



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

LEIDY CATARINA FELIX DOS ANJOS

**ANÁLISE DO USO DE MATERIAL DE MUDANÇA DE FASE EM
PAREDES DE TIJOLOS COMO FORMA DE CONTROLE TÉRMICO
PASSIVO EM EDIFICAÇÕES: ANÁLISE NUMÉRICA E
EXPERIMENTAL**

Recife
2025

LEIDY CATARINA FELIX DOS ANJOS

**ANÁLISE DO USO DE MATERIAL DE MUDANÇA DE FASE EM
PAREDES DE TIJOLOS COMO FORMA DE CONTROLE TÉRMICO
PASSIVO EM EDIFICAÇÕES: ANÁLISE NUMÉRICA E
EXPERIMENTAL**

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco
como requisito parcial para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Mecânica
Área de concentração: Energia.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Recarte Henriquez Guerrero

Coorientador: Prof. Dr. José Angelo Peixoto da Costa

Recife
2025

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Anjos, Leidy Catarina Felix dos.

Análise do uso de material de mudança de fase em paredes de tijolos como forma de controle térmico passivo em edificações : análise numérica e experimental / Leidy Catarina Felix dos Anjos. - Recife, 2025.

99f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2025.

Orientação: Jorge Recarte Henriquez Guerrero.

Coorientação: José Angelo Peixoto da Costa.

Inclui referências.

1. Controle térmico; 2. Edificações; 3. PCM; 4. Análise experimental; 5. Simulação numérica. I. Henríquez Guerrero, Jorge Recarte. II. Costa, José Angelo Peixoto da. III. Título.

UFPE-Biblioteca Central

LEIDY CATARINA FELIX DOS ANJOS

**ANÁLISE DO USO DE MATERIAL DE MUDANÇA DE FASE EM
PAREDES DE TIJOLOS COMO FORMA DE CONTROLE TÉRMICO
PASSIVO EM EDIFICAÇÕES: ANÁLISE NUMÉRICA E
EXPERIMENTAL**

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco
como requisito parcial para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Mecânica.
Área de concentração: Energia.

Aprovado em: 31/07/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jorge Recarte Henriquez Guerrero (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. José Claudino de Lira Junior
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Daniel Rodríguez López
Universidade Federal de Pernambuco

A Deus, sem ele nada disso seria possível.

A meus pais.

A meu irmão.

Ao meu esposo e meu filho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela oportunidade de vida, de saúde, de ter uma família me apoiando e de trabalho e de estar agindo e colaborando para este sonho fosse realizado. Aos meus pais, Nana e Luís, por todo o apoio amor e incentivo desde sempre. Ao meu irmão, Guilherme, que mesmo não estando aqui em vida, foi um grande incentivador de estudos, inteligência e amizade. Ao Pedro, meu esposo, por todo apoio e suporte, amor e incentivo durante dias difíceis. E ao meu filho Luís Henrique que nasceu em meio ao curso e com toda a dificuldade foi um incentivo para a conclusão. Agradeço ao meu Professor Orientador, Jorge Henríquez pelo aprendizado, dedicação e apoio fundamentais, principalmente nessa reta final, além do desenvolvimento profissional e pessoal que foi essencial durante estes anos. Ao meu professor e coorientador Ângelo, que sempre esteve pronto a tirar dúvidas e abrir espaço na pesquisa. Agradecer à Secretaria do Programa de Pós-Graduação pela contribuição, disposição, e aos colegas do programa, que também fizeram parte deste processo. À Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) pela oportunidade de poder realizar os estudos e conclusão do Mestrado. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro fornecido através da bolsa de Mestrado, na qual foi de grande valia para a realização e conclusão deste trabalho.

RESUMO

Paredes, telhados e janelas são importantes componentes de envoltórios de edificações. Do ponto de vista energético, estes devem atuar como barreira à perda de calor interno ou ganho de calor externo, evitando assim o aumento do consumo de energia para manutenção do conforto térmico. O consumo de energia para aquecimento e resfriamento nas edificações está diretamente relacionada à capacidade térmica dos materiais que são utilizados na sua construção. Este consumo de energia, para atender demandas com aquecimento e resfriamento, representa em média 40% do consumo final de energia em edificações. Os investimentos para eficiência energética nas edificações têm aumentado desde 2015 e impulsionado o desenvolvimento de novas tecnologias para o setor. O uso de materiais de controle passivo, adicionados aos materiais de construção convencional representam uma opção. Paredes e telhados com material de mudança de fase (Phase Change Material – PCM) podem ser projetados para regular a temperatura interna e reduzir o consumo de energia. O presente estudo avalia a aplicabilidade desta tecnologia através de uma análise experimental e numérica. Estas análises foram realizadas numa unidade de tijolo convencional de oito furos, tipicamente usado na construção civil. Estes furos do tijolo foram preenchidos com material de mudança de fase experimentalmente e nas simulações outros materiais isolantes também foram adicionados para uma avaliação comparativa. As análises experimentais e numéricas foram realizadas com o tijolo nas condições originais e nas condições modificadas. Estudos paramétricos foram conduzidos com o modelo numérico construído em Matlab®. Os resultados mostram que o uso do PCM integrado em paredes de tijolos representa uma solução que controla a transferência de calor para o interior da edificação e que este controle está diretamente associado ao armazenamento de energia no material de mudança de fase. Com o uso do PCM, a temperatura máxima do tijolo é reduzida e deslocada no tempo.

Palavras-chave: Controle térmico, Edificações, PCM, Análise experimental, Simulação numérica.

ABSTRACT

Walls, roofs, and windows are important components of building envelopes. From an energy perspective, they must act as a barrier to internal heat loss or external heat gain, thus preventing increased energy consumption to maintain thermal comfort. Energy consumption for heating and cooling in buildings is directly related to the thermal capacity of the materials used in their construction. This energy consumption, to meet heating and cooling demands, represents on average 40% of final energy consumption in buildings. Investments in energy efficiency in buildings have increased since 2015, driving the development of new technologies for the sector. The use of passive control materials, in addition to conventional building materials, represents an option. Walls and roofs with phase change material (PCM) can be designed to regulate internal temperature and reduce energy consumption. This study evaluates the applicability of this technology through experimental and numerical analysis. These analyzes were performed on a conventional eight-hole brick unit, typically used in civil construction. These brick holes were experimentally filled with phase-change material, and other insulating materials were also added in the simulations for comparative evaluation. Experimental and numerical analyzes were performed with the brick under its original and modified conditions. Parametric studies were conducted using the numerical model built in Matlab®. The results show that the use of PCM integrated into brick walls represents a solution that controls heat transfer to the building's interior and that this control is directly associated with energy storage in the phase-change material. With the use of PCM, the maximum brick temperature is reduced and shifted over time.

Keywords: Thermal control, Buildings, PCM, Experimental analysis, Numerical simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Esquema de como ocorre o microencapsulamento de um PCM	25
Figura 2.2 - Regiões de transição térmica do PCM.....	30
Figura 2.3 – Classificação dos PCMs.....	33
Figura 2.4 - Grupos diversos com temperatura e entalpia de fusão.....	34
Figura 3.1 - Modelo esquemático constituído por um tijolo exposto as condições ambientais externa e interna de uma edificação.....	39
Figura 3.2 – Domínio discreto para aplicação das equações de balanço de energia	40
Figura 3.3 – Volume elementar (1,1) com as resistências térmicas e fluxos de calor.....	41
Figura 3.4 – Volume elementar (2,2) com as resistências térmicas e fluxos de calor.....	42
Figura 3.5 - Corrente convectiva em espaço fechado quadrado.....	46
Figura 3.6 - Cavidade fechada retangular com superfícies verticais isotérmicas.....	47
Figura 3.7 - Temperaturas obtidas em bancada com o tijolo sem PCM nas lacunas e com resfriamento.....	48
Figura 3.8 - Temperaturas obtidas em bancada com o tijolo com PCM nas lacunas e com resfriamento.....	49
Figura 3.9 - Temperaturas obtidas em bancada com o tijolo com PCM invertido nas lacunas e sem resfriamento.....	50

Figura 4.1 - Modelo esquemático constituído por um tijolo exposto as condições ambientais externa e interna de uma edificação.....	47
Figura 4.2 – Domínio discreto para aplicação das equações de balanço de energia	49
Figura 4.3 – Volume elementar (1,1) com as resistências térmicas e fluxos de calor.....	49
Figura 4.4 – Volume elementar (2,2) com as resistências térmicas e fluxos de calor.....	51
Figura 4.5 - Cavidade fechada retangular com superfícies verticais isotérmicas.....	58
Figura 4.6 – Imagem do tijolo simulado as suas medidas.....	58
Figura 4.7 – Simulação de transmissão de calor no tijolo com cavidades preenchidas de ar para $I=800\text{W/m}^2$	62
Figura 4.8 – Simulação de transmissão de calor no tijolo com cavidades preenchidas de ar para $I=400\text{W/m}^2$	62
Figura 4.9 – Simulação de transmissão de calor no tijolo com cavidades preenchidas de ar para uma $I=200\text{W/m}^2$	63
Figura 4.10 – Simulação de transmissão de calor em tijolos maciços para $I=800\text{W/m}^2$	64
Figura 4.11 – Simulação de transmissão de calor em tijolos maciços para $I=400\text{W/m}^2$	65
Figura 4.12 – Simulação de transmissão de calor em tijolos maciços para uma $I=200\text{W/m}^2$	65

Figura 4.13 – Simulação de transmissão de calor em tijolos com fibra de coco para $I=800\text{W/m}^2$	67
Figura 4.14 – Simulação de transmissão de calor em tijolos com fibra de coco para $I=400\text{W/m}^2$	68
Figura 4.15 – Simulação de transmissão de calor em tijolos com fibra de coco para uma $I=200\text{W/m}^2$	69
Figura 4.16 – Simulação de transmissão de calor em tijolos com EPS 7 para $I=800\text{W/m}^2$	69
Figura 4.17 – Simulação de transmissão de calor em tijolos com EPS 7 para $I=400\text{W/m}^2$	70
Figura 4.18 – Simulação de transmissão de calor em tijolos com EPS 7 para uma $I=200\text{W/m}^2$	70
Figura 4.19 – Simulação de transmissão de calor em tijolos com PCM para $I=800\text{W/m}^2$	72
Figura 4.20 – Simulação de transmissão de calor em tijolos com PCM para $I=400\text{W/m}^2$	73
Figura 4.21 – Simulação de transmissão de calor em tijolos com PCM para uma $I=200\text{W/m}^2$	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Temperaturas finais obtidas para cada experimento.....	45
Tabela 4.1 – Parâmetros para o Modelo de MacAdams.....	63
Tabela 4.2 – Parâmetros de escolha do R_f de acordo com a rugosidade da superfície.....	64
Tabela 4.3 - Parâmetros de escolha das variáveis D, E e F de acordo com a rugosidade da superfície.....	66
Tabela 4.4 – Descrição dos conjuntos de simulações.....	68
Tabela 4.5 – Parâmetros e condições utilizados na simulação.....	69
Tabela 4.6 – Temperaturas máximas Bloco 1 das simulações.....	70
Tabela 4.7 – Temperaturas máximas Bloco 2 das simulações.....	75
Tabela 4.8 – Temperaturas máximas Bloco 3 das simulações.....	80

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

HVAC	Heating, Ventilation, and Air Conditioning (Sistemas de ventilação e ar-condicionado)
IEA	Intenacional Energy Agency (Agência internacional de Energia)
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
PCM	Phase Change Material (Material de Mudança de Fase)
TES	Thermal Energy Storage (Armazenamento de Energia Térmica)
SHS	Sensible Heat Storage (Armazenamento de Calor Sensível)
LHS	Latent Heat Storage (Armazenamento de Calor Latente)
AcCNF	Nanofibras de celulosa acetinadas
BES	Simulação de Energia em Edifícios
EPS	Poliestireno Expandido (Isopor)
PEG	Polietilenoglicol

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 19

2.1 CONFORTO TÉRMICO EM EDIFICAÇÕES 19

2.2 USO DE MATERIAL DE MUDANÇA DE FASE PARA CONFORTO TÉRMICO EM EDIFICAÇÕES 20

2.3 MÉTODOS DE INCORPORAÇÃO DO PCM 23

2.3.1 Aplicação em edifícios 23

2.3.3 Sistemas de armazenamento de energia térmica em edifícios 27

2.3.3.1 Sistemas Passivos 28

2.3.3.2 Sistemas Ativos 29

2.4 MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE (PCM) 30

2.4.1 Mecanismos e propriedades 30

2.4.2 Classificação dos PCMs 32

2.5 DESAFIOS NA APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA 35

3. ESTUDO EXPERIMENTAL 37

3.1 MODELO DE BANCADA DO ESTUDO EXPERIMENTAL 37

3.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES 41

3.2.1 Análises experimentais sem PCM e sem resfriamento 42

3.2.2 Análises experimentais sem PCM e com resfriamento 43

3.2.3 Análises experimentais com PCM e sem resfriamento 44

3.2.4 Análises experimentais com PCM e com resfriamento 45

3.2.5 Análises experimentais com PCM invertido no tijolo e sem resfriamento 46

3.3 CONCLUSÕES PARCIAIS 47

4. MODELAGEM E SIMULAÇÃO NUMÉRICA

4.1 INTRODUÇÃO 49

4.2 MODELAGEM 50

4.2.1 Caso 1: Tijolo original com ar nas cavidades 53

4.2.2 Caso 2: Tijolo com as cavidades preenchidas com material isolante térmico 54

4.2.3 Caso 3: Tijolo com cavidades preenchidas com (PCM) 55

4.3 COEFICIENTES CONVECTIVOS 57

4.3.1 Convecção Natural em cavidades 57

4.3.2 Convecção Sobre Superfícies Verticais em Edifícios 59

4.3.2.1 Convecção para paredes externas – Convecção em superfícies verticais segundo Modelo McAdams 59

4.4 PARÂMETROS E CONDIÇÕES DE SIMULAÇÃO 60

4.5 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO 63

4.5.1. Resultados da Simulação Numérica – BLOCO 1 63

4.5.1.1 Análise de simulações computacionais do tijolo preenchido com ar nas cavidades 64

4.5.1.2 Análise de simulações computacionais do tijolo maciço 66

4.5.2 Resultados da Simulação Numérica – BLOCO 2 68

4.5.2.1	Análise de simulações computacionais do tijolo com materiais isolantes nas cavidades	69
4.5.3	Resultados da Simulação Numérica – BLOCO 3	73
4.5.3.1	Análise de Simulação Computacional com Tijolo Preenchido de PCM	73
4.6	CONCLUSÕES PARCIAIS	77
5	CONCLUSÕES	80
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	82

1. INTRODUÇÃO

A energia elétrica atualmente é um insumo altamente relevante para qualquer atividade na sociedade. A eletricidade é um vetor energético essencial nos setores industrial, energético, residencial e de serviços, cujo consumo aumenta com o crescimento econômico e aumento populacional. Alimenta indústria, comércio, educação, comunicação e é o cerne principal da economia moderna, em especial há um crescimento do consumo desta para as economias em desenvolvimento (LI et al., 2021). De acordo com a Agência Internacional de Energia - IEA (2019), a demanda mundial de eletricidade deve crescer 2,1% ao ano no até 2040, aumentando o consumo final total de energia de 19% em 2018 para 24% em 2040. Consequentemente, existe uma séria preocupação que essas futuras demandas tenham que ser atendidas utilizando fontes não renováveis, as quais contribuem de forma sistêmica com a liberação de emissões prejudiciais ao meio ambiente, principalmente de gases de efeito estufa. Projeta-se que na taxa atual de emissões antropogênicas, o aquecimento médio global atingirá 1,5°C acima das temperaturas pré-industriais entre 2030 e 2050 (OGUNBODE; DORAN; BÖHM, 2019; SEMIENIUK et al., 2021).

O setor de edificações permanece como o maior consumidor de energia globalmente. Em 2022, foi responsável por aproximadamente 30% do consumo global final e de 26% das emissões relacionadas à energia, sendo 8% de emissões direta e 18% indiretas referentes à produção de eletricidade e calor que é utilizada nas edificações (IEA, 2022). A demanda por uso de ar-condicionado nos edifícios tem aumentado nos últimos anos devido às maiores exigências de conforto térmico (GLOBALABC, 2022). Conforme González-Torres et al. (2022), este fator levou a um uso generalizado de sistemas de ar-condicionado baseados em tecnologia de compressão. Estima-se que cerca de 40% da energia consumida nos edifícios é dedicada a proporcionar conforto térmico interior através de aquecimento, sistemas de ventilação e ar-condicionado (HVAC).

Para o âmbito brasileiro, os setores residenciais e de serviços (comercial e públicos) responderam por 16% da demanda total de energia em 2024, com

um aumento de 1% nos últimos 10 anos. Considerando apenas o consumo de eletricidade, estes setores respondem por 50% do consumo do total da energia elétrica disponibilizada, sendo o setor residencial responsável pela metade desse consumo (BEN, 2024). Basicamente este consumo impacta nos horários de ponta da geração de potência e ocorre devido ao uso de equipamentos como ar-condicionado e chuveiros elétricos (EPE, 2020).

O uso de ar-condicionado representa de 30 a 40% do consumo total de energia, principalmente no que se refere à manutenção da temperatura adequada ao conforto térmico dentro das residências, isso independente do clima ou região (ABRAVA, 2019). O consumo de ventiladores também cresceu significativamente, chegando a aumentar dez vezes na região Sul (ELETROBRAS, 2021; ABRAHÃO; SOUZA, 2023). Outro fator relevante está baseado no fato de que as pessoas têm passado cerca de 90% de seu tempo em ambientes fechados, o que corrobora tanto a necessidade do estudo do conforto térmico como a aplicação de meios relevantes para diminuição do consumo de energia elétrica decorrentes do uso crescente de sistemas de refrigeração que vem crescendo a cada dia (CHE et al., 2019).

Historicamente, o Brasil apresenta um perfil de geração de energia elétrica por fontes renováveis (88,2% em 2024) com forte participação de hidroeletricidade e uma contribuição menor, mas crescente, das fontes eólica e fotovoltaica com 23,7% de participação conjunta na matriz elétrica brasileira em 2024, com participação de 8,1% de outras fontes de energia renovável, como por exemplo a biomassa e outros (BEN, 2024). Apesar de o país apresentar um perfil energético sustentável e estar em posição mais favorável que a média mundial quanto à geração de eletricidade, ainda há desafios relacionados à eficiência energética nas edificações. A Lei nº 10.295/2001 reconhece a importância desse setor no consumo de energia elétrica e estabelece diretrizes para promover o uso racional da energia. Com base nessa regulamentação, foi desenvolvido o Programa Brasileiro de Etiquetagem de Edificações (PBE Edifica), que define critérios e métricas para avaliar o desempenho energético das construções (EPE, 2020).

Khosla et al. (2020) advogam que para viabilizar o acesso equitativo ao resfriamento sustentável este deveria ser parte integrante dos Objetivos de

Desenvolvimento Sustentável, uma vez que se relaciona com a saúde (ODS 3), acesso a e energias limpas (ODS 7), redução da desigualdade (ODS 10). As ações poderiam envolver o incentivo a tecnologias de baixo consumo energético, reformas urbanas para reduzir a necessidade de resfriamento ativo e a criação de regulações e padrões para produtos e edifícios.

O envelopamento de edifícios, constituído pelas paredes, janelas, pisos e telhados têm sido objeto de estudo quando se busca aprimorar a eficiência energética de edificações. Inclusive é atualmente uma preocupação em projetos arquitetônicos tendo em vista a necessidade de uma visão de design sustentável e uma preocupação de como a energia é utilizada (LI et al., 2020).

