

MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO ALTERNATIVOS: ANÁLISE DO CONFORTO TÉRMICO POR MODELAGEM COMPUTACIONAL EM CLIMA TROPICAL

Larissa dos Santos Borges¹, David Lohan Pereira de Sousa², Jean Carlos de Almeida Nobre³, Luiz Claudio Fialho Andrade⁴

¹Universidade Federal do Pará, Ananindeua, Brasil (larissa.borges@ananindeua.ufpa.br)

²Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil

Resumo: Um edifício projetado e modelado usando materiais construtivos alternativos para a cidade de Belém-PA foi analisado através de simulações termoeenergéticas. Conforme os parâmetros da ISO 9241/2011, os materiais alternativos exibiram uma curva de duração anual indicando conforto térmico em 48,6% do período, enquanto a curva para os materiais tradicionais obteve conforto em apenas 25,4% do período. Essa variação indica a viabilidade da aplicação de materiais alternativos em termos termoeenergéticos.

Palavras-chave: Conforto térmico, materiais alternativos; modelagem computacional; EnergyPlus.

INTRODUÇÃO

A demanda por materiais de construção alternativos é impulsionada pela necessidade de reduzir o impacto ambiental da construção civil e buscar soluções mais eficientes do ponto de vista energético. A busca por ambientes mais confortáveis em termos térmicos também tem sido um importante fator na escolha desses materiais. De acordo com Dorigo et al. (2010), a construção civil no Brasil tem responsabilidade considerável em problemas associados à exaustão de recursos naturais, o que indica a necessidade iminente de mudanças na prática da construção, seja por meio da adoção de novas tecnologias ou de intervenções que possam fornecer maior eficiência energética para os empreendimentos, mediante a utilização de sistemas mais racionais e sustentáveis capazes de atender ou auxiliar na demanda por energia.

Os materiais de construção alternativos apresentam algumas vantagens em relação aos materiais convencionais, dentre as quais se destacam a utilização de recursos renováveis em sua produção, a menor quantidade de energia requerida para a fabricação, a possibilidade de reciclagem ou reutilização e, muitas vezes, um menor custo (Lotti, 2015). Um exemplo de material alternativo que tem um elevado potencial na construção civil é a telha de fibra de celulose e betume (FCB). Esse material é produzido a partir de fibra de celulose reciclada e betume, um derivado do petróleo, e apresenta diversas vantagens em relação às telhas convencionais. A FCB é mais leve e fácil de manusear, o que facilita sua instalação. Essa telha, possui um excelente

desempenho térmico, o coeficiente de condutividade térmica da telha FCB é cerca de 75% menor do que o da telha de fibrocimento (Tabela 3), o que significa que ela oferece uma resistência maior à transferência de calor.

Além da telha FCB, outras soluções alternativas têm sido exploradas na construção civil. Dentre elas, podemos citar o tijolo COB, um tipo de tijolo de barro cru que não passa pelo processo de cozimento e, portanto, tem menor impacto ambiental; o piso de gesso acartonado, que consiste em placas de gesso revestidas com papel cartão; a porta de painéis OSB, produzida a partir de madeira de reflorestamento; a argamassa celular, um material leve e poroso que contribui para o isolamento térmico e acústico da edificação; o reboco de argamassa de gesso, que tem menor impacto ambiental do que o reboco convencional e a laje de concreto leve, que utiliza agregados leves em sua composição.

A avaliação do desempenho térmico de edificações construídas com materiais alternativos em clima tropical é um desafio que tem sido enfrentado por pesquisadores em todo o mundo. Segundo Borges et al. (2023), o conhecimento das condições climáticas externas é indissociável das análises de desempenho térmico em edifícios. Nesse sentido, a modelagem computacional é uma ferramenta indispensável, pois permite avaliar o comportamento térmico dos materiais e da edificação como um todo, considerando diversos fatores como o clima, a radiação solar, as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido e a umidade relativa do ar. Nesse sentido, pesquisas destinadas a

encontrar soluções para essas questões ambientais são práticas essenciais que buscam transformar o paradigma da construção civil (Ministério do Meio Ambiente, 2019). Essa abordagem, permite identificar as melhores soluções em termos de conforto térmico e contribuir para o desenvolvimento de edificações mais sustentáveis e confortáveis.

REVISÃO DE LITERATURA

Normas regulamentadoras

As normas ISO (*International Organization for Standardization*) e NBR (Normas Brasileiras) sobre conforto térmico, são um conjunto de padrões que estabelecem critérios para avaliar as condições de conforto térmico em ambientes internos e externos, considerando fatores como temperatura, umidade, velocidade do ar, vestimentas e atividades humanas. Essas normas são desenvolvidas por comitês técnicos compostos por especialistas em conforto térmico, ergonomia e qualidade ambiental interna, e seu objetivo é garantir que as pessoas trabalhem e vivam em ambientes saudáveis, confortáveis e seguros.

