmico de edificações. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 19., 2022, Canela. **Anais [...]** Porto Alegre: ANTAC, 2022. p. 1-13. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/2101>. Acesso em: 21 ago. 2023.

CAMPOS, Roger Francisco Ferreira; WEBER, Eduardo; BORGA, Tiago. Análise da eficiência do tijolo ecológico solo-cimento na construção civil. **IGNIS Periódico Científico de Arquitetura e Urbanismo Engenharias e Tecnologia de Informação**, 2017.

CB3E CENTRO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. **Cálculo da transmitância térmica de componentes construtivos usuais segundo a NBR 15220-2:2022**. 2022. Disponível em: https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/notas_tecnicas/RI%2010-2022-02.pdf. Acesso em: 13 set. 2023.

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.

CICERI, Taillan. **Estudo comparativo de viabilidade econômica para uma edificação com bloco cerâmico, tijolo cerâmico maciço e tijolo de solo-cimento**. 2016. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Taquari - Univates, Lajeado, 08 dez. 2016. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10737/1418>. Acesso em: 21 nov. 2023.

DUNEL, Maria Paula. **Avaliação do desempenho térmico de tijolos ecológicos em Aracaju/SE por meio de simulação computacional**. 2020. 149 f. Dissertação (Mestrado em

Engenharia Civil) - Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, 2020. Disponível em: <https://ri.ufs.br/jspui/handle/riufs/13630>. Acesso em: 12 set. 2023.

ECOTERM. **TIJOLO ECOLÓGICO**: uma técnica milenar para as construções mais inovadoras. 2023. Disponível em: <https://ecoterm.org/tijolo-ecologico>. Acesso em: 21 nov. 2023.

EUPHROSINO, Camila Augusto et al. Tijolos de solo-cimento usados para Habitação de Interesse social (HIS) em mutirão: estudo de caso em olaria comunitária. **revista Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 27, p. e202147087, 2022.

FRANCO, Luiza C. et al. Design and thermal evaluation of a social housing model conceived with bioclimatic principles and recycled aggregates. **Sustainable cities and society**, v. 51, n. 101725, p. 101725, 2019.

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

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades e Estados: Serra Talhada**. 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pe/serra-talhada.html>. Acesso em: 20 dez. 2023.

KOPPEN, W. **Climatologia con un estudio de los climas de la tierra**. México: FCE, 1948.

KRELLING, A. F.; ELI, L. G.; OLINGER, M. S.; VEIGA, R. K.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. PROPOSTA DE MÉTODO DE AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE RESIDÊNCIAS: NBR 15575. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18., 2020. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2020. p. 1–8. DOI: 10.46421/entac.v18i.847. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/847>. Acesso em: 13 set. 2023.

LABEEE Laboratório de Eficiência Energética de Edificações. **Planilha de Cálculo de Indicadores**. 2020a. Disponível: https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/documents/Planilha_NBR15575_Oficial_R02.xlsm. Acesso em: 15 Nov. 2023.

LABEEE Laboratório de Eficiência Energética de Edificações. **NBR 15575-2021 - Desempenho térmico**. 2020b. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/NBR15575-2020>. Acesso em: 21 out. 2023.

LAMBERTS, Roberto. **Casa eficiente: bioclimatologia e desempenho térmico (vol 1)**. Florianópolis: Ufsc/Labee, 2010. 130 p. Disponível em: https://labee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/livros/CasaEficiente_vol_I_WEB.pdf. Acesso em: 18 dez. 2023.

LAMBERTS, Roberto. **Casa eficiente: Simulação Computacional do Desempenho Termoenergético (vol 4)**. Florianópolis: UFSC/LabEEE, 2010a. 56 p. Disponível em: https://labee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/livros/CasaEficiente_vol_IV_WEB.pdf. Acesso em: 18 dez. 2023.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F.O.R. **Eficiência energética na arquitetura**. 3ªed. São Paulo: Editora Eletrobras/Procel, 2014. Disponível em: https://labee.ufsc.br/sites/default/files/apostilas/eficiencia_energetica_na_arquitetura.pdf. Acesso em: 18 dez. 2023.

LAMBERTS, Roberto; Melo, Ana Paula *et al.* **hab.labEEE**, 2023. Disponível em: <https://hablabee.ufsc.br/>. Acesso em: 09 out. 2023.

LAMBERTS, Roberto; Melo, Ana Paula *et al.* Modelos de referência de HIS. **hab.labEEE**, 2023a. Disponível em: <https://hablabee.ufsc.br/modelosHIS>. Acesso em: 09 out. 2023.

LAMBERTS, Roberto; Melo, Ana Paula *et al.* Sobre o HabLabEEE. **hab.labEEE**, 2023b. Disponível em: <https://hablabee.ufsc.br/sobre>. Acesso em: 09 out. 2023.