O controle térmico aliado ao armazenamento de energia por calor latente tem sido uma estratégia eficaz, usadas em paredes e coberturas, visando à redução da carga térmica em edificações (AL-YASIRI; SZABÓ, 2021). Desde 1985, diversas pesquisas têm explorado o uso de materiais de mudança de fase (PCMs) e suas propriedades térmicas para aprimorar o conforto térmico em edificações. De acordo com Zhan et al. (2023) em 2007 houve um aumento significativo na publicação de estudos em periódicos científicos de relevância. Esses trabalhos têm como foco principal o aprimoramento do desempenho térmico das edificações, além de abordar a redução do consumo energético e das emissões de poluentes, promovendo práticas sustentáveis, especialmente em regiões de clima tropical (ZHAN et al., 2023). Nesse contexto, o uso de PCMs se destaca como uma solução promissora e amplamente reconhecida por sua contribuição à eficiência energética e ao conforto térmico em edificações localizadas tanto em zonas tropicais quanto subtropicais.

Não obstante o crescente interesse pelo uso de PCMs no Brasil, ainda há uma escassez de estudos e referências nacionais sobre sua aplicação, especialmente em edificações com ventilação natural. Isso pode ser atribuído à falta de fabricantes locais e à necessidade de adaptação dos sistemas construtivos brasileiros, que são predominantemente pesados e possuem alta inércia térmica, o que reduz a eficácia adicional de armazenamento térmico proporcionada pelos PCMs (CORREIA; AMORIM; SANTAMOURIS, 2024). Filippini, Sartori e Torres (2021) informam em seu estudo que uma dificuldade

de aplicação desde tipo de tecnologia no Brasil se encontra na seleção adequada de acordo com o clima da região na qual o estudo se desenvolve, uma vez que o país tem seu território muito extenso e diferentes climas ao longo deste.

Liu et al. (2022) analisam através de um estudo de revisão a aplicação de materiais de mudança de fase (PCM) em edificações sob diferentes condições climáticas e observam que esta solução pode ser efetiva desde que o PCM escolhido tenha propriedades termo físicas compatíveis com tais condições climáticas. Como eles destacam, não existe um PCM universal que atenda todas as condições de habitat. Zhan et al. (2023) enfatizam a aplicabilidade da incorporação de PCM em materiais de construção como forma de controle e melhoria do conforto térmico em edificações em climas quentes. Por sua vez, num estudo de revisão da literatura (OLIVEIRA; LUCARELLI; CARLO, 2022) são discutidas as diferentes formas de incorporação de PCM em materiais construtivos (paredes, telhados e janelas), suas características mais relevantes e as localizações geográficas destas aplicações.

Diante das normativas brasileiras e dos esforços para atender especificações de melhor desempenho energético nas edificações, do crescente interesse global pelo uso de materiais de mudança de fase (PCM) como uma estratégia de condicionamento térmico passivo e como forma de contribuir e aumentar as pesquisa nesta área do conhecimento no país, o presente estudo avalia de forma numérica e experimental a incorporação de PCM em tijolos convencionalmente usados no setor de construção civil no Brasil.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é realizar uma análise experimental e numérica sobre o conceito de paredes térmicas que utilizam material de mudança de fase encapsulada nas paredes como forma de controle da temperatura ambiente interna em edificações.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Projetar e construir uma bancada experimental para a realização de ensaios térmicos de tijolos expostos a gradientes de temperatura nas superfícies internas e externas simulando uma condição de parede externa de uma edificação.
- Realizar estudos experimentais comparativos com tijolos com furos preenchidos com material de mudança de fase e tijolos sem PCM.
- Modelar a transferência de calor em paredes e construir um algoritmo de simulação para a realização de estudos numéricos de paredes com e sem material de mudança de fase.
- Realizar estudos experimentais variando os parâmetros de interesse
- Realizar estudos paramétricos com o algoritmo de simulação.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho está organizado em cinco capítulos. No primeiro capítulo está descrito o contexto geral relativo à importância atual de sistemas de armazenamento de energia. Apresentou-se os objetivos a serem alcançados com este estudo. O segundo capítulo, a revisão bibliográfica, trata de assuntos essenciais para o entendimento do trabalho, onde determina a base de estudos do porquê de utilizar o PCM como forma de melhoria do conforto térmico atrelada à economia energética. No terceiro capítulo apresenta-se o trabalho experimental em bancada e posteriormente os resultados obtidos. No quarto capítulo, tem-se a modelagem numérica na qual irá demonstrar como seguiu a simulação numérica bem como os resultados obtidos. E finalmente, no quinto capítulo, as conclusões da pesquisa e adicionalmente sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONFORTO TÉRMICO EM EDIFICAÇÕES

De acordo com a Emenda 1 da NBR 15.575 (ABNT, 2021), e outra Norma Técnica Regulamentadora, a NBR 15220, o conforto térmico pode ser descrito como: “satisfação psicofisiológica de um indivíduo com as condições térmicas do ambiente” (ABNT, 2005). De maneira geral, o conforto térmico ocorre quando a temperatura corporal de alguém é mantida em equilíbrio, a umidade da pele é baixa e o esforço fisiológico para adaptação ao meio é minimizado (ASHRAE, 2009). Então, ASHRAE 55 (2017) estabelece o método adaptativo de avaliação das condições de conforto térmico aceitáveis aos ocupantes, restritas a uma escala quantitativa da sensação de calor e frio que varia entre $-3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (frio) a $+3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (calor), em relação à temperatura de conforto neutra.

A construção civil, assim como diversas áreas de atividades da engenharia, segue normas, para o caso do conforto térmico, a NBR 15.575 que regulamenta o desempenho térmico em edificações foi criada para definir, avaliar e direcionar formas de aspectos construtivos no que se refere ao impacto térmico. Esta norma também regulamenta os parâmetros básicos para instalação de ar-condicionado em ambientes.

Com isso, há a necessidade de cautela quanto ao desempenho térmico de edificações e relacionando-o também com o conforto térmico das pessoas que irão circular no local. Devem-se observar as propriedades de isolamento térmico, armazenamento e isolamento do envelope do edifício, que devem ter um papel propício no atraso do decaimento da flutuação da temperatura externa, assim as temperaturas internas permanecerão em uma faixa adequada de conforto térmico, sem necessidade de resfriamento ou aquecimento (SOARES et al, 2013).

Adicionalmente e de acordo com a NBR 15.575, alguns protocolos devem ser seguidos em busca do conforto térmico. Devendo ser consideradas as cargas térmicas que se relacionam com aquele ambiente, sendo elas de origem interna e externa. As cargas térmicas devem ser individualizadas e

então avaliadas, para finalmente serem totalizadas, e dessa maneira, deve-se seguir um roteiro com estas cargas. Para o cálculo da carga externa, se faz necessária a posse da orientação e dimensões dos ambientes da edificação, características e dimensões dos materiais do piso, paredes, teto e vidros das janelas e portas; condições: externas do ambiente, dos ambientes adjacentes e de utilização do ambiente (ABNT, 1980).

E para tanto, deve-se ser aplicado este projeto junto ao construtor, como forma de viabilizar aspectos construtivos de forma integrada, com objetivo de alcançar o conforto térmico adequado aos usuários do ambiente em questão (COSTA, 2024).

2.2 USO DE MATERIAL DE MUDANÇA DE FASE PARA CONFORTO TÉRMICO EM EDIFICAÇÕES

O uso de sistemas de armazenamento de energia térmica (Thermal Energy Storage – TES) tem se mostrado uma estratégia eficaz para promover a eficiência energética, reduzir as emissões de CO₂ e minimizar a necessidade de climatização artificial em ambientes como salas comerciais, apartamentos e outras edificações que adotam soluções construtivas do tipo passivas (TYAGI et al., 2021). No contexto dos edifícios, já existem diversas abordagens, estudos e práticas voltadas à redução do consumo de energia elétrica, especialmente em resposta às demandas de conforto térmico dos ocupantes. Além disso, essas iniciativas contribuem diretamente para a diminuição das emissões de CO₂, associadas ao setor da construção civil. Nesse cenário, torna-se essencial o desenvolvimento contínuo de pesquisas que apoiem a transição para práticas sustentáveis, como já ocorre em países europeus, cujas políticas energéticas priorizam a redução das emissões de carbono como parte fundamental do desenvolvimento sustentável (Energy Efficiency Renewable Energy, 2011).

A estratégia do TES tem como marco inicial a manutenção da transmissão térmica (U-value), termo utilizado por Li, et al., (2021) que se refere ao

desempenho do isolamento térmico em uma parede multicamada, calculando o fluxo de calor que passa por área unitária de um componente complexo devido a um determinado gradiente de temperatura igual a 1K. Ainda para Li, et al., (2021) para tal U-Value ser mais adequado, este deve ser então, o de menor valor possível, com base em altos níveis de isolamento considerando isto, a forma de melhorar o desempenho térmico que envolve um edifício. E para se obter este envolvente de forma mais efetiva, integrar PCM permitirá o aumento da inércia térmica como forma de economizar energia e aumentar o conforto térmico interno. Uma parede como elemento construtivo, que ao incidir calor através da luz solar e as altas temperaturas resultam em uma onda de calor na qual penetra nas paredes do edifício. O PCM então é adicionado à esta parede como forma de absorver o excesso de calor que, ao mudar de fase e se fundir, retarda este fluxo de calor na parede reduzindo o pico de alta temperatura. Então, durante o dia a temperatura irá se manter confortável e com isso haverá um menor consumo de energia pelo sistema de resfriamento (RATHORE et al., 2022).

As soluções TES podem ser classificadas em algumas categorias, a saber: armazenamento de calor sensível (SHS) e armazenamento de calor latente (LHS) usando PCMs (MABROUK et al., 2022).

O armazenamento de calor latente (LHS) baseia-se na quantidade de energia absorvida ou liberada durante a reforma da estrutura de fase do PCM de um estado físico para o outro durante os fenômenos de mudança de fase (solidificação, fusão e liquefação). Outro fator importante se dá pelo fato da alta densidade de armazenamento de energia térmica e temperaturas de trabalho praticamente constantes. Com isso, a técnica de armazenamento de calor latente (LHS) tornou-se uma excelente opção para atender demandas não atendidas de energia que é consequente do menor fluxo de calor em paredes, reduzindo o pico de alta temperatura (ROMDHANE et al, 2020).

Elashmawy (2020), acrescenta que o uso do calor latente (Latent Heat Storage – LHS), baseia-se na absorção e liberação de calor do material utilizado para armazenar energia, enquanto ocorre a mudança de fase. Este método tem destaque na sua facilidade de aplicação e maior capacidade térmica, demandando assim um volume muito menor de material para

armazenar a mesma quantidade de energia. O uso de PCM para estes casos tem denotado atenção das pesquisas e experimentos, uma vez que aplicada esta tecnologia em edifícios não haverá a necessidade de mudanças drásticas na construção das paredes destas construções. Além destes aspectos, para além da maior capacidade térmica, no uso da tecnologia LHS ocorre ao longo da variação de temperatura e com isso um volume menor de PCM se faz necessário e consequentemente diminuição do fluxo de calor na parede (VIEIRA, 2022).

Pasarkar et al., (2022) também comentam em sua pesquisa, que a aplicação do armazenamento de energia através do calor sensível (SHS), a temperatura de um material varia com a quantidade de energia armazenada. Em outras palavras, a temperatura do meio de armazenamento é alterada para armazenar energia. Essa quantidade de calor armazenada é proporcional à densidade, calor específico, volume e variação de temperatura do material de armazenamento de energia. Sendo o sistema SHS mais simples, aplica-se um gradiente de temperatura a um meio (pode ser sólido ou líquido) com intuito de liberar ou de armazenar calor. Este tipo de sistema é utilizado em construções mais pesadas, como por exemplo concreto e alvenaria, uma vez que estes materiais tendem a armazenar mais calor do que construções em madeira, ou aço, por estes materiais serem mais leves. Outro fato importante, é de que o armazenamento térmico varia com o calor específico, massa e a composição química dos materiais empregados, onde este irá envolver o material no qual irá armazenar o calor – energia (ELASHMAWY, 2020).

As desvantagens deste tipo de sistema estão ligadas aos grandes tamanhos frequentemente necessários, onde este sistema necessita de grandes tanques, oscilações de temperatura resultantes da adição e remoção sensíveis de energia, que são necessários para adição e remoção de energia na forma de calor, pois o tanque precisa estar envolto em um gradiente de temperatura. Nestes tanques deve haver meios líquidos (como água, fluidos à base de óleo, sais fundidos etc.) e meios sólidos podem ser usados para armazenar calor (como rochas, metais e outros). Para este último caso, onde

exista meios sólidos, estes que requerem fluido para troca de calor e são comumente empregados em leitos compactados (ELASHMAWY, 2020).

Mabrouk et al., (2022) citam que as vantagens dessa técnica de armazenamento de energia é que o modo de liberação de energia na forma de calor acumulado (ciclos de carga e descarga) e podem ser repetidos sem problemas, para casos em que se aplicam grandes volumes com objetivo de atender altas demandas. Além disso, este método se destaca no uso de propriedades do material de armazenamento de energia, com foco no seu alto calor específico.

2.3 MÉTODOS DE INCORPORAÇÃO DO PCM

O PCM pode melhorar significativamente o desempenho energético quando se tratando de consumo de energia em edifícios, na melhoria do conforto térmico nesses ambientes. Em um determinado edifício, ao inserir PCM em seus materiais de construção, estes se liquefazem e a energia é armazenada. Ao haver o resfriamento, com isso, este material se solidifica e a energia é então liberada (CHEBLI e MECHIGHEL, 2025).

Este processo de incorporação do PCM é uma parte indispensável do estudo de aplicação, tendo em vista o fato em que se mantenha o desempenho dos PCMs. Para que uma incorporação seja positiva é necessário que se mantenham as propriedades térmicas do PCM, permitindo que ele se mantenha longe de mudanças potencialmente instáveis. Existem dois tipos de métodos populares de incorporação chamados de encapsulamento e estabilização da forma (WANG et al., 2022).

2.3.1 Aplicação em edifícios

PCMs podem ser adicionados em edifícios como forma passiva em paredes, janelas, telhados e até pisos, este PCM irá agir como uma barreira

térmica onde no inverno irá agir fazendo a parede perder mais energia e no verão ter um maior ganho de energia ao ocorrer a mudança de fase. Gholamibozanjani e Farid (2021) definem que os PCMs podem ser aplicados ao serem incorporados às construções de edifícios através de aplicações dos tipos: passivas e ativas.

Para o método de aplicação passiva, o PCM é incorporado aos materiais de construção sem o uso de qualquer equipamento auxiliar, que consequentemente aumenta a capacidade de armazenamento térmico destes materiais. As aplicações típicas das tecnologias de PCM do tipo passiva incluem a integração de PCM na estrutura da construção, como paredes, pisos e telhados. Esta tecnologia de aplicação com incorporação passiva, o PCM é adicionado aos materiais que envolvem a construção do edifício, que pode ocorrer por meio de diferentes perspectivas, como materiais de revestimento aprimorados com PCM, como drywall, placas e paredes de gesso, concreto e cerâmica. Assim como tecnologias mais aprimoradas como: painéis de PCM macro encapsulados, estrutura multiPCM (PCM encapsulado em hexágonos como favos de mel) e isolamentos impregnados com PCM. Além disso, elas podem ser incorporadas aos sistemas de janelas, isolamentos, fachadas, persianas e sombreamento do edifício (GHOLAMIBOZANJANI e FARID, 2021).

Já para sistemas ativos, este requer o uso de alguma energia adicional, como demonstram Gholamibozanjani e Farid (2021) em seu estudo. Esta energia pode ser mecânica ou elétrica e com isso o PCM estando contido em uma parede, janela ou telhado, por exemplo, sendo instalado dentro ou fora do edifício e com isso são integrados a sistemas com unidades de ar-condicionado, aquecimento de pisos ou ainda contêineres de armazenamento térmico. Com a aplicação do PCM de forma ativa, assim possibilita-se a absorção e liberação de calor sob demanda, o que resultará em uma transferência de calor mais eficiente, um menor consumo de energia e com isso um melhor controle de temperatura do ambiente e consequente melhor conforto térmico.

2.3.2 Tipos de encapsulamento

Os PCMs precisam necessariamente serem envoltos por alguma superfície, uma vez que como haverá mudança de fase neste, haverá a possibilidade de vazamento para o meio em que houver sua aplicação, sendo isso uma desvantagem. O encapsulamento é uma forma de nomear a contenção de uma certa quantidade de PCM como forma de que haja a mudança de fase por vários ciclos de aquecimento e resfriamento, que este material que encapsule o PCM não reaja nem com ele nem com o ambiente, mas que seja um excelente condutor de calor e tenha disponibilidade comercial e econômica (PASARKAR et al., 2022). Os encapsulamentos podem ser do tipo macroencapsulados e do tipo micro encapsulados.

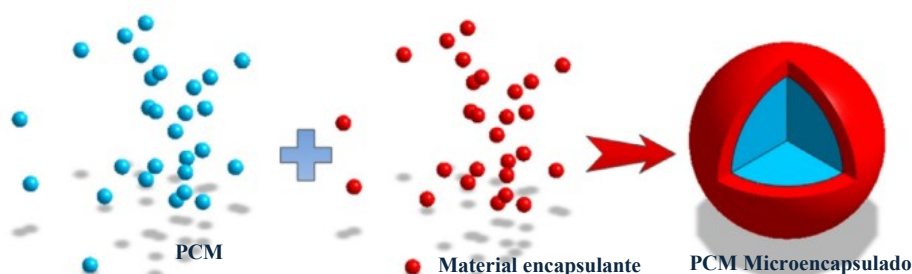
Ainda de acordo com Pasarkar et al. (2022), a técnica de macroencapsulamento consiste no encapsulamento em recipientes com mais de 1000mm. Esses ambientes podem ser flexíveis como bolsas, ou rígidos como tubos, esferas ocas, latas ou painéis, podendo ser utilizados como mencionado anteriormente materiais com alta condutividade térmica como metais, mas a depender da aplicação pode ser utilizado vidros ou cerâmicas.

Wang et al., (2022) acrescentam outro tipo de encapsulamento, neste o PCM muito utilizado em aplicações passivas, e ocorre quando materiais que são compactados e revestem o PCM, em formato de cápsula. Este método possui uma classificação adicional, que é o microencapsulamento, conforme segue abaixo esquema de microencapsulamento na Fig. 2.1. Onde segundo Majd, et al., (2024), este processo envolve a criação de minúsculos recipientes chamados microcápsulas, que englobam os materiais em seu núcleo, como partículas sólidas, gotículas de líquido ou bolhas de gás. Essa técnica emprega materiais poliméricos ou copolímeros, designados de materiais de casca orgânica, ou materiais de casca inorgânicos, como silicato, para encapsular o material do núcleo.

Um exemplo de estudo sobre o microencapsulamento se deu por Shi, et al., (2021), inicialmente a parafina foi encapsulada por nanofibrilas de celulosa acetiladas (AcCNF). Posteriormente a parafina e a suspensão do AcCNF em diversas proporções foram agitadas magneticamente a uma taxa de 500 rpm por 20 minutos a 80°C. Estas suspensões coloidais de AcCNF-parafina

apresentaram estabilidade física e térmica excelentes. O calor latente e o calor específico foram ligeiramente inferiores aos do PCM puro, no entanto aumentaram com uma maior proporção de PCM, com maior estabilidade térmica, comprovada por um ponto de degradação mais alto.

Figura 2.1 – Esquema de como ocorre o microencapsulamento de um PCM.