ISO 9241 (2011): estabelece diretrizes para a temperatura e umidade ideais em ambientes internos, indicando que a temperatura deve estar entre 20 °C e 24 °C no verão e entre 23 °C e 26 °C no inverno, enquanto a umidade relativa do ar deve ser mantida entre 40% e 80%.

NR 17 (1978): trata da ergonomia dos trabalhadores e estabelece parâmetros para garantir o conforto térmico em ambientes de trabalho. A NR 17 determina que o índice de temperatura efetiva (ITE) deve ficar entre 20°C e 23°C, a velocidade do ar não deve ultrapassar 0,75 m/s e a umidade relativa do ar não deve ser inferior a 40%. Esses parâmetros visam garantir o bem-estar dos trabalhadores, melhorar a segurança das atividades e prevenir possíveis doenças relacionadas ao trabalho, como a fadiga térmica.

NBR 15220-3 (2005): determina critérios para avaliação da qualidade térmica de ambientes externos. A norma estabelece faixas de temperatura, velocidade do ar e umidade relativa do ar para proporcionar o conforto térmico em ambientes externos, levando em consideração fatores como carga térmica, radiação solar e vento. Além disso, a norma oferece recomendações para o projeto de áreas externas com o objetivo de proporcionar conforto térmico aos seus usuários.

Conforto térmico

A definição de conforto térmico é complexa devido à influência dos fatores físicos, naturais e dos sistemas termorreguladores individuais. O conforto térmico é influenciado por dois fatores distintos: o pessoal, que envolve o metabolismo e a vestimenta, e o ambiental, que está relacionado à temperatura, umidade,

velocidade do ar e temperatura média radiante (Nóbrega e Lemos, 2011). O conforto térmico é uma condição psicológica, em que um indivíduo se sente confortável com a temperatura do ambiente no qual se encontra, sem sentir frio ou calor excessivo. O intercâmbio de calor entre o corpo humano e o ambiente ocorre por meio da condução, convecção, radiação e transferência de massa, conforme descrito por Fanger (1970). Diversos fatores podem influenciar no estabelecimento do conforto térmico, como a umidade do ar, velocidade do ar, movimentação pessoal, radiação térmica, condição de vestimenta e temperatura, conforme estudos de Halawa et al. (2014).

O conforto térmico está associado à condição psicológica que expressa satisfação com o ambiente térmico. Já do ponto de vista ambiental, um ambiente é considerado confortável quando permite a manutenção da temperatura corporal sem a necessidade de ativar mecanismos termorreguladores. A compreensão dos fatores envolvidos no conforto térmico é fundamental para a criação de ambientes térmicos saudáveis e produtivos. Os estudos conduzidos por Borges et al. (2022) e Gomes et al. (2022), evidenciam que a utilização de materiais alternativos tem se mostrado uma estratégia eficiente para alcançar o desempenho térmico desejado, uma vez que a substituição de materiais convencionais por alternativos, apresentou melhorias significativas em relação aos parâmetros estabelecidos pela norma ISO 9241/2011. Estas pesquisas demonstram que os materiais alternativos possuem elevado potencial no desenvolvimento de soluções eficazes para o conforto térmico em ambientes construídos.

Método do Balanço de Calor

O *Heat Balance Method* (HBM) ou Método do Balanço de Calor é um mecanismo de simulação de transferência de calor em construções. Esse método é baseado em uma representação dinâmica que considera a interação entre as condições climáticas externas e as atividades internas do edifício. Essa capacidade permite que o HBM seja utilizado para o cálculo da carga térmica que é a soma da quantidade de calor sensível e latente que deve ser removida ou adicionada de um espaço para proporcionar condições de conforto térmico aos ocupantes (Lopes, 2013). Segundo a ASHRAE (2013), o HBM é considerado um dos métodos mais eficazes para o cálculo da carga térmica. A precisão desse cálculo é fundamental para projetar e dimensionar sistemas de aquecimento, ventilação, ar condicionado e refrigeração (HVAC). O HBM é capaz de calcular essa variável em cada zona térmica do edifício, levando em consideração a inércia térmica e a influência das atividades internas sobre o desempenho térmico. Esse método modela de forma precisa a transferência de calor por convecção, condução e radiação, além de avaliar a interação entre

as zonas térmicas e a troca de ar entre ambientes internos e externos, permitindo uma análise detalhada da performance térmica da construção. No estudo de Sousa (2022), o *software EnergyPlus* v9.6.0 foi utilizado para realizar o balanço de calor em um edifício institucional localizado em Ananindeua-PA. O método HBM permitiu que o autor considerasse as variáveis climáticas externas, como temperatura ambiente, radiação solar, umidade e as características construtivas do edifício, como materiais de construção, isolamento térmico, entre outros. Em outra pesquisa realizada por Nobre (2022), o HBM foi empregado para analisar as trocas de calor que ocorrem no ambiente, considerando variáveis meteorológicas, estruturais e fisiológicas. A análise permitiu identificar as zonas térmicas do auditório em cada mês do ano, bem como a época com as maiores e menores temperaturas do ar. Essas informações são essenciais para entender o desempenho térmico do espaço e tomar medidas para melhorar o conforto térmico dos ocupantes. Essas aplicações demonstraram a eficácia da modelagem computacional de edificações como uma ferramenta útil para analisar e avaliar o desempenho térmico de edifícios. O fluxograma da Figura 1 mostra as trocas energéticas do HBM em uma zona, no qual, as setas duplas representam a troca de calor bidirecional entre os elementos, indicando que há uma transferência de calor ocorrendo nos dois sentidos e as setas únicas indicam que a interação é unidirecional.