MAKRYGIANNIS, Ioannis; KARALIS, Konstantinos. Optimizing Building Thermal Insulation: The Impact of Brick Geometry and Thermal Coefficient on Energy Efficiency and Comfort. **Ceramics**, v. 6, n. 3, p. 1449-1466, 2023.

MELO, Douglas Z. . **Norma de Desempenho ABNT NBR 15575: O que você precisa saber**. Disponível em: <https://normadedesempenho.com.br/norma-de-desempenho-nbr-15575/>. Acesso em: 1 nov. 2023.

MENDES, Vítor Freitas. **Métodos para avaliação de desempenho térmico de edificações envolvendo simulações energéticas**. 2023. 107 f. Dissertação (Mestrado Acadêmico). Universidade Federal de Ouro Preto. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Ouro Preto, 2023. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/jspui/handle/123456789/16318>. Acesso em: 12 set. 2023.

MOTTA, C. J.; MORAIS, W. P.; ROCHA, N. G. Tijolo de Solo Cimento: Análise das características físicas e viabilidade econômica de técnicas construtivas sustentáveis. Belo

Horizonte: **E-xata**, 2014. 13-26 p. Disponível em:
<http://dx.doi.org/10.18674/exacta.v7i1.1038>. Acesso em: 30 nov. 2023.

OLIVEIRA, Diego Nogueira de. **Análise da viabilidade do tijolo ecológico de solo-cimento na construção civil: uma revisão de literatura**. 2020. 33 f. Monografia (Graduação em Ciência e Tecnologia), Centro Multidisciplinar de Pau dos Ferros, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Pau dos Ferros, 2020. Disponível em:
<https://repositorio.ufersa.edu.br/handle/prefix/7626>. Acesso em: 12 set. 2023.

PBE Edifica. **ANEXO DA PORTARIA INMETRO N° 309/2022. ANEXO GERAL V – Catálogo de propriedades térmicas**. 2022 Disponível em:
https://www.pbeedifica.com.br/anexos_rac. Acesso em: 14 nov. 2023.

ROCHA, Marcelo da Silva; FURTADO NETO, Geraldo. **Desempenho térmico em paredes de alvenaria**. 2020. Disponível em: <http://hdl.handle.net/123456789/3689>. Acesso em: 1 nov. 2023.

SILVA, Ana Paula Maciel da. **O uso do tijolo de solo-cimento na construção civil**. Monografia (especialização) - Universidade Federal de Minas Gerais. Curso de Especialização em Construção Civil. Belo Horizonte, 2013. Disponível em:
<https://ri.ufs.br/jspui/handle/riufs/13630>. Acesso em: 14 set. 2023.

SILVA, M. T.C.; MILANI, A. P. . Condutividade térmica do material construtivo solo-cimento: um estudo bibliométrico. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 19., 2022. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2022. p. 1–16. DOI: 10.46421/entac.v19i1.2069. Disponível em:
<https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/2069>. Acesso em: 1 nov. 2023.

SILVA, Wilson Marques; FRREIRA, Regis de Castro; SOUZA, Lahuana Oliveira de; SILVA, Adriana Marques. Efeito da incorporação de resíduos agroindustriais nas características mecânicas e termofísicas de tijolos modulares de solo-cimento. **Brazilian Journal of Environmental Sciences (Online)**, n. 14, p. 9-14, 2009.

TRIANA, M. A.; LAMBERTS, R.; SASSI, P. Characterisation of representative building typologies for social housing projects in Brazil and its energy performance. **Energy policy**, v. 87, p. 524–541, 2015.

ZACARIAS, Camilla Clemente de Souza *et al.* Tijolo Ecológico – Fabricação e Análise das propriedades. **Revista Engenharia, Meio Ambiente e Inovação**, Nova Iguaçu, RJ, v. 09, n. 02, p. 95-101, jun. 2022. Semestral. Disponível em: https://unignet.com.br/wp-content/uploads/revista_engenharia_meio_ambiente_e_inovacao_volume_9_numero_2.pdf. Acesso em: 14 nov. 2023.

APÊNDICE A - CÁLCULO DAS PROPRIEDADES TERMO FÍSICAS DOS SISTEMAS CONSTRUTIVOS DE PAREDES

Foram calculadas as propriedades termo físicas de três sistemas de parede, o tijolo ecológico vazado com argamassa de assentamento, bloco cerâmico com argamassa de assentamento e revestimento e tijolo maciço com argamassa de assentamento.

1) SISTEMA DE PAREDE EQUIVALENTE DE TIJOLOS ECOLÓGICOS

Durante a pesquisa não foi possível obter a condutividade térmica dos tijolos em laboratório. Assim, para realizar o cálculo da resistência térmica da parede foi utilizado o valor de condutividade térmica para o tijolo por meio de valores de parâmetros estabelecidos na NBR ISO 10456 e NBR 15220-2:2005, conforme descrito na 15575-1, a condutividade dos materiais construtivos pode ser obtida por estimativa em função da densidade do material em questão.