Fonte: Adaptado de Wang et al. (2022)

Outra forma de encapsulamento interessante é o macro encapsulamento, que o material é encapsulado em escala macro. Wang et al., (2022) declaram que esta técnica engloba diversas formas e espaços de operação e inúmeros tipos de macro encapsulamentos. E o foco principal, bem como gargalo, se dá no impedimento de vazamento do PCM durante as mudanças de fase inerentes ao processo de armazenamento de energia, após vários ciclos de aquecimento/resfriamento. Se após testes, este encapsulamento tiver êxito, é uma forma garantida de sustentabilidade e conforto térmico.

Liu et al., (2018) em pesquisa experimental preencheram a lacuna entre duas peças de vidro com PCM com um compartimento do volume de 97%, e os 3% restantes são destinados à expansão de volume no processo de mudança de fase. O objetivo deste experimento era investigar os desempenhos ópticos e térmicos desta unidade envidraçada e aplicar esta tecnologia em edifícios. Este estudo também comparava a aplicação de PCM com a mesma estrutura com ar e como pôde-se observar, este envoltório de vidro, nada mais era do que um macro encapsulamento do PCM.

2.3.3 Sistemas de armazenamento de energia térmica em edifícios

Os sistemas de armazenamento de energia térmica em edifícios visam empregar tecnologia na qual consiga manter a temperatura do ar interno no nível desejado por períodos mais longos, podendo diminuir de forma significativa gastos devido a necessidades energéticas. E isso se tornou essencial, tendo em vista que o resfriamento ou aquecimento de um ambiente com conforto térmico pode apresentar consumos totais de até 60-70% em edifícios em ambientes extremamente quentes como do Irã, Turquia etc., conforme pesquisa de Aghoei et al. (2024 apud OMER, 2006).

Cunha et al., (2023) iniciam o tópico de aplicação de PCM na construção civil com tijolos onde pesquisas numéricas e experimentais comprovaram que a inserção de PCMs em tijolos aumenta a massa térmica e melhora as propriedades térmicas das paredes, garantindo o conforto interno e economizando energia. Abbas et al., (2021) realizaram estudos experimentais e de simulação onde o PCM foi inserido em lacunas de tijolos para utilização em paredes. Neste experimento, foi realizado um teste usando condições naturais ao ar livre, consistindo em dois cômodos idênticos, utilizando tijolos com PCM. Como resultado, demonstrou-se que o emprego dessa tecnologia no clima do Iraque apresentou redução da temperatura ambiente em cerca de 4,7 °C e da flutuação de temperatura em 23,84%, além de aumento do atraso em 2 horas, além disso, o fator de amortecimento foi de 70% em comparação com a parede de referência.

Jia et al., (2021) informaram diversas implicações resultantes do PCM em comparação a materiais isolantes. No estudo uma parede foi fabricada com tijolos sinterizados com lacunas, e como PCM foi utilizada a parafina (em temperatura de 20–30 °C), já para material isolante foi utilizado o poliestireno expandido (isopor). Como resultado desse estudo, houve aumento do tempo de atraso com a utilização do PCM como sendo mais de 7 vezes maior do que comparado no uso de materiais isolantes. Além disso, o PCM reduziu o fluxo máximo de calor em 50%, enquanto o fluxo médio de calor diminuiu significativamente devido aos materiais isolantes.

2.3.3.1 Sistemas Passivos

A tecnologia Thermal Energy Storage - TES é uma forma de aplicação passiva com objetivo de aprovisionar conforto térmico com o mínimo de uso de energia HVAC (aquecimento, ventilação e ar-condicionado). Tal sistema passivo tem como objetivo utilizar fontes de calor naturais com foco em dar estabilidade térmica em edifícios e amortecer a necessidade de dispositivos HVAC (AGHOEI, 2024).

Pesquisadores têm explorado a inserção e aplicabilidade dos PCMs em edifícios, onde essa tecnologia passiva concede vários métodos para integrar este material tanto em materiais de construção de diversas formas como imersão, incorporação direta, encapsulamento, estabilização de forma e microencapsulação (GRACIA e CABEZA, 2015). Mabrouk et al. (2022) apontam que a solidificação incompleta dos materiais de mudança de fase (PCM) durante o período noturno, especialmente em aplicações de resfriamento, representa uma limitação significativa nos sistemas passivos de armazenamento de energia térmica (TES). Essa falha compromete a eficácia do processo de absorção e liberação de calor, reduzindo o desempenho do sistema. Na mesma pesquisa, Mabrouk et al. (2022), descrevem diversas aplicações de resfriamento que integram PCMs, como sistemas solares, resfriamento livre, evaporativo e radiativo, além de sistemas de ar-condicionado e soluções ativas e passivas aplicadas às envoltórias de edificações. Os autores destacam que, além dos critérios de seleção dos PCMs, sua incorporação contribui significativamente para a redução do consumo energético e para a melhoria do conforto térmico, ao minimizar as variações de temperatura. No entanto, também são mencionadas desvantagens, como os baixos coeficientes de transferência de calor por convecção, a necessidade de grandes volumes de PCM, a solidificação incompleta durante a noite e a limitada transferência de calor entre o PCM e o fluido térmico.

Ademais, Wang, et al., (2024) integraram PCM em um projeto de edifícios passivos ao longo do ciclo de vida do edifício objetivando como estratégia central explorar o desenvolvimento de edifícios de escritórios sustentáveis. Essa pesquisa se baseou na construção de escritórios em uma região fria como modelo de construção. Nesses tijolos utilizados na construção, foi inserido PCM em uma camada e foram estudados dois tipos de paredes com material de mudança de fase, na qual foram instaladas na fachada sul. Eles concluíram que a economia de energia das paredes de mudança de fase externas e internas chegaram a 10,5% e 8,3%, respectivamente.

2.3.3.2 Sistemas Ativos

ZHOU et al., (2020) definem sistemas ativos diferenciando-os dos sistemas passivos no sentido de que o ativo utiliza dois dispositivos distintos de frio e de calor para armazenamento, que conseqüentemente inferem ao sistema uma melhor eficácia, uma vez que esses dois sistemas integrados auxiliaram na carga e descarga da energia armazenada dos PCMs.

Sistemas ativos tem como característica um maior controle de parâmetros e com isso uma maior flexibilidade operacional e viabilidade técnico-econômica. Zhou et al., (2020, apud Navarro et al., 2016) em sua revisão sistemática avaliaram inicialmente a inserção de PCM de forma ativa em sistemas térmicos integrados em edificações. De acordo com este estudo, as formas de integração ativa incluem em geral tetos falsos, sistema de ventilação, fachada solar externa, coletores solares térmicos e sistemas fotovoltaicos integrados em edificações.

O uso de sistemas TES ativos na indústria da construção são usados tanto na indústria de construção civil como para aumentar a confiabilidade e o desempenho de tecnologias maduras. Um exemplo adequado se dá pelo uso de bombas de calor TES e esta é reconhecido como uma tecnologia promissora, traduzindo cargas elétricas de ciclos pico-a-pico e, assim, funcionar como um método eficaz de gerenciamento da demanda, ajudando

a maximizar o processo de armazenamento/liberação de calor do PCM e a melhorando ainda mais seu efeito na economia de energia (ZAHIR, 2023).

2.4 MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE (PCM)

Materiais com mudança de fase sólido-líquido com adequação aplicáveis de armazenamento de calor (energia térmica), são comumente chamados de Materiais de Mudança de Fase (do inglês Phase Change Material – PCM). O PCM é uma substância que tem a capacidade de mudar de fase (sólido, líquido e gasoso) a uma determinada temperatura e isso ocorrerá através das oscilações de temperatura, onde o PCM muda de fase ao passo que a temperatura varia. Aplicando-se ao caso do PCM em construções de paredes, este ao iniciar o dia e a temperatura começar a aumentar, então o material irá passar do estado sólido para o estado líquido. Neste processo de mudança de fase ocorrem dois fenômenos de transferência de calor: transferência por calor sensível e por calor latente (LIU et al., 2022). Por este processo ser endotérmico, o calor é então armazenado pelo material.

Ainda com foco no PCM, é importante salientar que o PCM deve ser escolhido mediante a faixa de trabalho deste, uma vez que de acordo com sua capacidade térmica, este poderá ou não atender à demanda no qual será aplicado. Outro fator importante é o material no qual o PCM será envolvido, levando em conta que este pode ser sólido ou líquido a depender da temperatura que este irá operar, pois o maior atributo de aplicação do PCM é a sua grande capacidade de energia térmica (PASARKAR et al., 2022).

2.4.1 Mecanismos e propriedades

O armazenamento de calor sensível é o método mais comum de armazenamento de calor (ΔQ), sendo esse processo expresso pela Eq. 2.1 abaixo:

$$\Delta Q = C \cdot \Delta T = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (2.1)$$

Onde a capacidade de calor C , é dada pela quantidade de material (massa) m , e pelo calor específico c , e ΔT representando a amplitude térmica entre a temperatura final e inicial. Se cada material possui uma capacidade de calor diferente, C , então o calor sensível é influenciado pelas propriedades do material e a temperatura imposta no sistema (MEHILING; CABEZA, 2008).

Para o armazenamento de calor latente no cenário onde se tem sólido-líquido, (Fig. 2.1) este processo ocorre quando há a manutenção da temperatura constante, e é quando durante esse processo que ocorre a mudança de fase do material no qual irá armazenar energia, para o caso do PCM este irá então absorver o excesso de calor e então diminuir a temperatura do ambiente interno da edificação. Ainda observando a Fig. 2.1, onde se tem o aumento da temperatura e com isso o aumento do calor armazenado (calor sensível). Observando-se o caso para o PCM e aplicando-o em edifícios, quando o dia termina e a temperatura cai, o PCM muda de fase e volta para o estado sólido e por ser um processo endotérmico o calor é então dissipado (AL-YASIRI; SZABÓ, 2021).

Figura 2.2 - Regiões de transição térmica do PCM.



Fonte: Adaptado de Isa, Zhao e Yoshino (2010).

O calor de armazenamento associado ao processo de mudança de fase é calculado a partir da diferença de entalpia, ΔH entre a fase sólida e a fase líquida, a pressão constante, dada pela Eq. 2.2 a seguir:

$$\Delta Q = \Delta H.m \quad (2.2)$$

O calor latente, ΔQ , que é o calor armazenado durante o processo de mudança de fase, é então calculado pela diferença de entalpia ΔH , entre a fase sólida e a fase líquida, também chamada de entalpia de fusão ou calor de fusão e pela quantidade de material (massa) m . (MEHLING e CABEZA, 2008).

Conforme Mehling, Brütting e Haussmann (2022) citam em sua pesquisa, para temperaturas fora dessa faixa de mudança de fase, o PCM igualmente irá armazenar energia por calor sensível adicionalmente à energia armazenada por calor latente, conforme observou-se na Fig. 2.1.

2.4.2 Classificação dos PCMs

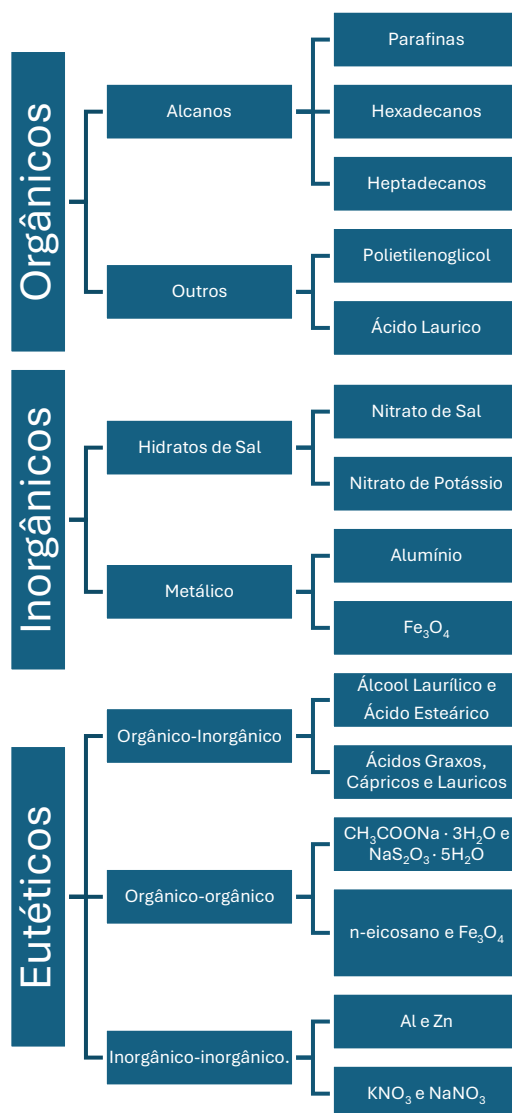
O primeiro pesquisador a categorizar os materiais de mudança de fase (PCM) foi o Abhat (1983), onde este propôs uma divisão dos PCMs a partir da mudança reversível de fase sólido-líquido em três famílias principais: orgânico, inorgânico e eutética. Consequente, os materiais de mudança de fase que foram classificados, de início em três categorias, receberam subdivisões de acordo com estado da matéria do PCM, sendo como sólido, líquido e gasoso (PIELICHOWSKA e PIELICHOWSKI, 2014).

Para este estudo, os materiais de mudança de fase que serão classificados, de início em três categorias, sendo estas baseadas em sua capacidade de transição do estado líquido para o sólido, são: orgânicos, inorgânicos e eutéticos (Fig. 2.3); esta classificação o Wang et al., (2022)

assim como Abhat (1983), pode ser subdividida de acordo com a composição química do PCM, mas com a mesma nomenclatura.

Outro fator importante é de determinar a faixa de trabalho de cada PCM para atender à demanda, levando em consideração sua capacidade térmica e qual material deverá revestir o PCM (encapsulamento). E para além desse aspecto a escolha do PCM deverá ser aplicada não apenas em casos em que se faz necessário a grande capacidade de armazenamento do PCM, mas as faixas de temperatura que este será aplicado, entre outros aspectos adicionais (PASARKAR et al., 2022).

Figura 2.3 - Classificação dos PCMs.

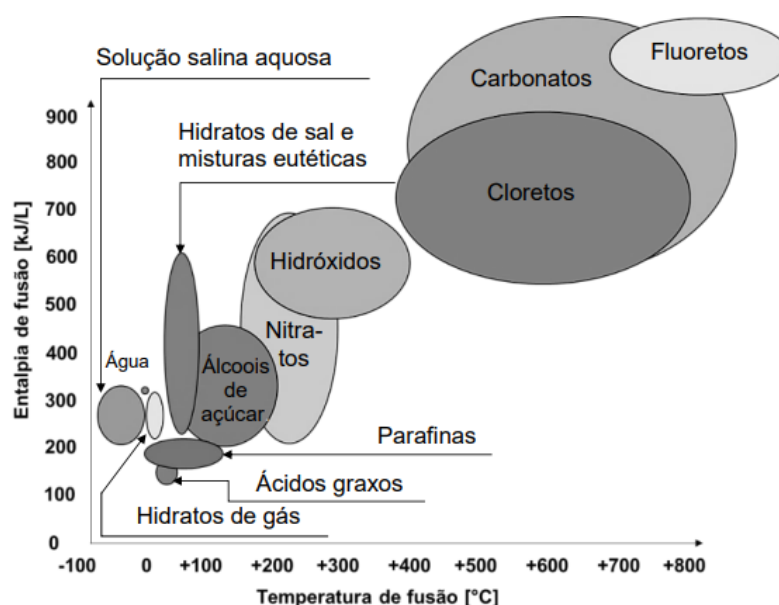


Fonte: Adaptado de Wang et al. (2022).

De acordo com Mehling et al., (2022) os PCMs podem ser vendidos comercialmente a granel em todo o mundo e possuem faixas de temperatura de operação em diversas aplicações, chegando de -50°C a $+90^{\circ}\text{C}$. Especificamente para o caso de aplicação em conforto humano, apenas aqueles com temperatura de mudança de fase próxima à temperatura ($\sim 20^{\circ}\text{C}$), no caso, estes podem ser aplicados em envelopes de edifícios segundo Khudhair e Farid (2004).

Quanto à classificação dos PCMs está demonstrada na Fig. 2.4, onde nesta exibe-se uma relação entre faixas de temperatura e entalpia de fusão de diferentes classes de PCMs que têm essa capacidade, que são fatores determinantes do desempenho térmico de PCMs (BRITO et al., 2017). Mabrouk et al., (2022), destacam de forma mais aprofundada, que PCMs mais adequados para construções são os que apresentam temperatura de fusão estão entre 18 e 40°C , que são: parafinas, ácidos graxos, hidratos de sal e misturas eutéticas, ou seja, os PCM que estão mais à esquerda e na parte com menor entalpia de fusão. Os demais PCMs são utilizados em aplicações que exigem temperaturas e entalpias mais altas de fusão.

Figura 2.4 - Grupos diversos com temperatura e entalpia de fusão.



Fonte: Vieira (2022 apud CABEZA, 2005; MEHLING; CABEZA, 2008).

2.5 DESAFIOS NA APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA

Os PCMs precisam se manter estáveis para que assim seu desempenho seja adequado após vários ciclos de solidificação e fusão com intuito de serem utilizados a longo prazo. Gradualmente, alguns PCMs tem a possibilidade de apresentar degradação no que tange ao desempenho térmico, podendo ainda sofrer separação de fases, diminuindo por consequência sua eficácia. Estes PCMs podem passar pelo processo de encapsulamento o que melhora a estabilidade do ciclo e a resistência a vazamentos (PEREIRA, et al., 2025).

Yang, et al., (2023) relatam que há um impasse para o uso de PCM e isso se dá em decorrência em alterações de seu volume, que ocorre ao longo da mudança de fase durante o processo de fusão, que o material dilata-se e no processo de solidificação este se contrai. E estes comportamentos do PCM devem ser estudados com grande atenção e cuidado, uma vez que pode causar danos na estrutura a ele aplicado, tornando-o inviável, visto que PCMs por exemplo: a água/gelo, podem expandir-se em cerca de 9% ao congelar.

Na aplicação de PCMs na construção precisam ser quimicamente estáveis, atóxicos e não inflamáveis. Adicionalmente, PCMs orgânicos são em geral estáveis e seguros para uso em edifícios além de eletrônicos, exemplos são as parafinas e ácidos graxos. Já os PCMs inorgânicos precisam de cuidados especiais em decorrência ao risco de corrosão ou sub-resfriamento, como os sais e hidratos de sal (WANG, et al., 2022).

Pereira, et al., (2025) acrescentam que essa integração além de desafios em decorrência do vazamento de PCM, precisa-se adequar as seguintes situações:

- A redução da resistência mecânica, uma vez que ao incorporar o PCM, pode ocorrer a redução da resistência estrutural do concreto, especificamente proporções mais altas de PCM;

- A alterabilidade do desempenho térmico, tendo em consideração que a eficácia deste concreto com PCM é diretamente proporcional às condições ambientais.