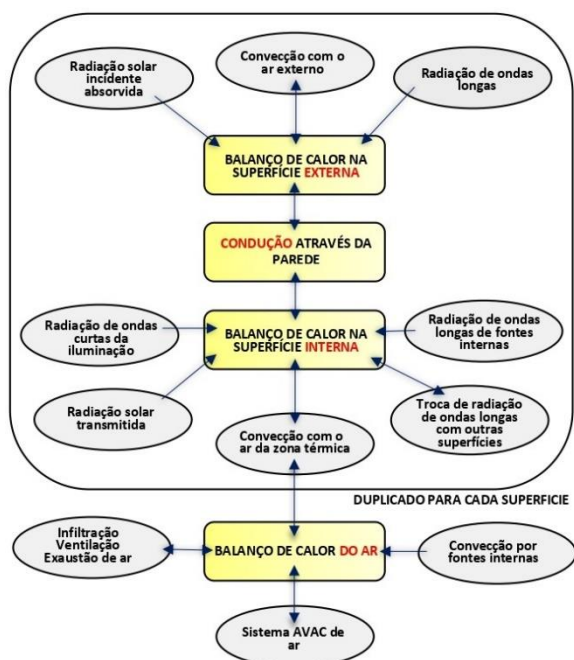


Figura 1. Fluxograma do Método do Balanço de Calor (HBM) em uma zona térmica. Adaptado, traduzido e simplificado de Pedersen; Fisher; Liesen (1997)

A Equação 1 estabelece o balanço de energia na camada superficial externa. A radiação solar de ondas curtas diretas e difusas é afetada pela posição geográfica do prédio, pelas características dos materiais que compõem a envoltória e pelas condições climáticas. Por sua vez, a radiação de onda longa surge a partir das trocas de calor por radiação entre as superfícies do entorno do edifício e o céu (McQuiston et al., 2005).

$$q''_{\alpha sol} + q''_{LWR} + q''_{conv} + q''_{ko} = 0 \quad (1)$$

Onde os fluxos q'' na Equação 1, são:

$q''_{\alpha sol}$ = radiação solar direta e difusa assimilada [W/m^2];

q''_{LWR} = calor por radiação de onda longa entre o ar e os arredores [W/m^2];

q''_{conv} = troca de calor por convecção com o ar externo [W/m^2];

q''_{ko} = calor por condução (parede) [W/m^2].

A radiação eletromagnética (solar) de comprimentos de onda longos e curtos, juntamente com a transferência de calor por convecção interna e condução, são processos fundamentais dentro de um sistema. Cada face interna envolvida nesse processo pode ser relacionada por meio da Equação 2.

$$q''_{LWX} + q''_{SW} + q''_{LWS} + q''_{ki} + q''_{sol} + q''_{conv} = 0 \quad (2)$$

Onde os fluxos q'' na Equação 2, são:

q''_{LWX} = líquido de radiação através das superfícies internas [W/m^2];

q''_{SW} = líquido de radiação das lâmpadas para superfícies [W/m^2];

q''_{LWS} = radiante dos equipamentos [W/m^2];

q''_{ki} = de condução mediante a parede [W/m^2];

q''_{sol} = de radiação solar absorvida e transmitida [W/m^2];

q''_{conv} = de calor convectivo para o ar interno [W/m^2].

MATERIAL E MÉTODOS

O edifício simulado possui dimensões de 12 m de comprimento, 12 m de largura, e 3 m de altura, perfazendo uma área total de 144 m². A Tabela 1, elenca os materiais utilizados na edificação deste trabalho, e a Tabela 2 mostra os materiais tradicionais utilizados na construção civil. As variáveis exibidas nas duas tabelas são: a espessura dos materiais (h [m]), a condutividade térmica (λ [W/mK]), a massa específica (ρ [kg/m^3]), e o calor específico (c [J/kgK]).

Tabela 1. Propriedades dos materiais utilizados.

