



UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA
CENTRO DAS CIÊNCIAS EXATAS E DAS TECNOLOGIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

LUCAS AMORIM DE SOUSA

**ANÁLISE DO USO DE ARGAMASSA DE REVESTIMENTO COM ADIÇÃO DE
CINZA DA CASCA DE ARROZ NO DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES
EM BARREIRAS – BA POR SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL**

**BARREIRAS-BA
DEZEMBRO - 2025**

LUCAS AMORIM DE SOUSA

**ANÁLISE DO USO DE ARGAMASSA DE REVESTIMENTO COM ADIÇÃO DE
CINZA DA CASCA DE ARROZ NO DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES
EM BARREIRAS – BA POR SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil do Centro de Ciências Exatas e das Tecnologias (CCET) da Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB) como requisito para a obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Dennis Coelho Cruz

**BARREIRAS-BA
DEZEMBRO – 2025**

FICHA CATALOGRÁFICA

S729 Sousa, Lucas Amorim de.

Análise do uso de argamassa de revestimento com adição de cinza da casca de arroz no desempenho térmico de edificações em Barreiras – BA por simulação computacional. / Lucas Amorim de Sousa. – 2025.

84f.

Orientador: Prof. Dr. Dennis Coelho Cruz.

Monografia (Graduação) – Bacharelado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Oeste da Bahia. Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias. Barreiras, BA, 2025.

1. Modelagem computacional; 2. Adição pozolânica; 3. Conforto térmico; 4. Reboco; 5. Eficiência energética. I. Cruz, Dennis Coelho. II. Universidade Federal do Oeste da Bahia - Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias. III. Título.

CDD 624

LUCAS AMORIM DE SOUSA

**ANÁLISE DO USO DE ARGAMASSA DE REVESTIMENTO COM ADIÇÃO DE
CINZA DA CASCA DE ARROZ NO DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES
EM BARREIRAS – BA POR SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil do Centro de Ciências Exatas e das Tecnologias (CCET) da Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB) como requisito para a obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Dennis Coelho Cruz

Aprovado em 05 de dezembro de 2025.

Banca Examinadora

Orientador: _____

Prof. Dr. Dennis Coelho Cruz

Universidade Federal do Oeste da Bahia

Prof. Dr. José Leonardo Vanderlei de Carvalho

Universidade Federal do Oeste da Bahia

Profª. Dra. Yascara Maia Araújo de Brito

Universidade Federal do Oeste da Bahia

Dedico este trabalho a Deus e à minha família,
em especial à minha namorada: Larissa,
à minha mãe: Eliane,
e ao meu pai: Pedro (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conduzir durante essa jornada e me abençoar com esse momento;

À minha namorada, Larissa, pela inspiração, paciência, incentivo, amor, cuidado e parceria durante mais essa etapa da nossa caminhada juntos;

Aos meus irmãos Pedrita, Pedro Henrique, Shayanne e Thiago, pela inspiração, conversas, conselhos, contribuições e apoio total durante a minha trajetória;

À minha mãe, Eliane, pelo amor incondicional diário; sem a senhora, eu jamais conseguiria;

Em especial, ao meu pai, Pedro (*in memoriam*), por todos os ensinamentos e puxões de orelha, por ter acreditado em mim mais do que eu mesmo e por ter feito tudo ao seu alcance para que eu pudesse vencer na vida; o senhor foi quem tornou essa nossa vitória possível;

Aos meus demais familiares e amigos, por compartilharem a caminhada da vida e estarem ao meu lado, sempre com muito amor e carinho;

Ao meu orientador, Prof. Dr. Dennis Coelho Cruz, pela seriedade e dedicação durante todo esse processo; esse trabalho só se concretizou graças à paciência e à sabedoria com a qual o senhor me guiou;

Aos meus colegas de trabalho e de curso, pelo enfrentamento aos obstáculos, pelas experiências e ensinamentos e pelas alegrias que vivenciamos juntos nesse período;

Aos funcionários, colaboradores e professores da UFOB, pela dedicação e excelência na prestação dos seus serviços;

A todos que, de alguma forma, contribuíram para que eu concluísse este trabalho.

Minha eterna gratidão!

RESUMO

O elevado consumo energético para climatização em edificações situadas em regiões de clima quente, como Barreiras – BA (Zona Bioclimática 5B), evidencia a necessidade de materiais com melhor desempenho térmico. Este trabalho teve como objetivo avaliar, por meio de simulação computacional no software EnergyPlus, a influência da incorporação de Cinza da Casca de Arroz (CCA) em argamassas de revestimento sobre a Carga Térmica de Resfriamento (CgTR). A metodologia consistiu na modelagem de uma edificação de referência e na simulação de 135 cenários distintos, variando-se o teor de substituição de areia por CCA (0% a 50%), a geometria dos blocos cerâmicos (9, 12 e 14 cm), a orientação solar e a espessura do revestimento. Os resultados, submetidos à análise estatística multifatorial (ANOVA), permitiram hierarquizar a influência das variáveis: embora a orientação solar e a geometria do bloco tenham se consolidado como determinantes primários, a argamassa com CCA firmou-se como uma intervenção relevante, apresentando magnitude de efeito superior à da espessura do revestimento. Nesse contexto, a composição com 30% de CCA (A30) destacou-se como o teor ótimo, equilibrando eficiência energética e viabilidade mecânica. Esta solução também permitiu que alvenarias de blocos de 9 cm atingissem transmitância térmica de $1,82 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$, atendendo aos requisitos normativos e superando, inclusive, o desempenho de paredes convencionais de 12 cm. Conclui-se que a incorporação de CCA é uma alternativa viável, do ponto de vista do desempenho térmico, para compatibilizar a cultura construtiva local de vedações esbeltas com o desempenho térmico exigido pelo clima do oeste baiano.

Palavras-chave: Modelagem computacional, adição pozolânica, conforto térmico, reboco, eficiência energética.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Gráfico PMV x PPD. | 11 |
| Figura 2 - Variáveis e adaptações relacionados ao conforto térmico. | 12 |
| Figura 3 - Resistência térmica de uma composição de parede. | 13 |
| Figura 4 – Mapa do zoneamento bioclimático do Brasil. | 16 |
| Figura 5 - Fases da transmissão de calor. | 19 |
| Figura 6 – a) cinza da casca de arroz; b) casca de arroz. | 24 |
| Figura 7 - Variação da condutividade térmica com substituição de areia por CCA. | 28 |
| Figura 8 - Diferença de temperatura ao longo do dia para diferentes composições. | 29 |
| Figura 9 - Interface inicial do EnergyPlus. | 31 |
| Figura 10 – Fluxograma das variáveis de entradas das simulações. | 34 |
| Figura 11 – Modelo computacional gerado no Sketchup. | 36 |
| Figura 12 - Temperatura e umidade relativa em Barreiras. | 37 |
| Figura 13 - Corte de paredes com os três tipos de blocos cerâmicos utilizados. | 39 |
| Figura 14 - Modelo de referência e modelo equivalente para uso no EnergyPlus. | 40 |
| Figura 15 - Interface inicial do EP-Launch. | 42 |
| Figura 16 - Interface do IDF Editor. | 43 |
| Figura 17 – Valores médios da Carga Térmica de Resfriamento (CgTR) para a A0. | 47 |
| Figura 18 – Valores médios de CgTR em função da orientação solar. | 50 |
| Figura 19 – Valores médios de CgTR em função da largura do bloco cerâmico. | 52 |
| Figura 20 – Valores médios da CgTR dos casos simulados na fachada Oeste. | 54 |
| Figura 21 - CgTR em função da incorporação de CCA. | 55 |
| Figura 22 – Valores médios da CgTR em função da espessura do revestimento. | 58 |
| Figura 23 - CgTR para composições comparadas. | 60 |
| Figura 24 - Transmitância térmica para composições comparadas. | 62 |
| Figura 25 - Classe Building. | 71 |
| Figura 26 - Classe Site:Location. | 71 |
| Figura 27 - Classe RunPeriod. | 72 |
| Figura 28 - Classe Material. | 72 |
| Figura 29 - Classe Material:AirGap. | 73 |
| Figura 30 - Classe Construction. | 73 |
| Figura 31 - Classe BuildingSurface:Detailed. | 74 |

| | |
|--|----|
| Figura 32 - Classe HVACTemplate:Thermostat. | 74 |
| Figura 33 - Classe Output:Variable. | 75 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|----|
| Quadro 1 - Disposições e estratégias térmicas para a cidade de Barreiras - BA..... | 16 |
| Quadro 2 - Parâmetros para o conforto térmico na cidade de Barreiras – BA..... | 17 |
| Quadro 3 - Parâmetros para o desempenho térmico na cidade de Barreiras – BA..... | 18 |
| Quadro 4 - Espessuras admissíveis de revestimentos internos e externos. | 22 |
| Quadro 5 - Composição química de amostra de CCA..... | 24 |
| Quadro 6 - Comprimentos equivalentes e resistência térmica do ar para os blocos cerâmicos. | 40 |
| Quadro 7 - Propriedades térmicas dos materiais empregados nas composições. | 41 |
| Quadro 8 - Valores para resistências de superfície com fluxo de calor horizontal. | 45 |
| Quadro 9 - Comparação da redução da CgTR através da incorporação de CCA..... | 56 |
| Quadro 10 - Comparação da redução da CgTR através de estratégias construtivas. | 59 |
| Quadro 11 - Resultado de todas as simulações realizadas no EnergyPlus. | 76 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - ANOVA multifatorial para simulações realizadas. | 48 |
| Tabela 2 - Resumo dos grupos de orientação solar. | 78 |
| Tabela 3 - Teste de Tukey para orientação solar. | 78 |
| Tabela 4 - Resumo dos grupos de larguras dos blocos cerâmicos. | 78 |
| Tabela 5 - Teste de Tukey para as larguras dos blocos cerâmicos. | 79 |
| Tabela 6 - Resumo dos grupos das argamassas. | 79 |
| Tabela 7 - Teste de Tukey para as argamassas. | 79 |
| Tabela 8 - Teste de Tukey para as espessuras de revestimento. | 80 |

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

A0: Argamassa sem adição de CCA

A10: Argamassa com 10% de adição de CCA

A20: Argamassa com 20% de adição de CCA

A30: Argamassa com 30% de adição de CCA

A50: Argamassa com 50% de adição de CCA

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASHRAE: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

C: Capacidade térmica

c: Calor específico

CCA: Cinza da casca de arroz

CEPEA: Centro de estudos avançados em economia aplicada

CgTA: Carga térmica de aquecimento

CgTR: Carga térmica de resfriamento

CT: Carga térmica

EMBRAPA: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

FSo: Fator solar de elementos opacos

NBR: Norma Brasileira Regulamentadora

PMV: Voto médio previsto

PPD: Porcentagem prevista de insatisfeitos

Q: Fluxo de calor

R: Resistência térmica

Rse: Resistência superficial externa

Rsi: Resistência superficial interna

U: Transmitância térmica

α : Absortância à radiação solar

η^2 : Tamanho do efeito

λ : Condutividade térmica

ρ : Densidade aparente

φ : Atraso térmico

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 8 |
| 1.1 Objetivos..... | 9 |
| 1.1.1 Objetivo Geral | 9 |
| 1.1.2 Objetivos específicos..... | 9 |
| 2. REVISÃO DE LITERATURA..... | 10 |
| 2.1 CONFORTO TÉRMICO..... | 10 |
| 2.1.1 Normas sobre desempenho térmico em edificações..... | 12 |
| 2.1.2 Zonas bioclimáticas e parâmetros construtivos | 15 |
| 2.1.3 Envoltória da edificação como estratégia para eficiência energética | 18 |
| 2.2 BLOCO CERÂMICO E SUA INFLUÊNCIA NO DESEMPENHO TÉRMICO DAS PAREDES DE VEDAÇÃO..... | 20 |
| 2.3 ARGAMASSA DE REVESTIMENTO E SUA INFLUÊNCIA NO DESEMPENHO TÉRMICO DAS PAREDES DE VEDAÇÃO | 21 |
| 2.4 CINZA DA CASCA DE ARROZ COMO ADIÇÃO SUSTENTÁVEL | 22 |
| 2.4.1 Desenvolvimento sustentável e resíduos agroindustriais | 22 |
| 2.4.2 Uso da cinza da casca de arroz na construção civil..... | 23 |
| 2.5 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL NO ESTUDO DO DESEMPENHO TÉRMICO | 29 |
| 2.6 ESTUDOS SOBRE O DESEMPENHO TÉRMICO EM BARREIRAS - BA..... | 32 |
| 3. METODOLOGIA..... | 34 |
| 3.1 MODELO DE EDIFICAÇÃO DE REFERÊNCIA..... | 35 |
| 3.1.1 Simulador e modelo computacional | 35 |
| 3.1.2 Condições climáticas da cidade de Barreiras – BA..... | 36 |
| 3.2 COMPOSIÇÃO DAS ENVOLTÓRIAS..... | 38 |
| 3.2.1 Blocos cerâmicos..... | 38 |
| 3.2.2 Argamassa de revestimento | 40 |
| 3.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL..... | 41 |
| 3.4 ANÁLISE DA VIABILIDADE DA CCA COMO ADIÇÃO | 44 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES | 47 |

| | |
|--|-----------|
| 4.1 ANÁLISE GERAL E HIERARQUIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS | 48 |
| 4.2 INFLUÊNCIA DA ORIENTAÇÃO SOLAR..... | 49 |
| 4.3 INFLUÊNCIA DA LARGURA DO BLOCO | 51 |
| 4.4 INFLUÊNCIA DO TEOR DE ADIÇÃO DE CCA NA ARGAMASSA..... | 53 |
| 4.5 INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DO REVESTIMENTO | 57 |
| 4.6 COMPARAÇÃO DA INCORPORAÇÃO DA CCA COM A LARGURA DO BLOCO CERÂMICO | 60 |
| 4.7 VERIFICAÇÕES DO PARÂMETRO DE TRANSMITÂNCIA TÉRMICA SEGUNDO O CONJUNTO NORMATIVO | 61 |
| CONCLUSÕES..... | 63 |
| RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 64 |
| REFERÊNCIAS | 65 |
| APÊNDICE A – PRINCIPAIS CLASSES UTILIZADAS NO ENERGYPLUS..... | 71 |
| APÊNDICE B – RESULTADO DE TODAS AS SIMULAÇÕES REALIZADAS | 76 |
| APÊNDICE C – CÁLCULO DAS ANÁLISES ESTATÍSTICAS | 78 |

1. INTRODUÇÃO

A construção civil é o setor com maior uso de recursos naturais de qualquer economia e esse consumo está relacionado a fatores como a tecnologia empregada nas construções (John, 2000). Em um cenário mais específico, a utilização de energia nas edificações é um dos principais desafios ambientais enfrentados atualmente. Individualmente, o setor residencial responde por cerca de 21% da demanda por consumidores finais de energia global (UNEP, 2023), o que corrobora a necessidade da busca por soluções para a eficiência energética das residências.

Nesse contexto, o conforto térmico possui papel relevante e pode ser definido como o estado mental que expressa a satisfação do homem com o ambiente térmico que o circunda. Um dos principais fatores que baseia os estudos de conforto térmico é a conservação de energia, que permite a minimização de desperdícios com calefação e refrigeração desnecessárias, mitigando uma possível crise energética e ambiental no país (Lamberts, Dutra e Pereira, 1997; Lamberts *et al.*, 2016; Monteiro, Bittencourt e Yannas, 2015).

Ademais, as soluções na promoção do conforto térmico devem abordar tanto a mudança de hábitos nos ambientes urbanos quanto a melhoria das propriedades termodinâmicas dos materiais empregados nas edificações. Diante disso, a utilização de subprodutos de atividades econômicas constitui uma alternativa ao investimento em fornecimento de mais energia, sendo mais barato e de interesse ambiental (Asdrubali, D’Alessandro e Schiavoni, 2015; Geller, 1994)

Nesse cenário, o Brasil se destaca como um dos maiores produtores de arroz em larga escala. Segundo dados da EMBRAPA (2025), a produção nacional corresponde a 28% do volume total produzido nas Américas, reforçando a importância da busca por um destino sustentável para a casca de arroz – resíduo agrícola gerado na cultura do alimento (Milani, 2008; Pouey, 2006).

A cinza da casca de arroz (CCA) – subproduto da queima do resíduo agrícola – possui potencial aplicação nas matrizes cimentícias. As pesquisas se concentram na substituição parcial do cimento por CCA, especialmente com o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas do concreto (Cordeiro, Toledo Filho e Fairbairn, 2009; Isaia *et al.*, 2010; Zucco e Beraldo, 2008)

Em outro ponto de vista, pesquisas recentes discutem a viabilidade da utilização da CCA como componente de argamassas e sistemas de isolamento térmico, impactando positivamente nas propriedades térmicas dos materiais compostos e contribuindo para a redução dos resíduos

agrícolas e desperdício energético (Bezerra, 2010; Onyenokporo *et al.*, 2024; Rosa *et al.*, 2015; Rosa e Scherer, 2018; Selvarranjan *et al.*, 2020).

Diante da crescente preocupação com o meio ambiente e a eficiência energética, pesquisas recentes realizadas na cidade de Barreiras – BA obtiveram resultados que demonstram o baixo desempenho térmico dos sistemas construtivos adotados na cidade, explicitando a necessidade da busca por soluções mais eficazes para a diminuição do consumo energético de uma edificação (Amarante, 2024; Araujo, 2018; Silva, 2021; Silva, 2022)

Selvarranjan *et al.* (2020) ressaltam que, a despeito do potencial de aplicação, a literatura ainda carece de estudos focados nas propriedades térmicas de argamassas com adição de CCA. Diante dessa lacuna, o presente trabalho visa analisar, por meio de simulação computacional, a influência da incorporação desse material alternativo em substituição à areia no revestimento de paredes sobre o desempenho térmico de uma residência em Barreiras – BA (Zona Bioclimática 5B, buscando validar alternativas construtivas que conciliem a destinação correta de passivos ambientais, como a CCA, com a melhoria do desempenho térmico das edificações em regiões de clima quente.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Estudar, via simulação computacional, o desempenho térmico de argamassas de revestimento contendo diferentes teores de adição de Cinza da Casca de Arroz (CCA), aplicadas em sistemas de vedação vertical em Barreiras – BA.

1.1.2 Objetivos específicos

- Quantificar a Carga Térmica de Resfriamento (CgTR) de uma edificação de referência submetida a diferentes configurações de envoltória, através do software EnergyPlus, considerando as condições climáticas locais;
- Analisar a influência das variáveis construtivas – orientação solar, geometria do bloco cerâmico e espessura do revestimento – no desempenho térmico das vedações, identificando os cenários mais eficientes;
- Comparar o desempenho térmico das argamassas com diferentes teores de CCA (10%, 20%, 30% e 50), verificando a significância estatística das reduções obtidas na CgTR em relação à argamassa convencional (0%).

2. REVISÃO DE LITERATURA

O presente capítulo expõe uma revisão de literatura acerca das definições relevantes relacionadas aos temas em estudo: conforto térmico, suas variáveis e conjuntos normativos relacionados; resíduos agrícolas e cinza da casca de arroz como adição sustentável; o uso da simulação computacional no estudo do desempenho térmico de edificações.

2.1 CONFORTO TÉRMICO

Uma das maiores diferenças entre o ser humano e os outros animais é a sua habilidade de transformar seu ambiente, protegendo-se das temperaturas extremas dos variados ambientes. O controle do fogo pelo homem e suas tecnologias de construções o permitiram viver em praticamente todos os ambientes terrestres (Cena e Clark, 1981).

Nesse contexto de sobrevivência, o conforto térmico é definido como o estado mental de satisfação com o ambiente térmico, uma avaliação subjetiva que pode variar entre diferentes indivíduos. Seu oposto, o desconforto térmico, ocorre quando o balanço do corpo é rompido, gerando as sensações de calor e frio (ASHRAE, 2020; Lamberts *et al.*, 2016).

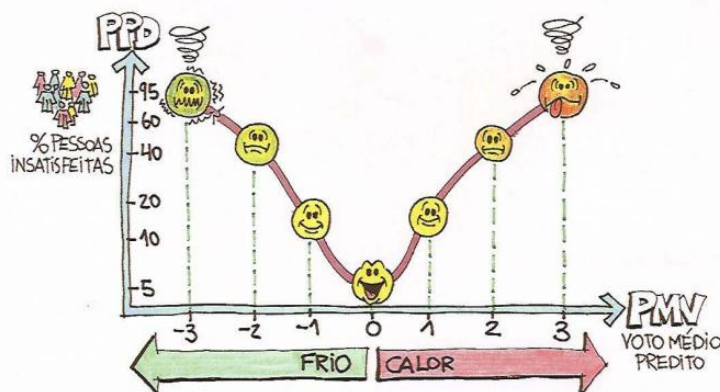
Para Dear e Brager (1998), o conforto térmico acontece através da adaptação apropriada ao ambiente climático interno. Assim, para que o conforto térmico seja satisfatoriamente atendido, deve-se entender as variáveis envolvidas. Para a previsão deste conforto, o modelo do engenheiro dinamarquês Povl Ole Fanger, desenvolvido na década de 1970, tornou-se um dos mais influentes. Baseado em experimentos em câmaras climáticas, Fanger (1970) criou um modelo preditivo que relaciona o Voto Médio Previsto (PMV) e a Porcentagem Prevista de Insatisfeitos (PPD), amplamente utilizado em estudos de desempenho energético. O modelo é fundamentado em variáveis que governam as trocas de calor entre o corpo e o ambiente:

- Taxa metabólica: geração de calor interno pelo corpo, variável conforme o nível de atividade física;
- Resistência térmica da vestimenta: isolamento proporcionado pelas roupas, que atua como uma barreira às trocas de calor;
- Temperatura do ar: temperatura resultante das superfícies ao redor, que afeta a troca de calor por radiação;
- Velocidade do ar: Influencia a taxa de transferência de calor por convecção e a evaporação do suor;

- Umidade relativa do ar: Afeta a capacidade do corpo de liberar calor através da evaporação do suor.

É importante notar que modelos mais recentes, como o modelo adaptativo (Dear e Brager, 1998), incorporam fatores psicológicos e comportamentais, sugerindo que os ocupantes podem aceitar uma faixa mais ampla de condições térmicas se tiverem controle sobre seu ambiente. No entanto, o modelo de Fanger permanece como a base normativa para a avaliação objetiva do conforto. A Figura 1 simplifica o modelo, com atribuição de notas subjetivas, na determinação do conforto térmico.

Figura 1 - Gráfico PMV x PPD.



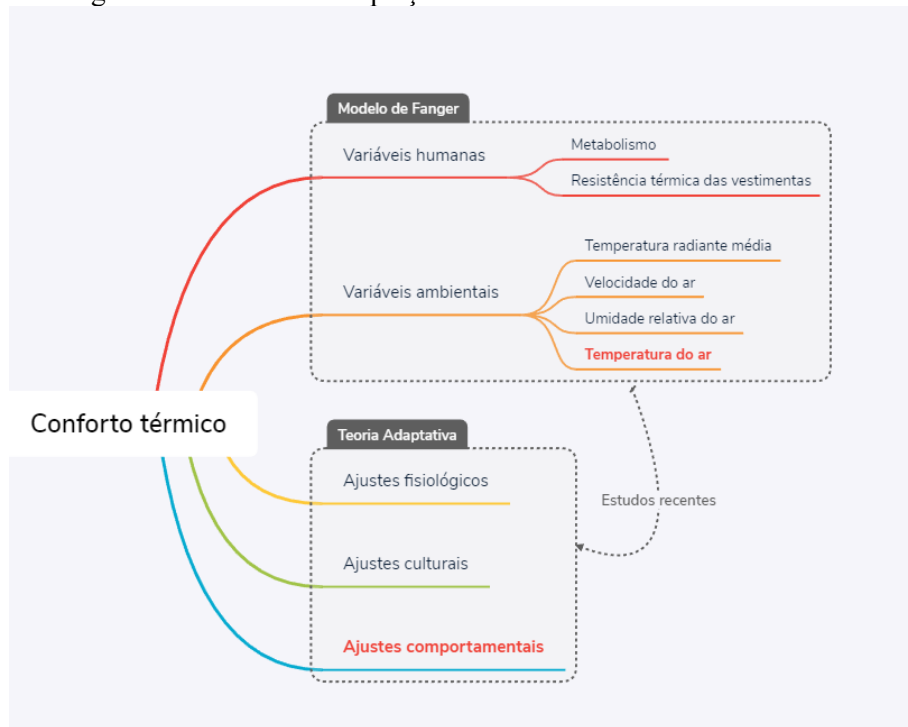
Fonte: Lamberts, Dutra e Pereira (1997).