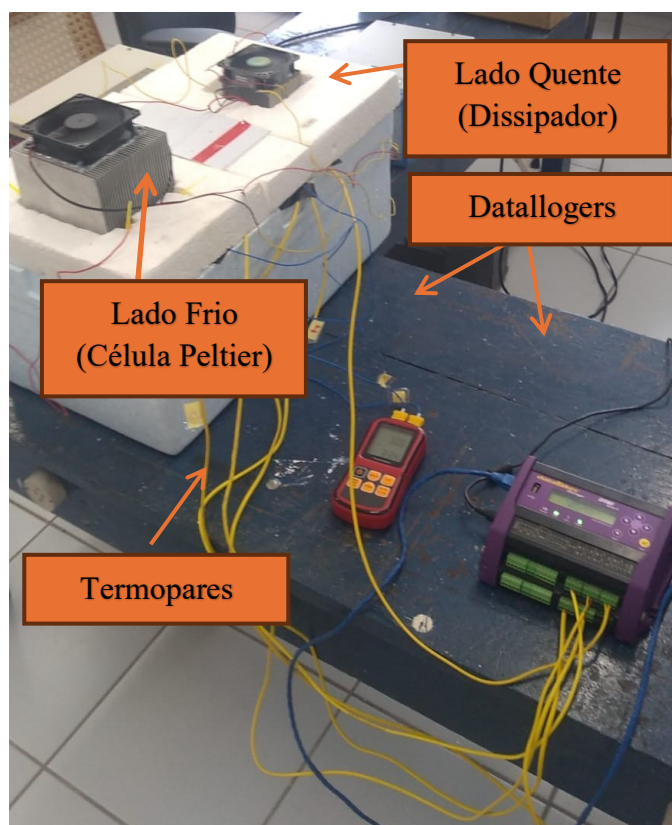
É necessário avaliar a longevidade e padronização, haja visto ainda há uma escassez de métodos que normalizem e avaliem o comportamento no longo prazo desses materiais e suas aplicações nestes casos. O que ratifica que é preciso uma maior quantidade de estudos que abranjam essas estratégias tanto de encapsulamento, como de integração do PCM para então garantir um uso mais seguro e com longevidade dos PCMs.

3. ESTUDO EXPERIMENTAL

3.1 MODELO DE BANCADA DO ESTUDO EXPERIMENTAL

A bancada de estudo experimental foi montada de forma a simular a exposição de uma parede de tijolo a diferentes temperaturas como forma de estudar o comportamento do controle de temperaturas em edificações. O processo de transmissão de calor se inicia na parte externa (parte quente) em direção à parte interna como sendo uma sala, a princípio, sem refrigeração e posteriormente com refrigeração.

Figura 3.1 - Parte externa da bancada experimental com células Peltier e dissipadores de calor.



Fonte: Autoria própria.

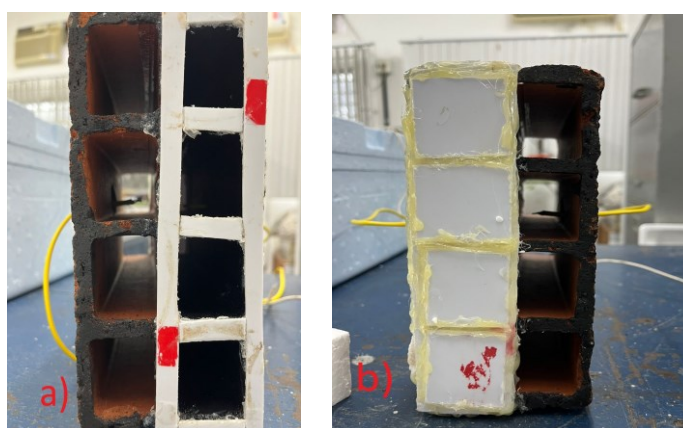
Os experimentos na bancada ocorreram por um período de quatro horas, semelhante ao realizado por Omara et al. (2018). As temperaturas foram

coletadas através de um Datalogger do tipo DT80 (Fig. 3.1), que permitiu registrar os valores de temperatura a cada 5 segundos.

Para a construção da bancada foi utilizado um recipiente retangular de isopor (Fig. 3.1), o tijolo que foi inserido dentro deste recipiente é um tijolo do tipo convencional contendo oito furos. Dentro desse recipiente de isopor, tem-se duas partes cúbicas idênticas que simulam os ambientes interno (lado frio) e externo (lado quente), e uma estrutura central permite acomodar o tijolo. A temperatura no lado frio é controlada mediante uma placa Peltier e acoplada a esta um dissipador de calor. Para atender as condições de temperatura do lado quente foi utilizada uma combinação de duas placas Peltier e uma resistência elétrica. Um dissipador de calor dentro da cavidade quente permite homogeneizar a temperatura no ambiente.

Uma tampa de isopor permite isolar termicamente a configuração e, portanto, ter maior controle das condições de temperatura (Fig. 3.1). Inicialmente de forma similar ao ambiente quente, um ventilador foi instalado no ambiente de menor temperatura, com objetivo de homogeneizar a temperatura no ambiente do lado frio. No entanto, este foi desligado devido ao calor gerado pelo acionamento deste equipamento.

Figura 3.2 a) e b) - Tijolo utilizado na bancada experimental e detalhes construtivos.



Fonte: Autoria própria.

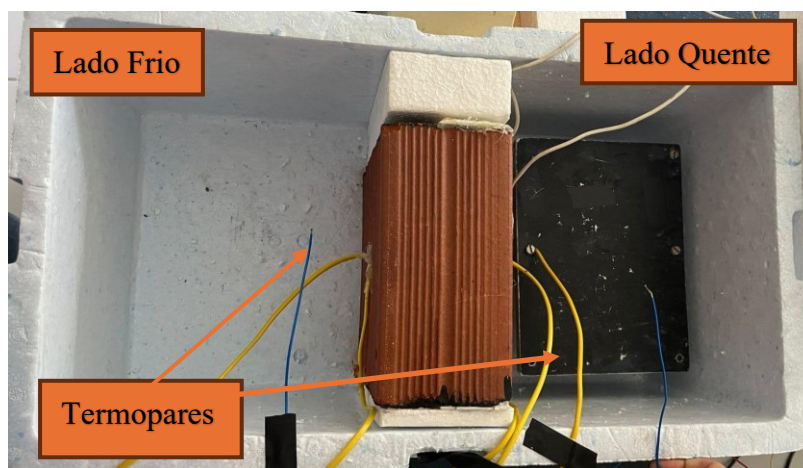
Este tijolo foi impermeabilizado internamente para encapsular de maneira macro o PCM, como forma evitar vazamentos do PCM ou infiltração deste nas paredes do tijolo. Outro fator importante é que também se tampou a lateral do

tijolo, onde estão as lacunas, como forma a conter quaisquer vazamentos do material de mudança de fase, como se observa nas Fig. 3.2 a) e 3.2 b).

Na Figura 3.3, conforme já comentado acima, o espaço à esquerda do tijolo representa o ambiente interno (lado frio), onde serão registradas as temperaturas internas sem e com o uso do PCM e desta forma, será possível definir as condições mais próximas ao conforto térmico.

Para medição das temperaturas foram utilizados termopares tipo K, colocados nas superfícies externas do tijolo, e nos espaços internos, primeiro sem PCM e posteriormente com uma fileira preenchida com o material de mudança de fase. Dois termopares adicionais são utilizados para registrar a temperatura dos ambientes, quente e frio, respectivamente (Fig. 3.3).

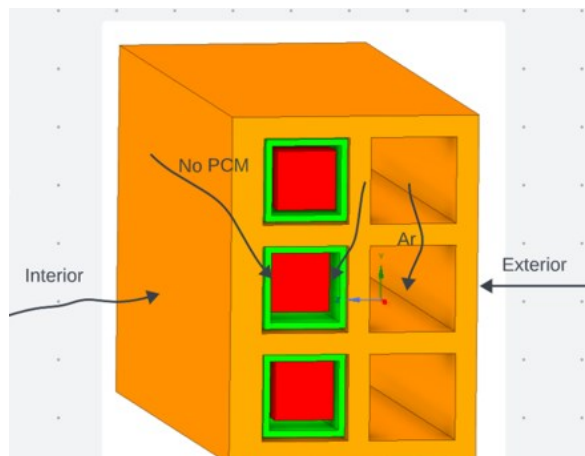
Figura 3.3 - Parte interna da bancada, representando o lado interno da parede e o lado externo.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 3.4, representa a disposição dos sensores de temperatura (termopares) nas partes internas e externas do tijolo. Onde serão registradas as temperaturas nas paredes externas do tijolo, bem como na região interna, esta última com um sensor na lacuna com PCM e outro na lacuna sem PCM. Além disso, têm-se a demonstração do envelopamento do PCM.

Figura 3.4 - Representação da disposição dos termopares no tijolo.



Fonte: Autoria própria.

O Material de mudança de fase utilizado neste estudo será o PCM orgânico polietilenoglicol 2000 - PEG 2000. Omara et al., (2018), destacam o polietilenoglicol 2000 - PEG 2000 em seu estudo como um material de propriedades adequadas para conforto térmico em edificações. Sponseller e Blaisten-Barojas (2021) afirmam em sua pesquisa o PEG 2000 como um polímero com as seguintes características: alta capacidade de armazenamento térmico durante processos de mudança de fase, temperatura de mudança de fase adequada para as temperaturas em climas quentes (temperatura de fusão entre $27,4^{\circ}\text{C}$), calor latente de fusão de $226,9 \text{ J/g}$, além de baixo custo e disponibilidade no mercado. Para este experimento o total de PCM inserido no estado líquido, em uma fileira de lacunas do tijolo foi de aproximadamente 1kg.

Os termopares foram previamente calibrados em forno de calibração ECIL BAT, que apresenta uma faixa de operação de -50°C a 1200°C . A calibração foi realizada em uma faixa de temperaturas compreendidas entre 5°C e 45°C , com incremento de 5°C e 5 minutos de medição para cada temperatura, período suficiente para estabilização e regulação da temperatura no forno. Devido à existência de outliers foi registrada a média de cada temperatura selecionada.

3.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nas próximas linhas desta pesquisa será apresentado os resultados e análise do comportamento térmico de edificações do estudo de caso aplicado em uma parede de tijolo. Este caso está aplicado para temperaturas mais especificamente em Recife-PE. Esta parede de tijolo situando-se em um ambiente naturalmente ventilado, testado aplicado sob temperaturas próximas a da realidade da região por um período de 6 horas.

Tabela 3.1. Temperaturas finais obtidas para cada experimento.

Descrição da Temperatura	Temp_ext _Q	Temp_int_ Q	Temp_int_ F	Temp_ext _F	
Referência	Temperat ura externa da parede externa do tijolo do lado quente	Temperat ura interna da lacuna do tijolo do lado quente	Temperat ura interna da lacuna do tijolo do lado frio	Temperat ura do tijolo do lado que represent a o lado frio	Diferenç a de Tempera turas (externa e interna ao tijolo)
Máximas temperaturas obtidas Experimento sem PCM sem Resfriamento	56,9°C	51,69°C	43,52°C	41,36°C	15,54°
Médias de temperaturas obtidas Experimento sem PCM com Resfriamento	55,59°C	49,87°C	40,29°C	38,01°C	17,58°C
Médias de temperaturas obtidas Experimento com PCM sem Resfriamento	56,59°C	45,19°C	42,08°C	39,94°C	16,65°C
Médias de temperaturas obtidas Experimento com PCM com Resfriamento	55,59°C	45,02°C	40,82°C	37,73°C	17,86°C
Médias de temperaturas obtidas Experimento com Tijolo invertido com PCM sem Resfriamento	61,51°C	55,07°C	42,20°C	39,21°C	22,3°C

Fonte: Autoria própria.

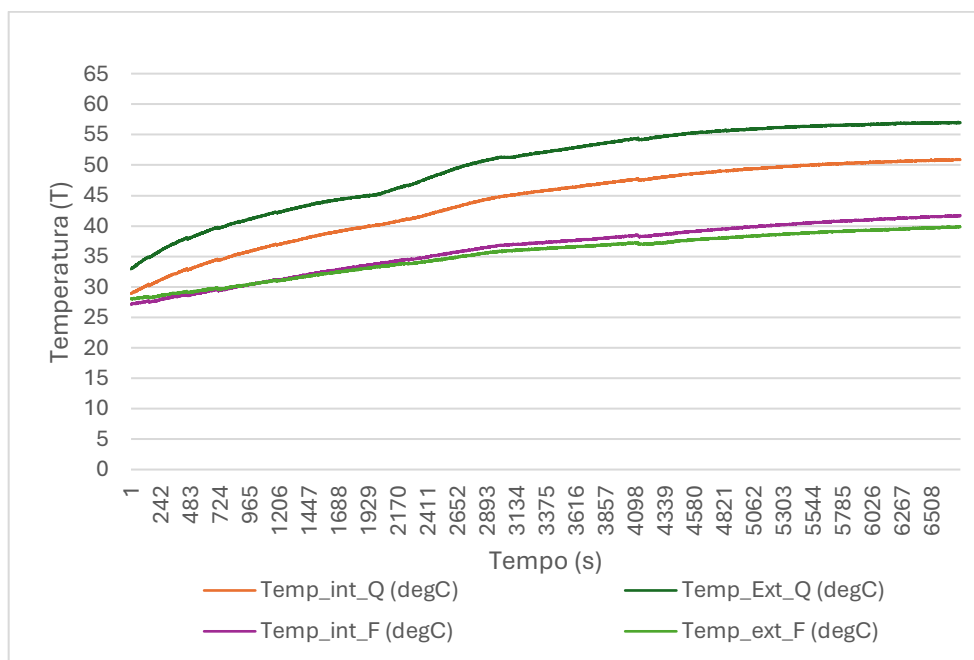
Na análise experimental ocorreu no tijolo submetido em laboratório, onde uma bancada foi construída de forma a isolar este tijolo, não havendo interferência de meios externos e dissipação de calor. Neste tijolo o PCM foi inserido em uma fileira de lacunas do tijolo e assim variou-se os parâmetros, conforme Tabela 3.1, com os resultados obtidos nos experimentos:

- Parede de tijolo sem PCM e sem resfriamento;
- Parede de tijolo sem PCM e com resfriamento;
- Parede de tijolo com PCM e sem resfriamento;
- Parede de tijolo com PCM e com resfriamento;
- Parede de tijolo com PCM invertido na lacuna e sem resfriamento.

3.2.1 Análises experimentais sem PCM e sem resfriamento

Nas medições realizadas na primeira configuração (Fig. 3.5), foi considerado o tijolo sem PCM e sem refrigeração na parte fria.

Figura 3.5 - Temperaturas obtidas em bancada com o tijolo sem PCM nas lacunas e sem resfriamento.



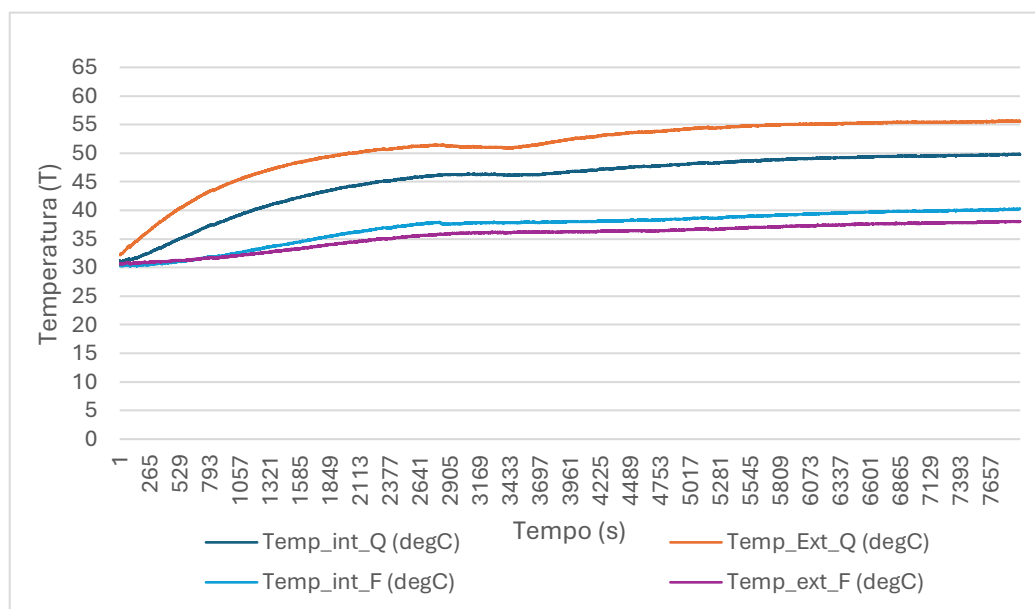
Fonte: Autoria própria.

Para as temperaturas nesse experimento foi então observado um gradiente de temperatura nas superfícies quente e fria do tijolo. Sendo a temperatura do tijolo na parte fria (Temp_ext_F) de 41,36°C (Tabela 3.1), quase 15,54°C inferior à temperatura externa do lado quente do tijolo (Temp_ext_Q). A temperatura na cavidade ao lado do lado quente foi de 51,6°C e a temperatura na cavidade seguinte, a ao lado do lado frio foi de 43,52°C.

3.2.2 Análises experimentais sem PCM e com resfriamento

Medições adicionais foram realizadas na primeira configuração, sem adição de PCM, porém com resfriamento do ambiente. Com isso, observa-se que a refrigeração melhorou e com isso houve um aumento da diferença de temperatura externa para a temperatura interna no tijolo (Fig. 3.6). Observando com maiores detalhes, a temperatura do tijolo na parte fria (Temp_ext_F) chega a aproximadamente 38,01°C (Tabela 3.1), e vê-se uma diferença de temperatura de quase 17,58°C inferior à temperatura externa do lado quente do tijolo (Temp_ext_Q) que foi de 55,59°C.

Figura 3.6 - Temperaturas obtidas em bancada com o tijolo sem PCM nas lacunas e com resfriamento.



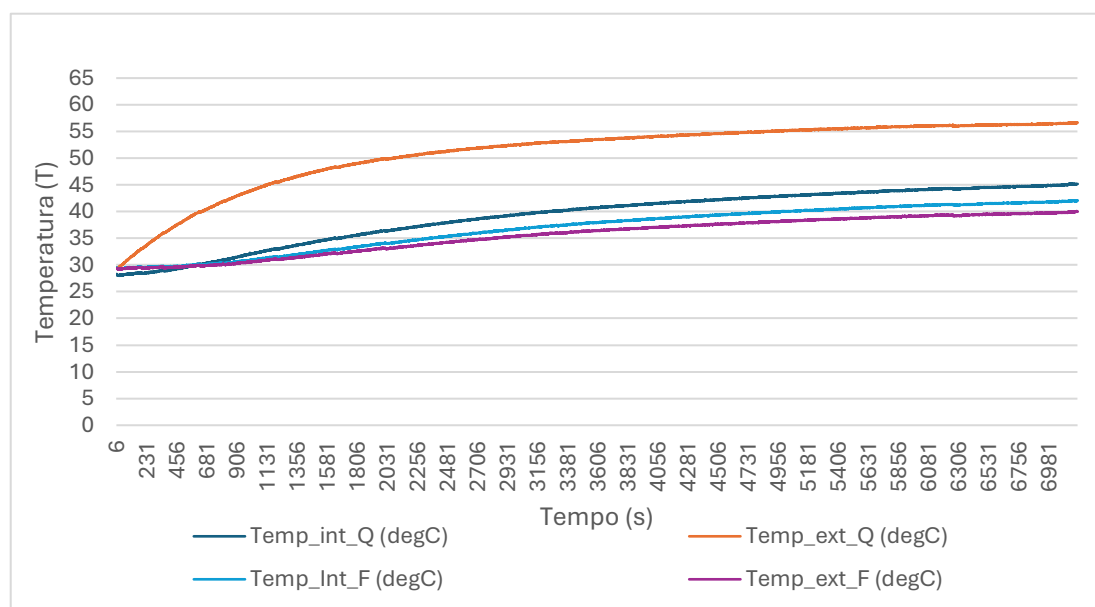
Fonte: Autoria própria.