Material	h [m]	λ [W/mK]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]
Telha FCB	0,0030	0,23	1075	1460
Tijolo COB	0,2970	0,55	1800	1110
Porta de Painéis OSB	0,0090	0,20	1000	2300
Piso de gesso acartonado	0,0125	0,35	750	840
Argamassa celular	-	0,40	600	1000
Reboco de argamassa de gesso	-	0,70	1200	840
Laje de concreto leve	0,2000	0,58	1850	963
Janela de vidro	0,0030	0,90	-	-
Lã de vidro	-	0,04	10	700
Brita	0,0480	0,70	1000	800

Fonte: a) telha de fibra de celulose e betume (FCB): JARDIM, Patricia R. S. Abreu (2011); b) tijolo COB: MENDONÇA, Ana Laura Alves; ALMEIDA, Danilo Guimarães (2019); c) piso de gesso cartonado: ABNT (2008); d) porta de painéis OSB: PALACIO, Cristian D. Uribe (2013); e); f); g); h) e i) lã de vidro; brita; argamassa celular; reboco de argamassa de gesso e laje de concreto leve: ABNT (2003)

Tabela 2. Propriedades dos materiais tradicionais.

Material	h [m]	λ [W/mK]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]
Telha de fibrocimento	0,0200	0,95	1800	920
Bloco cerâmico	-	0,90	1764	920
Porta de madeira	0,0300	0,15	614	2300
Piso cerâmico	0,0100	0,9	1600	920
Argamassa	0,0150	1,15	1600	1000
Reboco	0,0250	1,15	1800	1000
Laje de Concreto	0,2	1,75	2200	1000
Vidro comum	0,0100	1,00	2500	840

Fonte: Projeto 02:135.07-001/2. Desempenho térmico de edificações Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro (2003).

Durante a condução deste estudo, foram manipulados os softwares *SketchUp Make* 2017 v17.5.2555, *OpenStudio* v3.3.0 (*Plugin*) e *EnergyPlus* v9.6.0.

SketchUp: é um software de modelagem estrutural tridimensional desenvolvido pela *At Last Software* e adquirido posteriormente pela empresa *Google*. Ele

oferece diversas ferramentas para criação de modelos em 3D, estando disponível em versões comerciais pagas, além de uma versão gratuita chamada *SketchUp Make*. Além disso, tem-se disponível uma versão online do software, o *SketchUp for Web*.

No *SketchUp*, deve-se criar um novo projeto com as dimensões e a unidade de medida desejadas. A partir disso, pode-se criar formas básicas, como retângulos, círculos e linhas, e modificar suas dimensões e posições no espaço tridimensional.

OpenStudio: é uma suíte de ferramentas multiplataformas fornecida pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL), que permite a modelagem de edifícios por meio da integração dos softwares *SketchUp* e *EnergyPlus*, juntamente com outras ferramentas computacionais dedicadas à simulação termoenergética. Para isso, o usuário deve primeiro instalar o *SketchUp* e, em seguida, o *plugin* do *OpenStudio*. Ele inclui uma interface para o *EnergyPlus*, fornecendo uma visualização em tempo real dos resultados da simulação, como temperaturas, fluxo de ar, consumo de energia e outros indicadores de desempenho.

EnergyPlus: é uma ferramenta de simulação termoenergética que utiliza o Método de Balanço de Calor (HBM) para o cálculo da carga térmica. Desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, o *EnergyPlus* permite a realização de simulações de cargas térmicas e sistemas em regime transiente. A integração com outros softwares, como *SketchUp* e *OpenStudio*, é crucial para a pesquisa em questão, permitindo a sistematização em um único programa (*OpenStudio*) da entrada e saída de dados.

Variação percentual

Após a obtenção das propriedades construtivas dos materiais do edifício simulado, foi possível realizar uma comparação percentual entre os valores de espessura, condutividade térmica, massa específica e calor específico dos materiais tradicionais e alternativos, a fim de analisar os impactos da redução ou do aumento dessas propriedades no desempenho termoenergético da construção. Para calcular a variação percentual utilizou-se a Equação 3.

$$V_p = ((V_f - V_0) / V_0) \times 100 \quad (3)$$

Onde:

V_p é a variação percentual;

V_f é o valor final da grandeza que está sendo comparada;

V_0 é o valor inicial da grandeza que está sendo comparada.

Os valores de variação percentual indicam quanto um material alternativo apresenta ganho ou perda na sua performance em relação ao material convencional.

Janelas principais da simulação

No intuito de facilitar a compreensão das funcionalidades dos *softwares* utilizados nesta pesquisa, elaborou-se uma sequência com as principais abas da simulação. Para avaliar o desempenho térmico do edifício, informações sobre o clima e as propriedades térmicas dos materiais são inseridas no *OpenStudio*. Com base nesses dados, o *EnergyPlus* gera zonas térmicas para cada ambiente da construção, a fim de compará-los aos parâmetros definidos pela norma ISO 9241/2011. Na aba *Site* (Figura 2), é definido o intervalo de tempo a ser investigado e adicionado o arquivo climático correspondente à cidade de Belém-PA. O ano de referência foi 2022 (01/01/22-31/12/22) e foi utilizado o arquivo *Typical Meteorological Year* (TMY) que registra 14 anos de coleta de dados climatológicos.