Observa-se que as sensações extremas geram alta porcentagem de pessoas insatisfeitas, enquanto os ambientes neutros possuem uma menor porcentagem de pessoas insatisfeitas e, portanto, mais pessoas satisfeitas. Fanger (1970) define um ambiente idealmente confortável, do ponto de vista térmico, quando o PPD assume valores de 5%, ou seja, quando 95% dos indivíduos num ambiente estão satisfeitos. Dessa forma, cabe afirmar que o conforto térmico está relacionado à neutralidade térmica e ao equilíbrio fisiológico.

De acordo com Lamberts *et al.* (2016), o modelo de Fanger considera indivíduos ocupantes como receptores passivos dos estímulos ambientais. Estudos subsequentes, no entanto, passaram a entendê-los como agentes ativos no balanço térmico do ambiente, dando origem à corrente do modelo adaptativo. De Dear e Brager, 1998 categorizam os três tipos de ajustes possíveis para essa teoria: i) o ajuste psicológico, relacionado ao processo adaptativo inerente do ser humano; ii) o ajuste fisiológico, derivado das heranças genéticas e autorregulações corpóreas; e iii) o ajuste comportamental, subdividido em a) ajustes pessoais, como as vestimentas, b) ajustes tecnológicos, como o uso de eletrodomésticos reguladores da

temperatura e umidade do ar, e c) ajustes culturais. A Figura 2 resume a integração entre o modelo de Fanger e abordagem adaptativa, ilustrando as variáveis e mecanismos envolvidos na análise do conforto térmico.

Figura 2 - Variáveis e adaptações relacionados ao conforto térmico.



Fonte: Lamberts, Dutra e Pereira (1997, adaptado).

A teoria adaptativa complementa a teoria estática proposta por Fanger (1970). Enquanto o modelo de equilíbrio térmico de Fanger é essencialmente estático, tratando os ocupantes como receptores passivos, o modelo adaptativo introduz uma dimensão dinâmica. Uma crítica central ao modelo de Fanger é que, embora ele considere variáveis como vestimenta e taxa metabólica em seus cálculos, ele não as modela como um ajuste comportamental ativo do ocupante em resposta ao ambiente. O modelo adaptativo, por sua vez, tem como premissa fundamental essa capacidade de ajuste.

2.1.1 Normas sobre desempenho térmico em edificações

Em 2005, foi publicada a primeira versão do conjunto da Norma Brasileira Regulamentadora (NBR) 15220 – Desempenho térmico em edificações, de caráter orientativo, e foi dividida em 5 partes:

1. Requisitos gerais;
2. Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações;
3. Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social;
4. Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida;
5. Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo método fluximétrico.

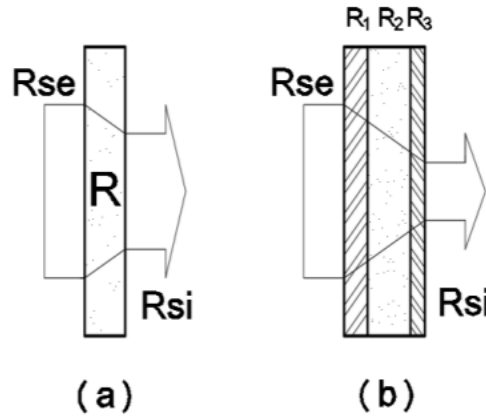
A NBR 15220-2 (ABNT, 2022) especifica o método de cálculo da resistência térmica e da transmitância térmica de elementos e componentes de edificações. O método de cálculo se baseia na apropriada condutividade e resistência térmicas de projeto dos materiais e produtos para a aplicação considerada. Algumas das propriedades térmicas importantes para o presente estudo são definidas a seguir, de acordo com a NBR 15220 (ABNT, 2022).

O fluxo de calor (Q) é definido como o quociente da quantidade de calor que atravessa uma superfície durante um intervalo de tempo pela duração desse intervalo. Sua unidade é definida em Watts (W).

A condutividade térmica (λ) é uma propriedade física de um material homogêneo e isotrópico, no qual se verifica um fluxo de calor constante, com densidade de 1 W/metro quadrado (m^2), quando submetido a um gradiente de temperatura uniforme de 1 Kelvin (K) por metro (m). Sua unidade é definida em W/ (m.K). A λ é inversamente proporcional ao poder isolante de um material, ou seja, menores valores de condutividade térmica estão relacionados aos materiais utilizados como isolantes térmicos.

A resistência térmica (R) é o quociente da diferença de temperatura verificada entre as superfícies de um elemento ou componente construtivo pela densidade de fluxo de calor, em regime estacionário. Sua unidade é definida em $(m^2.K) /W$. Maiores valores de resistência térmica estão relacionados aos materiais isolantes. Para uma parede, a resistência térmica está relacionada à espessura da composição (Figura 3). Além disso, pode ser dividida em resistência superficial interna (R_{si}), referente à camada de ar adjacente à superfície interna de um componente que transfere calor, e resistência superficial externa (R_{se}), referente à superfície externa do elemento que realiza trocas de calor (Rosa e Scherer, 2018).

Figura 3 - Resistência térmica de uma composição de parede.



Fonte: Rosa e Scherer (2018, adaptado).

Observa-se que a resistência térmica total, somatório do conjunto de resistências térmicas das camadas, depende da composição do sistema de vedação. Os materiais isolantes, com menores condutividades térmicas e consequentes maiores resistências térmicas, limitam a troca de calor entre ambientes, enquanto os materiais condutores possuem maiores condutividades térmicas e consequentes menores resistências térmicas, contribuindo para o fluxo de calor entre recintos.

A transmitância térmica (U) é o inverso da resistência térmica total e possui como unidade $W/(m^2.K)$. Elementos com maior transmitância térmica são condutores e permitem o fluxo de calor. Por exemplo, a diminuição da espessura das camadas da parede na Figura 3 impactaria na redução da R do elemento de vedação, aumentando a U e reduzindo sua capacidade isolante.

A capacidade térmica (C), ou inércia térmica, é a quantidade de calor necessária para variar em uma unidade a temperatura de um sistema ou componente construtivo. Sua unidade é definida como a razão Joules (J) / K . Materiais com maior inércia térmica conseguem armazenar o calor recebido durante o dia, liberando-o no período noturno. O calor específico (c), ou capacidade térmica específica, é o quociente da capacidade térmica pela massa, sendo a sua unidade $J/(kg.K)$.

O atraso térmico (ϕ) é definido como o tempo transcorrido, em horas, entre uma variação térmica em um meio e sua manifestação na superfície oposta de um componente construtivo submetido a um regime periódico de transmissão de calor.

O fator solar de elementos opacos (FS_o) é o quociente da taxa de radiação solar transmitida através de um componente opaco pela taxa da radiação solar total incidente sobre a superfície externa do mesmo.

A absorptância à radiação solar (α) é o quociente da taxa de radiação solar absorvida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície, e está relacionada às cores com valores entre 0 e 1.

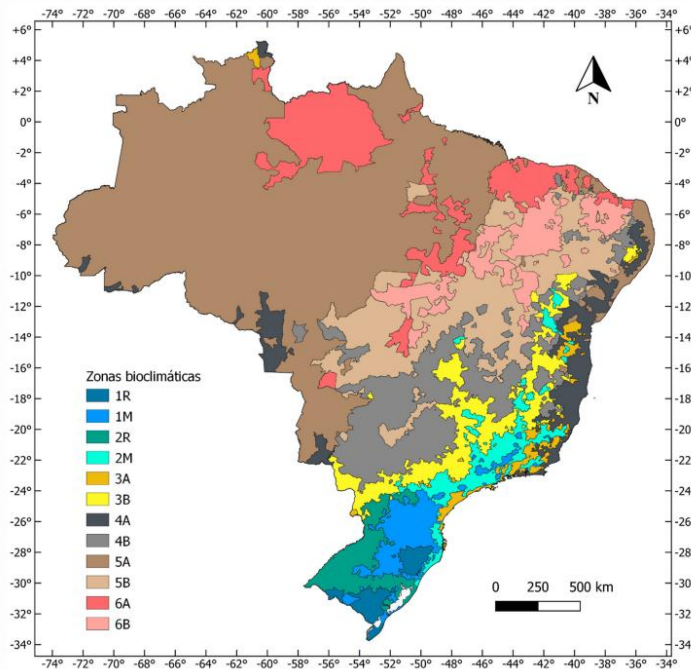
Por fim, segundo o Creder (2004), a carga térmica (CT) pode ser definida como a quantidade de calor sensível e latente, comumente expressa em kcal/h, que deve ser retirada ou colocada no recinto a fim de proporcionar conforto térmico. A carga térmica de resfriamento (CgTR) se refere à retirada de calor, enquanto a carga térmica de aquecimento (CgTA) corresponde à inserção de calor para tornar o ambiente termicamente confortável.

2.1.2 Zonas bioclimáticas e parâmetros construtivos

De acordo com a NBR 15220-3 (ABNT, 2024), o zoneamento bioclimático brasileiro é formado por seis zonas bioclimáticas divididas gradualmente de muito frio a muito quente (Figura 4), com seus respectivos indicadores meteorológicos e de localização, além das diretrizes construtivas específicas, relacionadas à:

- Tamanho das aberturas de ventilação: relativo ao percentual da área de piso do ambiente;
- Proteção das aberturas: a depender da época do ano é necessário recurso arquitetônico para promover sombreamento;
- Paredes externas e cobertura: pesadas, leves, refletoras ou isoladas;
- Estratégias de condicionamento passivo: soluções que visam ao conforto térmico.

Figura 4 – Mapa do zoneamento bioclimático do Brasil.



Fonte: NBR 15220 – 3 (2024).

De acordo com a norma, a análise do desempenho térmico para o município de Barreiras – BA, em estudo neste trabalho, está classificada como de clima quente e seco, zona bioclimática 5B. A compreensão das particularidades desta zona é fundamental para a definição dos parâmetros de entrada e a avaliação da eficácia de soluções para o conforto térmico e a eficiência energética do local. A NBR 15220-3 (2003) estabelecia as seguintes diretrizes e estratégias para a zona bioclimática da cidade, conforme Quadro 1.

Quadro 1 - Disposições e estratégias térmicas para a cidade de Barreiras - BA.

| | |
|---|---|
| Disposições construtivas | Aberturas de ventilação pequenas |
| | Aberturas sombreadas |
| | Paredes pesadas |
| | Cobertura pesadas |
| Verão: Estratégias de condicionamento térmico passivo | Resfriamento evaporativo |
| | Massa térmica para resfriamento |
| | Ventilação seletiva nos períodos quentes em que a temperatura interna seja superior à externa |

Fonte: NBR 15220-3 (2003, adaptado).

A limitação da abertura de ventilação visa impedir a entrada excessiva de ar nos períodos em que a temperatura externa é superior a interna. Considerando esse caso, a troca de ar não

beneficiaria o conforto térmico da edificação, dado que as estratégias para a região se concentram no verão e buscam reduzir a temperatura interna.

As aberturas sombreadas tendem a diminuir o impacto da radiação solar na transmissão de calor para a superfície interna da envoltória da edificação, reduzindo as trocas de calor com o ambiente externo.

As estratégias de condicionamento térmico passivo constituem um conjunto de diretrizes de projeto cujo objetivo é otimizar o desempenho térmico da edificação, minimizando o consumo de energia com sistemas de climatização artificial. Conforme a NBR 15220-3 (2003), as estratégias recomendadas no Quadro 1 envolvem o uso de massa térmica para resfriamento, propiciando o alcance de temperaturas internas mais agradáveis através do uso de paredes e coberturas com maior massa térmica, de forma que o calor armazenado em seu interior durante o dia seja devolvido ao exterior durante a noite, quando as temperaturas externas diminuem.

O uso do resfriamento evaporativo e da ventilação seletiva visa resfriar o ar externo antes de introduzi-lo no ambiente, amenizando as altas temperaturas internas. A combinação das diretrizes recomendadas com as estratégias de condicionamento passivo possui potencial para promover o conforto térmico dos usuários das edificações no município.

A norma ainda define limites para as propriedades térmicas dos materiais empregados nas paredes e coberturas das edificações. Esses valores, para a região em estudo, estão dispostos no Quadro 2.

Quadro 2 - Parâmetros para o conforto térmico na cidade de Barreiras – BA.

| Vedações | Transmitância térmica (U) (W/m ² .K) | Atraso térmico (h) | Fator solar (%) |
|------------------------------|---|---------------------|-----------------|
| Paredes e coberturas pesadas | $U \leq 2,20$ | $\varphi \geq 6,50$ | $FS_o \leq 3,5$ |

Fonte: NBR 15220-3 (2003, adaptado).

De forma complementar, o conjunto normativo NBR 15575-1 (2024) estabelece requisitos mínimos para segurança, conforto, durabilidade e qualidade para construções residenciais brasileiras, e está dividida em 6 partes. Dentre elas, a NBR 15575-4 (ABNT, 2021) estabelece o desempenho mínimo para os sistemas de vedações verticais internas e externas de unidades habitacionais. Para o presente trabalho, os parâmetros referentes às propriedades térmicas do elemento de vedação são relevantes e devem obedecer aos valores de referência do Quadro 3.

Quadro 3 - Parâmetros para o desempenho térmico na cidade de Barreiras – BA.

| Zona Bioclimática 5B | Transmitância térmica (U) (W/m ² .K) | Capacidade térmica (kJ/(m ² .K)) |
|-------------------------|---|---|
| $\alpha_{par} \leq 0,6$ | $U \leq 3,70$ | C > 130 |
| $\alpha_{par} > 0,6$ | $U \leq 2,5$ | |

Fonte: NBR 15575-4 (2021, adaptado).

Nota-se que o parâmetro U é mais rígido para o conforto térmico do que para o desempenho térmico. O limite máximo do Quadro 2 é menor do que o disposto no Quadro 3, ou seja, a NBR 15220 exige materiais mais isolantes do que a NBR 15575 para a região, com menor U e maior R, restringindo o fluxo de calor entre ambientes. Assim, elementos de vedação que limitem as trocas de calor entre os cômodos de uma edificação são benéficos nas regiões de clima quente.

Por fim, destaca-se a importância de definir a zona bioclimática da cidade de implantação de uma edificação e os materiais a serem empregados, o que permite uma análise do desempenho térmico da residência em projeto, em conformidade ao conjunto normativo brasileiro.

2.1.3 Envoltória da edificação como estratégia para eficiência energética

Diante da crise energética observada nos países desenvolvidos e o crescimento do consumo residencial de energia elétrica no Brasil no fim do século passado, Lamberts, Dutra e Pereira (1997) destacaram a necessidade de normas de eficiência energéticas no Brasil.

De acordo com Lamberts *et al.* (2016), a minimização de desperdícios com a climatização artificial é atingida através da conservação de energia, sendo um dos principais fatores que baseia os estudos de trocas térmicas.

Para Monteiro, Bittencourt e Yannas (2015), o conforto térmico contribui para o bem-estar por estar relacionado ao equilíbrio termofisiológico do corpo humano, sendo fundamental para o estabelecimento de padrões de desempenho tanto ambiental quanto energético nas residências.

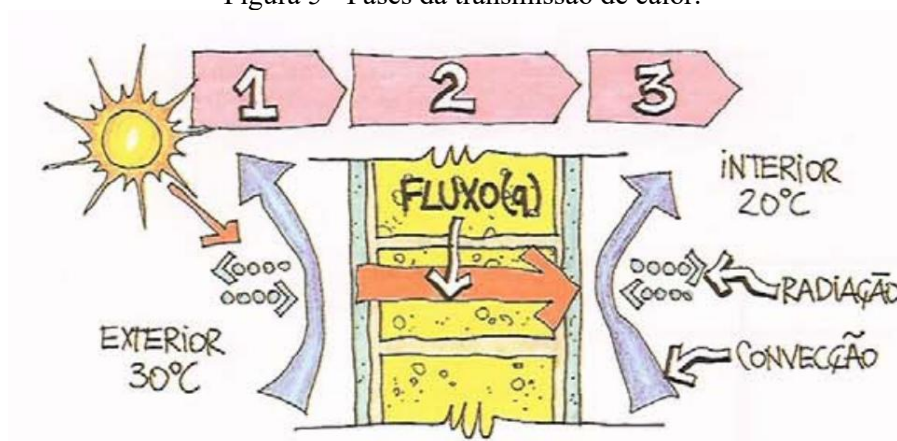
Segundo Asdrubali, D'Alessandro e Schiavoni (2015), as soluções na promoção do conforto térmico devem abordar tanto a mudança de hábitos nos ambientes urbanos quanto a melhoria das propriedades termodinâmicas dos materiais empregados nas edificações. Para Milani (2008), um problema frequente nos países emergentes, como o Brasil, está relacionado

à grande demanda habitacional, ligada à aplicação de tecnologias e materiais de construção energeticamente ineficientes, provocando impacto ambiental e futura escassez dos materiais de construção no país.

Geller (1994) discute ser mais barato investir em pesquisas para a economia energética do que investir no fornecimento de mais energia, fomentando melhorias energética nos equipamentos e reduzindo o consumo de materiais construtivos. Se os profissionais da construção civil tivessem conhecimento sobre a eficiência energética ao nível de especificação de materiais, haveria economia nos custos da obra e no consumo de energia (Lamberts, Dutra e Pereira, 1997).

De acordo com Lamberts, Dutra e Pereira (1997), as fases da transmissão de calor nos fechamentos estão ilustradas pela Figura 5.

Figura 5 - Fases da transmissão de calor.



Fonte: Lamberts, Dutra e Pereira (1997).

- Fase 1 - troca de calor com meio exterior: superfície externa recebe calor por convecção e radiação, elevando sua temperatura;
- Fase 2 – condução através do fechamento: com o ganho de calor na superfície externa, essa diferença em relação à superfície interna é transmitida através da troca de calor. Esse fluxo é diretamente proporcional à condutividade térmica do material;
- Fase 3 – troca de calor com meio interior: com o ganho de calor na superfície interna, que se tornará mais quente que a temperatura do ar. Então, as perdas de calor estarão relacionadas à resistência térmica total de fechamento e ao seu inverso, a transmitância térmica. Com essas duas últimas propriedades, pode-se comparar diversas opções de fechamento das edificações.

Percebe-se, assim, a possibilidade da comparação energética entre diferentes envoltórias através da análise de suas propriedades térmicas, possibilitando o estudo do emprego de materiais que produzam soluções térmicas eficazes.

2.2 BLOCO CERÂMICO E SUA INFLUÊNCIA NO DESEMPENHO TÉRMICO DAS PAREDES DE VEDAÇÃO

Os blocos cerâmicos constituem o principal componente dos sistemas de alvenaria de vedação no Brasil, sendo amplamente empregados devido à abundância de matéria-prima e à cultura construtiva local. Conforme Bauer (2008), tais elementos são obtidos a partir do processamento e queima de argilas, geralmente conformados por extrusão, o que lhes confere a geometria com furos longitudinais. O autor destaca que os blocos de vedação são projetados especificamente para compor paredes de fechamento e divisórias, devendo apresentar características físicas que garantam o isolamento e a estanqueidade, sem, contudo, desempenhar função estrutural na edificação.

Segundo a ANICER (2015), a presença de furos prismáticos é uma característica própria dos blocos cerâmicos, conferindo-lhes leveza, economia de material e desempenho compatível com os requisitos de isolamento térmico e acústico exigidos em paredes de vedação. Trata-se de um elemento amplamente consolidado no setor da construção civil nacional, utilizado sobretudo para compartimentação e fechamento vertical, com propriedades físicas adequadas ao clima e às técnicas construtivas predominantes no país.

Conforme elucidado por Callister Jr. e Rethwisch (2016), o processamento de cerâmicas à base de argila é finalizado na etapa de queima, onde o material é submetido a elevadas temperaturas para promover a vitrificação. Durante esse processo, forma-se uma fase líquida que flui e preenche parte dos espaços intergranulares, conferindo resistência mecânica ao bloco. Em elementos para vedação, a microestrutura final mantém uma porosidade significativa. Segundo os autores, essa característica é determinante para o desempenho térmico, pois a condutividade térmica de um material cerâmico diminui à medida que a porosidade aumenta; os poros atuam como barreiras de ar aprisionado que dispersam o fluxo de calor, resultando em um isolamento superior quando comparado a materiais mais densos e homogêneos.

Além da microporosidade da cerâmica, a geometria dos blocos desempenha papel fundamental na resistência térmica do componente. De acordo com Frota e Schiffer (2001), a presença de furos cria câmaras de ar estanque que interrompem o fluxo de calor por condução direta. Com isso, nessas cavidades, a transferência de energia deixa de ser puramente condutiva

e passa a ocorrer por processos de convecção natural e radiação entre as faces internas, mecanismos que, somados, oferecem maior resistência térmica do que a condução através do material cerâmico. Dessa forma, a configuração geométrica dos furos atua como uma barreira isolante, sendo determinante para reduzir a transmitância térmica do elemento de vedação.

No contexto brasileiro, as espessuras mais comuns de blocos cerâmicos para vedação são 9 cm, 12 cm e 14 cm. Segundo Weber *et al.* (2017), essas dimensões constituem as tipologias mais representativas do mercado nacional, sendo utilizadas como referência para a avaliação do desempenho térmico de edificações no país.

2.3 ARGAMASSA DE REVESTIMENTO E SUA INFLUÊNCIA NO DESEMPENHO TÉRMICO DAS PAREDES DE VEDAÇÃO

A importância da argamassa de revestimento no sistema de vedação é ratificada por Bauer (2008), que classifica as funções desta camada além do acabamento estético. Segundo o autor, o revestimento argamassado atua como o elemento de proteção, responsável por resguardar a alvenaria e a estrutura contra a atuação direta de agentes agressivos e intempéries, promovendo a estanqueidade à água e aos gases, vedando as frestas e porosidades naturais dos blocos cerâmicos.

Ademais, essa camada possui papel de destaque na análise do desempenho de vedações verticais. Segundo a NBR 15575 (ABNT, 2024), o desempenho térmico é avaliado sobre o sistema de vedação vertical completo. Portanto, a espessura, a densidade e a condutividade térmica da camada de revestimento influenciam diretamente variáveis críticas como a resistência térmica total de uma parede.

A correlação entre as proporções de dosagem e o desempenho final do revestimento é fundamentada na ciência dos materiais. Segundo Carasek (2010), as propriedades da argamassa no estado endurecido, tais como resistência mecânica, módulo de deformação e permeabilidade, são governadas diretamente pela sua microestrutura, definida pela relação entre os materiais constituintes da mistura. A autora explica que o teor de aglomerante (cimento e/ou cal), a granulometria da areia e a quantidade de água de amassamento determinam o volume de poros e a compacidade da matriz cimentícia.

Consequentemente, variações nas proporções alteram a densidade de massa aparente do material. Lamberts, Dutra e Pereira (2014) definem que a condutividade térmica de materiais porosos é governada fundamentalmente pela sua densidade: quanto maior a massa específica,

maior será a condução de calor através da matriz sólida, reduzindo, portanto, a capacidade de isolamento térmico da camada de revestimento como um todo.

No contexto brasileiro, apesar de amplamente difundidas pela cultura construtiva, as argamassas convencionais à base de cimento e areia apresentam limitações significativas quando aplicadas em regiões de clima quente. A insuficiência desses materiais é evidenciada por Passos, Jungblut e Carasek (2016). Ao avaliarem sistemas de vedação vertical sob a ótica do conjunto normativo de conforto térmico, os autores constataram que, para atingir a Capacidade Térmica mínima exigida em certas zonas bioclimáticas, o sistema composto por blocos cerâmicos necessitaria de uma camada de argamassa convencional de 5 cm de espessura, excedendo os limites de segurança estabelecidos pela NBR 13749, que define a seguinte faixa de dimensões para os revestimento com argamassa inorgânica, apresentada no Quadro 4.