Consequentemente e comparando estes resultados com a configuração do experimento sem PCM e sem resfriamento foi observada uma redução de $3,35^{\circ}\text{C}$ na temperatura média da temperatura do tijolo do lado frio deste experimento.

3.2.3 Análises experimentais com PCM e sem resfriamento

Para esta terceira configuração de testes experimentais, sendo o PCM posicionado de forma mais próximo ao lado quente (parte com resistências), como é observado na Fig. 3.7, a temperatura externa do tijolo na parte fria, (Temp_ext_F) chega a aproximadamente $39,94^{\circ}\text{C}$ (Tabela 3.1). Vê-se uma diferença de temperatura de $16,65^{\circ}\text{C}$, inferior em relação ao mesmo experimento referente à temperatura externa do lado quente do tijolo (Temp_ext_Q).

Figura 3.7 - Temperaturas obtidas em bancada com o tijolo com PCM nas lacunas e sem resfriamento.



Fonte: Autoria própria.

Com isso, já era de se esperar que a temperatura do lado frio teve uma redução de temperatura menor que o caso anterior sem PCM e com refrigeração, que foi de $17,58^{\circ}\text{C}$. Comparando ao caso do experimento sem

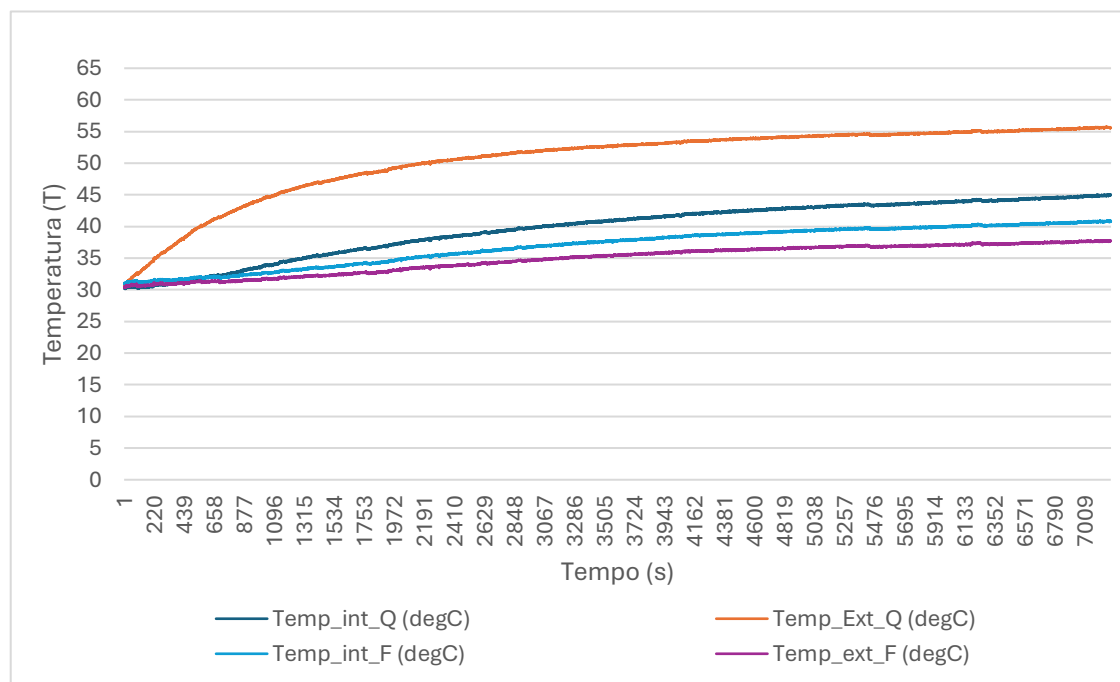
PCM e sem refrigeração, tem-se uma diminuição para $15,54^{\circ}\text{C}$, que foi uma diminuição de $1,11^{\circ}\text{C}$.

3.2.4 Análises experimentais com PCM e com resfriamento

Os resultados das análises experimentais realizadas na segunda configuração, considerando adição de PCM e com resfriamento do ambiente, se apresentam na Fig. 3.8. Onde vê-se que a temperatura externa do tijolo na parte fria, (Tem_ext_F) chega a aproximadamente $37,73^{\circ}\text{C}$ (Tabela 3.1), onde vê-se uma diferença de temperatura de $17,86^{\circ}\text{C}$, em comparação à temperatura externa do lado quente do tijolo (Temp_ext_Q).

Com isso, comparando com o resultado do experimento anterior (com PCM e sem resfriamento) a diferença de temperatura entre o lado quente e o lado frio do tijolo foi de $16,65^{\circ}\text{C}$, ou seja, houve então uma diminuição da temperatura de $1,21^{\circ}\text{C}$.

Figura 3.8 - Temperaturas obtidas em bancada com o tijolo com PCM nas lacunas e com resfriamento.

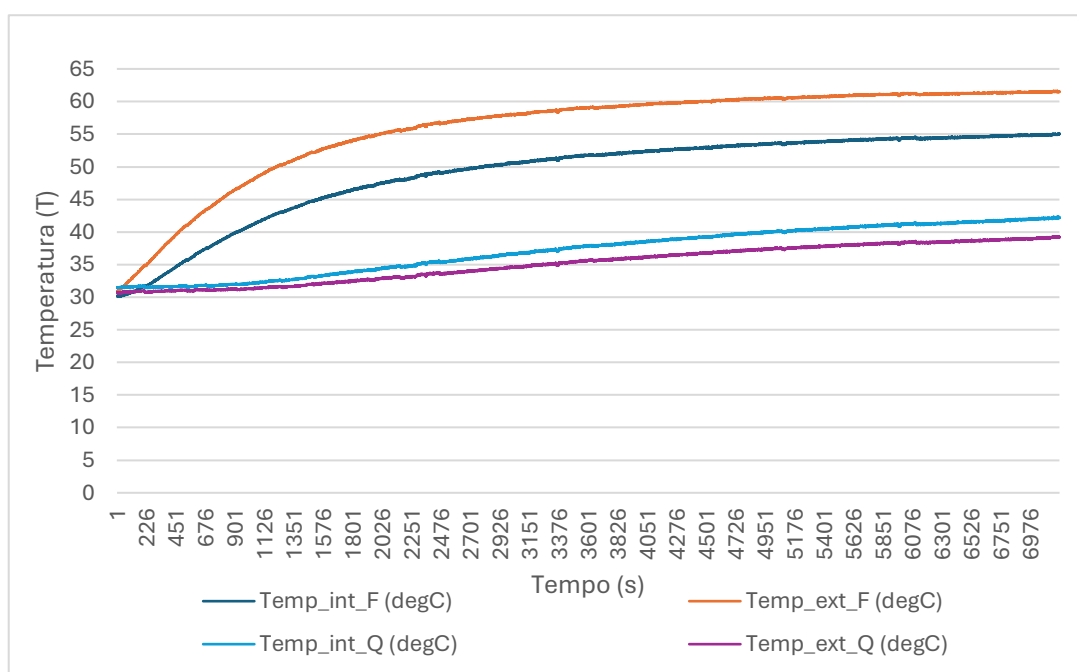


Fonte: Autoria própria.

3.2.5 Análises experimentais com PCM invertido no tijolo e sem resfriamento

Para complementar, realizou-se um outro experimento, baseado no estudo onde o tijolo foi analisado modificando a localização das lacunas preenchidas com este material, tal experimento foi realizado por Hamidi, Malha e Bal (2021), assim como o estudo experimental e numérico em Jia et.al. (2021). Para isto, o mesmo tijolo utilizado nos experimentos anteriores com PCM e sem refrigeração foi invertido na bancada, onde a parte das lacunas sem PCM ficaram mais próxima da resistência (lado quente) e a parte com PCM mais próxima do lado frio. Os resultados obtidos (Figura 3.9) denotam que a temperatura externa do tijolo na parte fria, (Temp_ext_F) chega a aproximadamente 39,21°C (Tabela 3.1), onde vê-se uma diferença de temperatura 22,3°C inferior à temperatura externa do lado quente do tijolo (Temp_ext_Q).

Figura 3.9 - Temperaturas obtidas em bancada com o tijolo com PCM invertido nas lacunas e sem resfriamento.



Fonte: Autoria própria.

Com isso, comparando-se com a diferença de temperatura do experimento similar, sem PCM e sem refrigeração da parte fria foi registrada uma redução na temperatura da superfície fria, inclusive maior, em $5,65^{\circ}\text{C}$ à registrada no tijolo com o PCM e próximo ao ambiente quente.

3.3 CONCLUSÕES PARCIAIS

Como era esperado e estudado nas diversas bibliografias citadas, tanto com os polietilenoglicóis, como com outros tipos de PCMs, o PEG 2000 cumpriu seu papel e diminuiu a temperatura interna do tijolo de forma considerável.

Para os casos do tijolo sem adição de PCM nas lacunas, inicialmente sem resfriamento entre o ambiente quente e o ambiente frio de $15,54^{\circ}\text{C}$, ou seja, apenas a convecção no tijolo já tem um papel importante na diminuição da temperatura e melhora do conforto térmico. Seguindo para o caso do teste realizado sem PCM e com resfriamento, a diminuição de temperaturas entre os ambientes quente e frio foi de $17,58^{\circ}\text{C}$, ou seja, a convecção das cavidades do tijolo teve um auxílio que é o que atualmente utiliza-se e com isso um ganho de $2,04^{\circ}\text{C}$ para o ambiente e com isso uma melhora do conforto térmico.

Conforme observou-se nas diversas configurações, o tijolo sem PCM e sem refrigeração obteve uma redução entre as temperaturas interna e externa do tijolo de $15,54^{\circ}\text{C}$, comparando-se então ao estudo do tijolo com PCM e sem refrigeração, houve uma redução entre as temperaturas interna e externa do tijolo de $16,65^{\circ}\text{C}$, ou seja, para este caso a refrigeração já reduz um valor considerável ao utilizar apenas este recurso.

Já para o caso do experimento do tijolo com PCM e sem refrigeração, comparado ao experimento do tijolo com PCM e com refrigeração, para este caso não houve mudanças na redução de temperatura, havendo uma redução de $17,58^{\circ}\text{C}$ (assim como houve no experimento do tijolo sem PCM e com refrigeração, que foi de $17,86^{\circ}\text{C}$), o que se observa que apenas com o uso do PCM já se descarta o uso de refrigeração e com isso diminui o consumo de energia elétrica.

Como forma de resumir, conforme observou-se para o caso com inserção do PCM, em todos os casos houve uma maior diferença de temperatura, menor temperaturas no ambiente. para o caso de sem PCM e sem resfriamento comparado ao caso de com PCM e sem resfriamento, a diferença de temperatura foi de $1,11^{\circ}\text{C}$ menos. Já para o caso de comparação com inserção do PCM com resfriamento comparando-se com o caso sem PCM e com resfriamento, ocorreu uma diferença de menos $0,28^{\circ}\text{C}$.

Quanto ao experimento adicional, este do tijolo com PCM mas invertido, onde o lado do tijolo com as lacunas preenchidas pelo PCM foi posicionado o lado próximo ao lado frio e com isso houve uma redução de 23°C , ou seja, comparando-se ao experimento com PCM e sem refrigeração, mas com o lado quente mais próximo das lacunas com PCM, houve uma maior redução da temperatura, sendo esta de 5°C , contra os 2°C desta última configuração citada.

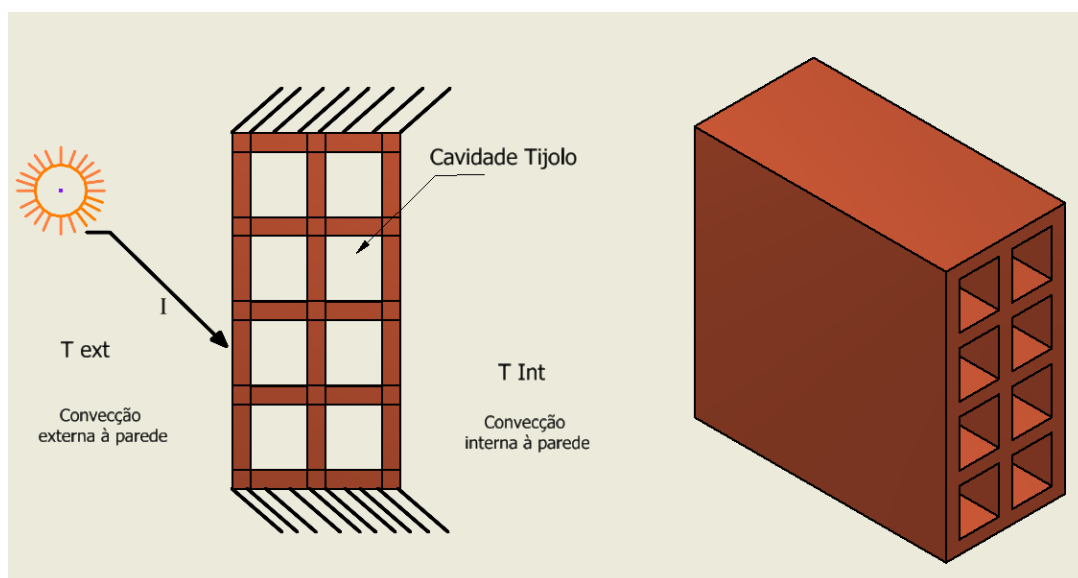
4. MODELAGEM E SIMULAÇÃO NUMÉRICA

4.1 INTRODUÇÃO

No presente capítulo será apresentada a modelagem matemática do problema, com a discretização das equações do modelo matemático para a resolução das equações por procedimentos numéricos e finalmente os resultados das simulações.

Para a formulação deste modelo a equação da energia unidimensional e transiente será a utilizada, considerando-se que a transferência de calor deve-se envolver processos de mudança de fase no interior do domínio quando então tijolo for considerado preenchido com material de mudança de fase. Para os casos em que as cavidades não sejam preenchidas com PCM, estas serão preenchidas com ar e, nesse caso, o modelo considerará o processo de convecção natural na cavidade. Já para o caso das cavidades preenchidas com material isolante, deve-se considerar que o ar está estagnado, então a transferência de calor na cavidade será unicamente por condução.

Figura 4.1 - Modelo esquemático constituído por um tijolo exposto às condições ambientais externa e interna de uma edificação.



Fonte: Autoria própria.

O sistema a ser modelado será um tijolo, que representa uma parede externa, sendo submetido a um ambiente externo com condições climáticas específicas de temperatura ambiente externo, irradiação solar e velocidade de vento local. Com isso, a superfície externa trocará calor com o ambiente por convecção forçada e esta dependerá da velocidade do vento local. Ademais, receberá energia térmica devido a absorção da energia solar em função do coeficiente de absorção. Por sua vez, a superfície da cavidade interna deste tijolo estará submetida às condições convecção natural, assim como ocorrerá nas superfícies internas da edificação. As superfícies superior e inferior do tijolo são consideradas termicamente isoladas. A Fig. 4.1 acima demonstra de forma esquemática o sistema parede externa constituído por um único tijolo.

4.2 MODELAGEM

Para a formulação das equações do modelo matemático será aplicado então um balanço de energia no sistema formado pelo tijolo, considerando-se então uma subdivisão do domínio num conjunto de volumes discretos conforme mostra a Fig. 4.2. Os domínios são finitos e para a aplicação do balanço de energia em cada volume assume-se uma abordagem de análise concentrada.

A seguir, serão apresentadas as formulações para alguns dos volumes típicos de forma a mostrar a metodologia empregada. Para os demais volumes segue-se procedimento semelhante.

Para o volume (1,1) do domínio mostrado na Fig. 4.2, está exposto ao ambiente externo e tem como vizinhos os volumes (1,2) e (2,1) nos quais a troca de calor ocorrerá por condução. É importante frisar que a fronteira superior deste volume é considerada termicamente isolada. A Fig. 4.3 especifica o esquema deste volume com as respectivas resistências térmicas e fluxos de calor presentes. A Equação (4.1) representa o balanço de energia realizado neste volume.

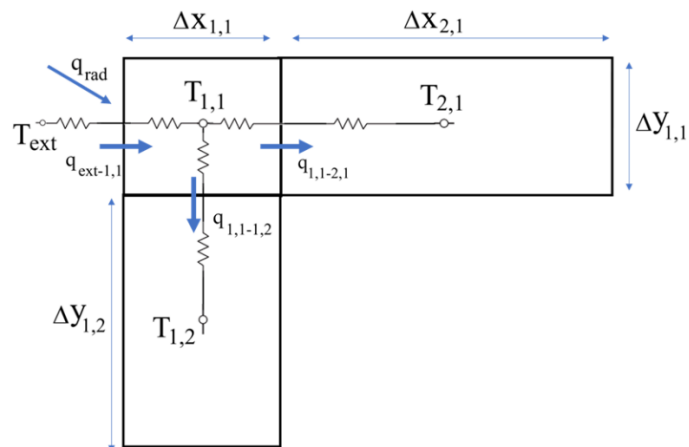
$$(V\rho C_p)_{1,1} \frac{\partial T_{1,1}}{\partial t} = A_{y;1,1} q_{etx-1,1} - A_{x;1,1} q_{1,1-2,1} - A_{y;1,1} q_{1,1-2,1} + A_{y;1,1} q_{rad} \quad (4.1)$$

Figura 4.2 – Domínio discreto para aplicação das equações de balanço de energia.

1,1	2,1	3,1	4,1	5,1
1,2	2,2	3,2	4,2	5,2
1,3	2,3	3,3	4,3	5,3
1,4	2,4	3,4	4,4	5,4
1,5	2,5	3,5	4,5	5,5
1,6	2,6	3,6	4,6	5,6
1,7	2,7	3,7	4,7	5,7
1,8	2,8	3,8	4,8	5,8
1,9	2,9	3,9	4,9	5,9

Fonte: Autoria própria.

Figura 4.3 – Volume elementar (1,1) com as resistências térmicas e fluxos de calor.



Fonte: Autoria própria.