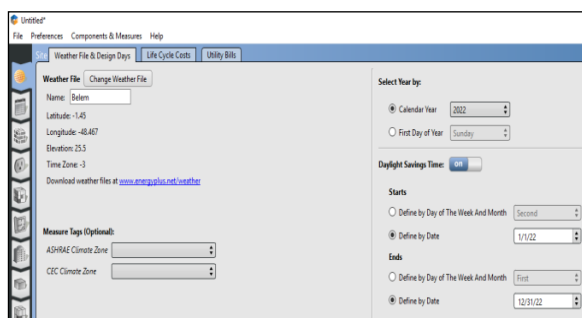


Figura 2. Aba *site*. Fonte: Autores (2023)

A seção *constructions* (Figura 3) as informações sobre a construção devem estar bem definidas, incluindo informações sobre a envoltória, o tipo de material, suas características térmicas (Tabela 1) e métricas. Os elementos telhado, porta, janela, parede, pisos e forro foram posicionados nas lacunas correspondentes aos espaços internos e externos do edifício, possibilitando a montagem do padrão construtivo da edificação dentro do *OpenStudio* com modelos detalhados e precisos das construções.

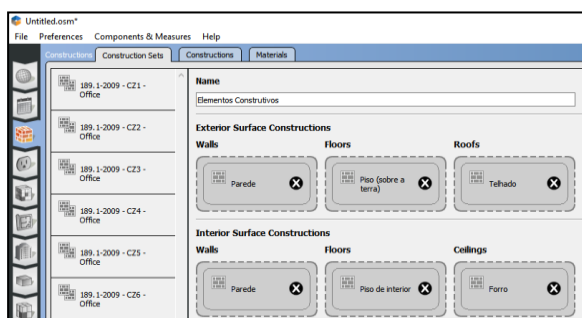


Figura 3. Seção *constructions*. Fonte: Autores (2023)

O desenho arquitetônico criado no *SketchUp* (Figura 4), também é visualizado na aba *geometry* do *OpenStudio*, nela é possível identificar as faces do edifício e atribuir nomes para uma melhor análise das zonas térmicas. Essa aba permite uma visão global do processo de modelagem em relação à geometria, oferecendo ferramentas para a criação e edição de elementos que constituem a envoltória da edificação.

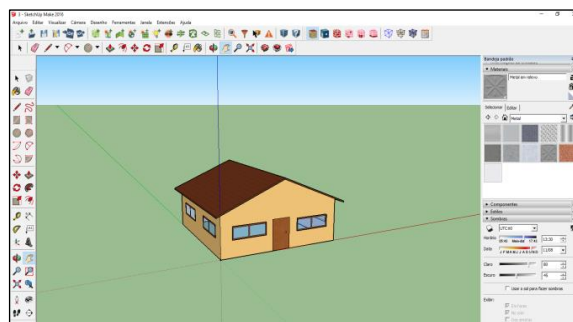


Figura 4. Modelo arquitetônico criado no *SketchUp*. Fonte: Autores (2023)

Na seção das variáveis de saída da simulação (*output variables*) foram selecionados resultados referentes às temperaturas de bulbo seco (temperatura indicada por um termômetro comum), bulbo úmido (indicação da quantidade de umidade no ar), radiação solar direta (energia solar que chega diretamente do sol à superfície terrestre sem interferência) e difusa (energia solar que é espalhada pela atmosfera terrestre e chega à superfície em várias direções), que são variáveis extremamente relevantes para a análise do desempenho do edifício em termos de energia. Após a definição das variáveis de saída, basta rodar a simulação na seção *run simulation* e coletar os resultados calculados pelo *EnergyPlus* na seção *results summary*.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos indicam que os materiais alternativos utilizados na construção, apresentam desempenho térmico superior em relação aos materiais convencionais, o que pode impactar positivamente no conforto térmico dos frequentadores do espaço. A Tabela 3 apresenta uma comparação entre os materiais alternativos utilizados nesta pesquisa e seu desempenho em relação aos materiais convencionais. Os valores negativos (positivos) indicam redução (aumento) na magnitude das propriedades (h [W/mK]), condutividade térmica (λ [W/mK]), massa específica (ρ [kg/m³]) e calor específico (c [J/kgK]).

Tabela 3. Valores de variação percentual das propriedades dos materiais alternativos em relação aos tradicionais.