Conforme SILVA e MILANI (2022), a condutividade térmica dos material construtivo solo-cimento pode variar entre 0,7 e 1,1 (W/m.K), os autores fazem um estudo bibliométrico sobre a condutividade térmica do solo-cimento e as demais propriedades físicas que a afetam, buscando um intervalo mais preciso em relação aos valores estabelecidos pela NBR ISO 10456 e NBR 15220-2:2005.

No estudo de Silva, Ferreira et al. (2009), os tijolos com solo predominantemente arenoso e densidade de 1890 kg/m³, apresentam condutividade de 0,38 W/m.k.

Nos trabalhos nota-se um bom potencial do solo-cimento para obter uma baixa condutividade térmica. Dessa forma, para esta pesquisa foi utilizado a média do intervalo descrito por SILVA e MILANI (2022) com condutividade térmica média de 0,9 W/m.K dos tijolos ecológicos. E calor específico de 1000 J/kg.K, que e o valor utilizado nas normas para maioria dos matérias que utilizam cimento em sua composição.

Tabela 11 - Dimensões e propriedades térmicas do sistema de tijolo ecológico.

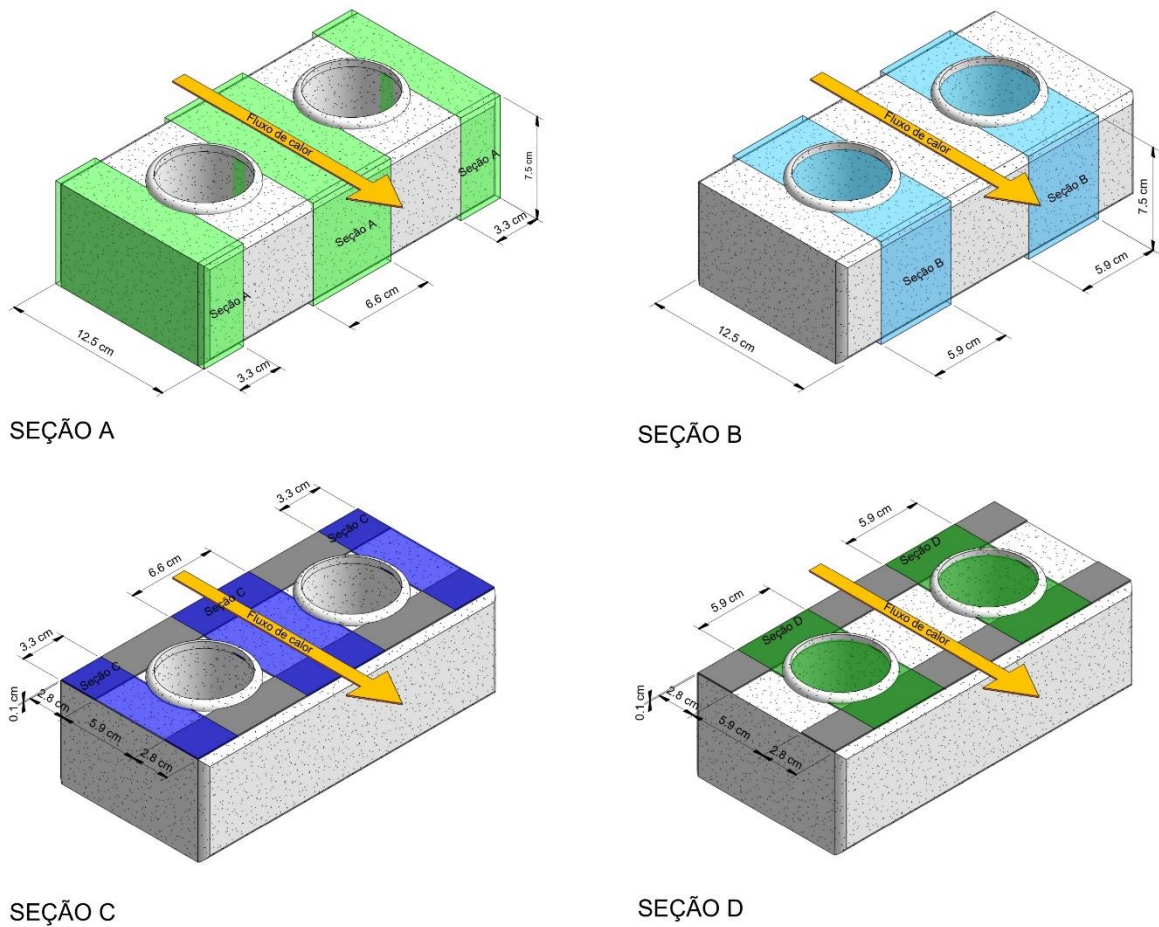
Sistema		Tijolo	Argamassa (assentamento)
Comprimento	m	0,250	0,250
Largura	m	0,125	0,115
Espessura (Altura)	m	0,075	0,001
Área (Face)	m ²	0,01875	0,00025
Densidade	kg/m ³	1746	1800
Calor específico	J/kg.K	1000	1000
Condutividade térmica	W/m.K	0,9	1