Sendo $A_{y;1,1}$ a área do volume (1,1), $q_{ext-1,1}$, o fluxo de calor que sai da parte externa para o volume (1,1). Considerando que $V_{1,1} = \Delta x_{1,1} \Delta y_{1,1} L$; $A_{x;1,1} = \Delta x_{1,1} L$; $A_{y;1,1} = \Delta y_{1,1} L$, com L sendo a largura do tijolo na direção z do domínio, e incluindo as resistências térmicas, resulta na Equação (4.2).

$$(\rho C_p) \frac{\partial T_{1,1}}{\partial t} = \frac{(T_{ext} - T_{1,1})}{R_{ext-1,1} \cdot \Delta x_{1,1}} - \frac{(T_{1,1} - T_{1,2})}{R_{1,1-1,2} \cdot \Delta y_{1,1}} - \frac{(T_{1,1} - T_{2,1})}{R_{1,1-2,1} \cdot \Delta x_{1,1}} + \frac{\alpha I}{\Delta x_{1,1}} \quad (4.2)$$

$$R_{ext-1,1} = \frac{1}{h_{ext}} + \frac{\Delta x_{1,1}}{2k_{tij}} \quad (4.3)$$

$$R_{1,1-2,1} = \frac{\Delta x_{1,1}}{2k_{tij}} + \frac{\Delta x_{2,1}}{2k_{tij}} \quad (4.4)$$

$$R_{11,12} = \frac{\Delta y_{1,1}}{2k_{tij}} + \frac{\Delta y_{1,2}}{2k_{tij}} \quad (4.5)$$

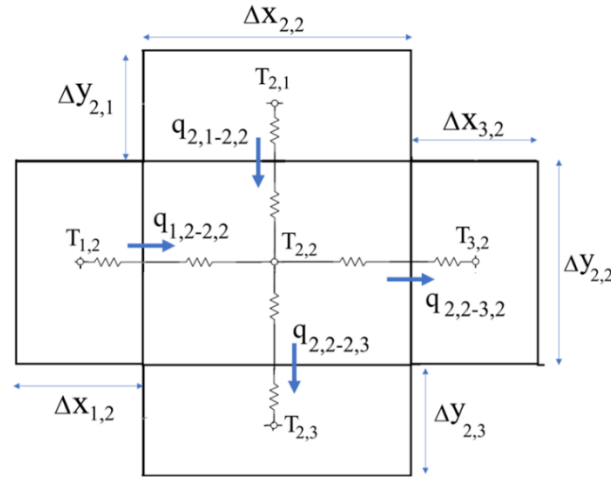
Aproximando-se, o termo diferencial por diferenças finitas com passo de tempo Δt e com isso avaliando-se as temperaturas dos volumes vizinhos no tempo anterior (método explícito) de resolução das equações, a Equação (4.2) transforma-se na Equação (4.6).

$$T_{1,1}^{t+1} = T_{1,1} + \frac{\Delta t}{(\rho C_p)_{tij}} \left[\frac{(T_{ext} - T_{1,1})}{R_{ext-1,1} \cdot \Delta x_{1,1}} - \frac{(T_{1,1} - T_{1,2})}{R_{1,1-1,2} \cdot \Delta y_{1,1}} - \frac{(T_{1,1} - T_{2,1})}{R_{1,1-2,1} \cdot \Delta x_{1,1}} + \frac{\alpha I}{\Delta x_{1,1}} \right] \quad (4.6)$$

Aplicando-se a mesma metodologia ao volume (2,2) conforme esquema da Fig. 4.4. Este volume irá corresponder a uma das cavidades do tijolo e esta cavidade pode ser preenchida com PCM, conforme citado anteriormente, com algum material isolante térmico ou simplesmente conter ar. Para cada uma destas condições a transferência de calor na cavidade deve ser tratada de forma diferente e, do ponto de vista da modelagem, o que irá resultar em expressões distintas para as resistências térmicas. Aplicando-se o balanço de energia, resultará na Equação (4.7).

$$(V\rho C_p)_{2,2} \frac{\partial T_{2,2}}{\partial t} = A_{y;2,2} q_{1,2-2,2} + A_{x;2,2} q_{2,1-2,2} - A_{x;2,2} q_{2,2-3,2} - A_{y;2,2} q_{2,2-3,2} \quad (4.7)$$

Figura 4.4 – Volume elementar (2,2) com as resistências térmicas e fluxos de calor.



Fonte: Autoria própria.

Usando-se a aproximação por diferenças finitas para o gradiente temporal e escrevendo em função das resistências térmica, resultará na Equação (4.8) para o volume (2,2).

$$T_{2,2}^{t+1} = T_{2,2} + \frac{\Delta t}{(\rho C_p)_{cav}} \left[\frac{(T_{1,2} - T_{2,2})}{R_{1,2-2,2} \cdot \Delta x_{2,2}} + \frac{(T_{2,1} - T_{2,2})}{R_{2,1-2,2} \cdot \Delta y_{2,2}} - \frac{(T_{2,2} - T_{3,2})}{R_{2,2-3,2} \cdot \Delta x_{2,2}} - \frac{(T_{2,2} - T_{2,3})}{R_{2,2-2,3} \cdot \Delta y_{2,2}} \right] \quad (4.8)$$

Conforme relatado, as resistências térmicas serão distintas a dependendo das condições de preenchimento da cavidade do tijolo.

4.2.1 Caso 1: Tijolo original com ar nas cavidades

Admitindo-se para este caso que a transferência de calor ocorre por convecção natural na cavidade, com isso, o coeficiente de transferência de calor por convecção será obtido de correlações associadas a esta condição. As resistências térmicas são definidas pelas Equações (4.9) à (4.12) e as propriedades $(\rho C_p)_{cav}$ serão as do ar.

$$R_{1,2-2,2} = \frac{\Delta x_{1,2}}{2k_{tij}} + \frac{1}{h_{cav}} \quad (4.9)$$

$$R_{2,1-2,2} = \frac{\Delta y_{2,1}}{2k_{tij}} + \frac{1}{h_{cav}} \quad (4.10)$$

$$R_{2,2-3,2} = \frac{1}{h_{cav}} + \frac{\Delta x_{3,2}}{2k_{tij}} \quad (4.11)$$

$$R_{2,2-2,3} = \frac{1}{h_{cav}} + \frac{\Delta y_{2,3}}{2k_{tij}} \quad (4.12)$$

4.2.2 Caso 2: Tijolo com as cavidades preenchidas com material isolante térmico

Para este caso, devem substituir-se os termos convectivos das resistências térmicas por termos que considerem a transferência de calor por condução. Os materiais que poderão ser analisados serão: fibra de coco, poliestireno expandido (isopor) ou ar estagnado (tijolo convencional com cavidades). Caso a análise conte com aspectos da cavidade e o gradiente de temperatura entre as paredes desta for favorável à inibição da convecção, ocorrerá então a condição de ar estagnado e a transferência de calor irá ocorrer por condução apenas. As resistências térmicas assumem a forma das Equações (4.13) à (4.16) e as propriedades $(\rho C_p)_{cav}$ serão as do material.

$$R_{1,2-2,2} = \frac{\Delta x_{1,2}}{2k_{tij}} + \frac{\Delta x_{2,2}}{2k_{mat}} \quad (4.13)$$

$$R_{2,1-2,2} = \frac{\Delta y_{2,1}}{2k_{tij}} + \frac{\Delta y_{2,2}}{2k_{mat}} \quad (4.14)$$

$$R_{2,2-3,2} = \frac{\Delta x_{2,2}}{2k_{mat}} + \frac{\Delta x_{3,2}}{2k_{tij}} \quad (4.15)$$

$$R_{2,2-2,3} = \frac{\Delta y_{2,2}}{2k_{mat}} + \frac{\Delta y_{2,3}}{2k_{tij}} \quad (4.16)$$

4.2.3 Caso 3: Tijolo com cavidades preenchidas com (PCM)

Caso a cavidade for preenchida com material de mudança de fase, pode-se assumir os estados líquidos e sólidos durante o processo de transferência de calor. Já se o sistema estiver numa temperatura inicial abaixo da temperatura de mudança de fase do PCM, este estará solidificado na cavidade. À medida que o sistema aquece pela exposição ao ambiente externo onde incide irradiação solar, o material da cavidade alcançará a temperatura de mudança de fase, o que então, iniciará o processo de fusão do PCM, mantendo-se a sua temperatura constante devido ao processo de mudança de fase. Esta condição permanecerá assim até que todo o PCM tenha fundido. Se ocorrer de o aquecimento continuar agregando energia, o PCM na fase líquida irá experimentar com isso, um aumento de temperatura. Assim, o papel do PCM será de controle ou amortecimento do processo de transferência de calor para o interior do ambiente.

Neste caso admite-se que a transferência de calor através da cavidade será sempre por condução independente dos estados sólido e líquido do PCM. Caso o PCM estiver na fase líquida, correntes convectivas poderiam surgir, no entanto, considerando-se as dimensões da cavidade, as propriedades do PCM líquido e estudos da literatura, a desconsideração da convecção resultará numa simplificação consistente.

As resistências térmicas para este caso são dadas pelas Equações (4.17) à (4.20). O sufixo *s* ou *l* nestas equações representa as fases sólida e líquida que deverão ser consideradas de acordo com a temperatura da cavidade durante o aquecimento. Neste caso, as propriedades $(\rho C_p)_{cav}$ serão as do PCM nas condições sólido ou líquido.

$$R_{1,2-2,2} = \frac{\Delta x_{1,2}}{2k_{tij}} + \frac{\Delta x_{2,2}}{2k_{PCM,s/l}} \quad (4.17)$$

$$R_{2,1-2,2} = \frac{\Delta y_{2,1}}{2k_{tij}} + \frac{\Delta y_{2,2}}{2k_{PCM,s/l}} \quad (4.18)$$

$$R_{2,2-3,2} = \frac{\Delta x_{2,2}}{2k_{PCM,s/l}} + \frac{\Delta x_{3,2}}{2k_{tij}} \quad (4.19)$$

$$R_{2,2-2,3} = \frac{\Delta y_{2,2}}{2k_{PCM,s/l}} + \frac{\Delta y_{2,3}}{2k_{tij}} \quad (4.20)$$

Para definir o critério, devem ser usadas as propriedades das fases sólida ou líquida nas equações acima mencionadas, dependendo da temperatura da cavidade (se a cavidade tiver atingido a temperatura de mudança de fase do PCM e iniciado o processo de fusão) e da duração do processo de mudança de fase. Para este caso de controle pode-se realizar através da resolução da Equação (4.21). Partindo desta Equação (4.21), correspondente a um balanço de energia na cavidade onde coexistem as fases sólida e líquidas durante a mudança de fase. Resolvendo-se esta equação pode-se então ser monitorada as frações de massa fundida, $\Delta m(t)$, em cada intervalo de tempo (Δt) e com isto, prever o instante no qual a massa tiver sido completamente fundida. A partir desse momento, devem-se usar as equações considerando as propriedades da fase líquida na cavidade. Nesta equação o termo L é o calor latente e T_{TMF} é a temperatura de mudança de fase do PCM.

$$\frac{(T_{1,2} - T_{TMF})}{R_{1,2-2,2} \cdot \Delta x_{2,2}} + \frac{(T_{2,1} - T_{TMF})}{R_{2,1-2,2} \cdot \Delta y_{2,2}} - \frac{(T_{TMF} - T_{3,2})}{R_{2,2-3,2} \cdot \Delta x_{2,2}} - \frac{(T_{TMF} - T_{2,3})}{R_{2,2-2,3} \cdot \Delta y_{2,2}} = L \frac{\Delta m(t)}{\Delta t} \quad (4.21)$$

Para o caso dos volumes do tijolo que se encontram na superfície que faz fronteira com o ambiente interno, estes devem trocar energia por convecção com este ambiente. Nesse caso, escolhendo um volume que represente a superfície, a equação da representação do volume (5,5) e suas fronteiras será dada pela Equação (4.21) e as Equações (4.21) à (4.24) representam as resistências térmicas para este volume.

$$T_{5,5}^{t+1} = T_{5,5} + \frac{\Delta t}{(\rho C_p)_{tij}} \left[\frac{(T_{4,5} - T_{5,5})}{R_{4,5-5,5} \cdot \Delta x_{5,5}} + \frac{(T_{5,4} - T_{5,5})}{R_{5,4-5,5} \cdot \Delta y_{5,5}} - \frac{(T_{5,5} - T_{5,6})}{R_{5,5-5,6} \cdot \Delta y_{5,5}} - \frac{(T_{5,5} - T_{int})}{R_{5,5-int} \cdot \Delta x_{5,5}} \right] \quad (4.22)$$

$$R_{4,5-5,5} = \frac{\Delta x_{4,5}}{2k_{tij}} + \frac{\Delta x_{5,5}}{2k_{tij}} \quad (4.23)$$

$$R_{5,4-5,5} = \frac{\Delta y_{5,4}}{2k_{tij}} + \frac{\Delta y_{5,5}}{2k_{tij}} \quad (4.24)$$

$$R_{5,5-5,6} = \frac{\Delta y_{5,5}}{2k_{tij}} + \frac{\Delta y_{5,6}}{2k_{tij}} \quad (4.25)$$

$$R_{5,5-int} = \frac{\Delta x_{5,5}}{2k_{tij}} + \frac{1}{h_{int}} \quad (4.26)$$

Estando o volume de fronteira também em contato com a cavidade, deve-se levar em conta qual será o tipo de material de preenchimento da cavidade. Isto vale também para os volumes do domínio que se encontram na fronteira externa do tijolo.

4.3 COEFICIENTES CONVECTIVOS

4.3.1 Convecção Natural em cavidades

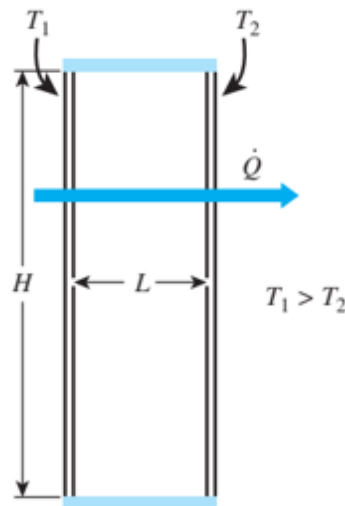
A transferência de calor em espaços fechados é destaque por haver interesse devido sua aplicação prática, no entanto há uma certa complexidade, devido o fluido nesse espaço fechado não ficar parado. Para o caso de um ambiente fechado vertical, o fluido adjacente à superfície mais quente sobe e o fluido adjacente à superfície mais fria desce e com isso, ocorre um ciclo, o que melhora a transferência de calor dentro deste espaço fechado (ÇENGEL e GHAJAR, 2013).

O número de Rayleigh para espaços fechados pode ser encontrado através da Equação 4.27 abaixo. Sendo o L_c o comprimento característico, que é a distância entre as superfícies verticais, quente e fria; T_1 e T_2 são as temperaturas quente e fria das superfícies, respectivamente. E todas as temperaturas devem ser avaliadas sob a temperatura média do fluido, ou seja $T_{méd} = (T_1 + T_2)/2$.

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_1 - T_2)L_c^3}{\nu^2} Pr \quad (4.27)$$

As medidas da cavidade do tijolo utilizado no estudo medem: 0,035m x 0,03m de comprimento e largura, respectivamente, caracterizando uma superfície retangular. Com isso, faz-se necessário o estudo específico de cavidades retangulares. Então, ainda mediante Çengel e Ghajar (2013) para este caso são utilizadas as Eq. 4.28 a 4.29 a seguir e conforme a Fig. 4.5.

Figura 4.5 - Cavidade fechada retangular com superfícies verticais isotérmicas.



Fonte: (ÇENGEL e GHAJAR, 2013).

$$Nu = 0,18 \left(\frac{Pr}{0,2 + Pr} Ra_L \right)^{0,29} \quad \begin{array}{l} 1 < H/L < 2 \\ \text{Qualquer Número de} \\ \text{Prandtl} \end{array} \quad (4.28)$$

$$\frac{Ra_L Pr}{0,2 + Pr} > 10^3$$

$$Nu = 0,22 \left(\frac{Pr}{0,2 + Pr} Ra_L \right)^{0,28} \left(\frac{H}{L} \right)^{-1/4} \quad \begin{array}{l} 2 < H/L < 10 \\ \text{Qualquer Número de} \\ \text{Prandtl} \end{array} \quad (4.29)$$

$$Ra_L < 10^{10}$$

4.3.2 Convecção Sobre Superfícies Verticais em Edifícios

O estudo de superfícies verticais considerando a convecção natural será da seguinte forma: apenas a convecção decorrente de um ar parado ao redor de sua superfície sem estar sob influência de agentes externos como vento e outras intempéries decorrentes da exposição destas (parede interna da edificação e cavidade do tijolo). Devido isto, faz-se necessário um estudo mais aprofundado da convecção como um todo. Já no que tange à convecção decorrente de outros agentes, o coeficiente de transferência de calor em superfícies externas a edifícios é essencial também para aplicações energéticas de edificações. (BLOCKEN, et al., 2009, apud MIRSADEGHI, et al., 2013).

4.3.2.1 Convecção para paredes externas – Convecção em superfícies verticais segundo Modelo McAdams

Existem diferentes métodos de se obter o $h_{c,ext}$, que podem se categorizar como métodos empíricos e analíticos numéricos, além dos experimentais. Uma correlação importante e estudada amplamente, é a baseada no estudo do túnel de vento de Jürges (ABUKU; JANSSEN; ROELS, 2009, apud MIRSADEGHI, et al., 2013), utilizando uma placa de cobre quadrada vertical, medindo: $0.5 \times 0.5 \text{ m}^2$, em um fluxo de ar uniforme e paralelo à placa, através do ensinamento do McAdams (1954, apud MIRSADEGHI, et al., 2013), este utiliza a seguinte expressão conforme demonstra a Eq. 4.30:

$$h_{c,ext} = 5.678 \left[m + n \left(\frac{V_f}{0.3048} \right)^p \right] \quad (4.30)$$

Segundo McAdams (1954, apud MIRSADEGHI, et al., 2013), o m e n são parâmetros de rugosidade para superfícies lisas e ásperas, apresentados na

Tabela 01 abaixo. O V_f seria a velocidade do vento em fluxo livre, ou seja, a velocidade do vento longe de qualquer objeto ou limite físico, onde o fluxo não é perturbado, já o termo p será sempre 1, conforme Tabela 4.1. Mirsadeghi, et al. (2013) analisa todos estes parâmetros, e evidencia que não há muita diferença entre eles, no que se refere às superfícies rugosas e lisas. Outro fator que chama atenção está na forma de classificação da superfície sendo rugosa ou lisa. Este modelo também não considera fatores como altura do edifício, orientação da superfície, entre outros. Mas apesar de tantas lacunas este modelo é amplamente utilizado em Simulações de Energia em Edifícios (BES).

Tabela 4.1 – Parâmetros para o Modelo de MacAdams.

Parâmetros para o Modelo de MacAdams	$V_f < 4.88\text{m/s}$ 16ft/s			4.88m/s (16ft/s) $\leq V_f < 30.48\text{m/s}$ (100ft/s)		
	m	n	p	m	n	p
Rugosa	0.99	0.21	1	0	0.50	0.78
Lisa	1.09	0.23	1	0	0.53	0.78

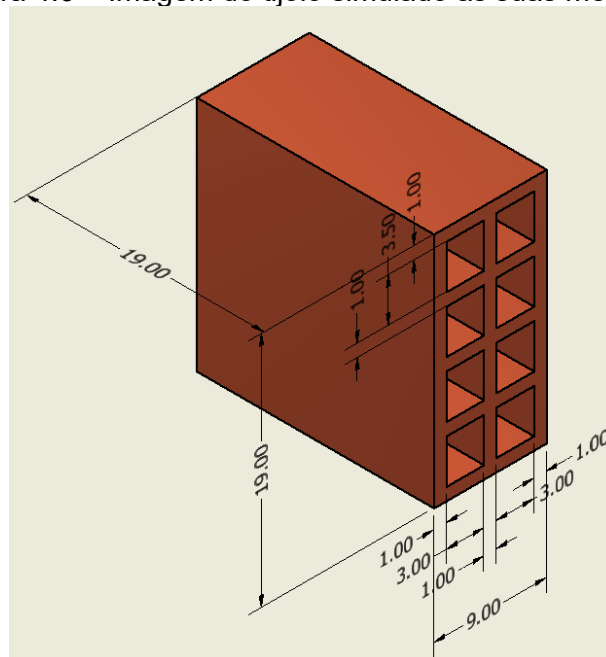
Fonte: Mirsandeghi (2013).

4.4 PARÂMETROS E CONDIÇÕES DE SIMULAÇÃO

O estudo numérico foi direcionado para o sentido de comparar este mesmo tijolo, agora em um ambiente de simulação, onde tendo-se em mãos as propriedades do tijolo, os parâmetros de temperatura incidência de radiação entre outros, pôde-se comparar o uso do PCM e confrontar os testes realizados em bancada, adicionalmente, foram feitos testes com outros materiais com intuito demonstrar que este é um tipo de estudo adequado e pôde-se comparar com outros materiais isolantes e observar o comportamento desse modelo.

O modelo do tijolo será o mesmo utilizado na Fig. 4.2, onde este tijolo estará preenchido (ou não) em suas cavidades com materiais isolantes (fibra de coco e isopor) que serão mencionados mais adiante, segue Figura 4.6 com dimensões utilizadas no tijolo.