Material	h [m]	λ [W/mK]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]
Telha alternativa	-85,0%	-75,8%	-40,3%	+58,7%
Tijolo alternativo	-	-38,9%	-2,0%	+20,6%
Porta alternativa	-70,0%	+33,3%	+62,8%	-
Piso alternativo	+25,0%	-61,1%	-53,1%	-8,7%
Argamassa alternativa	-	-65,2%	-62,5%	-
Reboco alternativo	-	-39,1%	-33,3%	-16,0%
Concreto alternativo	-	-66,8%	-15,0%	-3,7%

A telha alternativa apresentou uma redução de 85% na espessura, o que pode ser uma vantagem em regiões quentes, pois reduz a troca de calor entre o ambiente interno e externo, melhorando o conforto térmico. Além disso, essa telha apresentou redução na condutividade térmica e na massa específica, o que também favorece o desempenho térmico da cobertura. O tijolo alternativo teve uma redução de 38,9% na condutividade térmica, o que significa que ele apresenta menor capacidade de transferir calor em relação ao tijolo convencional. Apresentou redução de 2% na massa específica, tornando-o mais leve e fácil de manusear durante a construção. Já a capacidade térmica específica do tijolo alternativo, aumentou em 20,6%, o que significa que ele tem maior capacidade de armazenar calor em relação ao tijolo convencional. A porta alternativa apresentou um aumento de 62,8% na massa específica (ρ), o que pode torná-la mais resistente e durável.

O piso alternativo apresentou aumento de 25% na espessura e redução na condutividade térmica e massa específica. Essas características contribuem para reduzir a transferência de calor entre o solo e o ambiente interno, sendo uma vantagem em climas tropicais como o de Belém-PA.

A argamassa e o reboco alternativos apresentaram uma redução de, respectivamente, 62,5% e 33,3% na massa específica (ρ), tornando-os mais fáceis de aplicar e mais econômicos em termos de consumo de material. Da mesma forma, o concreto alternativo se demonstrou uma boa opção para a construção, pois oferece melhor isolamento térmico e facilidade de manuseio, tendo em vista a redução em 66,8% na condutividade térmica e 15% na massa específica.

A Figura 5 mostra a taxa de radiação solar direta no edifício para cada mês. A média anual foi de 185,2 W/m² e máxima de 889,9 W/m².

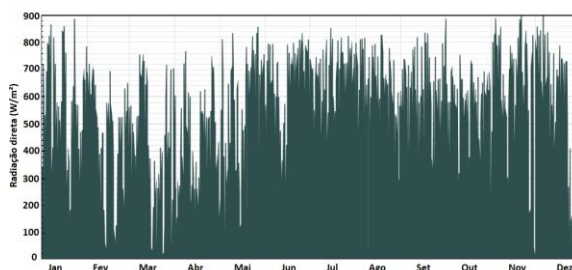


Figura 5. Taxa de radiação solar direta do edifício. Fonte: Autores (2023)

A Figura 6 mostra a taxa de radiação solar difusa no edifício para cada mês. A média anual foi de 79,4 W/m² e máxima de 483,2 W/m².

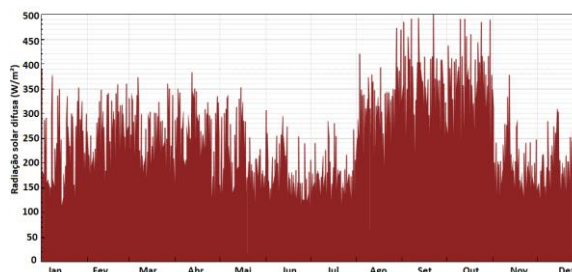


Figura 6. Taxa de radiação solar difusa do edifício. Fonte: Autores (2023)

A Figura 7 mostra a temperatura de bulbo seco do ar na edificação simulada. Na qual, a média anual foi de 26,5 °C, a mínima de 21,9 °C, a máxima de 33,2 °C e o desvio padrão de 2,6 °C.

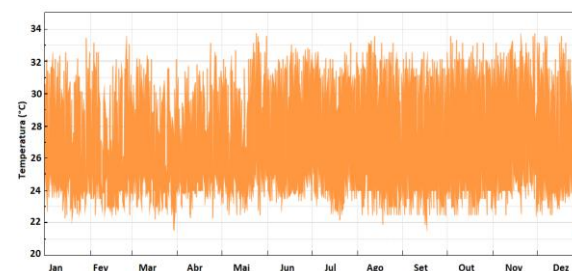


Figura 7. Temperatura de bulbo seco do ar no edifício. Fonte: Autores (2023)

A Figura 8 mostra a temperatura de bulbo úmido do ar na edificação simulada. Na qual, a média anual foi de 24,3 °C, a mínima de 20,2 °C, a máxima de 27,8 °C e o desvio padrão de 1,0 °C.

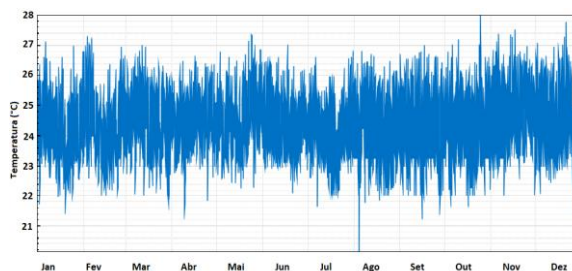


Figura 8. Temperatura de bulbo úmido do ar no edifício. Fonte: Autores (2023)

Na Figura 9, tem-se a curva de duração dos materiais construtivos alternativos correspondente a 8760 horas (um ano). Nela, destaca-se o intervalo de tempo em que a temperatura se manteve dentro dos parâmetros de conforto térmico da ISO 9241/2011.