Quadro 4 - Espessuras admissíveis de revestimentos internos e externos.

| Revestimento | Espessura (e) (mm) |
|----------------|--------------------|
| Parede interna | $5 < e < 20$ |
| Parede externa | $20 < e < 30$ |

Fonte: NBR 13749 (2013, adaptado).

Ou seja, a espessura da argamassa de revestimento deve seguir os valores descritos acima e ainda, levar em conta o local de aplicação daquela parede, tendo em vista a obediência ao conjunto normativo.

2.4 CINZA DA CASCA DE ARROZ COMO ADIÇÃO SUSTENTÁVEL

2.4.1 Desenvolvimento sustentável e resíduos agroindustriais

Com o advento das máquinas a vapor na Revolução Industrial e o início do processo de urbanização, o processo de degradação ambiental foi acelerado em níveis não vistos anteriormente. Diante disso, a busca pelo equilíbrio entre o meio ambiente equilibrado e o desenvolvimento econômico se tornou fundamental para satisfazer as necessidades humanas sem prejudicar as gerações futuras (CMMAD, 1991).

O aumento populacional nas últimas décadas foi seguido pelo acréscimo na demanda por alimentos, como consequência, o agronegócio se tornou um dos principais setores da economia global. Segundo o CEPEA (2025), a participação do agronegócio no PIB do Brasil em 2024 foi de 23,5%. Em meio a esse cenário, destaca-se a produção de arroz, que segundo dados da

EMBRAPA (2025), a produção nacional responde por cerca de 28% do volume total de arroz produzido nas Américas. Essa alta produtividade, no entanto, resulta na geração de um grande volume de casca de arroz, subproduto agrícola normalmente tratado como rejeito.

A lei nº 12.305/2010 (Brasil, 2010), que institui a política nacional de resíduos sólidos, possui como um dos seus principais objetivos o incentivo ao desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental e empresarial voltados para a melhoria dos processos produtivos e ao reaproveitamento dos resíduos sólidos, incluídos a recuperação e o aproveitamento energético. Ainda nesse sentido, a NBR ISO 14001 (ABNT, 2015), parte do conjunto de leis e normas relacionadas ao desenvolvimento sustentável, define o ciclo de vida de um produto como os estágios consecutivos e encadeados de um sistema de produto ou serviço, desde a aquisição da matéria-prima ou de sua geração, a partir de recursos naturais até a disposição final. No contexto dessa pesquisa, a disposição final dos subprodutos do cultivo de arroz representa uma etapa do seu ciclo de vida com potencial para reaproveitamento, mitigando impactos ambientais e contribuindo para um desenvolvimento mais verde, além de representar uma oportunidade de geração de valor a partir de um resíduo com alto valor agregado.

Diversos estudos apontam o potencial de materiais orgânicos e subprodutos agroindustriais na construção civil, verificando um equilíbrio desejável entre qualidade técnica, custo e sustentabilidade (Pinto et al., 2012). Essa é uma alternativa particularmente interessante para países em desenvolvimento, onde o grande volume de resíduos representa uma oportunidade para o reaproveitamento (Asdrubali, D'Alessandro e Schiavoni, 2015). Dessa forma, fomenta-se a investigação sobre o uso desses resíduos, como a casca de arroz, para melhorar as propriedades de materiais relacionados ao conforto térmico.

2.4.2 Uso da cinza da casca de arroz na construção civil

Segundo Marconcini e Oliveira (2007), a composição de orgânicos e inorgânicos das cascas de arroz depende de vários fatores, tais como variedade, tipo de solo, condições climáticas e adubação. A sílica amorfa e a sílica branca podem ser extraídas a partir da casca e do caule das plantas de arroz, originando um material de alta área superficial.

A casca de arroz possui alto poder calorífico, sendo empregada como fonte de energia na indústria de beneficiamento do arroz. Dessa forma, há a geração de uma grande quantidade de cinza de casca de arroz (CCA), sem destinação adequada e normalmente descartado de forma inadequada (Pouey, 2006).

A CCA (Figura 6a) é um resíduo obtido através da queima da casca do arroz (Figura 6b) em fornalhas, a céu aberto ou em fornos especiais à temperatura controlada. Esse processo ocorre quando a casca de arroz não é utilizada de forma direta, normalmente como condicionador de solo, o que gera um alto volume de CCA e constitui um grave passivo ambiental (Milani, 2008).

Figura 6 – a) cinza da casca de arroz; b) casca de arroz.



Fonte: Selvarranjan *et al.* (2020).

Segundo Pouey (2006), a CCA é um material leve, com massa específica da ordem de 2000 kg/m³, com elevado teor de sílica, podendo atingir patamares acima de 95% da sua composição, possibilitando seu emprego na construção civil como pozolana agregada em cimentos, concretos e argamassas ou ainda como isolante térmico, dentre outras aplicações. De acordo com Selvarranjan *et al.*, o Quadro 5 apresenta a composição química típica de uma amostra padrão de CCA obtida numa cultura de arroz para regiões de clima tropical.

Quadro 5 - Composição química de amostra de CCA.

| Composição química | SiO ₂ | K ₂ O | CaO | MgO | Al ₂ O ₃ | Na ₂ O | Fe ₂ O ₃ | LOI |
|--------------------|------------------|------------------|-----|-----|--------------------------------|-------------------|--------------------------------|-----|
| % | 85,4 | 3,4 | 2,6 | 1,4 | 1,1 | 0,8 | 0,7 | 7,9 |

Fonte: Selvarranjan *et al.* (2020).

Nota-se que o composto químico predominante na CCA é a sílica (SiO₂), com teores decrescentes dos óxidos de potássio, cálcio e magnésio (K₂O, CaO e MgO), enquanto as perdas ao fogo (LOI) representam 7,9% e estão relacionadas às impurezas do material.

O LOI de 7,9% obtido para a amostra analisada se encontra dentro do intervalo esperado para cinzas de casca de arroz provenientes de processos industriais de geração de energia. De acordo com Pouey (2006), o LOI é um dos principais indicadores da eficiência da combustão e varia significativamente conforme a temperatura, o tempo de residência e a oxigenação do sistema.

Milani (2008) reforça que cinzas industriais, produzidas em caldeiras que operam com menor controle operacional, tendem a apresentar teores mais elevados de carbono residual quando comparadas às cinzas obtidas em condições laboratoriais controladas, nas quais a combustão é mais homogênea e eficiente. Assim, a amostra do Quadro 5 está alinhado ao comportamento típico das cinzas industriais, caracterizando um subproduto amplamente disponível, economicamente competitivo e coerente com os processos termoenergéticos que o originam.

Milani (2008) destaca que temperaturas rigorosamente controladas entre 400 °C e 700 °C favorecem a formação de sílica amorfa altamente reativa, resultando em cinzas com menor variabilidade e maior desempenho pozolânico. Habeeb e Mahmud (2010) demonstraram que processos otimizados podem gerar cinzas com pureza superior a 95%, mas cujo custo é substancialmente maior devido às etapas adicionais de beneficiamento térmico.

Em contraste, cinzas industriais apresentam maior variabilidade composicional, mas permanecem atrativas do ponto de vista econômico e ambiental, sendo reconhecidas por autores como Zhang e Malhotra (1996) como um subproduto abundante de baixo custo, com elevado potencial de uso em argamassas e materiais de construção quando o objetivo inclui sustentabilidade e redução de custos.

No contexto da crise energética, diversas pesquisas abordam a utilização de cinzas vegetais como aglomerantes alternativos, desde que sejam predominantemente silicosas, que possa ser produzida no estado vítreo e com granulometria adequada. A reatividade dessas cinzas está ligada à composição morfológica e do processo de produção da cinza, como o tempo de queima, temperatura de combustão e grau de moagem (Milani, 2008).

Segundo Milani (2008), boa parte das pesquisas concentra -se nas cinzas de casca de arroz, pois os fatores como grande volume de cinza na casca de arroz gerado, o elevado teor de sílica, o tipo de estrutura física e a disponibilidade da casca de arroz no mercado, contribuem para a sua utilização como pozolana. A CCA com alto teor de sílica amorfa é considerada adequada para a produção de produtos cimentícios.

A pozolana com alta reatividade desempenha um papel fundamental nos materiais cimentícios, sendo parte da reação pozolânica que ocorre entre ela e o hidróxido de cálcio, um subproduto da hidratação do Cimento Portland. Ao consumir esse hidróxido de cálcio, a reação contribui significativamente para a durabilidade do produto, especialmente em ambientes ácidos. Além disso, os produtos dessa reação preenchem os poros capilares da matriz, conferindo maior resistência mecânica e impermeabilidade ao sistema (Mehta e Monteiro, 2008).

Dentre as aplicações da CCA na construção civil, Selvarranjan *et al.* (2020) destacam seu uso como substituto parcial do cimento, especialmente com o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas do concreto, devido a composição química do resíduo e seu potencial reativo no processo de hidratação do cimento.

Zucco e Beraldo (2008) analisaram o efeito da adição de CCA em misturas cimento-casca de arroz, analisando o impacto nas propriedades do compósito. Os resultados mostraram uma redução no consumo de cimento sem alterar de forma significativa os valores de resistência mecânica das placas prensadas confeccionadas, reduzindo a emissão de gás carbônico emitido no ciclo de vida do cimento e fomentando construções mais viáveis do ponto de vista ecológico.

Cordeiro, Toledo Filho e Fairbairn (2009) estudaram a influência da substituição parcial de cimento pela CCA ultrafina e com alto teor de carbono nas propriedades do concreto. Para concretos de resistência convencional, a substituição proporcionou incrementos na faixa de 20% nos valores de resistência à compressão, em comparação à referência. Percebe-se a aplicabilidade da utilização da CCA com alta atividade pozolânica nos concretos estruturais, inclusive promovendo melhorias no sistema.

A pesquisa conduzida por Isaia *et al.* (2010) analisou o emprego da casca de arroz, tanto no estado natural quanto moída, aplicada ao concreto estrutural, encontrando a viabilidade da utilização da mistura com 15% de casca de arroz natural como concreto estrutural, apesar do decréscimo entre 20% e 30% no desempenho mecânico do material, especialmente nas primeiras idades, enquanto a casca de arroz moída apresentou valores de desempenho similares ao material de referência.

Nota-se a necessidade de caracterizar e escolher a CCA correta, visto que a variabilidade no processo de obtenção do resíduo impacta nos efeitos produzidos no composto cimentício. Pouey (2006) afirma que a falta de uniformidade do material disponível implica na incerteza do grau de atividade e, portanto, numa limitação para sua aplicação. Milani (2008) pontua que nem toda casca é queimada em temperaturas controladas, e esse tipo de processo acaba gerando

cinzas com presença de sílica cristalina, quimicamente inativas e, portanto, inadequadas para o aproveitamento na construção civil.

Rosa *et al.* (2015) testaram o emprego de CCA em conjunto com outros materiais orgânicos como placas isolantes térmicas, em comparação à lâ de vidro, isolante térmico com alta empregabilidade comercial. Os resultados indicam performances similares entre os sistemas isolantes testados: enquanto a modelo referência apresentou temperatura máxima de 38,3°C nos testes realizados, o modelo com adições apresentou valores na faixa de 39,3°C, para as mesmas condições.

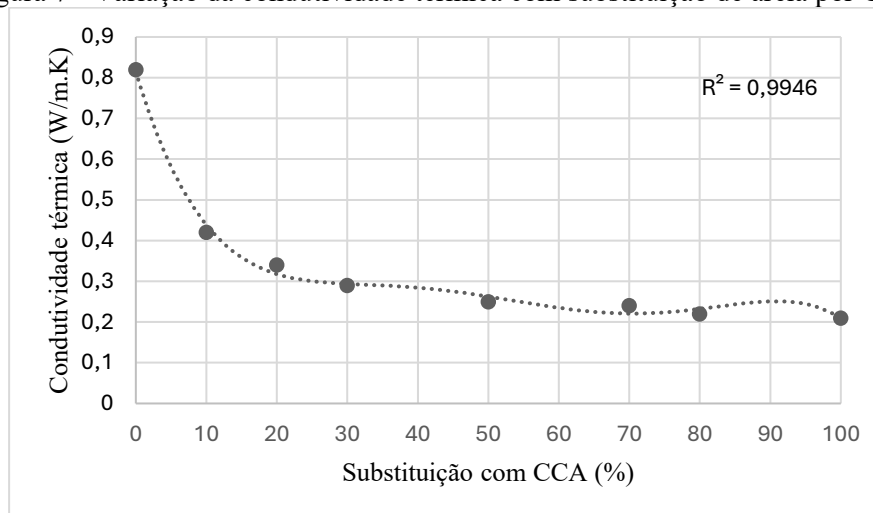
Onyenokporo *et al.* (2024) exploraram a relação entre a adição de CCA em blocos de vedação e a eficiência energética nas edificações em zonas de clima tropical, na cidade de Abuja, Nigéria. Os resultados da simulação no EnergyPlus indicaram uma redução de até 6,5% na carga térmica de resfriamento (CgTR), para o bloco de 15% de CCA, em comparação ao bloco de vedação convencional.

Afunilando os escopos das pesquisas, alguns estudos analisaram a aplicação da CCA como componente de argamassas. Bezerra (2010) investigou a influência da incorporação da CCA em argamassas de assentamento e revestimento, obtendo resultados satisfatórios quanto ao desempenho físico e mecânico, inclusive melhores do que os valores da argamassa de referência: aos 28 dias, a mistura com 9% de CCA apresentou resistência à compressão simples de 2,70 MPa, mais de 20% acima do modelo de referência, com 2,20 MPa.

Rosa e Scherer (2018) avaliaram o impacto de compósitos com casca de arroz no desempenho térmico de alvenaria, comprovando a melhora nas propriedades térmicas das paredes modificadas com os materiais testados: a composição com casca de arroz moída apresentou transmitância térmica (U) de 1,945 m².K, cerca de 29% mais isolante do que a composição com argamassa comum e bloco cerâmico, que apresentou U de 2,511 m².K.

Apesar do potencial isolante do material, Selvarranjan *et al.* (2020) afirmam que são poucos os estudos com foco nas propriedades térmicas da argamassa com adição de CCA. A pesquisa desenvolvida por eles analisou o impacto da substituição da areia pela CCA de baixo custo, observando melhorias na condutividade térmica da argamassa (λ), com valores condizentes com materiais isolantes, mantendo níveis adequados de resistência mecânica para percentuais de substituição de CCA abaixo de 50%. A influência da adição de CCA na λ da argamassa é observado na Figura 7.

Figura 7 - Variação da condutividade térmica com substituição de areia por CCA.

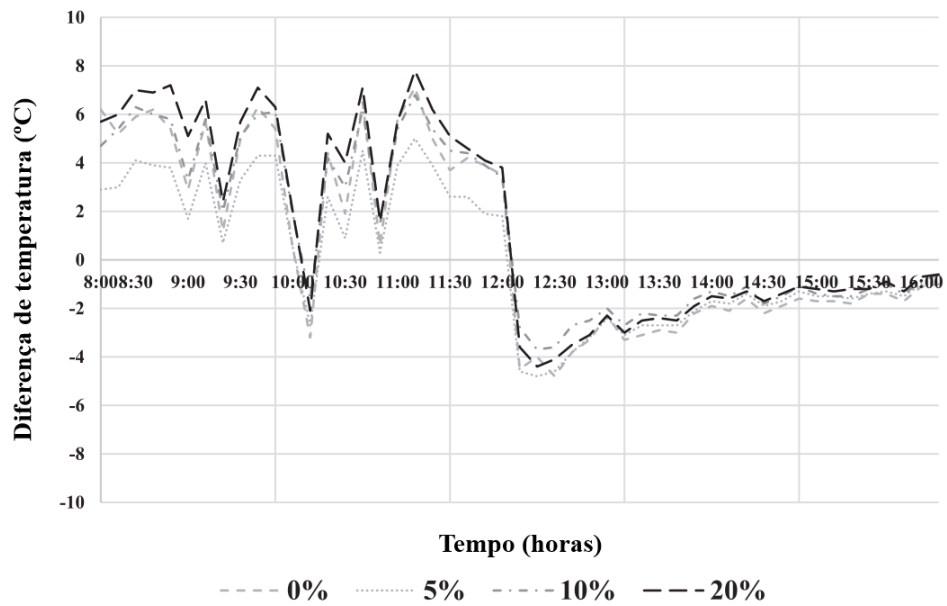


Fonte: Selvarranjan *et al.* (2020, adaptado.)

Ainda, os pesquisadores afirmam que a melhoria detectada está relacionada à baixa densidade da CCA, visto que a λ dos materiais porosos é governada pela presença de vazios do material. Assim, o aumento da adição de CCA em substituição à areia diminui a densidade do compósito e conseqüentemente, aumenta a quantidade de poros, diminuindo a λ do material.

Resultados positivos também foram encontrados por De Silva, Vishvalingam e Etampawala (2021), substituindo cimento por CCA nos teores de 5, 10 e 20% e analisando a resistência mecânica, durabilidade e desempenho térmico da argamassa, indicando a melhoria nos três parâmetros estudados. A diminuição da λ em função do acréscimo de CCA pode ser visualizada na Figura 8.

Figura 8 - Diferença de temperatura ao longo do dia para diferentes composições.



Fonte: De Silva, Vishvalingam e Etampawala (2021, adaptado).

Percebe-se que as maiores diferenças de temperatura estão ligadas à menor transferência de calor entre a face exposta ao calor do sol e a face interna das amostras. Essa relação é corroborada pelo comportamento das curvas apresentadas, onde a composição com o maior teor de substituição (20%) atinge os picos mais elevados de gradiente térmico, superando os 7°C de diferença em determinados intervalos. Em contrapartida, a argamassa de referência (0%) apresenta as menores amplitudes, indicando uma passagem de calor mais acelerada. Portanto, evidencia-se o ganho de resistência térmica proporcionado pela incorporação da CCA, confirmando sua atuação como barreira eficiente contra o fluxo de calor entre as superfícies.

2.5 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL NO ESTUDO DO DESEMPENHO TÉRMICO

Em face da crescente preocupação com a eficiência energética das residências e seu impacto ambiental, a NBR 15575-4 (ABNT, 2021) definiu parâmetros para a avaliação de desempenho térmico. O procedimento normativo definido envolve a análise simplificada dos critérios definidos para a transmitância e capacidade térmica. Quando este processo encontra valores insatisfatórios, a norma determina a avaliação térmica através da simulação computacional, recomendando o uso do software EnergyPlus ou similar, a consideração da habitação como um todo, com cada ambiente como uma zona térmica e ainda, na composição de materiais para a simulação, a utilização de dados das propriedades térmicas dos materiais e/ou componentes construtivos (NBR 15575-1, 2024).

O estudo sobre o desempenho térmico de edificações envolve o entendimento de variáveis complexas, como as condições climáticas da região em estudo e suas alterações, a composição de materiais da edificação, as atividades e cargas internas dos ambientes, além de sistemas de climatização natural e artificial. Devido aos diversos fatores envolvidos no estudo energético de um ambiente, diversos pesquisadores apontam para a vantagem do uso de softwares no estudo do desempenho energético de edificações em relação aos métodos simplificados, visto que nem sempre é possível realizar medições de um ambiente em projeto.

Segundo Hensen e Lamberts (2011), existem casos nos quais estudos analíticos tendem a gerar respostas exatas para uma visão muito simplificada da realidade, com escopo restrito, estacionário e incompatíveis com os desafios da área de economia energética.

Nesse sentido, Chvatal (2014) observou que o procedimento simplificado não representa de forma correta os impactos da transmitância e da absorvância da envolvente avaliados pelo método de simulação, podendo levar a uma sub ou superestimação térmico real.

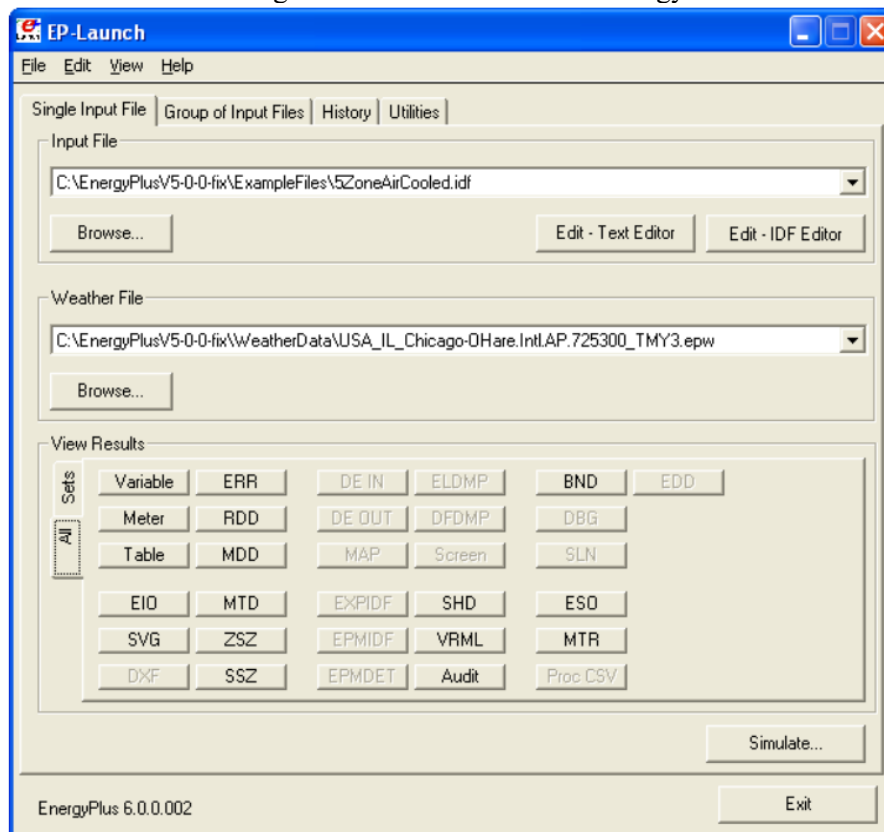
De acordo com Gonçalves, Moura e Kuniochi (2015), as técnicas computacionais se sobressaem ao permitir uma avaliação termodinâmica multifatorial, como o clima externo, efeitos da inércia térmica com o passar dos anos e ainda, dados relacionados à carga térmica para climatização artificial. Assim, nota-se a validade e robustez da simulação computacional para o estudo do desempenho energético das construções, desde que a metodologia empregada no uso dos softwares disponíveis seja adequada.

Dentre as ferramentas disponíveis, o EnergyPlus destaca-se como um programa de simulação termoenergética de edifícios de código aberto, gratuito e acessível, desenvolvido e mantido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (*DEO*). O software é fruto da fusão de dois programas anteriores amplamente validados, o BLAST e o DOE-2, incorporando suas melhores características. Ele é reconhecido internacionalmente por sua precisão e é a ferramenta de referência recomendada pela NBR 15575-1 (2024) para a verificação do desempenho térmico em nível superior.

A robustez do EnergyPlus reside na utilização do método do Balanço de Calor. Segundo Crawley *et al.* (2001), este método permite o cálculo simultâneo das cargas térmicas da edificação e da resposta dos sistemas, considerando as interações fundamentais de radiação, convecção e condução em cada superfície e em cada zona térmica, em intervalos de tempo inferiores a uma hora. Essa capacidade de processamento dinâmico é fundamental para estudos em climas como o de Barreiras, onde a amplitude térmica diária e a inércia dos materiais desempenham papel determinante no conforto dos usuários.

Embora seja um motor de cálculo potente, o EnergyPlus opera fundamentalmente através de arquivos de texto (*inputs e outputs*), carecendo de uma interface gráfica nativa para modelagem geométrica complexa, conforme Figura 9.

Figura 9 - Interface inicial do EnergyPlus.



Fonte: Departamento de energia dos EUA (2025).