Figura 4.6 – Imagem do tijolo simulado as suas medidas.



Fonte: Autoria própria.

Outro parâmetro que se realizou modificações foi na incidência de radiação solar, podendo-se então comparar este mesmo estudo de forma a aplicá-los em diversas regiões do Brasil, sendo a radiação solar de: 200 W/m²; 400 W/m²; 800W/m².

Experimentos serão divididos em três blocos, de forma que os resultados serão avaliados mediante a incidência de radiação em 200W/m², 400W/m² e 800 W/m² no tijolo e conforme Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Descrição dos conjuntos de simulações.

INTENSIDADE DE RADIAÇÃO	BLOCO 1	BLOCO 2	BLOCO 3
<ul style="list-style-type: none"> • 250 W/m² • 400 W/m² • 800W/m² 	<ul style="list-style-type: none"> • Parede do tijolo com ar nas cavidades; • Parede do tijolo com tijolo maciço (sem cavidades). 	<ul style="list-style-type: none"> • Parede do tijolo com fibra de coco nas cavidades; • Parede do tijolo com EPS tipo 7 nas cavidades. 	<ul style="list-style-type: none"> • Parede de tijolo com PCM nas cavidades.

Fonte: Autoria própria.

O tijolo utilizado na simulação computacional é similar ao utilizado no experimento de bancada, este além de ser de argila - as propriedades do tijolo estão descritas na Tabela 4.5 - possui as mesmas medidas do estudado, onde este tem as seguintes medidas respectivamente, de largura, altura e profundidade: 19cm x 9cm x 19cm, conforme descrito na Fig. 4.6. Outro fato importante de se explanar são as medidas das paredes do tijolo, onde, esta tem paredes com espessura de 1cm e as cavidades têm medidas de 3,5cm x 3cm e todas foram necessárias para a simulação da transferência de calor ao longo das paredes do tijolo.

Tabela 4.5 – Parâmetros e condições utilizados na simulação.

Material	Densidade - ρ (kg/m ³)	Condutividade Térmica - k (W/m.K)	Calor específico - C_p (J/kg.K)	Referências
Ar	1,2	0,025	1000	(ÇENGEL e GHAJAR, 2013).
PCM	800	0,2	2000	(LI; CAO; PAN; WANG; LIN, 2021)
Fibra de coco	19,03	0,0780	1809	(ARAÚJO, et al., 2015)
Isopor (EPS7)	32,50	1,160	1394	(NBR 11752, 2016); (NBR 11752, 2016). (BRANDRUP et al., 1999 apud CELLA, 2012);
Tijolo (argila)	1700	0,73	840	(VIJAYAN, et al., 2021)

Fonte: Autor.

As temperaturas utilizadas de forma fixa, onde para a Temperatura externa ao ambiente do tijolo foi de 30°C e a temperatura interna ao tijolo foi de 25°C. O intervalo de tempo utilizado nas simulações foi de um período de 6 horas e o passo de tempo utilizado nas análises foi de 0.25 segundos.

Para as convecções, h_{ext} = Convecção externa = 25W/m².K; h_{int} = Convecção interna = 3W/m².K; e h_{cav} = Convecção na cavidade = 2W/m².K. Estas foram calculadas anteriormente mediante as temperaturas internas e externas, as medidas do tijolo (Fig 4.6) e velocidade do vento ($v=7\text{m/s}$) para a parede externa ao tijolo baseando-se na cidade do Recife-PE (ARAÚJO e BITTENCOUT, 2021). Outro dado importante foi a absorvância do tijolo, que

segundo os estudos de Bonin e Pezzuto (2013) e GOMES, et. al (2022), esta tem um valor de 0,6192.

4.5 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

4.5.1. Resultados da Simulação Numérica – BLOCO 1

Tendo como objetivo com estas simulações ter um ponto de partida para simulações, e comparar o uso do PCM, realizou-se então testes com tijolos comuns conforme (Fig. 4.6), onde suas lacunas foram preenchidas com ar (forma convencional) e outras simulações foram realizadas com o tijolo maciço, preenchido pelo próprio tijolo, variando-se então o índice de radiação para os valores de e conforme descrito na Tabela 4.6 a seguir: 200W/m^2 , 400W/m^2 e 800W/m^2 .

Tabela 4.6 – Temperaturas máximas Bloco 1 das simulações.

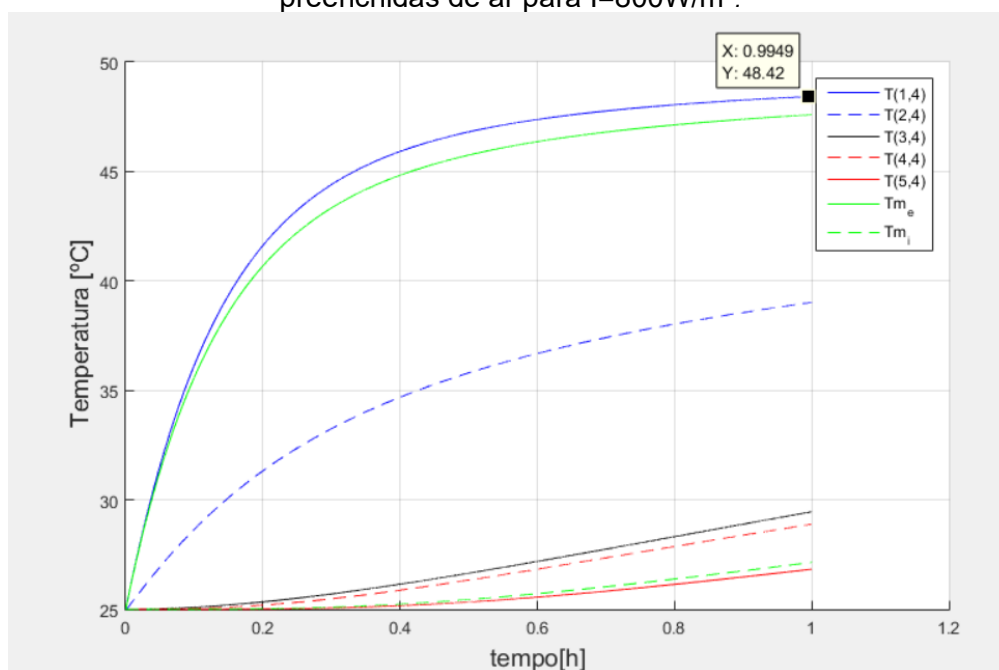
Descrição da Temperatura		T (1,4)	T (2,4)	T (3,4)	T (4,4)	T (5,4)	
Referência	Incidência de Radiação	T parede externa do tijolo do lado quente	T interna da lacuna - 1ª fileira do tijolo	T da parede tijolo central à parede	T interna da lacuna - 2ª fileira do tijolo	T parede do tijolo - lado interno da parede	Diferença entre T (1,4) e T (5,4)
Máximas temperaturas obtidas na simulação do tijolo com ar nas cavidades	I = 800W/m^2	48,43°C	38,99°C	29,43°C	28,88°C	26,82°C	21,61°C
	I = 400W/m^2	38,94°C	33,34°C	27,65°C	27,30°C	26,9°C	12,04°C
	I = 200W/m^2	31,62°C	29,41°C	27,98°C	26,81°C	26,45°C	5,17°C
Máximas temperaturas obtidas na simulação do tijolo maciço (sem cavidades)	I = 800W/m^2	41,87°C	36,27°C	32,59°C	29,64°C	28,68°C	19,19°C
	I = 400W/m^2	35,04°C	31,69°C	29,52°C	27,67°C	27,2°C	7,84°C
	I = 200W/m^2	33,63°C	26,35°C	25,95°C	24,41°C	25,17°C	8,46°C

Fonte: Autoria própria.

4.5.1.1 Análise de simulações computacionais do tijolo preenchido com ar nas cavidades

Os resultados das simulações realizadas para o tijolo preenchido apenas com ar, que é a forma usual das construções, e com incidência de radiação no valor de 800W/m^2 estes apresentaram as seguintes respostas, conforme na Fig. 4.7. Temperaturas máximas na parte externa do tijolo ($T(1,4)$) com valores que se aproximam de 49°C , (Tabela 4.6), onde vê-se uma diferença de temperatura de $21,61^\circ\text{C}$, em comparação à temperatura interna do tijolo ($T(5,4)$).

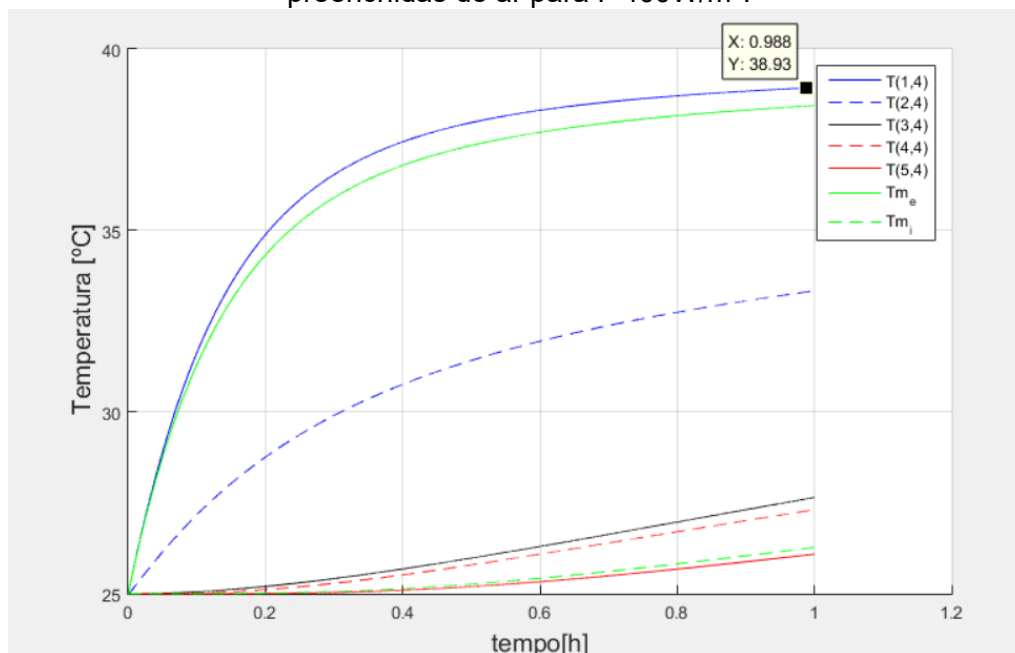
Figura 4.7 – Simulação de transmissão de calor no tijolo com cavidades preenchidas de ar para $I=800\text{W/m}^2$.



Fonte: Autoria própria.

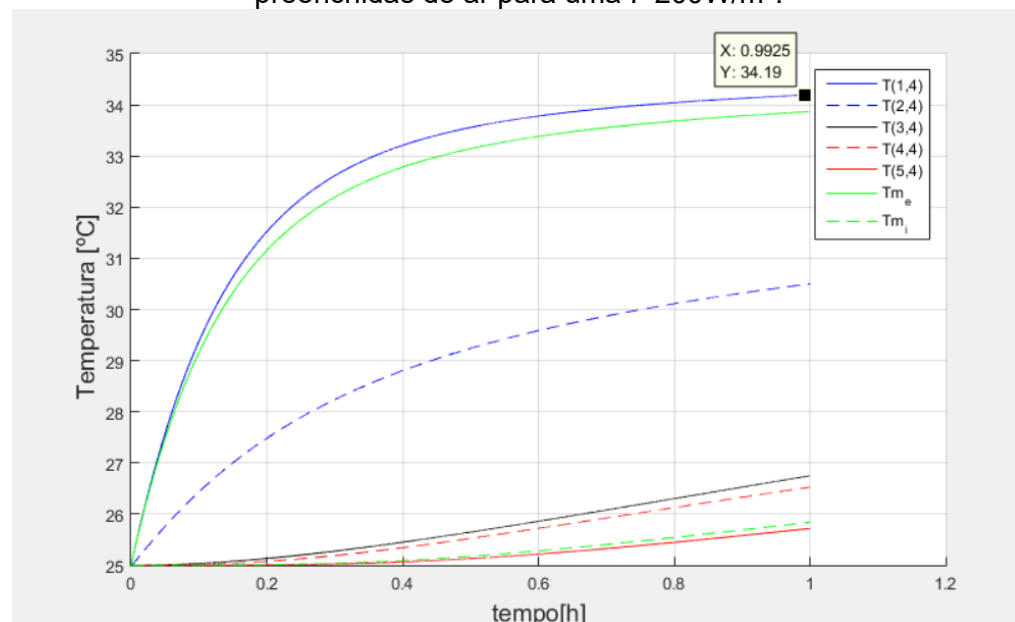
Para a simulação no tijolo com ar nas cavidades e com incidência de radiação de 400W/m^2 , como se observa na Fig. 4.8, a temperatura máxima obtida na parte da parede externa do tijolo ($T(1,4)$) foi de $38,94^\circ\text{C}$ e a temperatura da parede interna ao tijolo ($T(5,4)$) foi de $26,9^\circ\text{C}$, ou seja, uma diferença de $12,04^\circ\text{C}$.

Figura 4.8 – Simulação de transmissão de calor no tijolo com cavidades preenchidas de ar para $I=400\text{W/m}^2$.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4.9 – Simulação de transmissão de calor no tijolo com cavidades preenchidas de ar para uma $I=200\text{W/m}^2$.



Fonte: Autoria própria.

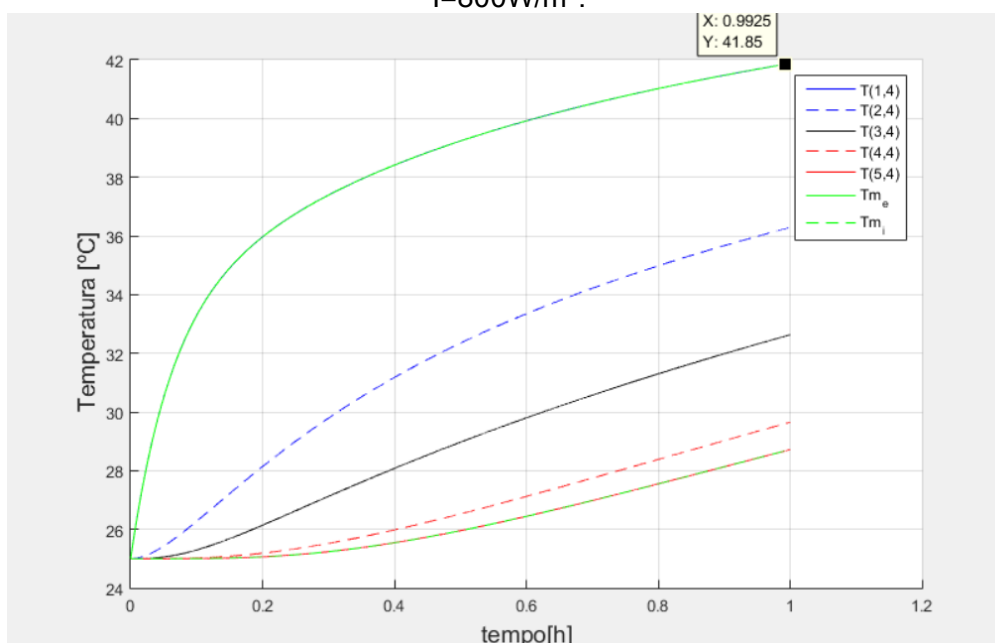
Já para os testes de simulação realizada para este mesmo modelo de tijolo, mas agora com uma incidência de 200W/m^2 , conforme observou-se na Fig. 4.9 estes valores de temperatura máxima na parede externa do tijolo (T

(1,4)), foram de aproximadamente $31,62^{\circ}\text{C}$, prosseguindo a comparação para a parede interna do tijolo ($T(5,4)$), esta temperatura máxima interna foi de $26,45^{\circ}\text{C}$, onde houve uma diferença de temperatura de $5,17^{\circ}\text{C}$.

4.5.1.2 Análise de simulações computacionais do tijolo maciço

Para esta análise, o parâmetro a ser modificado no tijolo, foi o fato deste estar preenchido totalmente, não havendo cavidades neste. Inicialmente e aplicando-se uma incidência de radiação de 800W/m^2 as temperaturas máximas na parte externa do tijolo ($T(1,4)$), conforme Fig. 4.10, tiveram valores de aproximadamente de $41,87^{\circ}\text{C}$, (Tabela 4.6), e a temperatura máxima interna à edificação foi de $28,68^{\circ}\text{C}$, em comparação à temperatura interna ($T(5,4)$), que gerou uma diferença de $13,19^{\circ}\text{C}$ entre os ambientes.

Figura 4.10 – Simulação de transmissão de calor em tijolos maciços para $I=800\text{W/m}^2$.

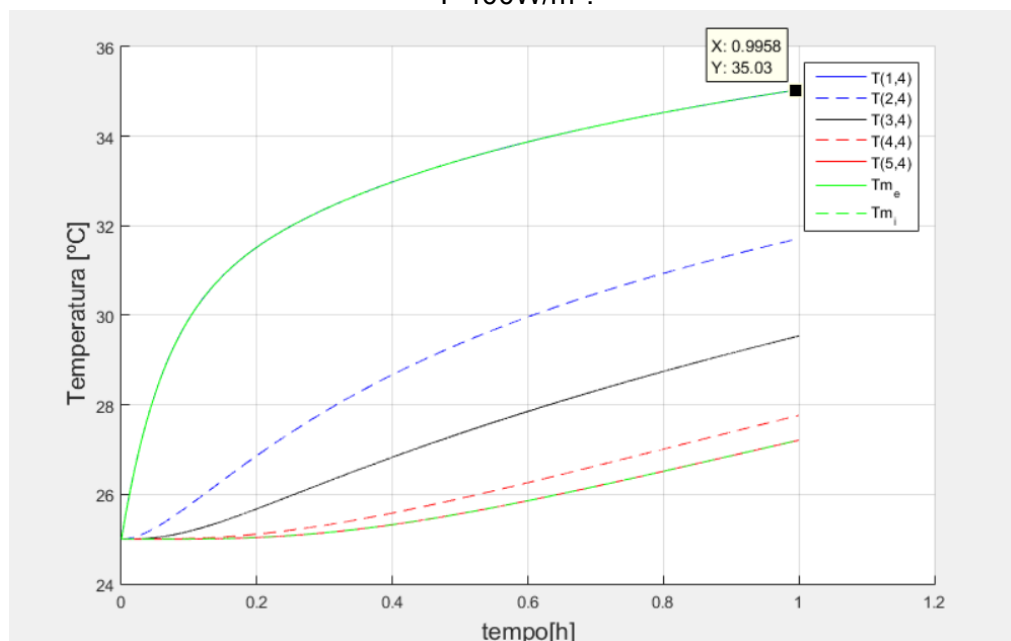


Fonte: Autoria própria.