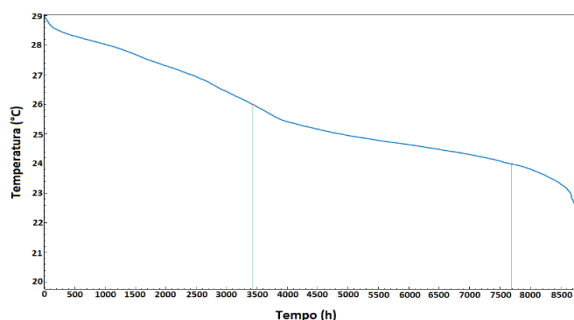


Figura 9. Curva de duração dos materiais alternativos ao longo de um ano. Fonte: Autores (2023)

Nota-se que no intervalo de 0-3400 horas, a edificação esteve com a temperatura acima de 26 °C, logo, fora dos parâmetros de conforto. A partir de 7650 horas até 8760 horas a temperatura esteve abaixo de 24°C, indicando fuga dos níveis de conforto. No intervalo superior a 3400 horas até 7650 horas, o edifício manteve sua temperatura dentro dos parâmetros de conforto térmico da ISO 9241/2011, que corresponde a 48,6% do período anual. A menor média de temperatura registrada foi de 25,7 °C, correspondente ao mês de fevereiro e a maior temperatura foi de novembro que registrou uma média de 27,0 °C. Esses resultados indicam aumento percentual de 91% no conforto térmico em relação a curva de duração dos materiais tradicionais (Figura 10).

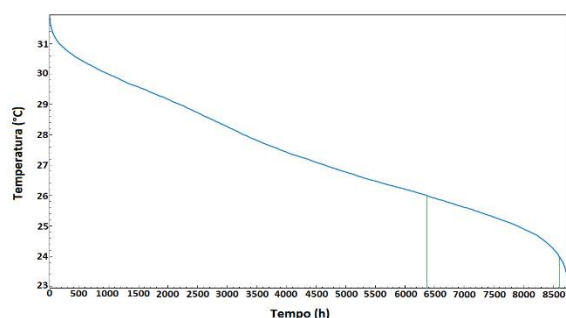


Figura 10. Curva de duração dos materiais tradicionais ao longo de um ano. Fonte: Autores (2023)

Observa-se que no período de 0 a 6375 horas, a temperatura da edificação excedeu 26°C, resultando em desconforto térmico. Entre 8601 e 8760 horas, a temperatura ficou abaixo de 24°C, indicando desvio dos padrões de conforto. No intervalo de tempo superior a 6375 até 7650 horas, a temperatura da edificação com materiais tradicionais se manteve

dentro dos padrões de conforto térmico da norma ISO 9241/2011, correspondente a apenas 25,4% do período anual. Estes dados são importantes para avaliar como a edificação simulada se comporta em relação ao desempenho termoenergético e ajudar na seleção de materiais que garantam um ambiente confortável e eficiente. A comparação entre materiais tradicionais e alternativos oferece o aprimoramento de estratégias de mitigação de calor em climas tropicais.

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos nesta avaliação do desempenho térmico de uma edificação construída com materiais alternativos em clima tropical, demonstram a importância da modelagem computacional para a avaliação do comportamento térmico dos materiais antes da construção do sistema real. Esta análise, permitiu verificar que durante 48,6% do período anual, a temperatura da edificação manteve-se dentro dos parâmetros de conforto térmico estabelecidos pela ISO 9241/2011. Ou seja, a simples troca de materiais convencionais por não-convencionais (telha, tijolo, piso, argamassa, reboco, porta e laje), proporcionou um elevado aumento percentual (91%) nos níveis de conforto térmico da edificação simulada, certificando que as propriedades construtivas dos elementos alternativos são mais favoráveis a obtenção do conforto térmico em edifícios projetados para climas tropicais como o de Belém-PA. Vale ressaltar, que as variações observadas entre as propriedades implicam em um balanço líquido, em impacto positivo no consumo de materiais e na produção de resíduos, contribuindo com a sustentabilidade da construção e diminuindo custos. Infere-se, portanto, que o uso de materiais alternativos pode oferecer vantagens significativas em termos de economia de material, desempenho térmico, durabilidade, sustentabilidade da construção e redução de custos.