Para contornar esta limitação, o fluxo de trabalho adotado nesta pesquisa utiliza o software SketchUp, reconhecido pela flexibilidade na representação volumétrica, associado à extensão Euclid. Segundo Ellis (2017), essa interface atua como uma ponte de interoperabilidade, permitindo a tradução precisa da geometria tridimensional e das zonas térmicas para a sintaxe *.idf*, lida pelo EnergyPlus. Tal integração assegura a correta atribuição das propriedades físicas e condições de contorno aos componentes construtivos modelados, garantindo a integridade dos dados da simulação (BIG LADDER SOFTWARE, 2025).

A confiabilidade dos resultados gerados pelo EnergyPlus para a realidade construtiva brasileira é comprovada na literatura. Weber *et al.* (2017), por exemplo, comprovaram a eficácia do software na simulação de blocos cerâmicos com furos, sistema usual no país, demonstrando que o uso de modelos geométricos equivalentes gera resultados de resistência

térmica compatíveis com ensaios laboratoriais, validando a ferramenta para o estudo de vedações verticais.

Contudo, a mera execução de simulações não garante, por si só, a validade científica das conclusões. Dada a natureza complexa e multivariada dos fenômenos térmicos, a interpretação dos dados de saída – como os valores de carga térmica – deve ser respaldada por métodos estatísticos inferenciais.

As técnicas como a Análise de Variância (ANOVA) e o Teste de Tukey são ferramentas consolidadas para determinar se as diferenças de desempenho observadas entre os cenários simulados possuem significância estatística real. Essa abordagem foi empregada com êxito por Silva (2022) ao analisar o desempenho térmico de diferentes sistemas de cobertura na cidade de Barreiras – BA: a autora utilizou o tratamento estatístico para corroborar que a variação dos materiais da envoltória exercia, de fato, influência significativa na redução da temperatura interna e da carga térmica, validando a simulação computacional como instrumento de prova técnica.

2.6 ESTUDOS SOBRE O DESEMPENHO TÉRMICO EM BARREIRAS - BA

A cidade de Barreiras – BA é caracterizada pelo calor e baixa umidade relativa. Nesse sentido, diversas pesquisas recentes abordaram os parâmetros térmicos normativos para a cidade, tanto através do método simplificado quanto pela simulação computacional, identificando falhas construtivas do ponto de vista do desempenho térmico.

Segundo observações de Araújo (2018), o sistema construtivo padrão adotado na região, alvenaria simples e revestimento convencional, apresenta desempenho térmico insatisfatório, não atendendo às diretrizes normativas de conforto térmico definidas para a zona bioclimática da cidade. Dessa forma, através da proposição de composições com diferentes sistemas isolantes, a autora encontrou soluções eficazes que, ao elevarem a resistência térmica da envoltória, garantem a adequação aos parâmetros exigidos e superam as deficiências de isolamento do sistema usualmente aplicado na região.

De forma complementar, Silva (2021) utilizou o método da simulação computacional para analisar a carga térmica de resfriamento (CgTR) para diferentes composições de elementos de vedação. Seus resultados demonstraram o baixo desempenho do sistema construtivo tradicional da cidade, com alta CgTR necessária, enquanto os sistemas com materiais isolantes

na envoltória demonstraram necessitar de menor CgTR, propiciando uma melhor eficiência energética e a redução de custos com resfriamento artificial nas edificações.

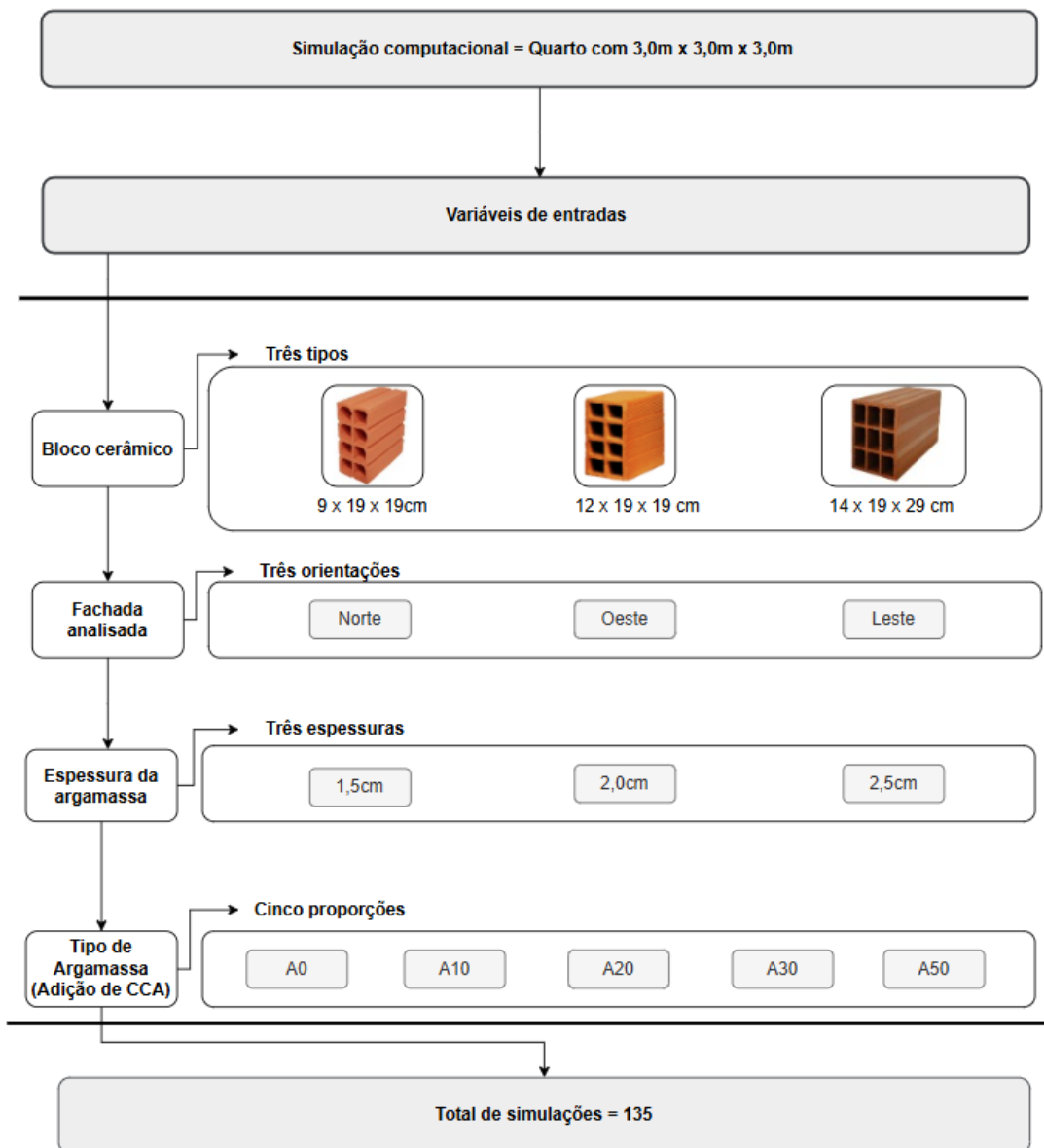
Em outra ótica, Silva (2022) estudou o efeito da mudança dos materiais empregados e das camadas existentes nas coberturas das casas na CgTR. Os resultados mostraram diversas configurações de cobertura com bom desempenho térmico, embora o sistema mais usual em Barreiras – cobertura com telha cerâmica – apresente a maior necessidade de CgTR dentre todas as estudadas.

Amarante (2024) analisou, através do software EnergyPlus, a relação entre diferentes tamanhos de vãos de ventilação e CgTR das edificações. Na contramão das construções observadas na cidade, o autor identificou que quanto maior a área do vão da abertura, maior a CgTR para manter a temperatura de 25° C nas edificações.

3. METODOLOGIA

Este capítulo descreve os procedimentos adotados para o alcance dos objetivos da pesquisa. O estudo partiu da modelagem de uma edificação de referência simplificada, com dimensões de 3,0 x 3,0 x 3,0 m, cujo desempenho térmico foi avaliado, mediante simulação computacional, sob diferentes configurações de envoltória. As variáveis de projeto incluíram a alteração da geometria dos blocos cerâmicos (9 x 19 x 19 cm, 12 x 19 x 19 cm e 14 x 19 x 29 cm) e da espessura da argamassa de revestimento (1,5 cm, 2,0 cm e 2,5 cm) nas faces internas e externas do modelo, conforme mostrado na Figura 10.

Figura 10 – Fluxograma das variáveis de entradas das simulações.



Fonte: Autor.

As composições de argamassa analisadas compreenderam o traço convencional (A0) e misturas com substituição parcial de agregado miúdo por Cinza da Casca de Arroz (CCA) nas proporções de 10%, 20%, 30% e 50%. A definição desses teores teve como base os traços experimentais validados por Selvarranjan et al. (2020), os quais demonstraram viabilidade mecânica e térmica para essa faixa de substituição.

As simulações consideraram as edificações voltadas para as orientações solares Oeste, Norte e Leste, selecionadas por representarem as fachadas com maior exposição à radiação solar direta e, conseqüentemente, de ganho térmico crítico na latitude da Zona Bioclimática 5B, conforme é apresentado no fluxograma esquemático (Figura 10).

Como indicador de desempenho, adotou-se a Carga Térmica de Resfriamento (CgTR) para as 135 combinações propostas. O tratamento estatístico dos dados incluiu Análise de Variância (ANOVA) e Teste de Tukey, executados no software Jamovi¹, escolhido por ser uma alternativa livre e completa para modelagem estatística. Ainda, utilizou-se o coeficiente η^2 (eta-quadrado) para a determinação do tamanho do efeito (*effect size*): essa métrica permitiu quantificar a magnitude da influência de cada variável independente sobre a CgTR, possibilitando a hierarquização dos fatores (orientação solar, largura do bloco, argamassa e sua espessura) conforme seu impacto prático no desempenho térmico global da edificação.

Por fim, o cálculo da Transmitância Térmica (U) pelo método simplificado estabelecido na NBR 15220-2 (2022) permitiu verificar a adequação das composições com CCA aos parâmetros normativos de desempenho térmico.

3.1 MODELO DE EDIFICAÇÃO DE REFERÊNCIA

3.1.1 Simulador e modelo computacional

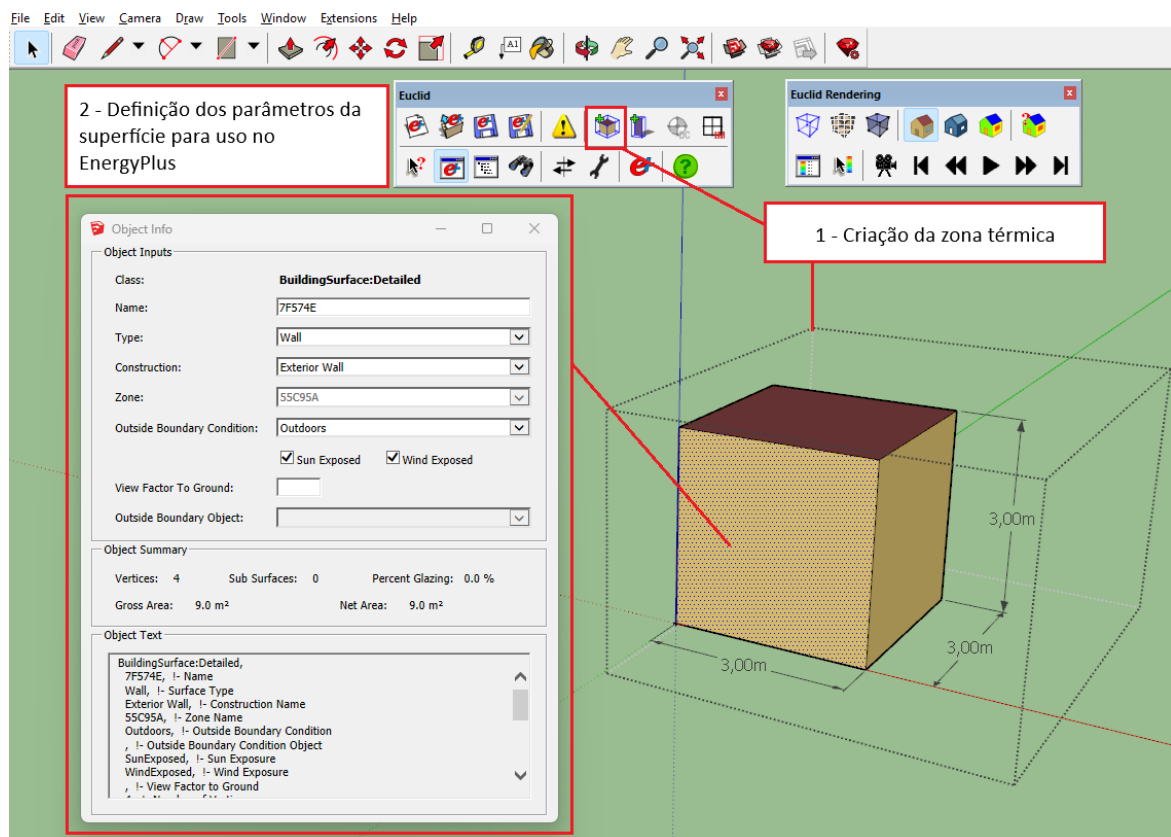
Considerando que a NBR 15575-1 (ABNT, 2024) indica o uso de simulação computacional para análise do desempenho de edificações na fase de projeto, utilizou-se o software EnergyPlus para avaliar a eficiência energética dos sistemas simulados. A geometria do modelo de referência consiste em uma célula de teste simplificada (Figura 11) de um quarto, cômodo de longa permanência, com dimensões de 3,0m de largura, 3,0m de comprimento e 3,00m de pé-direito.

¹ Disponível em: <https://www.jamovi.org/>. Acesso em: 18 de novembro de 2025.

Para isolar termicamente as vedações verticais, foco deste estudo, o modelo foi concebido sem aberturas (portas e janelas). Adotou-se ainda a condição de contorno adiabática para o piso, a cobertura e para as demais paredes adjacentes à fachada em análise. Essa configuração elimina a interferência de esquadrias e assegura a inexistência de fluxo de calor através das superfícies isoladas, permitindo avaliar exclusivamente o desempenho da envoltória composta pelos blocos e argamassas propostos.

A geração do modelo computacional seguiu a metodologia empregada por Amarante (2024) e Silva (2021): o protótipo foi modelado no software SketchUp com auxílio da extensão Euclid, que permitiu a criação das zonas térmicas, o estabelecimento das dimensões e a definição das propriedades das superfícies do ambiente. Conforme Figura 11, a interface gráfica possibilita a verificação visual das condições de contorno e da geometria espacial. Esta etapa é fundamental para garantir a correta atribuição dos parâmetros físicos antes da exportação do arquivo final no formato .idf para o simulador EnergyPlus.

Figura 11 – Modelo computacional gerado no Sketchup.

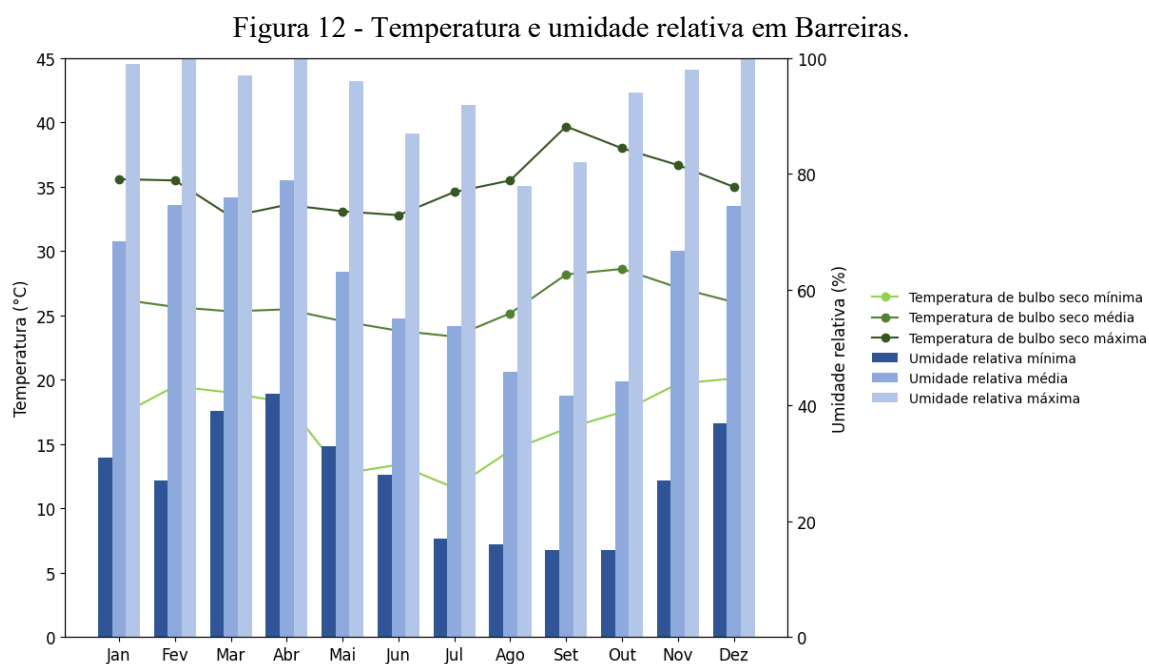


Fonte: Autor.

3.1.2 Condições climáticas da cidade de Barreiras – BA

Com o objetivo de simular o impacto dos sistemas em estudo na cidade de Barreiras – BA, classificada na zona bioclimática 5B conforme a NBR 15220-3 (ABNT, 2024), será utilizado o arquivo climático da cidade. Esta norma define disposições construtivas e estratégias de condicionamento passivo para a região, já citadas anteriormente (Quadros 2 e 3).

O arquivo climático utilizado nas simulações, de extensão .epw (*EnergyPlus Weather*), foi obtido junto ao repositório digital *Climate.OneBuilding*². Conforme descrito por Silva (2021), este arquivo é do tipo *Typical Meteorological Year (TMY)*, elaborado a partir de uma série histórica de dados de múltiplos anos. Sua metodologia de composição consiste em uma seleção estatística na qual, para cada mês, excluem-se as ocorrências de extremos climáticos (anos atipicamente mais quentes ou frios), resultando em um ano virtual representativo das condições típicas locais. Segundo a última série histórica disponível, entre 2009 e 2023, o dia típico de verão local considerado é 25/09, que foi considerado para a realização das simulações. A Figura 12 representa a variação mensal da temperatura e da umidade relativa do ar, para seus valores médios, máximos e mínimos.



Fonte: Climate One Building (2025, adaptado).

Os dados climáticos evidenciam a severidade das condições no segundo semestre do ano, caracterizadas por picos de temperatura que superam frequentemente os 35°C, com baixos

² Disponível em: <https://climate.onebuilding.org>. Acesso em: 25 de agosto de 2025.

índices de umidade relativa do ar. Esse cenário de alta amplitude térmica diária e ar seco reforça a necessidade de estratégias construtivas baseadas na inércia térmica. Dessa forma, os dados apresentados validam a escolha do cenário crítico de setembro para verificar, via simulação, a capacidade das diferentes composições de envoltória em amortecer os ganhos de calor e reduzir a carga térmica interna.

3.2 COMPOSIÇÃO DAS ENVOLTÓRIAS

3.2.1 Blocos cerâmicos

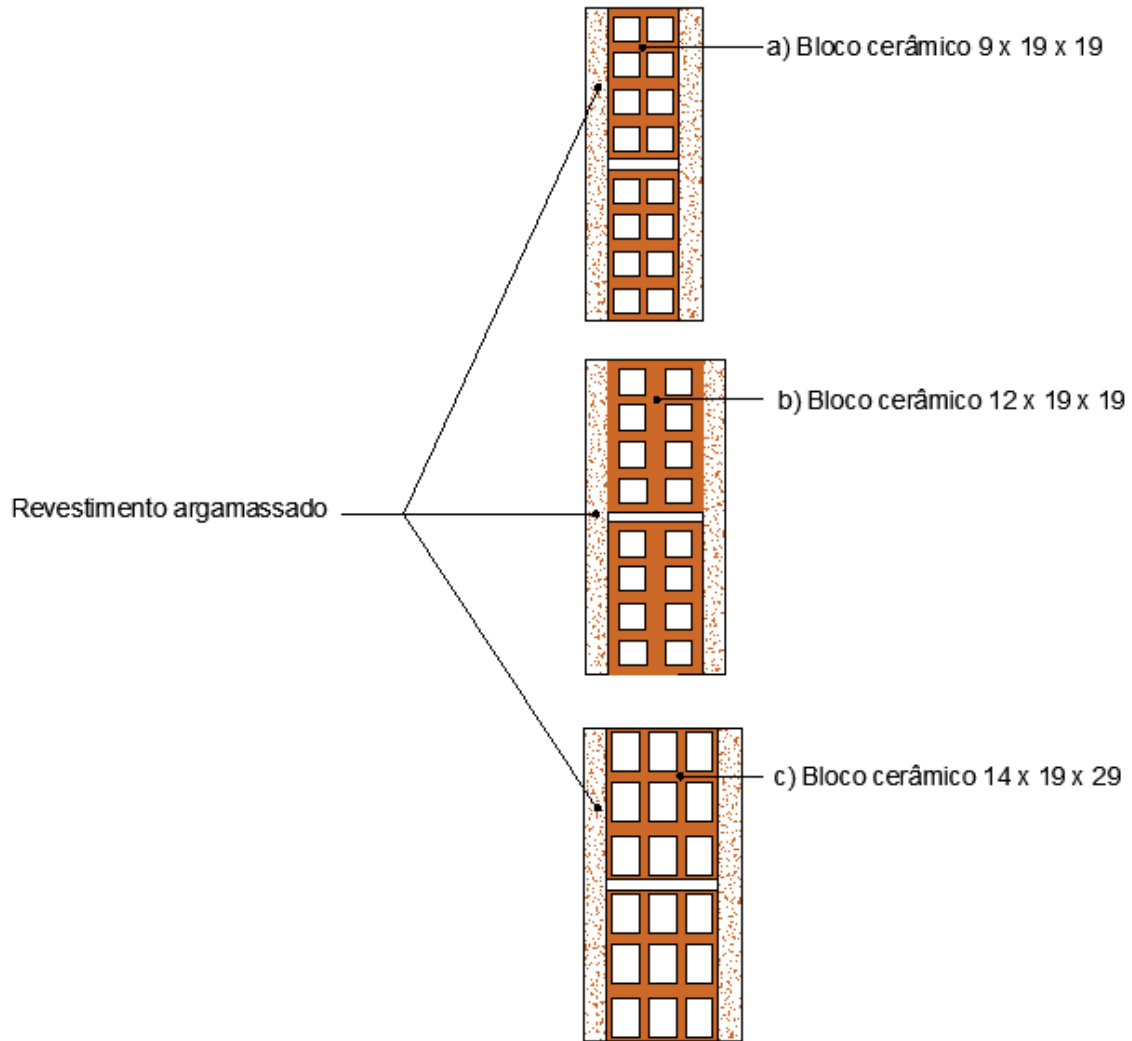
Com o modelo computacional e as condições climáticas definidas, a etapa subsequente consistiu na caracterização das vedações verticais. A estrutura base da alvenaria foi configurada considerando o uso de blocos cerâmicos de furos horizontais, seguindo as práticas construtivas usuais da região.

As larguras para o núcleo da alvenaria (9 cm, 12 cm e 14 cm) foram selecionadas com base na adequação às estratégias bioclimáticas, a representatividade do mercado local, além de permitir a verificação comparativa do potencial compensatório da argamassa proposta. O trabalho de Weber *et al.* (2017) construiu uma biblioteca digital com as propriedades higrotérmicas necessárias para simulações computacionais com os três tipos de blocos, representativos no contexto das construções no Brasil.

Considera-se que a cidade de Barreiras – BA, situada na Zona Bioclimática 5B, possui como diretriz construtiva recomendada pela NBR 15220-3/2024 o uso de paredes pesadas com alta inércia térmica. Nesse contexto, a variação da espessura do bloco cerâmico altera a massa térmica da envoltória, permitindo verificar se a geometria do componente influencia na eficácia da adição de CCA.