Fonte: NBR ISO 10456 (ABNT, 2022a); Autor.

a) Cálculo da transmitância térmica

Para o cálculo, de ser identificado as seções do componente avaliado, pela qual o fluxo de calor é transmitido em série, conforme Figura 18. Os círculos dos vazados do tijolo foram considerados como quadrados com área equivalente.

Figura 18 - Seções de fluxo de calor do tijolo ecológico.



Fonte: Autor.

Então, são calculados os fatores de área de cada seção, considerando a área perpendicular ao fluxo de calor:

Área Total

$$A_t = (7.5 + 0.1) \cdot 25 = 190 \text{ cm}^2$$

Seção A) – Tijolo

$$f_A = \frac{(3,3 + 6,6 + 3,3) \cdot 7,5}{A_t} = 0,521$$

Seção B) - Tijolo + Ar + Tijolo

$$f_B = \frac{(5,9 + 5,9) \cdot 7,5}{A_t} = 0,466$$

Seção C) - Argamassa

$$f_C = \frac{(3,3 + 6,6 + 3,3) \cdot 0,1}{A_t} = 0,007$$

Seção D) - Argamassa + Ar + Argamassa

$$f_D = \frac{(5,9 + 5,9) \cdot 0,1}{A_t} = 0,006$$

Em seguida, calcula-se o R_{upper} , que soma as resistências em série de cada seção. As resistências para cada seção são calculadas com as equações a seguir, a partir da Equação (3).

Logo:

Seção A) – Tijolo

$$R_A = \frac{0,125}{\lambda_{tijolo}} + R_{si} + R_{se} \quad \text{Equação (15)}$$

$$R_A = \frac{0,125}{0,9} + 0,04 + 0,13 = 0,309 \text{ W/m.K}$$

Seção B) - Tijolo + Ar + Tijolo

$$R_B = \frac{0,033}{\lambda_{tijolo}} + R_{ar} + \frac{0,033}{\lambda_{tijolo}} + R_{si} + R_{se} \quad \text{Equação (16)}$$

$$R_B = \frac{0,033}{0,9} + 0,16 + \frac{0,033}{0,9} + 0,04 + 0,13 = 0,403 \text{ W/m.K}$$

Seção C) – Argamassa + Ar + Argamassa

$$R_C = \frac{0,033}{\lambda_{arg}} + R_{ar} + \frac{0,033}{\lambda_{arg}} + R_{si} + R_{se} \quad \text{Equação (17)}$$

$$R_C = \frac{0,033}{1} + 0,16 + \frac{0,033}{1} + 0,04 + 0,13 = 0,396 \text{ W/m.K}$$

Seção D) - Argamassa + Ar + Argamassa

$$R_D = R_C \quad \text{Equação (18)}$$

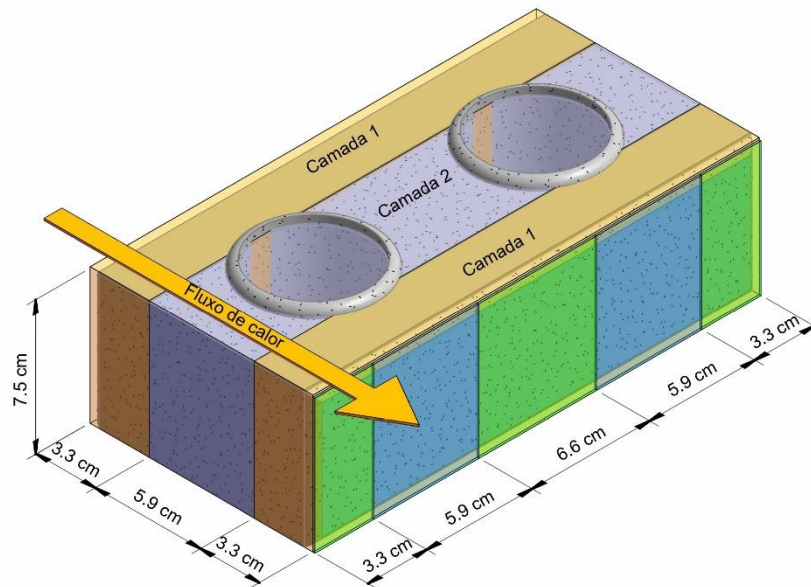
$$R_D = 0,396 \text{ W/m.K}$$

Logo, com as resistências de cada seção calcula-se o R_{upper} conforme Equação (11):

$$R_{upper} = \frac{1}{\frac{0,521}{0,309} + \frac{0,466}{0,403} + \frac{0,007}{0,396} + \frac{0,006}{0,396}} = 0,3478 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

O próximo passo é o cálculo do R_{lower} , que considera cada camada do componente (Figura 19), determinando a resistência em paralelo de cada seção.