REFERÊNCIAS

- ASHRAE Handbook: Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, SI edition. ASHRAE, Atlanta, GA e. 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220-2: Desempenho térmico de edificações. Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005. 28 p.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NR 17: Ergonomia: ENIT – MTE – informação e documentação. Portaria GM nº 3.214, de 08 de junho de 1978.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto 02:135.07-001:2003. Desempenho térmico de edificações – Parte 1: Definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro, 2003. (Origem: Projeto 02:135.07-001:2003, ABNT/CB-02 – Comitê Brasileiro de Construção Civil, CE-02:135.07 – Comissão de Estudo de Desempenho Térmico de Edificações).
- BORGES, L. dos S.; NOBRE, J. C. de A.; SOUSA, D. L. P. de; ANDRADE, L. C. F. Construção de um novo perfil de radiação solar e temperatura do ar a partir de padrões climáticos conhecidos para a cidade de Belém-PA. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, Viçosa/MG, BR, v. 9, n. 2, p. 15352–01e, 2023. DOI: 10.18540/jcecvl9iss2pp15352-01e. Disponível em: <<https://periodicos.ufv.br/jcec/article/view/15352>>. Acesso em: 2 mar. 2023.
- BORGES, Larissa dos Santos. Simulação numérica da temperatura do ar em um edifício com materiais construtivos alternativos. Orientador: Luiz Claudio Fialho Andrade. 2022. 29 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciência e Tecnologia) – Campus Universitário de Ananindeua, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 2022. Disponível em: <<https://bdm.ufpa.br:8443/jspui/handle/prefix/4834>>. Acesso em: 22 fev. 2023.
- FANGER, P.O. *Thermal Comfort*. New York: McGraw-Hill, 1970.
- GOMES, Gisele Fabiane do Nascimento. Análise sobre desempenho térmico estrutural. Orientador: Luiz Claudio Fialho Andrade. 2022. 9 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciência e Tecnologia) – Campus Universitário de Ananindeua, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 2022. Disponível em: <<https://bdm.ufpa.br:8443/jspui/handle/prefix/4832>>. Acesso em: 22 fev. 2023.
- HALAWA, Edward; VAN HOOFF, Joost; SOEBARTO, Veronica. The impacts of the thermal radiation field on thermal comfort, energy consumption and control - A critical overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 37, p. 907-918, 2014.
- International Organization for Standardization. ISO 9241: Ergonomics – Determination of metabolic heat production. Genebra, 2011.
- LOPES, Cícero Furtado de Mendonça. Análise comparativa de carga térmica entre dois métodos de cálculos para um auditório. 2013. 53 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.
- LOTTI, M.G.M. Processo de desenvolvimento e implantação de sistemas, medidas e práticas sustentáveis com vista a certificação ambiental de empreendimentos imobiliários – Estudo de Caso – Empreendimento Bairro Ilha Pura – Vila dos Atletas 2016. 2015. Monografia (Especialização em Construção Sustentável) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- MCQUISTON, Faye C.; PARKER, Jerald D.; SPITLER, Jeffrey D. *Heating, Ventilating and Air conditioning: Design and analysis*, 6th edition, John Wiley, NY, 2005.
- MENDONÇA, Ana Laura Alves; ALMEIDA, Danilo Guimarães. *Análise de Desempenho Térmico de Bioconstrução em COB*. 2019.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Construção Sustentável. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/urbanismosustentavel/constru%C3%A7%C3%A3o-sustent%C3%A1vel.html>>. Acesso em: 01 mar. 2023.
- NOBRE, Jean Carlos de Almeida. Análise e simulação numérica sobre desempenho térmico estrutural em um auditório utilizando o software EnergyPlus. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Pará.
- NÓBREGA, Ranyére Silva; LEMOS, Thiago Verçosa da Silva. O microclima e o (des)conforto térmico em ambientes abertos na cidade do Recife. *Revista de Geografia (UFPE)*, v. 28, n. 1, p. 93-107, 2011. Disponível em: <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/revistageografia/article/viewFile/228942/23352>>. Acesso em: 23 fev. 2023.
- PALACIO, Cristian David Uribe. Energia incorporada de vedações para habitação de interesse social considerando-se o desempenho térmico. Estudo de caso com utilização do Light Steel Frame no entorno do DF. 2013. 165 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, 2013. Orientadora: Rosa Maria Sposto. Publicação: E.DM-005A/13.
- PEDERSEN, Curtis O.; FISHER, Daniel E.; LIESEN, Richard J. Development of a heat balance procedure for calculating cooling loads. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA (United States), 1997.

PIMENTA, José Augusto; BEGA, João; SAITO, Marcel; SILVA, Leila; FIGUEIREDO, Filipe; BOSCOLI, Maria; SANTOS, Renivaldo dos. Estudo comparativo do desempenho térmico das coberturas de fibra de celulose e betume, fibrocimento e cerâmica. *Colloquium Exactarum*, v. 8, n. 3, p. 21-35, 2016. DOI: 10.5747/ce.2016.v08.n3.e163.

SOUSA, David Lohan Pereira de. Análise do desempenho térmico de um edifício utilizando o software EnergyPlus. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Pará.