Ademais, as dimensões escolhidas refletem a realidade construtiva regional: o bloco de 9 cm (Figura 13a) representa a construção econômica e usual, associada a menor desempenho térmico, enquanto os blocos de 12 cm (Figura 13b) e 14 cm (Figura 13c) representam cenários de melhoria progressiva. Busca-se, portanto, responder se a aplicação de um revestimento termicamente aprimorado sobre uma alvenaria de 9 cm é capaz de atingir desempenho comparável ao de uma alvenaria mais espessa de 14 cm com o revestimento convencional. A proposta é variar a largura dos blocos para, com isso, aumentar a espessura da camada de ar interna e, conseqüentemente, influenciar a resistência térmica total do elemento de vedação.

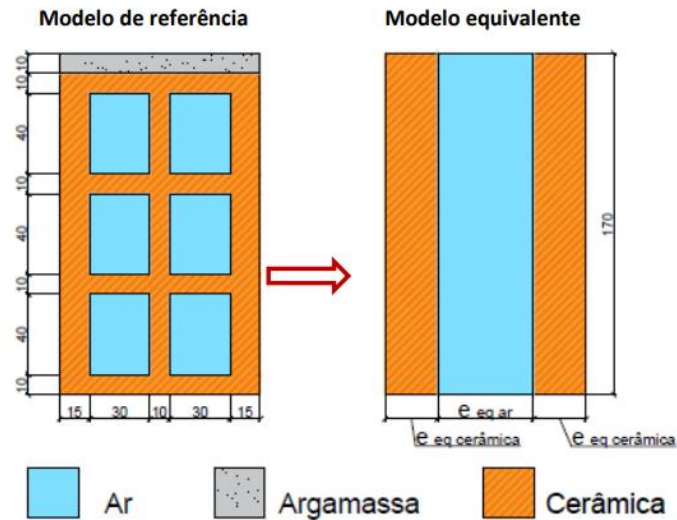
Figura 13 - Corte de paredes com os três tipos de blocos cerâmicos utilizados.



Fonte: Autor.

O método de cálculo do EnergyPlus não considera a geometria interna dos blocos cerâmicos, o que é necessário para uma quantificação energética precisa. Essa limitação torna necessária a determinação de um modelo equivalente para o sistema construtivo brasileiro (Weber *et al.*, 2017). Nesse modelo, as espessuras da argamassa de assentamento entre blocos e as divisões entre os furos são simplificadas e representadas por camadas homogêneas de materiais com propriedades térmicas equivalente, conforme detalhado na Figura 14.

Figura 14 - Modelo de referência e modelo equivalente para uso no EnergyPlus.



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

O Quadro 6 apresenta os valores das espessuras equivalentes e suas respectivas resistências térmicas das camadas de ar. Nota-se que, à medida em que o bloco se torna mais largo, a camada equivalente de ar aumenta, elevando a resistência térmica do ar para aquele elemento de vedação.

Quadro 6 - Comprimentos equivalentes e resistência térmica do ar para os blocos cerâmicos.

| Bloco cerâmico | Condutividade térmica (W/(m.k)) | Espessura equivalente (m) | Resistência térmica da camada de ar (m ² .K/W) |
|-----------------|---------------------------------|---------------------------|---|
| 9 x 19 x 19 cm | 0,90 | 0,013 | 0,170 |
| 12 x 19 x 19 cm | 0,90 | 0,013 | 0,227 |
| 14 x 19 x 29 cm | 0,90 | 0,0165 | 0,297 |

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

3.2.2 Argamassa de revestimento

Serão utilizadas cinco composições de argamassas no estudo: argamassa convencional (A0), argamassa com adição de cinza da casca de arroz em substituição à areia nos teores de 10% (A10), 20% (A20), 30% (A30) e 50% (A50).

As propriedades térmicas utilizadas como parâmetro de entrada no EnergyPlus foram: a condutividade térmica (λ), densidade de massa aparente (ρ) e o calor específico (c). As propriedades higrotérmicas (densidade, condutividade térmica e calor específico) dos blocos cerâmicos estão descritas conforme a NBR ISO 10456 (ABNT, 2022), enquanto seus comprimentos equivalentes e as propriedades da camada de ar seguem o modelo equivalente

proposto por Weber *et al.* (2017). As propriedades das argamassas (A0, A10, A20, A30 e A50) foram obtidas do trabalho Selvarranjan *et al.* (2020), conforme Quadro 7.

Quadro 7 - Propriedades térmicas dos materiais empregados nas composições.

| Elemento | Densidade (kg/m ³) | Condutividade térmica (W/(m.k)) | Calor específico (kJ/(kg.K)) | Comprimento equivalente (m) ⁽²⁾ | Resistência da camada de ar (m ² .K/W) ⁽²⁾ |
|--------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------------|--|--|
| Bloco 9 x 19 x 19 cm ⁽¹⁾ | 1600 | 0,90 | 0,92 | 0,013 | 0,170 |
| Bloco 12 x 19 x 19 cm ⁽¹⁾ | 1600 | 0,90 | 0,92 | 0,013 | 0,227 |
| Bloco 14 x 19 x 29 cm ⁽¹⁾ | 1600 | 0,90 | 0,92 | 0,0165 | 0,297 |
| A0 ⁽³⁾ | 2385 | 0,83 | 1,00 | - | - |
| A10 ⁽³⁾ | 2070 | 0,43 | 1,00 | - | - |
| A20 ⁽³⁾ | 1920 | 0,34 | 1,00 | - | - |
| A30 ⁽³⁾ | 1780 | 0,29 | 1,00 | - | - |
| A50 ⁽³⁾ | 1605 | 0,24 | 1,00 | - | - |

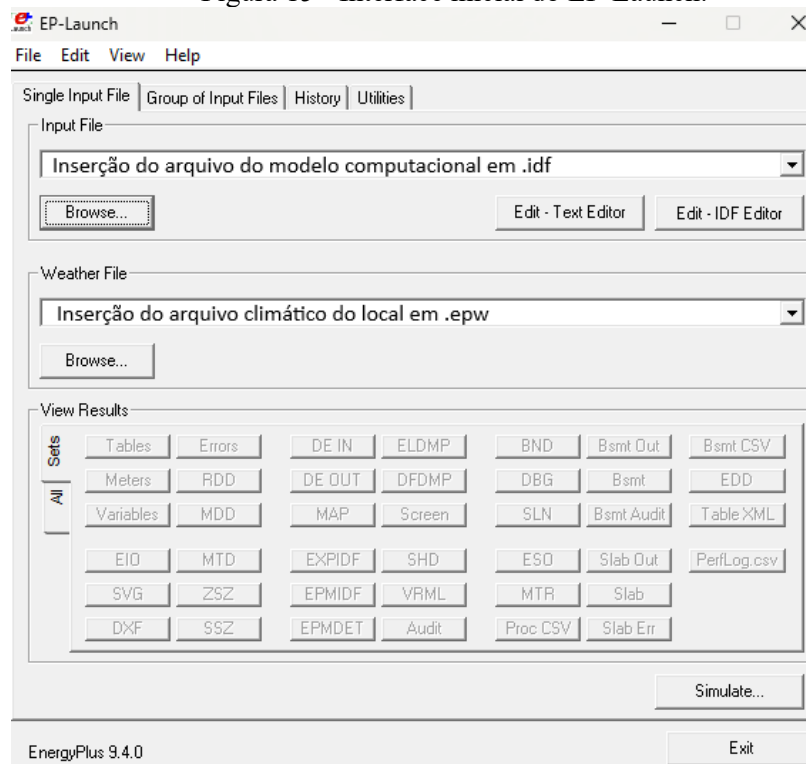
Fonte: (1) NBR ISO 10456 (2022); (2) Weber *et al.* (2017); (3) Selvarranjan *et al.* (2020).

As espessuras das argamassas de revestimento foram definidas com base nas dimensões admissíveis e usuais preconizadas pela ABNT NBR 13749 (ABNT, 2013). Considerando que a norma determina que o revestimento de paredes internas deve possuir espessura entre 5 mm e 20 mm, enquanto para paredes externas a faixa exigida situa-se entre 20 mm e 30 mm, o estudo contemplou a simulação dos cenários de 1,5 cm, 2,0 cm e 2,5 cm para cobrir a faixa de aplicação.

3.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A execução das simulações foi gerenciada através da interface EP-Launch do EnergyPlus. Nesta etapa, ocorre a integração entre a geometria modelada (arquivo de extensão .idf, proveniente do SketchUp/Euclid) e os dados climáticos locais (arquivo de extensão .epw), conforme fluxo de trabalho ilustrado na Figura 15.

Figura 15 - Interface inicial do EP-Launch.



Fonte: Autor.

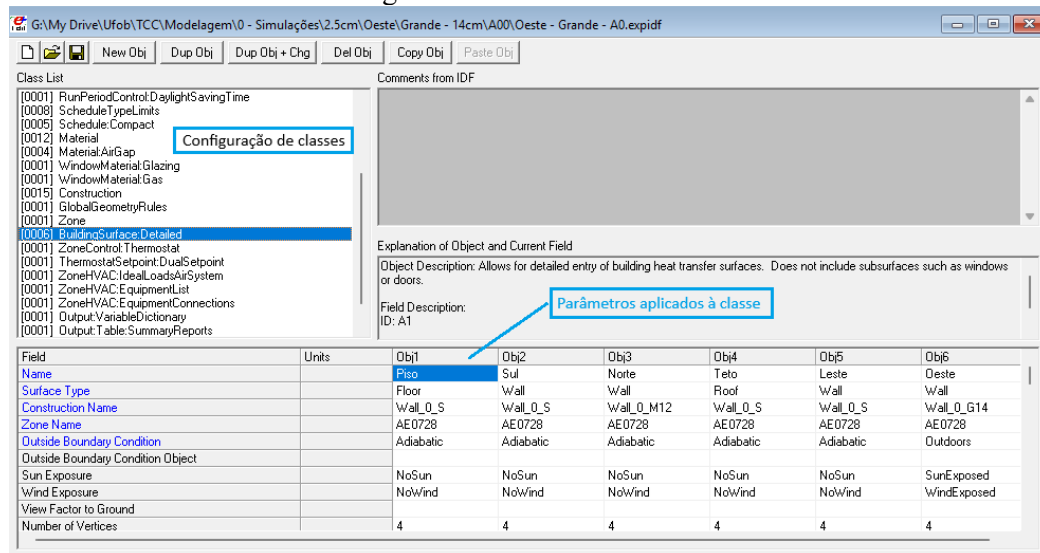
Para a definição dos parâmetros físicos e operacionais da edificação, utilizou-se o IDF Editor, interface nativa do software que organiza os dados em classes hierárquicas. As principais classes configuradas para este estudo estão listadas a seguir:

- **Version:** Identificação da versão do simulador de cálculo utilizado (versão 9.4);
- **Building:** Definição dos parâmetros globais, como a orientação da edificação em relação ao Norte geográfico;
- **RunPeriod:** Determinação do intervalo temporal da simulação (Para este estudo, definiu-se o *Summer Design Day* de 25 de setembro);
- **Material:** Especificação das propriedades termofísicas de cada componente individual (blocos, ar, argamassas A0 a A50);
- **Construction:** Montagem das camadas das paredes, associando os materiais criados às espessuras definidas na metodologia;
- **BuildingSurface:Detailed:** Caracterização geométrica das superfícies (paredes, piso e teto) e suas condições de contorno (Externa ou Adiabática);
- **HVACTemplate:Zone:IdealLoadsAirSystem:** Definição do sistema de climatização ideal, necessário para o cálculo da carga térmica;

- **Output:Variable:** Seleção das variáveis de saída para a coleta de dados (Carga Térmica de Resfriamento).

A configuração e os valores definidos para todas as classes utilizadas no presente trabalho estão dispostas no apêndice A, da Figura 25 até a Figura 33. A Figura 16 exemplifica a interface do IDF editor com algumas das classes manipuladas.

Figura 16 - Interface do IDF Editor.



Fonte: Autor.

Como mencionado anteriormente, visando isolar o comportamento térmico da parede frontal (objeto de estudo), as configurações de contorno no *BuildingSurface:Detailed* foram ajustadas de modo que apenas a fachada em análise (Norte, Leste ou Oeste) realizasse trocas de calor com o meio externo. As demais superfícies (pisos, cobertura e paredes adjacentes) foram configuradas como adiabáticas, simulando uma condição em que não há fluxo de calor através dessas fronteiras, neutralizando sua influência nos resultados. Adicionalmente, o parâmetro de coeficiente de absorvância à radiação da argamassa foi simplificado, garantindo que as variações de desempenho sejam decorrentes exclusivamente das propriedades térmicas dos materiais e não de sua coloração.

Para o cálculo da Carga Térmica de Resfriamento (CgTR) foi utilizado a classe *Ideal Loads Air System*, que simula uma máquina de climatização ideal, com capacidade infinita, que injeta ar frio no ambiente sempre que a temperatura interna ultrapassa um limite preestabelecido (*setpoint*).

O termostato foi configurado com temperatura de resfriamento em 24°C. A definição desse valor para o *setpoint* fundamenta-se nas diretrizes de conforto térmico estabelecidas pela

ABNT NBR 16401 (ABNT, 2008) e pela ASHRAE Standard 55 (2020). Tais normas preconizam que, para condições de verão, a zona de conforto térmico situa-se na faixa de temperatura operativa entre 22,5°C e 25,5°C. Adotou-se o valor de 24°C como parâmetro de simulação por representar o valor médio desta faixa normativa, buscando assegurar condições de conforto térmico e permitindo a comparabilidade com estudos consolidados na literatura de eficiência energética.

Assim, o software contabiliza a energia necessária (em Watts ou Joules) para manter o ambiente nessa temperatura, sendo este valor acumulado a variável de resposta da pesquisa.

3.4 ANÁLISE DA VIABILIDADE DA CCA COMO ADIÇÃO

A análise dos resultados baseou-se na validação estatística e técnica do desempenho das composições com adição de CCA. Para verificar se a adição de CCA exerce influência significativa na redução da Carga Térmica de Resfriamento (CgTR), os dados das 135 simulações foram submetidos a um tratamento estatístico.

Adotou-se uma abordagem similar à de Silva (2022), utilizando a Análise de Variância (ANOVA de múltiplos fatores) para comparar o desempenho das cinco misturas (A0, A10, A20, A30 e A50). A ANOVA permitiu identificar a existência de diferenças estatisticamente significativas entre as médias dos grupos, considerando um intervalo de confiança de 95%. Para complementar a análise de significância estatística (valor-p) e quantificar a magnitude da influência de cada variável independente sobre a CgTR, utilizou-se o coeficiente de tamanho do efeito η^2 , que mede a força da relação entre amostras e é definido como a razão entre a soma dos quadrados do efeito de um fator específico (SQ_{fator}) e a soma dos quadrados total do modelo (SQ_{total}), conforme a Equação (1):

$$\eta^2 = \frac{SQ_{fator}}{SQ_{total}} \quad (1)$$

Para a interpretação da magnitude dos efeitos, adotaram-se os limites propostos por Cohen (1988), que classifica o tamanho do efeito como: pequeno ($\eta^2 \approx 0,01$), médio ($\eta^2 \approx 0,06$) e grande ($\eta^2 \geq 0,14$). Essa abordagem permite hierarquizar a relevância prática das variáveis de projeto, distinguindo entre diferenças estatisticamente significativas e aquelas com impacto físico preponderante no desempenho térmico. Uma vez identificados os fatores preponderantes, utilizou-se o Teste de Tukey para refinar a análise, discriminando quais parâmetros específicos

dentro de cada variável resultaram em melhor comportamento termoenergético, validando assim a eficácia das diferentes composições propostas.

Por fim, aplicou-se o método de cálculo simplificado prescrito pela ABNT NBR 15220-2/2022 para determinar a Transmitância Térmica (U) das vedações verticais. O procedimento visou quantificar o impacto da incorporação de CCA nas propriedades isolantes do sistema, verificando a adequação das composições propostas aos limites de desempenho térmico exigidos para a Zona Bioclimática 5B. A rotina de cálculo considera o fluxo de calor unidirecional em regime estacionário através de componentes planos e paralelos. A U, expressa em $W/(m^2.K)$, pode ser obtida pelo inverso da resistência térmica total (R_t) do componente, conforme a Equação (2):

$$U = \frac{1}{R_t} \quad (2)$$

A resistência térmica total pode ser definida como a soma da resistência térmica do componente (R) com a resistência térmica superficial interna (R_{si}) e externa (R_{se}), conforme Equação (3):

$$R_t = \sum R + R_{si} + R_{se} \quad (3)$$

Os valores convencionais aplicados para as resistências de superfície (R_{si} e R_{se}), para elementos de vedação verticais, onde há fluxo de calor na horizontal, são definidos no Quadro 8.

Quadro 8 - Valores para resistências de superfície com fluxo de calor horizontal.

| Superfície | Resistência superficial ($m^2.K/W$) |
|----------------------|---------------------------------------|
| Interna (R_{si}) | 0,13 |
| Externa (R_{se}) | 0,04 |

Fonte: NBR 15220-2 (2022, adaptado)

Para paredes verticais composta de camadas homogêneas, a NBR 15220-2 (ABNT, 2022) define a obtenção da resistência térmica de cada camada a partir da sua espessura (e) e de sua condutividade térmica (λ), conforme a Equação 4:

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (4)$$

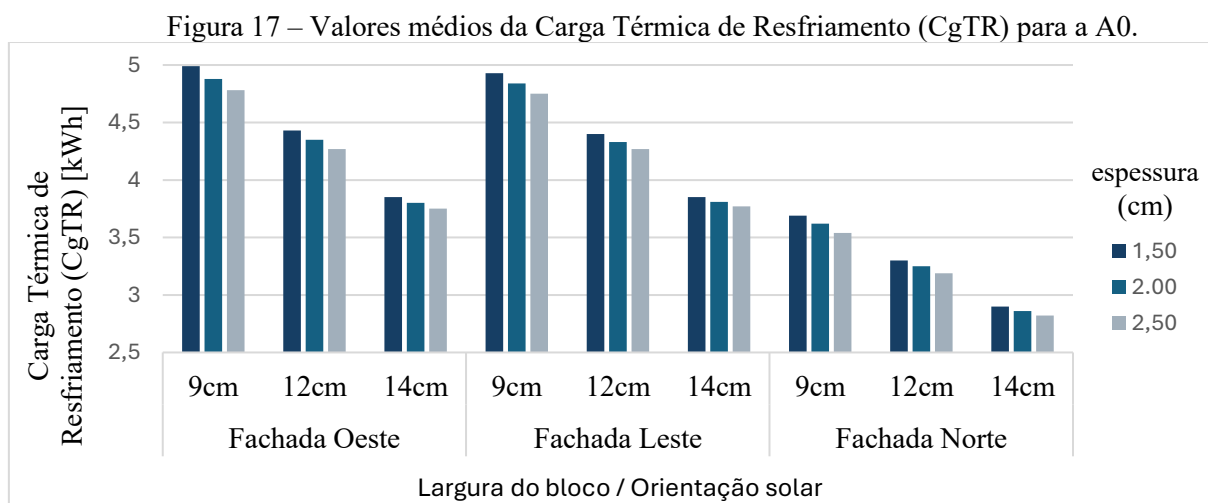
A partir da rotina de cálculo descrita acima, a U das composições selecionadas foi calculada e comparada com os limites máximos normativos apresentados nos Quadro 2 e Quadro 3.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente capítulo apresenta e discute os resultados obtidos a partir das simulações computacionais do desempenho térmico. Optou-se por uma análise estatística multifatorial que considerou a atuação simultânea das variáveis de projeto: orientação solar, largura do bloco cerâmico, tipo de argamassa (teor de adição de CCA) e espessura do revestimento.

Para tanto, os dados da Carga Térmica de Resfriamento (CgTR) foram submetidos a uma Análise de Variância (ANOVA), complementada pelo cálculo do tamanho do efeito (η^2). Essa abordagem permitiu não apenas validar a significância estatística das diferenças ($p < 0,05$), mas principalmente hierarquizar a magnitude da influência de cada fator. Para refinar essa análise, aplicou-se o Teste de Tukey, identificando quais níveis específicos de cada fator apresentaram diferenças estatísticas entre si.

Preliminarmente à apresentação da modelagem estatística multifatorial, é fundamental estabelecer o desempenho da argamassa de referência (A0) e o comportamento médio das composições propostas. A Figura 17 apresenta os valores médios da CgTR para argamassa A0.



Fonte: Autor.

Nota-se que a orientação solar exerce forte influência nos resultados, com as fachadas Oeste e Leste apresentando os picos de maior carga térmica, enquanto a fachada Norte demonstra um desempenho comparativamente superior, exigindo menores CgTR. Observa-se também na Figura 17, uma tendência consistente de redução da CgTR associada ao aumento da inércia térmica da parede, evidenciada tanto pela troca da largura dos blocos (de 9 cm para 14 cm) quanto, em menor escala, pelo incremento na espessura do revestimento argamassado.

4.1 ANÁLISE GERAL E HIERARQUIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS

Os valores médios da CgTR das simulações estão disponíveis no Quadro 11, Apêndice B. Com base nesse conjunto de dados, a Análise de Variância (ANOVA) é apresentada na Tabela 1, realizada para todas as variáveis de entrada e as interações de segundo grau entre elas.

Tabela 1 - ANOVA multifatorial para simulações realizadas.

| | SQ | df | QM | F | p | η^2 |
|------------------------|---------|----|----------|---------|-------|----------|
| Orientação | 27,7055 | 2 | 13,8528 | 17018.4 | <.001 | 0.525 |
| Largura | 13,5039 | 2 | 6,7519 | 8294.9 | <.001 | 0.256 |
| Argamassa | 8,8083 | 4 | 2,2021 | 2705.3 | <.001 | 0.167 |
| Espessura | 1,7306 | 2 | 0,8653 | 1063.0 | <.001 | 0.033 |
| Orientação * Largura | 0,2237 | 4 | 0,0559 | 68.7 | <.001 | 0.004 |
| Orientação * Argamassa | 0,1647 | 8 | 0,0206 | 25.3 | <.001 | 0.003 |
| Largura * Argamassa | 0,2847 | 8 | 0,0356 | 43.7 | <.001 | 0.005 |
| Orientação * Espessura | 0,0341 | 4 | 0,0085 | 10.5 | <.001 | 0.001 |
| Largura * Espessura | 0,0761 | 4 | 0,0190 | 23.4 | <.001 | 0.001 |
| Argamassa * Espessura | 0,1636 | 8 | 0,0205 | 25.1 | <.001 | 0.003 |
| Residuais | 0,0716 | 88 | 8,14E-04 | | | |

Fonte: Autor.

Nota: SQ: soma dos quadrados; df: graus de liberdade; QM: quadrado médio; F: fator F; p: significância; η^2 : tamanho do efeito.

A análise de variância demonstrou que todos os fatores principais possuem influência estatisticamente significativa sobre o desempenho térmico ($p < 0,001$). O nível de significância encontrado indica uma probabilidade inferior a 0,1% de que as diferenças nas médias sejam randômicas, ou seja, os resultados obtidos e suas variações são genuínas e consistentes. Contextualizando para o estudo, esses dados validam a premissa de que as variáveis de projeto (orientação, geometria, tipo de argamassa e sua espessura) são determinantes para o conforto térmico.

A orientação solar destacou-se como o fator preponderante, sendo responsável isoladamente por 52,5% ($\eta^2 = 0,525$) de toda a variação da CgTR. Em segundo lugar, a largura do bloco explicou por 25,6% ($\eta^2 = 0,256$) da variância. Juntos, esses dois fatores de geometria e implantação governam quase 80% do desempenho térmico. O tipo de argamassa (% de teor de CCA), objeto central deste estudo, apresentou-se como a terceira variável mais importante, com um tamanho de efeito considerável de 16,7% ($\eta^2 = 0,167$). Por fim, a espessura do revestimento, embora estatisticamente significativa, exerceu um papel de refinamento, contribuindo com apenas 3,30% ($\eta^2 = 0,033$) na variação global dos resultados.

As interações de primeira ordem entre os fatores (combinação de duas variáveis), apesar de significativas devido ao rigor numérico da simulação, apresentaram tamanhos de efeito desprezíveis (todos abaixo de 0,5%). Em síntese, as variáveis de entrada atuam de forma independente e a interação entre elas não explica as simulações com magnitude relevante. Nesse sentido, pode-se afirmar, por exemplo, que os benefícios da incorporação de CCA ocorrem de forma estável e independente das demais variáveis de entrada.