Figura 19 - Camadas de fluxo de calor do tijolo ecológico.



Fonte: Autor.

O tijolo ecológico foi separado em 3 camadas e calculado as resistências R_1 e R_3 de acordo com a Equação (12) e R_2 com a Equação (13), obtendo as equações a seguir:

Camada 1

$$R_1 = \frac{1}{\frac{f_A + f_B}{0,033} + \frac{f_C + f_D}{0,033}} \quad \text{Equação (19)}$$

$$R_1 = \frac{1}{\frac{0,521 + 0,466}{0,033} + \frac{0,007 + 0,006}{0,033}} = 0,037 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

Camada 2

$$R_2 = \frac{1}{\frac{f_A}{0,033} + \frac{f_B + f_C + f_D}{R_{ar}}} \quad \text{Equação (20)}$$

$$R_2 = \frac{1}{\frac{0,521}{0,033} + \frac{0,466 + 0,007 + 0,006}{0,16}} = 0,091 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

Camada 2

$$R_3 = R_1 \quad \text{Equação (21)}$$

$$R_3 = 0,037 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

Logo, com as resistências de cada camada calcula-se o R_{lower} conforme Equação (14).

$$R_{\text{lower}} = 0,13 + 0,037 + 0,091 + 0,037 + 0,04 = 0,3346 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

Então é calculado a resistência térmica total do componente conforme Equação (4).

$$R_{\text{tot}} = \frac{0,3478 + 0,3346}{2}$$

$$R_{\text{tot}} = 0,3412 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

Por fim, a transmitância térmica para o componente é dada pela Equação (1).

$$U = \frac{1}{0,3412} = 2,9306 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Para todos os sistemas de parede foi necessário calcular a condutividade térmica, a densidade o calor específico equivalente do sistema, que são dados de entrada do EnergyPlus.

No cálculo da transmitância térmica é necessário considerar as resistências térmicas superficiais interna (R_{si}) e externa (R_{se}). Porém para a condutividade térmica para entrada no EnergyPlus, estas não são levados em consideração. Dessa forma será necessário calcular a condutividade equivalente desconsiderando as resistências superficiais consideradas na resistência térmica total.

b) Cálculo da condutividade térmica equivalente

Para calcular condutividade térmica equivalente desconsidera-se as resistências superficiais consideradas no cálculo da transmitância térmica, conforme Equação (22) a seguir:

$$\lambda = \frac{d}{R_{tot} - R_{si} - R_{se}} \quad \text{Equação (22)}$$

$$\lambda = \frac{0,125}{0,3412 - 0,04 - 0,13} \rightarrow \lambda = 0,73 \text{ W/m} \cdot \text{K}$$

c) Cálculo da densidade e o calor específico

A densidade e o calor específico são calculadas por ponderação de área:

$$\rho_{tot} = \frac{A_{tij} \cdot \rho_{tij}}{A_{tot}} + \frac{A_{arg} \cdot \rho_{arg}}{A_{tot}} \quad \text{Equação (23)}$$

$$\rho_{tot} = \frac{0,01875 \cdot 1746}{0,0190} + \frac{0,00025 \cdot 1800}{0,0190} \rightarrow \rho_{tot} = 1747 \text{ kg/m}^3$$

$$C_{tot} = \frac{A_{tij} \cdot C_{tij}}{A_{tot}} + \frac{A_{arg} \cdot C_{arg}}{A_{tot}} \quad \text{Equação (24)}$$

$$C_{tot} = \frac{0,01875 \cdot 1000}{0,0190} + \frac{0,00025 \cdot 1000}{0,0190} \rightarrow \rho_{tot} = 1000 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$$

d) Cálculo da capacidade térmica

Para calcular a capacidade térmica equivalente do tijolo ecológico, utiliza-se as equações a seguir:

Seção A) – Tijolo

$$A_a = (0,033 + 0,066 + 0,033) \cdot 0,075 = 0,0099 \text{ m}^2$$

$$C_{Ta} = (e \cdot c \cdot \rho)_{tijolo}$$

Equação (25)

$$C_{Ta} = 0,125 \cdot 1 \cdot 1746 = 218,25 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Seção B) - Tijolo + Ar + Tijolo

$$A_b = (0,059 + 0,059) \cdot 0,075 = 0,00885 \text{ m}^2$$

$$C_{Tb} = (e \cdot c \cdot \rho)_{tijolo} + (e \cdot c \cdot \rho)_{ar} + (e \cdot c \cdot \rho)_{tijolo}$$