Ao aplicar a categorização proposta por Cohen (1988), constatou-se que a orientação solar, a largura do bloco e o tipo de argamassa demonstraram um tamanho de efeito de elevada magnitude ($\eta^2 \geq 0,14$). Esse resultado é particularmente relevante, pois posiciona a incorporação de CCA no mesmo patamar de importância dos fatores arquitetônicos. Em contrapartida, a espessura do revestimento apresentou um impacto classificado entre pequeno e médio, atuando como uma variável secundária ou de refinamento.

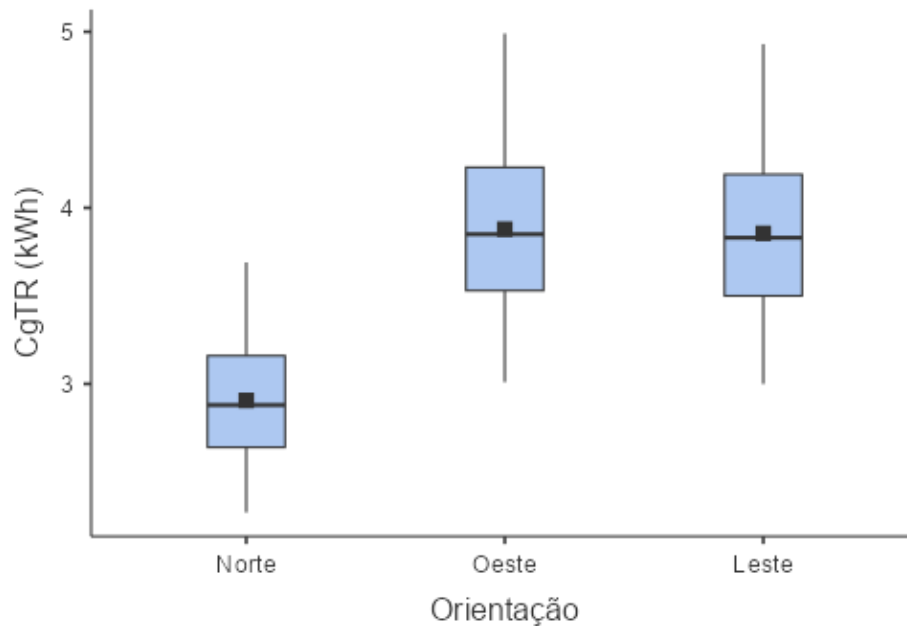
Por fim, as interações entre os fatores apresentaram magnitude desprezível, evidenciando que as variáveis principais atuam de forma independente sobre o desempenho térmico, com o efeito de uma variável não sendo condicionado por outra, como por exemplo, a influência da espessura do revestimento sobre a CgTR mantém-se constante, independentemente de se utilizar a argamassa convencional (A0) ou as misturas com adição de CCA.

Dada a disparidade na influência dos fatores, optou-se por delimitar a discussão subsequente apenas às variáveis de magnitude relevante, desconsiderando-se as interações de primeira ordem.

4.2 INFLUÊNCIA DA ORIENTAÇÃO SOLAR

A Figura 18 resume as simulações realizadas para as três orientações solares.

Figura 18 – Valores médios de CgTR em função da orientação solar.



Fonte: Autor.

Nota: A linha horizontal no interior da caixa representa a mediana; o marcador quadrado indica a média aritmética e as hastes verticais delimitam a amplitude total dos dados (valores mínimos e máximos).

Ao comparar as três orientações solares, percebe-se que a fachada Norte apresenta os valores mais amenos de CgTR exigidos para a manutenção da temperatura de 24°C, embora receba radiação solar durante a manhã e tarde. Em contrapartida, as fachadas Oeste e Leste configuram-se como as condições mais críticas devido à incidência direta de radiação nos períodos vespertino e matutino, respectivamente, atingindo valores máximos próximos a 5,00 kWh.

Acerca da expressiva amplitude vertical, representada pelas linhas verticais no gráfico da Figura 18, ela indica que o desempenho térmico não é rígido: os valores inferiores da distribuição demonstram que as estratégias construtivas simuladas (bloco de maior inércia e argamassa com CCA) são capazes de compensar a desvantagem da insolação direta, tornando uma edificação na orientação crítica – Oeste - tão eficiente energeticamente quanto uma situada em orientação favorável – Norte.

Dessa forma, percebe-se a relevância da orientação solar na disposição dos ambientes com vistas a melhoria do conforto térmico dos usuários e eficiência energética das edificações em Barreiras.

Segundo Frota e Schiffer (2001), a orientação Leste é a mais indicada para dormitórios no hemisfério sul. Essa fachada recebe a radiação solar direta no período da manhã, o que favorece a higienização do ambiente (ação bactericida dos raios UV) sem promover o superaquecimento das vedações. Em contrapartida, a orientação Oeste deve ser evitada para ambientes de permanência noturna. Conforme explicam Lamberts, Dutra e Pereira (1997), as paredes expostas ao sol da tarde acumulam calor durante os horários de pico de temperatura externa e, devido à inércia térmica dos materiais, liberam essa energia para o interior do ambiente justamente no período da noite, coincidindo com o horário de repouso e comprometendo o conforto térmico dos usuários.

A análise das médias revela que as fachadas Oeste e Leste apresentam comportamentos térmicos similares entre si (3,88 kWh e 3,85 kWh, respectivamente), porém estatisticamente superiores à fachada Norte (2,90 kWh). O confronto das médias para as orientações solares com o Teste de Tukey (Tabela 3, no apêndice C) mostrou que os pares de orientação solar Oeste e Norte e Leste e Norte têm médias significativas diferentes, ao passo que as orientações Oeste e Leste não diferem de forma significativa entre si.

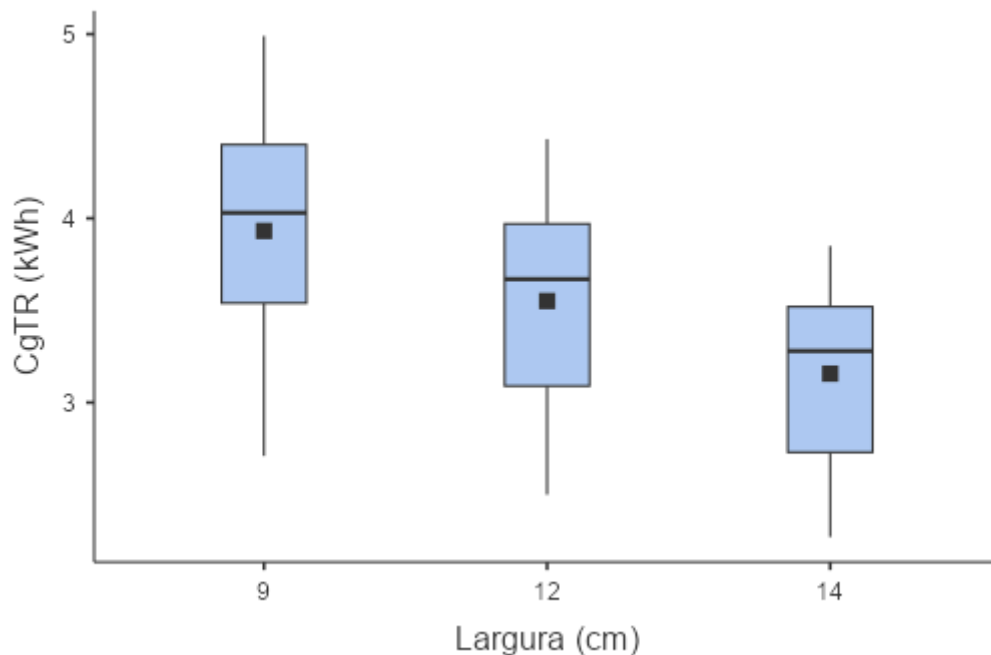
O aumento em cerca de 33,79% da CgTR necessária para a manutenção do conforto térmico na fachada Oeste, se comparada com a fachada Norte, fortalece a crítica de Kowaltowski *et al.* (2006) quanto à negligência dessa variável. Segundo os autores, a lógica de produção em massa frequentemente impõe a padronização de tipologias sem considerar a orientação solar do lote, replicando o mesmo projeto em diferentes exposições, podendo comprometer severamente a eficiência energética da residência.

Em resumo, a fachada Norte é a que necessita menor carga térmica e as orientações solares Oeste e Leste foram críticas, justificando a decisão metodológica de focar as análises de eficiência da argamassa no cenário da Fachada Oeste, representante da condição crítica de CgTR, e corroborando com a sugestão de orientação solar pela NBR15.575 para as simulações computacionais.

4.3 INFLUÊNCIA DA LARGURA DO BLOCO

Na sequência dos parâmetros hierarquizados em função da magnitude de sua relevância na CgTR, a Figura 19 detalha o comportamento térmico em função da largura do bloco cerâmico (9, 12 e 14 cm).

Figura 19 – Valores médios de CgTR em função da largura do bloco cerâmico.



Fonte: Autor.

Observa-se um escalonamento descendente em função da largura do bloco empregado. A CgTR para o bloco cerâmico de 9 cm foi a mais alta, indicando pior desempenho térmico, enquanto os valores do bloco de 14 cm são os menores. O bloco de 12cm apresenta valores intermediários entre os dois extremos. Em termos quantitativos, a comparação entre os extremos revela uma melhoria significativa: a CgTR média decresceu de 3,93 kWh (bloco de 9 cm) para 3,16 kWh (bloco de 14 cm), representando uma redução absoluta de 0,77 kWh, ou 19,59%.

Observou-se que todas as comparações entre as tipologias de blocos resultaram em diferenças significativas. A diferença de desempenho entre o bloco de 9 cm e o de 12 cm é de 0,380 kWh, magnitude similar à observada entre o bloco de 12 cm e o de 14 cm (0,394 kWh), confirmando a influência determinante da largura da vedação na carga térmica. A Tabela 5, presente no Apêndice C, resume o Teste de Tukey dessa variável confirmando essa observação.

Tal comportamento valida diretamente as diretrizes construtivas da NBR 15220-3 para a Zona Bioclimática 5B, apresentadas na revisão de literatura, que recomenda o uso de massa térmica para resfriamento como estratégia passiva prioritária para a região. Nesse contexto, a alvenaria de 14 cm se aproxima do comportamento de uma parede pesada, proporcionando

melhor inércia necessária para suavizar os picos de temperatura externa vespertina, enquanto o bloco de 9 cm não obteve um desempenho satisfatório (3,93 kWh).

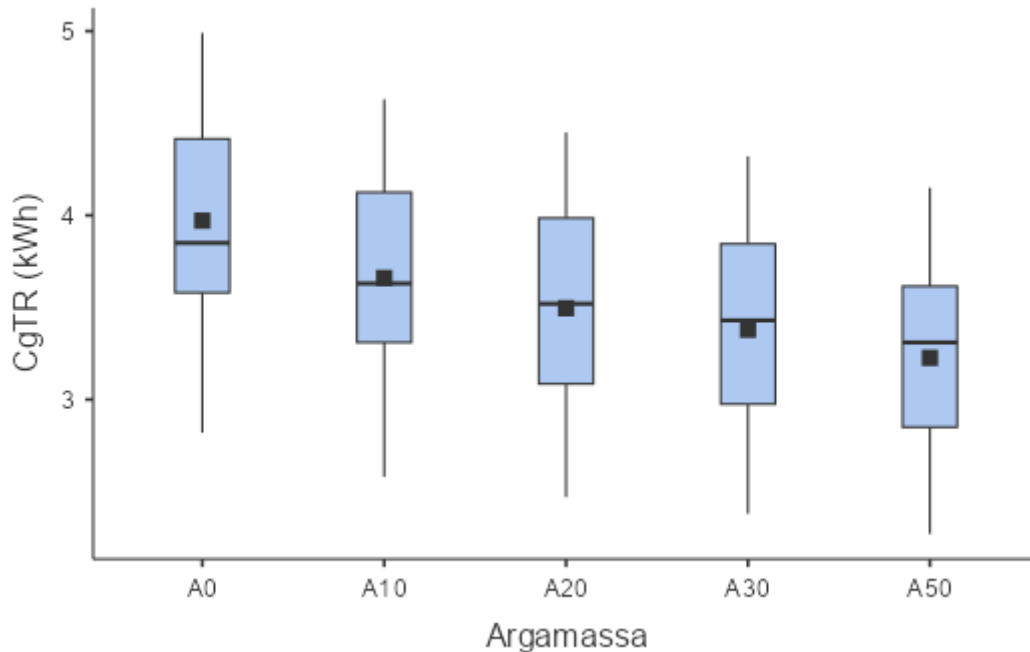
O fator determinante para a eficiência do bloco mais largo é, portanto, a resistência térmica oferecida pela camada de ar confinada nos furos. A análise dos dados do Quadro 6 baseados no método de Weber et al. (2017), demonstra que o aumento da largura do bloco amplia significativamente a espessura dessa camada isolante. Observa-se que a resistência térmica da camada de ar salta de 0,170 m².K/W no bloco de 9 cm para 0,297 m².K/W no bloco de 14 cm. Ou seja, o bloco mais largo apresenta melhor desempenho térmico predominantemente por encapsular um volume maior de ar estático, que atua como a barreira contra o fluxo de calor.

É relevante notar, contudo, a sobreposição das amplitudes verticais do box plot: os melhores resultados obtidos com o bloco de 9 cm (valores mínimos) equiparam-se aos valores medianos do bloco de 12 cm e 14 cm. Isso reforça a tese de que, embora a geometria robusta seja vantajosa, a otimização de outras variáveis - como a argamassa com CCA e a orientação solar - pode compensar parcialmente o uso de vedações mais esbeltas.

4.4 INFLUÊNCIA DO TEOR DE ADIÇÃO DE CCA NA ARGAMASSA

A fim de verificar o desempenho da argamassa com adição de CCA em substituição à areia, analisou-se o comportamento da CgTR em função do teor de substituição da areia (0% a 50%), mostrado pela Figura 20 que ilustra o desempenho dos diferentes teores de substituição de CCA para as variações dos outros parâmetros.

Figura 20 – Valores médios da CgTR dos casos simulados na fachada Oeste.



Fonte: Autor.

Nota-se uma relação inversamente proporcional: à medida que o teor de substituição de CCA em relação à areia aumenta (da A0 para a A50), a CgTR diminui, ou seja, a incorporação de CCA impacta positivamente no desempenho térmico do cômodo simulado. Como as interações realizadas na ANOVA da Tabela 1 possuíram magnitude desprezível ($\eta^2 \leq 0,01$), essa tendência da diminuição da CgTR em função do aumento do teor de CCA se mantém mesmo variando as outras variáveis de entrada.

A verificação pelo Teste de Tukey mostrou que não há diferença significativa entre as médias da A0 e a A10, ocorrendo diferenças significativas somente entre as médias de A0 e os teores A20, A30 e A50, ao passo que não houve variação significativa entre os teores A10, A20, A30 e A50, conforme Tabela 7, apresentada no apêndice C.

Essa ausência de diferenças significativa do ponto de vista estatístico permite afirmar que os teores de incorporação de CCA intermediários – A20 e A30 – surgem como soluções térmicas otimizadas: situam-se em um platô de eficiência térmica, entregando desempenho estatisticamente equivalente ao da A50 e superior ao da A0.

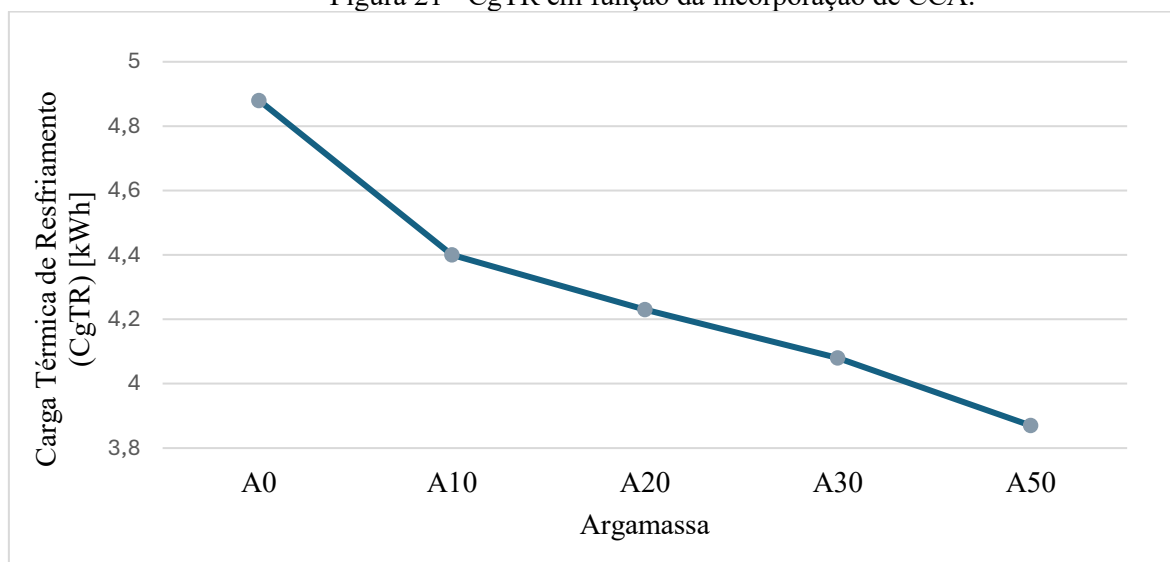
É importante destacar que, embora as comparações entre pares intermediários (como A10-A30 ou A20-A50) resultarem em diferenças não significativas, esse comportamento não invalida a eficácia da adição, demonstrando que o ganho de desempenho ocorre de maneira

gradual e linear, sem rupturas abruptas (Figura 21). Isso sugere uma estabilidade técnica da solução: pequenas variações no traço durante a execução da obra (dentro dessas faixas intermediárias) não resultariam em perdas drásticas de desempenho térmico.

A análise estatística multifatorial posicionou o tipo de argamassa como a terceira variável de maior relevância ($\eta^2 = 0,167$) para o desempenho térmico global da edificação, superando a influência da espessura do revestimento, que possui menor impacto na redução da CgTR. A amplitude dos dados observada na Figura 20, especialmente na argamassa de referência (A0), demonstra a preponderância das outras duas variáveis de entrada (orientação solar e largura do bloco) na redução da CgTR: mesmo com a relevância do teor de CCA nas argamassas de revestimento, a A0 consegue assumir valores de CgTR próximos aos das argamassas com adição através de composições mais eficientes, confirmando que a eficiência energética de uma parede é resultado de um conjunto de fatores e não de um componente isolado.

Para isolar a influência exclusiva da incorporação de CCA na argamassa, a Figura 21 recorta o seguinte cenário construtivo: a parede da fachada Oeste composta por bloco de 9 cm - usual nas construções locais - e revestimento de 2,0 cm – única espessura de revestimento utilizável tanto em paredes internas e externas, conforme limites estabelecidos pela NBR 13749 (ABNT, 2013).

Figura 21 - CgTR em função da incorporação de CCA.



Fonte: Autor.

Observa-se que a relação entre o teor de adição (A0, A10, A20, A30 e A50) e a redução CgTR é nítida: enquanto a A0 demanda 4,88kWh para manter a temperatura do modelo

computacional em 24°C, a composição com A50 reduz essa necessidade para 3,87kWh. Essa diferença de 1,01kWh representa uma redução percentual de 20,70% apenas com a incorporação de CCA.

A partir da análise conjunta da Figura 21 com o Quadro 9, destaca-se o comportamento da curva de desempenho. Nota-se que a inserção inicial de apenas 10% de CCA (A10) já promove uma redução de 9,84% na CgTR, correspondendo a quase metade do ganho total observado na mistura A50. A partir da A10, embora a redução da carga térmica continue ocorrendo, a intensidade do ganho marginal decresce com o aumento do teor de substituição, fenômeno corroborado visualmente pela suavização da curva na Figura 21.

Quadro 9 - Comparação da redução da CgTR através da incorporação de CCA.

| Argamassa | CgTR (kWh) | Redução (kWh) | Redução (%) |
|-----------|------------|---------------|-------------|
| A0 | 4,88 | - | - |
| A10 | 4,40 | -0,48 | -9,84% |
| A20 | 4,23 | -0,65 | -13,32% |
| A30 | 4,08 | -0,8 | -16,39% |
| A50 | 3,87 | -1,01 | -20,70% |

Fonte: Autor.

O comportamento observado está relacionado à redução da condutividade térmica das argamassas encontrado no trabalho de Selvarranjan *et al.* (2020), conforme apresentado na Figura 7 e Quadro 7. A presença de sílica amorfa e, principalmente, o aumento da porosidade da matriz decorrente da adição da CCA, material com baixa densidade, criam barreiras resistivas que dificultam o fluxo de calor. Assim, a argamassa com incorporação de CCA apresenta menor condutividade térmica e consequentemente, propriedades isolantes mais interessantes para o clima local, aumentando a resistência térmica do elemento de vedação como um todo e diminuindo a necessidade do gasto energético com climatização artificial.

Em contraste aos achados deste trabalho, Onyenokporo *et al.* (2024) reportaram reduções de menor magnitude na CgTR ao simularem blocos cerâmicos com adição de 15% de CCA em sua composição. A eficácia superior observada no presente estudo pode ser atribuída à natureza do componente modificado: enquanto a incorporação no bloco se restringe às finas paredes do elemento - cujo isolamento é governado majoritariamente pelas câmaras de ar —, a aplicação na argamassa modifica uma camada maciça e contínua de maior espessura. Isso potencializa a ação isolante da CCA, resultando em um impacto mais expressivo na redução da carga térmica.

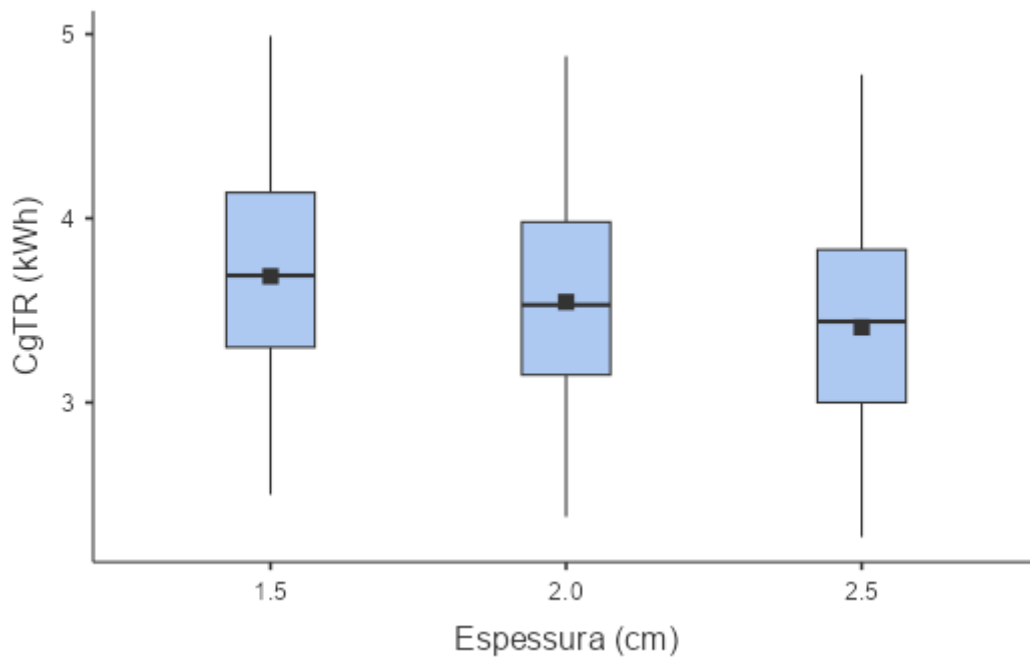
Ainda que a redução da carga térmica seja contínua até o teor de 50%, é prudente cruzar esses dados com a viabilidade mecânica apontada na literatura. Enquanto Selvarranjan *et al.* (2020) validam a resistência para teores abaixo de 50%, o estudo de De Silva, Vishvalingam e Etampawala (2021) concentrou seus resultados positivos em faixas próximas a 20%.

Dessa forma, embora a argamassa A50 apresente o melhor desempenho energético simulado neste trabalho, as composições intermediárias (A20 e A30) representam uma faixa de otimização técnica mais segura para aplicação em larga escala, conciliando os ganhos térmicos expressivos com a garantia de integridade do revestimento apontada pela literatura. A comparação entre esses dois teores intermediários, especialmente pela Figura 21, permite afirmar que a A30 apresenta comportamento superior à A20, consolidando-se como o teor ótimo de incorporação de CCA ao maximizar o conforto térmico dentro de margens seguras de viabilidade material.

4.5 INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DO REVESTIMENTO

Dentre as variáveis de entrada, a única que foi classificada de impacto variando entre baixo e médio foi a espessura do revestimento argamassado, que exerce um papel de refinamento, e contribui com 3,30% da redução da CgTR do quarto simulado, conforme é apresentado na Figura 22.

Figura 22 – Valores médios da CgTR em função da espessura do revestimento.



Fonte: Autor.

Observa-se uma discreta tendência de redução da CgTR conforme se eleva a espessura de 1,5 cm para 2,5 cm, comportamento esperado devido ao incremento da resistência térmica da camada de revestimento. Contudo, a análise visual corrobora a baixa magnitude do tamanho do efeito apontada anteriormente, com uma significativa sobreposição das áreas interquartis (as caixas azuis) entre as três espessuras; embora o aumento da camada de argamassa contribua para o isolamento, o seu efeito é marginal quando comparada às outras variáveis.

A variação da espessura não apresentou distinção estatística entre as médias avaliadas. O Teste de Tukey mostrou-se não significativo para todas as comparações ($p > 0,05$), evidenciando uma homogeneidade de desempenho entre as espessuras de 1,5 cm, 2,0 cm e 2,5 cm. Esses dados, detalhados na Tabela 8 do Apêndice C, reforçam a conclusão de que o aumento do revestimento oferece retornos térmicos marginais.

Para quantificar a disparidade de influência entre as variáveis de projeto, elaborou-se um cenário comparativo fixando as condições de contorno críticas: fachada Oeste e argamassa

de referência (A0). O Quadro 10 confronta o ganho energético obtido por duas estratégias distintas: a alteração da geometria da alvenaria *versus* o aumento da espessura do revestimento.

Quadro 10 - Comparação da redução da CgTR através de estratégias construtivas.

| Estratégias de otimização | Cenário base (kWh) | Cenário otimizado (kWh) | Redução (kWh) | Redução (%) |
|---|--------------------|-------------------------|---------------|-------------|
| Troca de bloco (9cm → 14cm) | 4,99 | 3,85 | -1,14 | -22,85% |
| Aumento do revestimento (1,5cm → 2,5cm) | 4,99 | 4,78 | -0,21 | -4,21% |

Fonte: Autor.

Enquanto a substituição do bloco de 9 cm pelo de 14 cm reduziu a carga em mais de 1,0 kWh, o aumento da espessura do reboco reduziu a CgTR em apenas 0,21 kWh. A troca do bloco proporciona uma redução da CgTR cerca de 5 vezes maior do que a obtida com o aumento da espessura do revestimento.

Esse resultado é corroborado por Silva (2021) para o clima de Barreiras. Em seu estudo, o autor concluiu que a variação da espessura da argamassa convencional exerce influência pouco significativa na redução da CgTR, ao passo que alterações na composição do núcleo da parede (como a inserção de isolantes) promovem ganhos de desempenho mais expressivos.

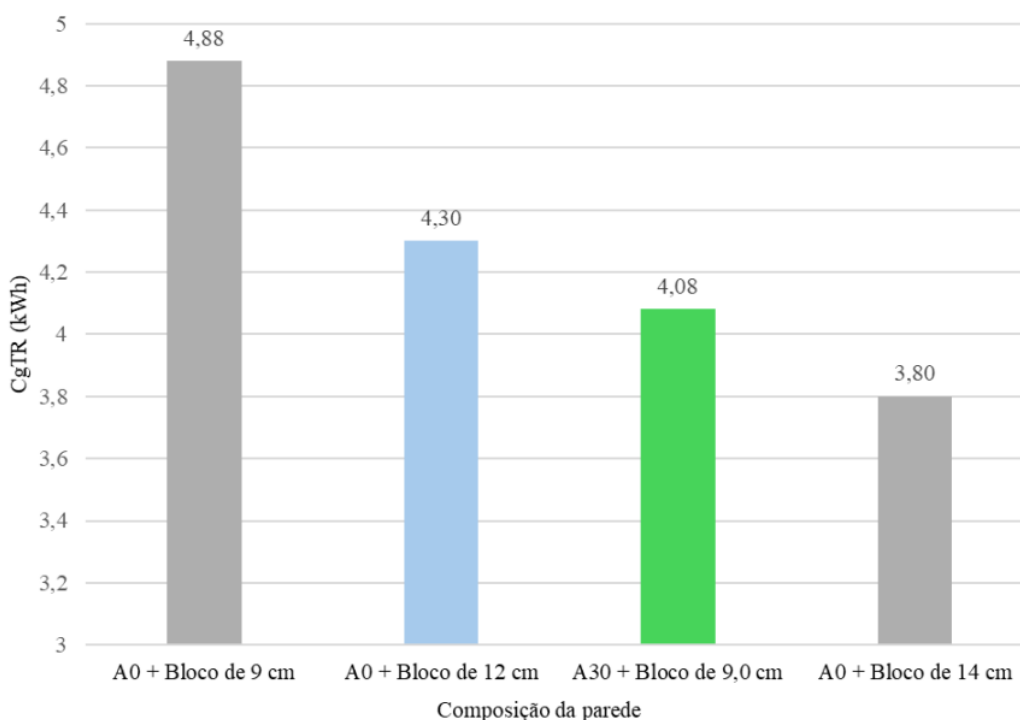
Por outra ótica, cabe ressaltar que, embora a NBR 15220-3 (ABNT, 2003) prescreva o uso de paredes pesadas para a Zona 5B, o termo pode induzir à interpretação equivocada. Essa ressalva é apontada por Akutsu, Brito e Chiepe (2012) ao destacarem a importância do equilíbrio entre resistência e capacidade térmica. Ou seja, o simples aumento da massa ou espessura da vedação não é garantia de desempenho térmico, conforme evidenciado pelos resultados da Figura 19.

Conclui-se, portanto, que a estratégia de aumentar a espessura é termodinamicamente ineficiente se comparada às outras mudanças possíveis devido à baixa magnitude dessa variável nos cenários simulados. Conforme visto na Tabela 1, mesmo com a alta relevância estatística do teor de CCA, a interação desta variável com a espessura do revestimento permaneceu com magnitude desprezível, comprovando que a eficácia da argamassa como isolante térmico está mais relacionada à sua composição, não sendo significativamente alterada ou potencializada pelo aumento da camada de revestimento.

4.6 COMPARAÇÃO DA INCORPORAÇÃO DA CCA COM A LARGURA DO BLOCO CERÂMICO

Para corroborar a viabilidade técnica da solução proposta, analisou-se a capacidade da argamassa com CCA em compensar a menor inércia térmica de blocos mais esbeltos. Para este cenário comparativo, fixou-se a orientação solar crítica (Oeste) e o traço A30 (faixa de desempenho otimizado). A espessura do revestimento foi padronizada em 2,0 cm, valor adotado por atender simultaneamente aos requisitos da ABNT NBR 13749 (2013) para espessuras de revestimentos de argamassa em áreas internas e externas.

Figura 23 - CgTR para composições comparadas.



Fonte: Autor.

Os dados simulados (Figura 23) revelam que a alvenaria de 9 cm revestida com a argamassa otimizada (A30) atinge uma CgTR de 4,08 kWh. Este desempenho mostrou-se superior ao da alvenaria de 12 cm com revestimento convencional (A0), que demanda 4,35 kWh. Na prática, isso indica que a melhoria na resistência térmica do revestimento compensou a deficiência geométrica do bloco mais fino, superando o desempenho de uma construção convencional mais robusta com o bloco intermediário.

Adicionalmente, a solução aproxima-se da eficiência da alvenaria de 14 cm (3,80 kWh). Enquanto a parede de 9 cm original (A0) apresentava um déficit de 1,08 kWh em relação ao bloco de 14 cm, a aplicação da argamassa A30 reduz essa lacuna para apenas 0,28 kWh. Essa constatação valida a incorporação de CCA como uma alternativa estratégica, permitindo que edificações com blocos econômicos atinjam níveis de conforto térmico competitivos.

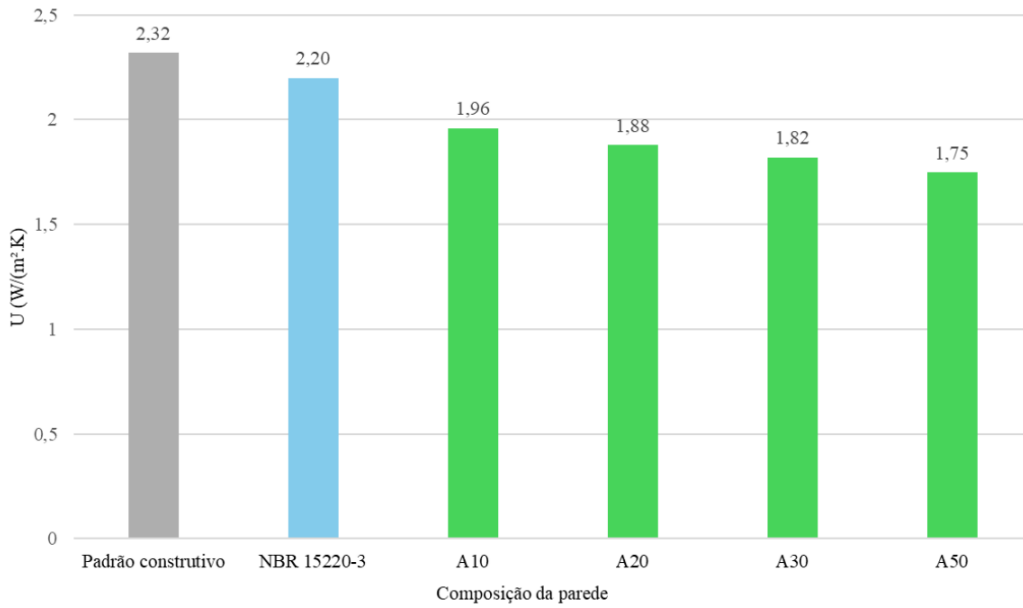
4.7 VERIFICAÇÕES DO PARÂMETRO DE TRANSMITÂNCIA TÉRMICA SEGUNDO O CONJUNTO NORMATIVO

A relevância da solução proposta foi ratificada ao confrontar os resultados com o diagnóstico do cenário construtivo local. Pesquisas anteriores realizadas em Barreiras-BA, como as de Araújo (2018) e Silva (2021), convergem ao apontar que a tipologia padrão da região (alvenaria de 9 cm com argamassa convencional e espessura de revestimento de 2,5cm) é insuficiente para garantir o conforto térmico.

Segundo Silva (2021), esse sistema convencional apresenta uma Transmitância Térmica (U) de 2,32 W/m². K, valor que, embora atenda aos requisitos mínimos de habitabilidade da NBR 15575-4 (2021), viola o limite de 2,20 W/m². K estabelecido pela NBR 15220-3 (2003) para o desempenho energético na Zona Bioclimática 5B.

O presente trabalho demonstrou que a substituição da CCA altera essa realidade. O cálculo da transmitância para o padrão construtivo da cidade de Barreiras (bloco de 9 cm com espessura de revestimento de 2,5 cm), conforme rotina estabelecida no conjunto normativo, resultou nos valores do Figura 24 para as argamassas com adição de CCA.

Figura 24 - Transmitância térmica para composições comparadas.



Fonte: Autor.

Esse resultado representa um ganho de desempenho térmico de aproximadamente 21% em relação ao padrão local para a argamassa A30, reposicionando a alvenaria de 9 cm dentro da zona de conformidade de acordo com a NBR 15220-3 (2003) para todas as porcentagens de adição da CCA ($U \leq 2,20$ W/ (m².K)). Conclui-se, portanto, que a argamassa com CCA atua como um elemento de compatibilização técnica, pois ela permite manter a cultura construtiva local (blocos esbeltos e econômicos) enquanto corrige suas deficiências termoenergéticas, entregando uma edificação normativa e eficiente do ponto de vista energético sem a necessidade de alterar a geometria das paredes.

CONCLUSÕES

O presente trabalho avaliou, via simulação computacional, o potencial da incorporação de Cinza da Casca de Arroz (CCA) em argamassas de revestimento para a otimização térmica de edificações em Barreiras – BA. Com base nos resultados de Carga Térmica de Resfriamento (CgTR) e nas análises estatísticas, conclui-se que:

- Hierarquia de Influência: a análise multifatorial confirmou a Orientação Solar ($\eta^2 = 52,5\%$) e a Geometria do Bloco ($\eta^2 = 25,6\%$) como os condicionantes dominantes do desempenho. Contudo, o teor de adição de CCA na argamassa de revestimento consolidou-se como a intervenção de revestimento mais relevante ($\eta^2 = 16,7\%$), exercendo um impacto cinco vezes superior ao da simples variação da espessura da argamassa ($\eta^2 = 3,3\%$);
- Ponto Ótimo de Projeto: embora a redução da carga térmica seja proporcional ao aumento do teor de CCA, a mistura A30 (30% de adição) foi identificada como a solução técnica ideal. Este teor maximiza a eficiência energética sem atingir as zonas de risco de comprometimento mecânico associadas à adição de 50%, equilibrando desempenho termoenergético e viabilidade construtiva;
- Adequação Normativa: a aplicação da argamassa A30 (2,5 cm) sobre blocos cerâmicos de 9 cm reduziu a transmitância térmica da parede para 1,82 W/ (m².K). Esse ganho de desempenho de 21% em relação à referência foi determinante para enquadrar o sistema construtivo típico da região nos requisitos exigidos para a Zona Bioclimática 5B;
- Efeito Compensatório: a argamassa com CCA demonstrou capacidade de compensar a inércia térmica de vedações mais esbeltas. O revestimento do bloco de 9 cm com a mistura A30 resultou em uma CgTR (4,08 kWh) inferior à do bloco de 12 cm com argamassa convencional (4,35 kWh).

Em suma, a incorporação da CCA valida-se não apenas como uma destinação sustentável para o resíduo agrícola, mas como uma estratégia eficaz para elevar o desempenho térmico de vedações econômicas a patamares compatíveis com alvenarias mais robustas.

RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos neste trabalho e visando o aprofundamento do tema, sugerem-se as seguintes pesquisas para a continuidade do estudo:

- Realizar uma análise de viabilidade econômica detalhada, considerando a cadeia produtiva local da CCA (coleta, transporte e beneficiamento) e a variação de preços dos insumos, a fim de determinar o ponto de equilíbrio financeiro da substituição;
- Executar a construção de células-teste físicas (protótipos) na região para monitoramento das variáveis térmicas (temperatura superficial e do ar), permitindo a calibração dos modelos computacionais com dados práticos e dotado das características dos materiais locais;
- Expandir a análise para o comportamento mecânico e a durabilidade da argamassa com CCA, investigando a absorção de umidade e riscos de patologias, dado o aumento da porosidade da matriz cimentícia observado na literatura;
- Realizar a Avaliação do Ciclo de Vida da argamassa proposta, quantificando a redução da pegada de carbono e da energia incorporada proporcionada pelo uso do resíduo agroindustrial em substituição a agregados naturais;
- Investigar a aplicação de outros subprodutos agrícola da região, como a palha da soja, no processo construtivo das edificações, verificando sua contribuição para o conforto térmico das edificações.

REFERÊNCIAS

AMARANTE, B. S. do. **Dimensionamento de janelas no desempenho térmico de paredes: simulação para edificações no município de Barreiras-BA**. Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Oeste da Bahia. Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias. Barreiras, 2024.

ANICER. **Manual de Execução de Alvenaria com Blocos Cerâmicos**. Rio de Janeiro: Associação Nacional da Indústria Cerâmica, 2015.

ARAÚJO, H. F. de. **Desempenho térmico de paredes: uma análise de parâmetros térmicos relacionados ao custo e benefícios térmicos voltados para o município de Barreiras-BA**. Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Oeste da Bahia. Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias. Barreiras, 2018.

AKUTSU, M.; BRITO, A. C. de; CHIEPE, K. C. **Análise do potencial de desempenho térmico de diferentes tipologias de blocos cerâmicos**. In: XIV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC), 2012, Juiz de Fora. Anais... Juiz de Fora: ANTAC, 2012.

ASDRUBALI, F., D’ALESSANDRO, F., SCHIAVONI, S. A review of unconventional sustainable building insulation materials. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 4, p. 1-17, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2015.05.002>.

ASHRAE. **Standard 55: Thermal environmental conditions for human occupancy**. [S. l.], 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13749: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Especificação**. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR ISO 14001: Sistemas de gestão ambiental - Requisitos com orientações para uso**. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 15220-1: Desempenho térmico de edificações - Parte 1 – Definições, símbolos e unidades**. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15220-2: Desempenho térmico de edificações - Parte 2 – Componentes e elementos construtivos das edificações – Resistência e transmitância térmica – Métodos de cálculo**. Rio de Janeiro, 2022.

_____. **NBR 15220-3: Edificações habitacionais - Desempenho térmico - Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações de interesse social**. Rio de Janeiro, 2024.

_____. **NBR 15220-3: Edificações habitacionais - Desempenho térmico - Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações de interesse social**. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR ISO 10456: Materiais e produtos de construção — Propriedades higrotérmicas — Valores e procedimentos de projeto tabulados para determinar valores térmicos declarados e de projeto.** Rio de Janeiro, 2022.

_____. **NBR 15575-1: Edificações habitacionais - Desempenho - Parte 1: Requisitos gerais.** Rio de Janeiro, 2024.

_____. **NBR 15575-4: Edificações habitacionais — Desempenho Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas — SVVIE.** Rio de Janeiro, 2021.

_____. **NBR 16401-2: Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários - Parte 2: Parâmetros de conforto térmico.** Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção.** 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. v. 1.

BEZERRA, Izabelle Marie Trindade. **Cinza da casca do arroz utilizada em argamassas de assentamento e revestimento.** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.

BIG LADDER SOFTWARE. **Euclid: An EnergyPlus Plugin for SketchUp.** Denver: Big Ladder Software, 2025. Disponível em: <https://bigladdersoftware.com/projects/euclid>. Acesso em: 20 de novembro de 2025.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da União:** Brasília, DF, 03 de agosto de 2010.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução.* 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CARASEK, Helena. Argamassas. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Org.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.** 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2010.

CENA, K.; CLARK, J. A. **Bioengineering, thermal physiology and comfort.** Elsevier, Amsterdam, p. 99-110, 1981.

CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA (CEPEA). **PIB do Agronegócio.** Piracicaba, 2025. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/upload/kceditor/files/ct-pib-do-agro-17jun25.pdf>. Acesso em: 25 de agosto de 2025.

CHVATAL, K. M. S. **Avaliação do procedimento simplificado da NBR 15575 para determinação do nível de desempenho térmico de habitações.** Ambiente Construído, Porto Alegre ,p. 119-134, out./dez. 2014. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1678-86212014000400009>. Acesso em: 01 de setembro de 2025.

CLIMATE.ONEBUILDING.ORG. **Repository of free climate data for building performance simulation**. 2025. Disponível em: <https://climate.onebuilding.org>. Acesso em: 25 de agosto de 2025

COHEN, J. **Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences**. 2nd. ed. Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates, 1988.

COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO (CMMAD). **Nosso futuro comum**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora da Fundação Getúlio Vargas, 1991.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. Influência da substituição parcial de cimento por cinza ultrafina da casca de arroz com elevado teor de carbono nas propriedades do concreto. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 99-107, 2009.

CRAWLEY, D. B.; LAWRIE, L. K.; WINKELMANN, F. C.; BUHL, W. F.; HUANG, Y. J.; PEDERSEN, C. O.; STRAND, R. K.; LIESEN, R. J.; FISHER, D. E.; WITTE, M. J.; GLAZER, J. EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. **Energy and Buildings**, v. 33, n. 4, p. 319-331, 2001.

CREDER, Hélio. **Instalações de Ar-Condicionado**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

DEPARTAMENTO DE ENERGIA DOS ESTADOS UNIDOS. **Getting Started: EnergyPlus™ Version 25.1.0 Documentation**. [S. l.]: Departamento de Energia dos Estados Unidos, 2025. Disponível em: https://energyplus.net/assets/nrel_custom/pdfs/pdfs_v25.1.0/GettingStarted.pdf. Acesso em: 10 de dezembro de 2025.

DE DEAR, Richard J.; BRAGER, Gail S. **Developing an adaptive model of thermal comfort and preference**. *ASHRAE Transactions*, v. 104, n. 1, p. 145-167, 1998.

DE SILVA, G. H. M. J. S.; VISHVALINGAM, S.; ETAMPAWALA, T. Effect of waste rice husk ash from rice husk fuelled brick kilns on strength, durability and thermal performances of mortar. **Construction and Building Materials**, v. 268, p. 121794, 2021.

ELLIS, P. **OpenStudio Comes Full Polygon**. Washington: U.S. Department of Energy, 2017. Disponível em: <https://www.energy.gov/eere/buildings/articles/openstudio-comes-full-polygon>. Acesso em: 20 de novembro de 2025.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Estatística de produção**. 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/arroz/pre-producao/socioeconomia/estatistica-de-producao>. Acesso em: 20 de agosto de 2025.

FANGER, P. O. **Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering**. Danish Technical Press, 244 p. Copenhagen, 1970.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto térmico**: arquitetura, urbanismo. 5. ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001.

GELLER, H. **O uso eficiente da eletricidade: uma estratégia de desenvolvimento para o Brasil**. Rio de Janeiro: INEE; ACEEE, 1994.

GONÇALVES, J. C. S.; MOURA, N. C. S.; KUNIOCHI, E. M. U. Avaliação de desempenho, simulação computacional e o projeto arquitetônico. *In*: GONÇALVES, J. C. S.; SOUZA, R. V. M. **Edifício Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. p. 297-312.

HABEEB, G. A.; MAHMUD, H. Utilization of rice husk ash as a supplementary cementing material in the production of high-performance concrete. *Construction and Building Materials*, v. 24, n. 7, p. 1043–1050, 2010.

HENSEN, J. L. M.; LAMBERTS, R. (Ed.). **Building performance simulation for design and operation**. 2. ed. London: Routledge, 2011.

ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G.; MEIRA, L.; DUART, M.; ZERBINO, R. Viabilidade do emprego de cinza de casca de arroz natural em concreto estrutural. Parte I: propriedades mecânicas e microestrutura. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 10, n. 1, p. 121-137, 2010.

JOHN, Vanderley Moacyr. **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/livredocencia/3/tde-27072022-082553/>. Acesso em: 20 de Agosto de 2025.

KOWALTOWSKI, D. C. C. K. et al. **Métodos e instrumentos de avaliação de projetos habitacionais: qualidade e sustentabilidade**. In: Coletânea Habitar - Vol. 7: Construção e Meio Ambiente. Porto Alegre: ANTAC, 2006.

LAMBERTS, R. *et al.* **Desempenho térmico de edificações**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. São Paulo: PW Editores, 1997.

MARCONCINI, J. M.; OLIVEIRA, R. M. Termogravimetria de cascas de arroz. São Carlos: **Embrapa Instrumentação Agropecuária**, 2007. (Comunicado Técnico, 89). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/29537/1/CT892007.pdf>. Acesso em: 10 de dezembro de 2025.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MILANI, A. P. S. **Avaliação física, mecânica e térmica do material solo-cimento-cinza de casca de arroz e seu desempenho como parede monolítica**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

MONTEIRO, L. M.; BITTENCOURT, L.; YANNAS, S. Arquitetura da adaptação. *In*: GONÇALVES, J. C. S.; SOUZA, R. V. M. **Edifício Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. p. 27 – 53.

ONYENOKPORO, N. C.; TAKI, A.; ZAPATA MONTALVO, L.; OYINLOLA, M. A. Exploring the Impact of Rice Husk Ash Masonry Blocks on Building Energy Performance. **Buildings**, v. 14, n. 5, p. 1290, 2024.