Equação (26)

Por recomendação da norma despreza-se a capacidade térmica da câmara de ar:

$$C_{Tb} = 0,033 \cdot 1 \cdot 1746 + 0 + 0,033 \cdot 1 \cdot 1746 = 115,24 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Seção C) - Argamassa

$$A_c = (0,033 + 0,066 + 0,033) \cdot 0,001 = 0,000132 \text{ m}^2$$

$$C_{Tc} = (e \cdot c \cdot \rho)_{argamassa}$$

Equação (27)

$$C_{Tc} = 0,125 \cdot 1 \cdot 1800 = 225 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Seção D) - Argamassa + Ar + Argamassa

$$A_d = (0,059 + 0,059) \cdot 0,001 = 0,000118 \text{ m}^2$$

$$C_{Td} = (e \cdot c \cdot \rho)_{argamassa} + (e \cdot c \cdot \rho)_{ar} + (e \cdot c \cdot \rho)_{argamassa}$$

Equação (28)

Desprezando a capacidade térmica da câmara de ar:

$$C_{Td} = 0,033 \cdot 1 \cdot 1800 + 0 + 0,033 \cdot 1 \cdot 1800 = 118,8 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Logo, a capacidade térmica da parede será:

$$C_T = \frac{A_a + A_b + A_c + A_d}{\frac{A_a}{C_{Ta}} + \frac{A_b}{C_{Tb}} + \frac{A_c}{C_{Tc}} + \frac{A_d}{C_{Td}}}$$

Equação (29)

$$C_T = \frac{0,0099 + 0,00885 + 0,000132 + 0,000118}{\frac{0,0099}{218,25} + \frac{0,00885}{115,24} + \frac{0,000132}{225} + \frac{0,000118}{118,8}} = 154 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

2) SISTEMA DE PAREDE EQUIVALENTE DE BLOCO CERÂMICO

Tabela 12 - Dimensões e propriedades térmicas do sistema de bloco cerâmico.

Sistema		Bloco	Argamassa (assentamento)
Comprimento	m	0,19	0,395
Largura	m	0,09	0,09
Espessura (Altura)	m	0,19	0,015
Área (Face)	m ²	0,0361	0,005925
Densidade	kg/m ³	1300	1800
Calor específico	J/kg.K	920	1000
Resistência térmica total	m ² .K/W		0,392
Transmitância térmica total	W/m ² .K		2,551

Fonte: CB3E (2022); NBR ISO 10456 (ABNT, 2022a); Autor.

Para o sistema de parede com bloco cerâmico necessário calcular a condutividade térmica, a densidade e o calor específico equivalente do sistema, que são dados de entrada do EnergyPlus. Assim como no cálculo realizado para o tijolo ecológico, as resistências superficiais não são consideradas na condutividade térmica.

A argamassa de revestimento foi inserida no software como uma camada separada no sistema de parede equivalente, por isso não há consideração dela nos cálculos.

a) Cálculo da condutividade térmica equivalente

Para calcular condutividade térmica equivalente desconsidera-se as resistências superficiais consideradas no cálculo da transmitância térmica, conforme Equação (22):

$$\lambda = \frac{0,09}{0,392 - 0,04 - 0,13} \rightarrow \lambda = 0,4054 \text{ W/m} \cdot \text{K}$$

b) Cálculo da densidade e o calor específico

A densidade e o calor específico são calculadas por ponderação de área:

$$\rho_{tot} = \frac{A_{bloc} \cdot \rho_{bloc}}{A_{tot}} + \frac{A_{arg} \cdot \rho_{arg}}{A_{tot}} \quad \text{Equação (30)}$$

$$\rho_{tot} = \frac{0,0361 \cdot 1300}{0,042} + \frac{0,0059 \cdot 1800}{0,042} \rightarrow \rho_{tot} = 1370,23 \text{ kg/m}^3$$

$$C_{tot} = \frac{A_{bloc} \cdot C_{bloc}}{A_{tot}} + \frac{A_{arg} \cdot C_{arg}}{A_{tot}} \quad \text{Equação (31)}$$

$$C_{tot} = \frac{0,0361 \cdot 920}{0,042} + \frac{0,0059 \cdot 1000}{0,042} \rightarrow \rho_{tot} = 931,23 \text{ J/kg.K}$$

3) SISTEMA DE PAREDE EQUIVALENTE DE TIJOLO MACIÇO

Tabela 13 - Dimensões e propriedades térmicas do sistema de tijolo maciço.