PASSOS, Paulo M. dos; JUNGBLUT, Mônica E.; CARASEK, Helena. **Influência do revestimento de argamassa no desempenho térmico dos sistemas de vedação vertical**. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO (ENTAC), 16., 2016, São Paulo. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2016.

PINTO, J.; PEREIRA, H.; VILELA, P.; JACINTO, C.; VIEIRA, J.; PAIVA, A.; PEREIRA, S.; FERREIRA, J.; CUNHA, V. M. C. F.; VARUM, H. Camada de regularização com agregado de granulado de caroço da espiga de milho. In: **4º Congresso Português de Argamassas e ETICS**, 4, 2012, Coimbra. Anais... Coimbra: APFAC, 2012.

POUEY, M. T. F. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Porto Alegre – RS, 2006.

ROSA, L. C.; SANTOR, C. G.; LOVATO, A.; ROSA, C. S.; GÜTHS, S. Use of rice husk and sunflower stalk as a substitute for glass wool in thermal insulation of solar collector. **Journal of Cleaner Production**, v. 104, p. 90-97, 2015.

ROSA, F. S.; SCHERER, M. J. Desempenho térmico de paredes de alvenaria protegidas com revestimento de compósitos de resíduos agrícolas. **Revista Gestal Industrial**, Ponta Grossa, v. 14, n. 2, p. 96-113, 2018. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/rgi>>. Acesso em: 25 de agosto de 2025.

SELVARRANJAN, K.; GAMAGE, J. C. P. H.; DE SILVA, G. I. P.; ATTANAYAKA, V. Thermal performance of rice husk ash mixed mortar in concrete and masonry buildings. **Budownictwo i Architektura**, v. 19, n. 4, p. 45-54, 2020. DOI: <https://doi.org/10.35784/bud-arch.2121>.

SILVA, B. H. P. da. **Simulação do comportamento térmico de paredes para as condições climáticas do município de Barreiras, Bahia**. Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Oeste da Bahia. Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias. Barreiras, 2021.

SILVA, L. M. da. **Análise do desempenho térmico em coberturas a partir de simulação computacional no município de Barreiras, Bahia**. Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Oeste da Bahia. Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias. Barreiras, 2022.

THE JAMOVI PROJECT. **Jamovi**. (Version 2.3) [Computer Software]. 2024. Disponível em: <https://www.jamovi.org>. Acesso em: 18 de novembro de 2025.

UNEP; IEA. **Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector**. Nairobi, Paris, 2023. Disponível em: <https://www.unep.org/resources/report/global-status-report-buildings-and-construction>. Acesso em: 27 de agosto de 2025.

WEBER, F. DA S. *et al.* **Desenvolvimento de um modelo equivalente de avaliação de propriedades térmicas para a elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos brasileiros para o uso no programa EnergyPlus.** Florianópolis: LabEEE, 2017.

ZHANG, M. H.; MALHOTRA, V. M. High-performance concrete incorporating rice husk ash as a supplementary cementing material. *ACI Materials Journal*, v. 93, n. 6, p. 629–636, 1996.

ZUCCO, L. L.; BERALDO, A. L. Efeito da adição de cinza da casca de arroz em misturas cimento-casca de arroz. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 24, n. 3, p. 571-580, 2008.

APÊNDICE A – PRINCIPAIS CLASSES UTILIZADAS NO ENERGYPLUS

Figura 25 - Classe Building.

The screenshot shows the EnergyPlus software interface with the 'Building' class selected. The Class List on the left contains the following items:

- [0001] Version
- [0001] SimulationControl
- [0001] Building
- [0001] HeatBalanceAlgorithm
- [0001] Timestep
- [0001] Site:Location
- [0005] SizingPeriod:DesignDay
- [0001] RunPeriod
- [0010] RunPeriodControl:SpecialDays
- [0001] RunPeriodControl:DaylightSavingTime
- [0007] ScheduleTypeLimits
- [0002] Schedule:Compact
- [0012] Material
- [0004] Material:AirGap
- [0001] WindowMaterial:Glazing
- [0001] WindowMaterial:Gas
- [0015] Construction
- [0001] GlobalGeometryRules

The Comments from IDF pane on the right displays the following text:

Explanation of Object and Current Field

Object Description: Describes parameters that are used during the simulation of the building. There are necessary correlations between the entries for this object and some entries in the Site:WeatherStation and Site:HeightVariation objects, specifically the Terrain field.

Field Description:
ID: A1

The Fields table at the bottom is as follows:

| Field | Units | Obj1 |
|---|--------|-------------------------|
| Name | | Untitled |
| North Axis | deg | 0 |
| Terrain | | City |
| Loads Convergence Tolerance Value | w | 0,04 |
| Temperature Convergence Tolerance Value | deltaC | 0,4 |
| Solar Distribution | | FullInteriorAndExterior |
| Maximum Number of Warmup Days | | 25 |
| Minimum Number of Warmup Days | | |

Fonte: Autor.

Figura 26 - Classe Site:Location.

The screenshot shows the EnergyPlus software interface with the 'Site:Location' class selected. The Class List on the left contains the following items:

- [0001] Version
- [0001] SimulationControl
- [0001] Building
- [0001] HeatBalanceAlgorithm
- [0001] Timestep
- [0001] Site:Location
- [0005] SizingPeriod:DesignDay
- [0001] RunPeriod
- [0010] RunPeriodControl:SpecialDays
- [0001] RunPeriodControl:DaylightSavingTime
- [0007] ScheduleTypeLimits
- [0002] Schedule:Compact
- [0012] Material
- [0004] Material:AirGap
- [0001] WindowMaterial:Glazing
- [0001] WindowMaterial:Gas
- [0015] Construction
- [0001] GlobalGeometryRules

The Comments from IDF pane on the right displays the following text:

Explanation of Object and Current Field

Object Description: Specifies the building's location. Only one location is allowed. Weather data file location, if it exists, will override this object.

Field Description:
ID: A1
Enter a alphanumeric value
This field is required.

The Fields table at the bottom is as follows:

| Field | Units | Obj1 |
|-----------|-------|-----------------------------------|
| Name | | Barreiros_BA_BRA Design_Condtions |
| Latitude | deg | -12,15 |
| Longitude | deg | -44,99 |
| Time Zone | hr | -3 |
| Elevation | m | 470 |

Fonte: Autor.

Figura 27 - Classe RunPeriod.

Class List

- [0001] Version
- [0001] SimulationControl
- [0001] Building
- [0001] HeatBalanceAlgorithm
- [0001] Timestep
- [0001] Site:Location
- [0005] SizingPeriod:DesignDay
- [0001] RunPeriod**
- [0010] RunPeriodControl:SpecialDays
- [0001] RunPeriodControl:DaylightSavingTime
- [0007] ScheduleTypeLimits
- [0002] Schedule:Compact
- [0012] Material
- [0004] Material:AirGap
- [0001] WindowMaterial:Glazing
- [0001] WindowMaterial:Gas
- [0015] Construction
- [0001] GlobalGeometryRules

Comments from IDF

Explanation of Object and Current Field

Object Description: Specify a range of dates and other parameters for a simulation. Multiple run periods may be input, but they may not overlap.

Field Description: descriptive name (used in reporting mainly) Cannot be not blank and must be unique
ID: A1
Enter a alphanumeric value
This field is required.

| Field | Units | Obj1 |
|--|-------|------------|
| Name | | construcao |
| Begin Month | | 9 |
| Begin Day of Month | | 25 |
| Begin Year | | |
| End Month | | 9 |
| End Day of Month | | 25 |
| End Year | | |
| Day of Week for Start Day | | |
| Use Weather File Holidays and Special Days | | Yes |
| Use Weather File Daylight Saving Period | | Yes |
| Apply Weekend Holiday Rule | | No |

Fonte: Autor.

Figura 28 - Classe Material

Class List

- [0001] Version
- [0001] SimulationControl
- [0001] Building
- [0001] HeatBalanceAlgorithm
- [0001] Timestep
- [0001] Site:Location
- [0005] SizingPeriod:DesignDay
- [0001] RunPeriod
- [0010] RunPeriodControl:SpecialDays
- [0001] RunPeriodControl:DaylightSavingTime
- [0007] ScheduleTypeLimits
- [0002] Schedule:Compact
- [0012] Material**
- [0004] Material:AirGap
- [0001] WindowMaterial:Glazing
- [0001] WindowMaterial:Gas
- [0015] Construction
- [0001] GlobalGeometryRules

Comments from IDF

Explanation of Object and Current Field

Object Description: Regular materials described with full set of thermal properties

Field Description:
ID: N1
No default value available
Range: 0 < X but no maximum
This field is required.

| Field | Units | Obj1 | Obj2 | Obj3 | Obj4 | Obj5 | Obj6 | 0 |
|---------------------|--------|-----------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---|
| Name | | Tijolo_pe | Tijolo_deitado | A0 | A10 | A20 | A30 | A |
| Roughness | | Rough | Rough | MediumSmooth | MediumSmooth | MediumSmooth | MediumSmooth | N |
| Thickness | m | 0.013 | 0.082 | 0.025 | 0.025 | 0.015 | 0.025 | 0 |
| Conductivity | W/m-K | 0.9 | 0.9 | 0.83 | 0.43 | 0.34 | 0.29 | 0 |
| Density | kg/m3 | 1600 | 1600 | 2385 | 2070 | 1920 | 1780 | 1 |
| Specific Heat | J/kg-K | 920 | 920 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1 |
| Thermal Absorptance | | | | | | | | |
| Solar Absorptance | | | | | | | | |
| Visible Absorptance | | | | | | | | |

Fonte: Autor.

Figura 29 - Classe Material:AirGap.

Class List

- [0001] Version
- [0001] SimulationControl
- [0001] Building
- [0001] HeatBalanceAlgorithm
- [0001] Timestep
- [0001] Site:Location
- [0005] SizingPeriod:DesignDay
- [0001] RunPeriod
- [0010] RunPeriodControl:SpecialDays
- [0001] RunPeriodControl:DaylightSavingTime
- [0007] ScheduleTypeLimits
- [0002] Schedule:Compact
- [0012] Material
- [0004] Material:AirGap
- [0001] WindowMaterial:Glazing
- [0001] WindowMaterial:Gas
- [0015] Construction
- [0001] GlobalGeometryRules

Comments from IDF

Explanation of Object and Current Field

Object Description: Air Space in Opaque Construction

Field Description:
 ID: N1
 No default value available
 Range: 0 < X but no maximum
 This field is required.

| Field | Units | Obj1 | Obj2 | Obj3 | Obj4 |
|--------------------|--------|--------|-----------------------|---------|---------|
| Name | | Ar_9cm | FD5 Ceiling air space | Ar_12cm | Ar_14cm |
| Thermal Resistance | m2-K/W | 0,17 | 0,18 | 0,227 | 0,297 |

Fonte: Autor.

Figura 30 - Classe Construction.

Class List

- [0001] HeatBalanceAlgorithm
- [0001] Timestep
- [0001] Site:Location
- [0005] SizingPeriod:DesignDay
- [0001] RunPeriod
- [0010] RunPeriodControl:SpecialDays
- [0001] RunPeriodControl:DaylightSavingTime
- [0007] ScheduleTypeLimits
- [0002] Schedule:Compact
- [0012] Material
- [0004] Material:AirGap
- [0001] WindowMaterial:Glazing
- [0001] WindowMaterial:Gas
- [0015] Construction
- [0001] GlobalGeometryRules
- [0001] Zone
- [0006] BuildingSurface:Detailed
- [0001] HVAC:emplate:Thermostat

Comments from IDF

Explanation of Object and Current Field

Object Description: Start with outside layer and work your way to the inside layer
 Up to 10 layers total, 8 for windows
 Enter the material name for each layer

Field Description:
 ID: A5
 Select from list of objects

| Field | Units | Obj1 | Obj2 | Obj3 | Obj4 | Obj5 | Obj6 |
|---------------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|-------------|
| Name | | Wall_0_S | Wall_10_S | Wall_20_S | Wall_30_S | Wall_50_S | Wall_0_M12 |
| Outside Layer | | A0 | A10 | A20 | A30 | A50 | A0 |
| Layer 2 | | Tijolo_pe | Tijolo_pe | Tijolo_pe | Tijolo_pe | Tijolo_pe | Tijolo_m_12 |
| Layer 3 | | Ar_9cm | Ar_9cm | Ar_9cm | Ar_9cm | Ar_9cm | Ar_12cm |
| Layer 4 | | Tijolo_pe | Tijolo_pe | Tijolo_pe | Tijolo_pe | Tijolo_m_12 | Tijolo_m_12 |
| Layer 5 | | A0 | A10 | A20 | A30 | A50 | A0 |
| Layer 6 | | | | | | | |
| Layer 7 | | | | | | | |
| Layer 8 | | | | | | | |
| Layer 9 | | | | | | | |

Fonte: Autor.

Figura 31 - Classe BuildingSurface:Detailed.

| Field | Units | Obj1 | Obj2 | Obj3 | Obj4 | Obj5 | Obj6 |
|-----------------------------------|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Surface Type | | Floor | Wall | Wall | Roof | Wall | Wall |
| Construction Name | | Wall_0_S | Wall_0_S | Wall_0_M12 | Wall_0_S | Wall_0_S | Wall_20_G14 |
| Zone Name | | AE0728 | AE0728 | AE0728 | AE0728 | AE0728 | AE0728 |
| Outside Boundary Condition | | Adiabatic | Adiabatic | Adiabatic | Adiabatic | Adiabatic | Outdoors |
| Outside Boundary Condition Object | | | | | | | |
| Sun Exposure | | NoSun | NoSun | NoSun | NoSun | NoSun | SunExposed |
| Wind Exposure | | NoWind | NoWind | NoWind | NoWind | NoWind | WindExposed |
| View Factor to Ground | | | | | | | |
| Number of Vertices | | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Vertex 1 X-coordinate | m | 4.371543978896 | 1.371543978896 | 4.371543978896 | 1.371543978896 | 4.371543978896 | 1.371543978896 |

Fonte: Autor.

Figura 32 - Classe HVACTemplate:Thermostat.

| Field | Units | Obj1 |
|--------------------------------|-------|----------|
| Name | | Ar_24_26 |
| Heating Setpoint Schedule Name | | |
| Constant Heating Setpoint | C | 24 |
| Cooling Setpoint Schedule Name | | |
| Constant Cooling Setpoint | C | 26 |

Fonte: Autor.

Figura 33 - Classe Output:Variable.

Class List

- [0010] RunPeriodControl:SpecialDays
- [0001] RunPeriodControl:DaylightSavingTime
- [0007] ScheduleTypeLimits
- [0002] Schedule:Compact
- [0012] Material
- [0004] Material:AirGap
- [0001] WindowMaterial:Glazing
- [0001] WindowMaterial:Gas
- [0015] Construction
- [0001] GlobalGeometryRules
- [0001] Zone
- [0006] BuildingSurface:Detailed
- [0001] HVACTemplate:Thermostat
- [0001] HVACTemplate:Zone:IdealLoadsAirSystem
- [0001] Output:VariableDictionary
- [0001] Output:Table:SummaryReports
- [0001] OutputControl:Table:Style
- [0002] Output:Variable

Comments from IDF

Explanation of Object and Current Field

Object Description: each Output:Variable command picks variables to be put onto the standard output file (.eso) some variables may not be reported for every simulation. a list of variables that can be reported are available after a run on the report dictionary file (.rdd) if the Output:VariableDictionary has been requested.

Field Description:
ID: A2

| Field | Units | Obj1 | Obj2 |
|---------------------|-------|--------------------------------|--|
| Key Value | | * | * |
| Variable Name | | Zone Ideal Loads Zone Total Cc | Zone Ideal Loads Zone Total Heating Energy |
| Reporting Frequency | | Timestep | Timestep |
| Schedule Name | | | |

Fonte: Autor.

APÊNDICE B – RESULTADO DE TODAS AS SIMULAÇÕES REALIZADAS

Quadro 11 - Resultado de todas as simulações realizadas no EnergyPlus.

| Fachada | Largura bloco | Argamassa | Espessura de revestimento | | |
|---------|---------------|-----------|---------------------------|------------|------------|
| | | | 2,5cm | 2,0cm | 1,5cm |
| | | | CgTR (kWh) | CgTR (kWh) | CgTR (kWh) |
| Norte | 9cm | A0 | 3,54 | 3,62 | 3,69 |
| Norte | 9cm | A10 | 3,18 | 3,59 | 3,44 |
| Norte | 9cm | A20 | 3,01 | 3,16 | 3,31 |
| Norte | 9cm | A30 | 2,88 | 3,04 | 3,21 |
| Norte | 9cm | A50 | 2,71 | 2,89 | 3,09 |
| Norte | 12cm | A0 | 3,19 | 3,25 | 3,3 |
| Norte | 12cm | A10 | 2,89 | 2,99 | 3,09 |
| Norte | 12cm | A20 | 2,75 | 2,86 | 2,99 |
| Norte | 12cm | A30 | 2,64 | 2,77 | 2,91 |
| Norte | 12cm | A50 | 2,50 | 2,64 | 2,81 |
| Norte | 14cm | A0 | 2,82 | 2,86 | 2,9 |
| Norte | 14cm | A10 | 2,58 | 2,66 | 2,73 |
| Norte | 14cm | A20 | 2,47 | 2,56 | 2,65 |
| Norte | 14cm | A30 | 2,38 | 2,48 | 2,59 |
| Norte | 14cm | A50 | 2,27 | 2,38 | 2,5 |
| Oeste | 9cm | A0 | 4,78 | 4,88 | 4,99 |
| Oeste | 9cm | A10 | 4,27 | 4,4 | 4,63 |
| Oeste | 9cm | A20 | 4,04 | 4,23 | 4,45 |
| Oeste | 9cm | A30 | 3,86 | 4,08 | 4,32 |
| Oeste | 9cm | A50 | 3,63 | 3,87 | 4,15 |
| Oeste | 12cm | A0 | 4,27 | 4,35 | 4,43 |
| Oeste | 12cm | A10 | 3,87 | 4 | 4,14 |
| Oeste | 12cm | A20 | 3,67 | 3,83 | 4 |
| Oeste | 12cm | A30 | 3,53 | 3,7 | 3,89 |
| Oeste | 12cm | A50 | 3,34 | 3,53 | 3,75 |
| Oeste | 14cm | A0 | 3,75 | 3,8 | 3,85 |
| Oeste | 14cm | A10 | 3,44 | 3,53 | 3,64 |
| Oeste | 14cm | A20 | 3,28 | 3,4 | 3,53 |
| Oeste | 14cm | A30 | 3,17 | 3,3 | 3,45 |
| Oeste | 14cm | A50 | 3,01 | 3,17 | 3,34 |
| Leste | 9cm | A0 | 4,75 | 4,84 | 4,93 |
| Leste | 9cm | A10 | 4,24 | 4,4 | 4,57 |
| Leste | 9cm | A20 | 4,00 | 4,19 | 4,4 |
| Leste | 9cm | A30 | 3,83 | 4,03 | 4,27 |
| Leste | 9cm | A50 | 3,60 | 3,83 | 4,1 |
| Leste | 12cm | A0 | 4,27 | 4,33 | 4,4 |
| Leste | 12cm | A10 | 3,85 | 3,98 | 4,11 |
| Leste | 12cm | A20 | 3,65 | 3,8 | 3,97 |

| | | | | | |
|-------|------|-----|------|------|------|
| Leste | 12cm | A30 | 3,5 | 3,67 | 3,86 |
| Leste | 12cm | A50 | 3,31 | 3,5 | 3,72 |
| Leste | 14cm | A0 | 3,77 | 3,81 | 3,85 |
| Leste | 14cm | A10 | 3,44 | 3,53 | 3,63 |
| Leste | 14cm | A20 | 3,28 | 3,39 | 3,52 |
| Leste | 14cm | A30 | 3,16 | 3,29 | 3,43 |
| Leste | 14cm | A50 | 3,00 | 3,15 | 3,32 |

Fonte: Autor.

APÊNDICE C – CÁLCULO DAS ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Nesta seção foram analisadas se os parâmetros de entrada influenciam de forma significativa as CgTR demandadas pelo modulo computacional em estudo. Os dados obtidos foram submetidos à Análise de Variância (ANOVA) com nível de confiança de 95% ($\alpha = 0,05$). Para os resultados significativos, realizou-se o Teste de Tukey para comprovar a diferença entre as médias dos grupos.

Tabela 2 - Resumo dos grupos de orientação solar.

| <i>Grupo</i> | <i>Contagem</i> | <i>Soma</i> | <i>Média</i> | <i>Variância</i> |
|--------------|-----------------|-------------|--------------|------------------|
| Norte | 45 | 130,77 | 2,91 | 0,13 |
| Oeste | 45 | 174,54 | 3,88 | 0,23 |
| Leste | 45 | 173,47 | 3,85 | 0,22 |

Fonte: Autor.

Tabela 3 - Teste de Tukey para orientação solar.

| | | Norte | Oeste | Leste |
|--------------|------------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Norte | Diferença entre médias (dM) | — | -0.973 | -0.9489 |
| | P | — | <.001 | <.001 |
| Oeste | Diferença entre médias (dM) | | — | 0.0238 |
| | P | | — | 0.964 |
| Leste | Diferença entre médias (dM) | | | — |
| | P | | | — |

Fonte: Autor.

Tabela 4 - Resumo dos grupos de larguras dos blocos cerâmicos.

| <i>Grupo</i> | <i>Contagem</i> | <i>Soma</i> | <i>Média</i> | <i>Variância</i> |
|--------------|-----------------|-------------|--------------|------------------|
| 9cm | 45 | 176,92 | 3,93 | 0,38 |
| 12cm | 45 | 159,80 | 3,55 | 0,30 |
| 14cm | 45 | 142,06 | 3,16 | 0,22 |

Fonte: Autor.

Tabela 5 - Teste de Tukey para as larguras dos blocos cerâmicos.

| | | 9 cm | 12 cm | 14 cm |
|-------|----|------|-------|-------|
| 9 cm | dM | — | 0.380 | 0.775 |
| | P | — | 0.003 | <.001 |
| 12 cm | dM | | — | 0.394 |
| | P | | — | 0.002 |
| 14 cm | dM | | | — |
| | P | | | — |

Fonte: Autor.

Tabela 6 - Resumo dos grupos das argamassas.

| <i>Grupo</i> | <i>Contagem</i> | <i>Soma</i> | <i>Média</i> | <i>Variância</i> |
|--------------|-----------------|-------------|--------------|------------------|
| A0 | 27 | 107,22 | 3,97 | 0,44 |
| A10 | 27 | 98,82 | 3,66 | 0,35 |
| A20 | 27 | 94,39 | 3,50 | 0,32 |
| A30 | 27 | 91,24 | 3,38 | 0,30 |
| A50 | 27 | 87,11 | 3,23 | 0,27 |

Fonte: Autor.

Tabela 7 - Teste de Tukey para as argamassas.

| | | A0 | A10 | A20 | A30 | A50 |
|-----|----|----|-------|-------|-------|-------|
| A0 | dM | — | 0.311 | 0.475 | 0.592 | 0.745 |
| | P | — | 0.289 | 0.026 | 0.003 | <.001 |
| A10 | dM | | — | 0.164 | 0.281 | 0.434 |
| | P | | — | 0.838 | 0.393 | 0.054 |
| A20 | dM | | | — | 0.117 | 0.270 |
| | P | | | — | 0.947 | 0.435 |
| A30 | dM | | | | — | 0.153 |
| | P | | | | — | 0.870 |
| A50 | dM | | | | | — |
| | P | | | | | — |

Fonte: Autor.

Tabela 8 - Teste de Tukey para as espessuras de revestimento.

| | | 1,5 cm | 2,0 cm | 2,5 cm |
|---------------|-----------|---------------|---------------|---------------|
| 1,5 cm | dM | — | 0.140 | 0.277 |
| | P | — | 0.537 | 0.091 |
| 2,0 cm | dM | | — | 0.138 |
| | P | | — | 0.547 |
| 2,5 cm | dM | | | — |
| | P | | | — |

Fonte: Autor.