Sistema		Tijolo	Argamassa
Comprimento	m	0,22	0,295
Largura	m	0,10	0,10
Espessura (Altura)	m	0,06	0,015
Área (Face)	m ²	0,0132	0,004425
Densidade	kg/m ³	2000	1800
Calor específico	J/kg.K	920	1000
Resistência térmica total	m ² .K/W		0,279
Transmitância térmica total	W/m ² .K		3,5858

Fonte: CB3E (2022); NBR ISO 10456 (ABNT, 2022a); Autor.

Para o sistema de parede com tijolo maciço foi necessário calcular a condutividade térmica, a densidade o calor específico equivalente do sistema, que são dados de entrada do EnergyPlus. Assim como no cálculo realizado para o bloco cerâmico, as resistências superficiais não são consideradas na condutividade térmica.

a) Cálculo da condutividade térmica equivalente

Para calcular condutividade térmica equivalente desconsidera-se as resistências superficiais consideradas no cálculo da transmitância térmica, conforme Equação (22):

$$\lambda = \frac{0,10}{0,279 - 0,04 - 0,13} \rightarrow \lambda = 0,9174 \text{ W/m} \cdot \text{K}$$

b) Cálculo da densidade e o calor específico

A densidade e o calor específico são calculadas por ponderação de área:

$$\rho_{tot} = \frac{A_{tijm} \cdot \rho_{tijm}}{A_{tot}} + \frac{A_{arg} \cdot \rho_{arg}}{A_{tot}} \quad \text{Equação (32)}$$
$$\rho_{tot} = \frac{0,0132 \cdot 2000}{0,0176} + \frac{0,0044 \cdot 1800}{0,0176} \rightarrow \rho_{tot} = 1950 \text{ kg/m}^3$$

$$C_{tot} = \frac{A_{tijm} \cdot C_{tijm}}{A_{tot}} + \frac{A_{arg} \cdot C_{arg}}{A_{tot}} \quad \text{Equação (33)}$$
$$C_{tot} = \frac{0,01321 \cdot 920}{0,0176} + \frac{0,0044 \cdot 1000}{0,0176} \rightarrow C_{tot} = 940 \text{ J/kg.K}$$

APÊNDICE B - ANÁLISES DOS TIJOLOS: ANÁLISE DIMENSIONAL, ÍNDICE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.

As tabelas a seguir mostram os valores das análises dos tijolos fabricados em na cidade de Triunfo, também são apresentados os dados dos tijolos com a adição de 10%, 20%, 30%, 50% e 100% (S90R10, S80R20, S70R30, S50R50 e R100 respectivamente) de resíduo de construção e demolição (RCD) nas misturas dos tijolos. Para esta pesquisa foi utilizado os dados dos tijolos com o traço padrão (S100) como parâmetro para as análises térmicas.

Os ensaios foram realizados no laboratório do campus em conjunto com a aluna Gleyds Mikaelly Melo Lima em seu trabalho de conclusão de curso intitulado “CARACTERIZAÇÃO DO SOLO E CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DO TIJOLO SOLO-CIMENTO COM ADIÇÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO FABRICADOS EM TRIUNFO – PE”.

1) ANÁLISE DIMENSIONAL

Tabela 14 - Análise Dimensional dos tijolos ecológicos.

Análise Dimensional – Médias Gerais (mm)					
Identificação	Comprimento	Largura	Altura	Espessura	Diâmetro
S100	250,7	125,5	75,5	33,25	66,97
S90R10	250,40	125,60	76,62	33,18	66,89
S80R20	250,46	125,67	76,59	33,21	66,82
S70R30	250,85	125,53	75,88	33,22	66,73
S50R50	250,26	125,50	76,84	33,19	66,70
R100	250,44	125,51	76,75	33,28	66,67

Fonte: Arquivo pessoal.

2) ÍNDICE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

Tabela 15 - Índice de Absorção de Água dos tijolos ecológicos.

Identificação	Massa Seca (g)	Massa Saturada (g)	Absorção (%)	Média	Avaliação Média
S100	3439,32	3914,37	13,81		
S100	3420,59	3911,49	14,35	14,73	APROVADO
S100	3427,51	3976,65	16,02		

Identificação	Massa Seca (g)	Massa Saturada (g)	Absorção (%)	Média	Avaliação Média
S90R10	3490,56	3900,50	11,74		
S90R10	3700,39	4074,80	10,12	10,59	APROVADO
S90R10	3650,80	4012,48	9,91		
S80R20	3502,67	3946,51	12,67		
S80R20	3628,77	3990,05	9,96	11,16	APROVADO
S80R20	3533,91	3917,23	10,85		
S70R30	3433,21	3846,31	12,03		
S70R30	3531,88	3867,16	9,49	10,51	APROVADO
S70R30	3518,91	3870,64	10,00		
S50R50	3577,15	3966,22	10,88		
S50R50	3531,39	3919,69	11,00	11,27	APROVADO
S50R50	3534,99	3957,21	11,94		
R100	3507,60	3820,74	8,93		
R100	3480,15	3831,72	10,10	9,51	APROVADO

Fonte: Arquivo pessoal.

3) RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Tabela 16 - Resistência à Compressão dos tijolos ecológicos aos 28 dias.

Identificação	Área de aplicação da carga (mm ²)	Carga de ruptura (N)	Resistência (Mpa)	Situação
S100 - 4	15401,75	26200	1,70	APROVADO
S100 - 5	15682,13	29200	1,86	APROVADO
S100 - 6	16522,66	28100	1,70	APROVADO
S100 - 7	15362,16	30100	1,96	APROVADO
S100 - 8	15398,53	25400	1,65	REPROVADO
S100 - 9	15575,11	27000	1,73	APROVADO
S100 - 10	15401,75	30100	1,95	APROVADO
Média geral			1,79	REPROVADO
S90R10 - 7	16234,47	54100	3,33	APROVADO
S90R10 - 8	15952,76	48200	3,02	APROVADO
S90R10 - 9	16248,90	48900	3,01	APROVADO
S90R10 - 10	15745,44	54100	3,44	APROVADO
Média geral			3,20	APROVADO

Identificação	Área de aplicação da carga (mm ²)	Carga de ruptura (N)	Resistência (Mpa)	Situação
S80R20 - 4	16233,31	43100	2,66	APROVADO
S80R20 - 6	15942,18	41300	2,59	APROVADO
S80R20 - 7	15525,22	53100	3,42	APROVADO
S80R20 - 9	16437,83	38700	2,35	APROVADO
Média geral			2,76	APROVADO
S70R30 - 4	15959,82	42600	2,67	APROVADO
S70R30 - 6	16036,94	48800	3,04	APROVADO
S70R30 - 7	15930,31	52600	3,30	APROVADO
S70R30 - 9	16181,10	40200	2,48	APROVADO
Média geral			2,87	APROVADO
S50R50 - 5	16422,29	51700	3,15	APROVADO
S50R50 - 6	15374,23	35600	2,32	APROVADO
S50R50 - 10	16028,72	39100	2,44	APROVADO
S50R50 - 11	16181,10	46400	2,87	APROVADO
Média geral			2,69	APROVADO
R100 - 3	15911,30	41100	2,58	APROVADO
R100 - 5	15752,08	45500	2,89	APROVADO
R100 - 6	16275,74	50100	3,08	APROVADO
R100 - 7	15587,55	43300	2,78	APROVADO
Média geral			2,83	APROVADO

Fonte: Arquivo pessoal.

APÊNDICE C - DADOS DO ARQUIVO CLIMÁTICO.

Os Dados da Tabela 17 são as principais informações referentes à temperatura, elevação e pressão da cidade de Serra Talhada-PE provenientes do arquivo climático utilizado na simulação. De caráter informativo.

Tabela 17 - Dados do arquivo climático para Serra Talhada.

Mês	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
Ano	2010	2010	2009	2009	2009	2009	2009	2009	2009	2009	2009	2009
Temperaturas de bulbo seco (°C)												
Máx.	33.3	34.8	32.6	31.9	30.1	28.8	30.7	32.9	35.7	36.2	36.6	35.5
Dia:Hora	16:16	5:15	21:15	5:13	15:14	2:15	21:13	22:14	25:14	7:14	9:14	8:15
Mín.	19.4	19.4	20.3	20.5	18.8	17.7	16.3	16.1	16.7	19.7	20.2	20.4
Dia:Hora	20:04	21:06	21:04	14:01	31:21	17:06	9:05	3:05	11:05	2:05	21:05	4:05
Média	25.6	26.4	25.4	24.6	23.4	22.6	22.8	23.4	26.2	27.6	28.0	27.3
25.5												
Temperaturas do solo (°C)												
0,5 m	26.7	27.5	27.7	27.5	26.3	25.1	23.9	23.1	22.8	23.3	24.3	25.5
2,0 m	25.9	26.7	27.1	27.1	26.4	25.6	24.6	23.9	23.5	23.6	24.1	25.0
4,0 m	25.4	26.0	26.4	26.5	26.3	25.8	25.1	24.5	24.1	24.0	24.3	24.8
Velocidade do vento (m/s)												
Máx.	9.0	6.3	6.9	6.5	5.5	5.7	6.1	6.0	6.7	8.6	8.3	7.9
Dia:Hora	12:20	16:16	14:13	1:22	10:17	16:11	18:10	3:19	7:08	23:24	29:15	17:19
Elevação (m)	461 m - acima do nível do mar											
Pressão barométrica (Pa)	95908											

Fonte: Adaptado do arquivo climático disponibilizado pela NBR 15575-1-1 (ABNT, 2021a).