Em relação à simulação no tijolo sem as cavidades e modificando-se a incidência de radiação para 400W/m^2 , Fig. 4.11, a temperatura máxima obtida na parede externa ($T(1,4)$) foi de $38,94^{\circ}\text{C}$, já a temperatura da parede interna

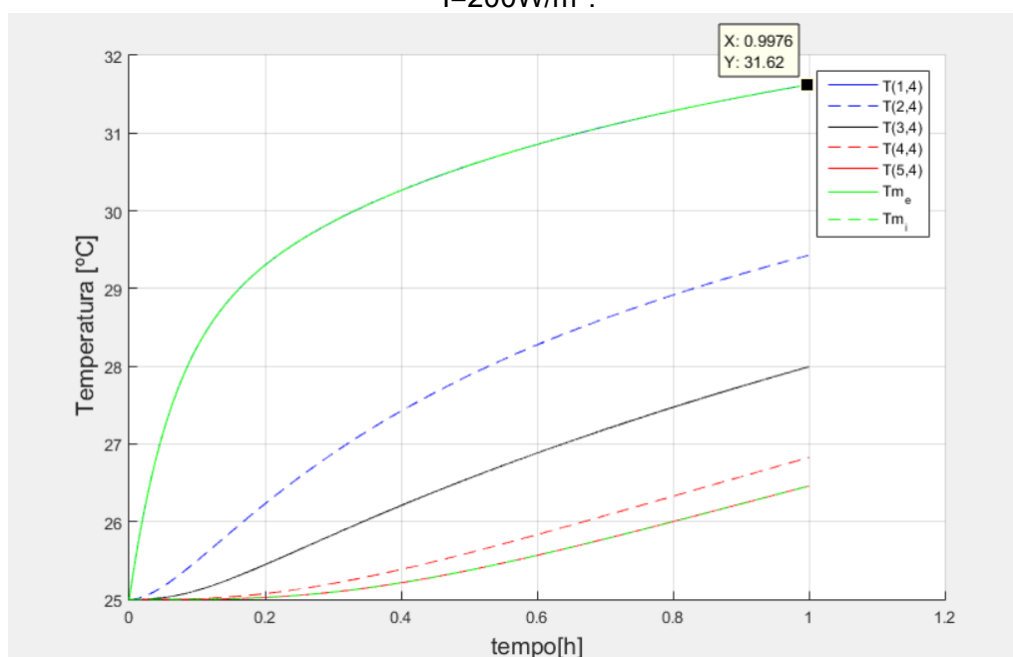
ao tijolo (T (5,4)) foi de 26,9°C, ou seja, uma diferença de temperatura de 12,04°C.

Figura 4.11 – Simulação de transmissão de calor em tijolos maciços para $I=400\text{W/m}^2$.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4.12 – Simulação de transmissão de calor em tijolos maciços para uma $I=200\text{W/m}^2$.



Fonte: Autoria própria.

Adicionalmente, para a simulação realizada no tijolo maciço, agora com uma incidência de 200W/m^2 , conforme Fig. 4.12, estes valores de temperatura máxima na parede externa do tijolo (T (1,4)), foram de aproximadamente $34,19^\circ\text{C}$, comparando-se com a parede interna do tijolo (T (5,4)), esta temperatura máxima interna foi de $25,72^\circ\text{C}$, onde houve uma diferença de temperatura de $8,47^\circ\text{C}$.

4.5.2 Resultados da Simulação Numérica – BLOCO 2

Tendo como objetivo comparar o comportamento da transmissão de calor em ambientes internos de edifícios em termos do PCM, foi então simulado dois tipos de materiais diferentes, a fibra de coco e o isopor. Outro fator no qual variou-se foi o índice de radiação para os valores de: 200W/m^2 , 400W/m^2 e 800W/m^2 .

Tabela 4.7 – Temperaturas máximas Bloco 2 das simulações.

Descrição da Temperatura		T (1,4)	T (2,4)	T (3,4)	T (4,4)	T (5,4)	
Referência	Incidência de Radiação	T parede externa do tijolo do lado quente	T interna da lacuna na 1ª fileira do tijolo	T parede do tijolo central à parede	T interna da lacuna na 2ª fileira do tijolo	T parede do tijolo do lado interno da parede	Diferença de Temperatura T (1,4) e T (5,4)
Máx temperaturas obtidas na simulação - fibra de coco nas cavidades	I = 800W/m^2	$47,02^\circ\text{C}$	$28,45^\circ\text{C}$	$27,45^\circ\text{C}$	$26,04^\circ\text{C}$	$25,43^\circ\text{C}$	$21,59^\circ\text{C}$
	I = 400W/m^2	$38,19^\circ\text{C}$	$26,08^\circ\text{C}$	$26,08^\circ\text{C}$	$25,12^\circ\text{C}$	$25,64^\circ\text{C}$	$12,55^\circ\text{C}$
	I = 200W/m^2	$33,69^\circ\text{C}$	$25,71^\circ\text{C}$	$25,71^\circ\text{C}$	$25,08^\circ\text{C}$	$25,42^\circ\text{C}$	$8,27^\circ\text{C}$
Máx temperaturas obtidas na simulação - EPS tipo 7 nas cavidades	I = 800W/m^2	$47,18^\circ\text{C}$	$26,82^\circ\text{C}$	$26,81^\circ\text{C}$	$25,19^\circ\text{C}$	$26,04^\circ\text{C}$	$21,14^\circ\text{C}$
	I = 400W/m^2	$38,1^\circ\text{C}$	$27,07^\circ\text{C}$	$26,46^\circ\text{C}$	$25,62^\circ\text{C}$	$25,25^\circ\text{C}$	$12,85^\circ\text{C}$
	I = 200W/m^2	$33,63^\circ\text{C}$	$26,35^\circ\text{C}$	$25,95^\circ\text{C}$	$24,41^\circ\text{C}$	$25,17^\circ\text{C}$	$8,46^\circ\text{C}$

Fonte: Autoria própria.

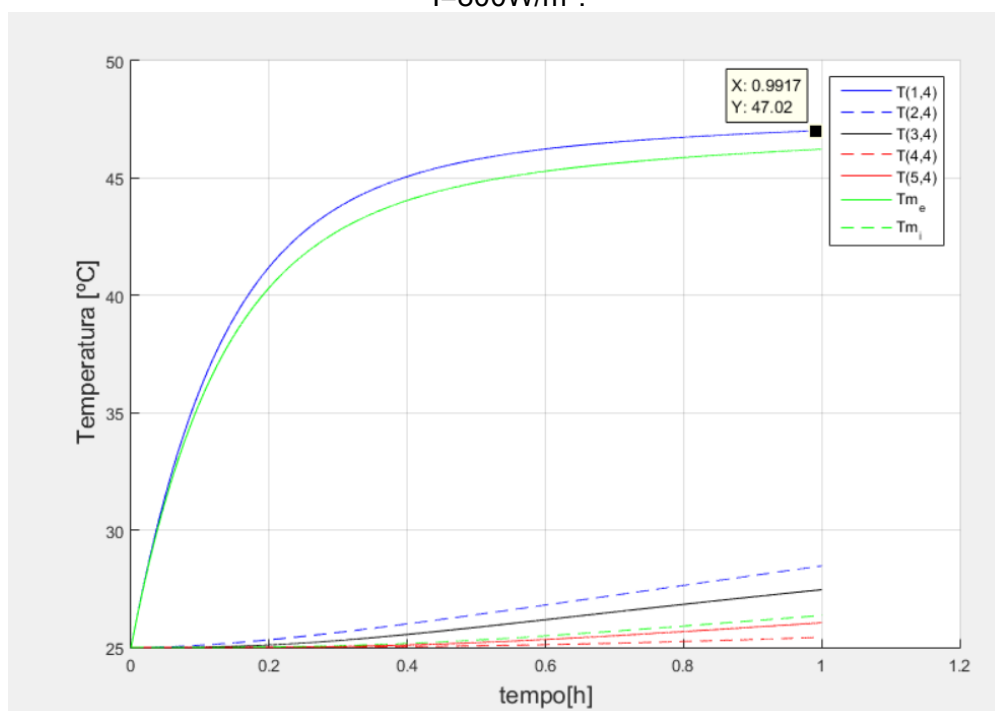
4.5.2.1 Análise de simulações computacionais do tijolo com materiais isolantes nas cavidades

Tendo como objetivo comparar o comportamento da transmissão de calor em ambientes internos de edifícios em termos do PCM, foram simulados dois tipos de materiais diferentes, a fibra de coco, sendo esta de coco e o isopor, onde testou-se o do tipo EPS 7.

Para a análise de simulação com incidência de radiação de 800W/m^2 no tijolo desta vez preenchido com coco, foi uma temperatura máxima na parede externa do tijolo foi de $47,02^\circ\text{C}$ ($T(1,4)$), como pode-se observar na Fig. 4.13 e a parte interna do tijolo, na parte do ambiente a máxima temperatura foi de $25,43^\circ\text{C}$ ($T(5,4)$), havendo então uma diferença de $21,59^\circ\text{C}$.

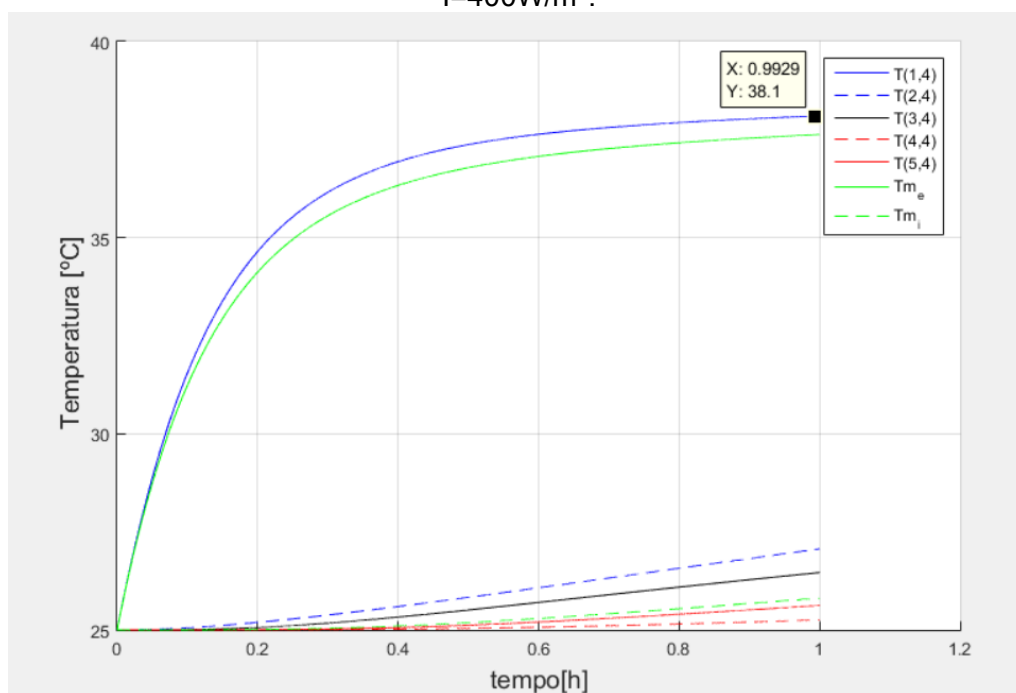
Já para a simulação com incidência de radiação de 400W/m^2 ocorreu temperaturas máximas de $38,1^\circ\text{C}$, na parte da parede externa do tijolo ($T(1,4)$) – Fig. 4.14 e para o caso das máximas temperaturas na parte interna do ambiente desta foi de $25,25^\circ\text{C}$, havendo então a diferença de $12,55^\circ\text{C}$.

Figura 4.13 – Simulação de transmissão de calor em tijolos com fibra de coco para $I=800\text{W/m}^2$.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4.14 – Simulação de transmissão de calor em tijolos com fibra de coco para $I=400\text{W/m}^2$.

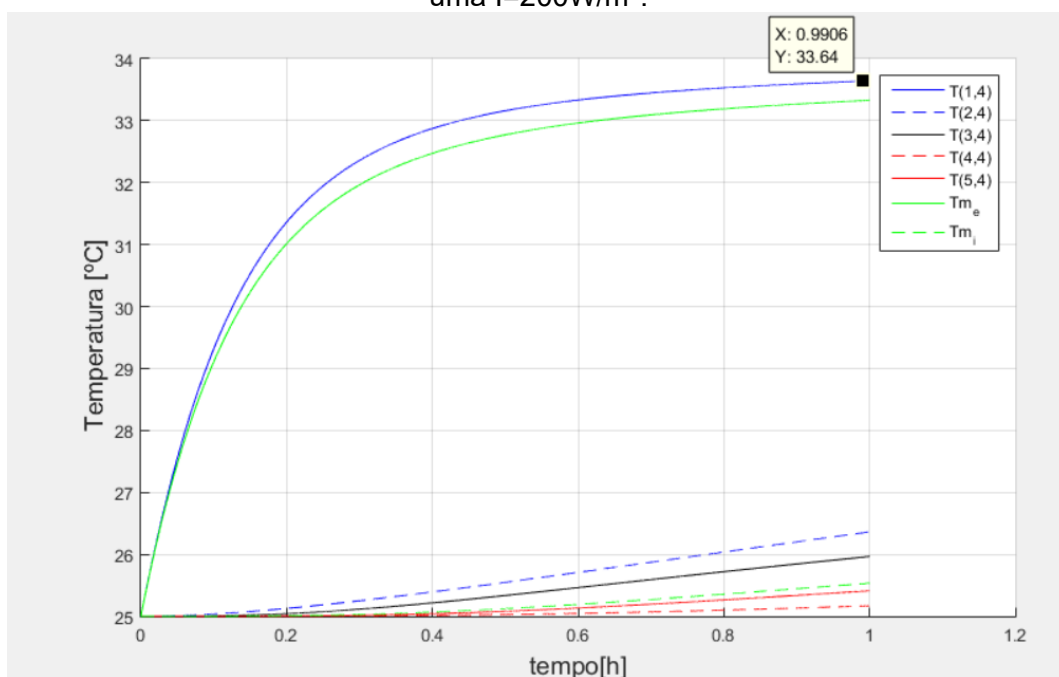


Fonte: Autoria própria.

Findando esta análise, para a simulação com incidência de 200W/m^2 , esta análise descrita na Fig. 4.15, caso as temperaturas máximas, na parte externa ao tijolo, foram de $33,69^\circ\text{C}$ ($T(1,4)$) e a temperatura máxima na parte interna do ambiente foi de $25,17^\circ\text{C}$ ($T(5,4)$), com uma diferença de $8,27^\circ\text{C}$ ao longo das paredes do tijolo.

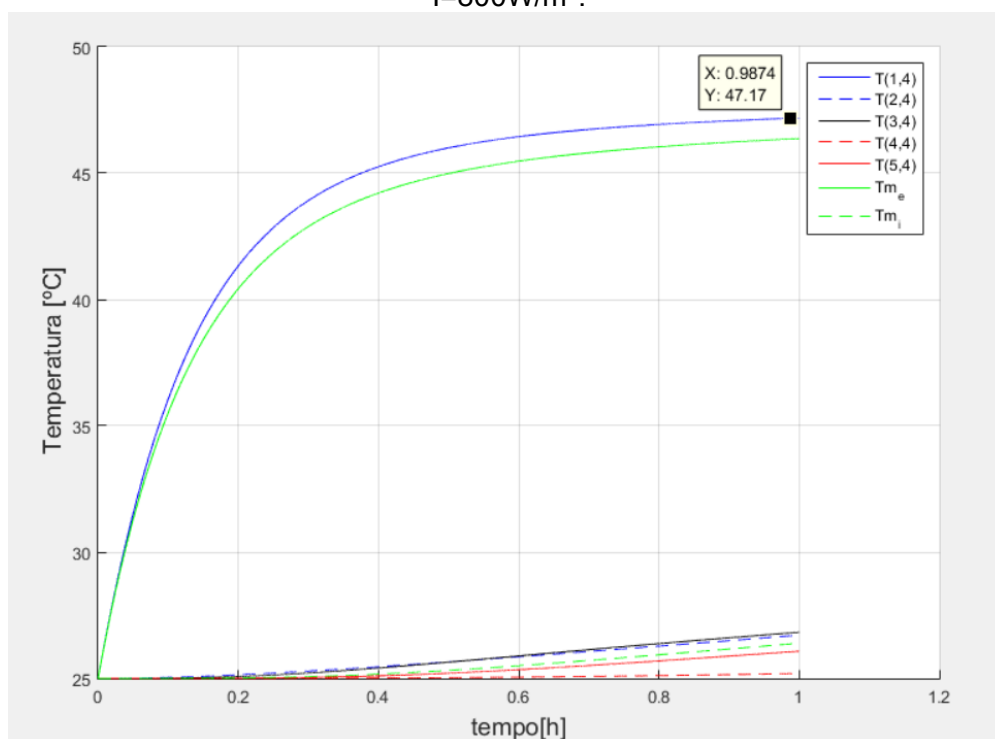
Para o estudo de simulação com maior incidência de radiação de 800W/m^2 no tijolo, informado na Tabela 4.7, onde este tijolo foi preenchido desta vez com isopor EPS 7, a temperatura máxima na parede externa do tijolo foi de $47,18^\circ\text{C}$ ($T(1,4)$), como pode-se observar na Fig. 4.16 e a parte interna do ambiente a máxima temperatura foi de $26,04^\circ\text{C}$ ($T(5,4)$), o que denota então uma diferença entre temperaturas de $21,14^\circ\text{C}$.

Figura 4.15 – Simulação de transmissão de calor em tijolos com fibra de coco para uma $I=200\text{W/m}^2$.



Fonte: Autoria própria.

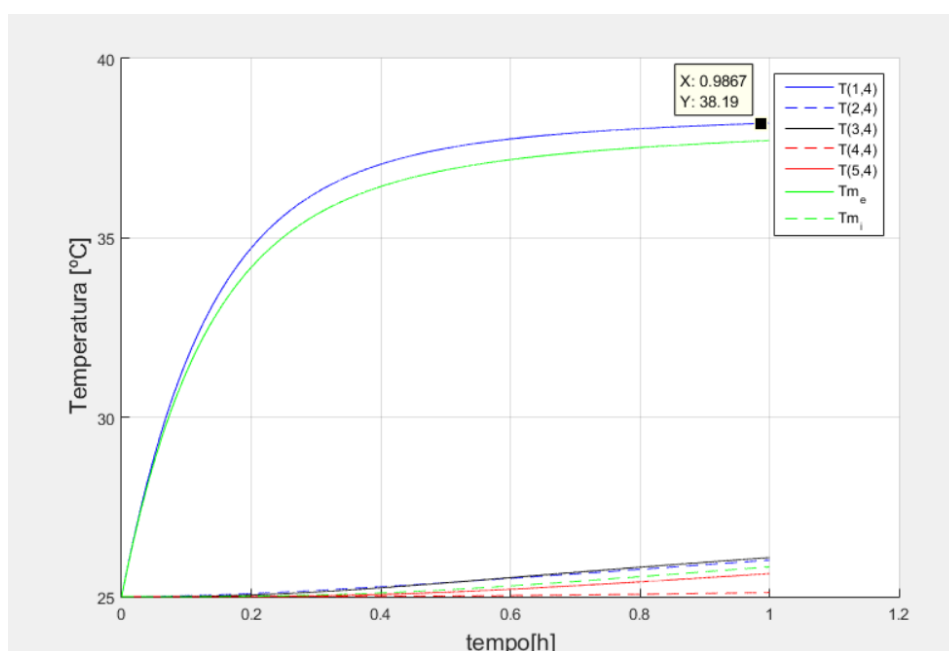
Figura 4.16 – Simulação de transmissão de calor em tijolos com EPS 7 para $I=800\text{W/m}^2$.



Fonte: Autoria própria.

Dando prosseguimento às simulações, conforme apresentou-se na Tabela 4.7, a como pode-se observar na Fig. 4.17 a parte da parede em que há a incidência de 400W/m^2 , no ponto (T (1,4)) esta obteve temperaturas máximas de $38,1^\circ\text{C}$ e a parede interna ao ambiente (T (5,4)) obteve uma temperatura de $25,25^\circ\text{C}$ o que denota uma diferença de temperatura de $12,85^\circ\text{C}$.

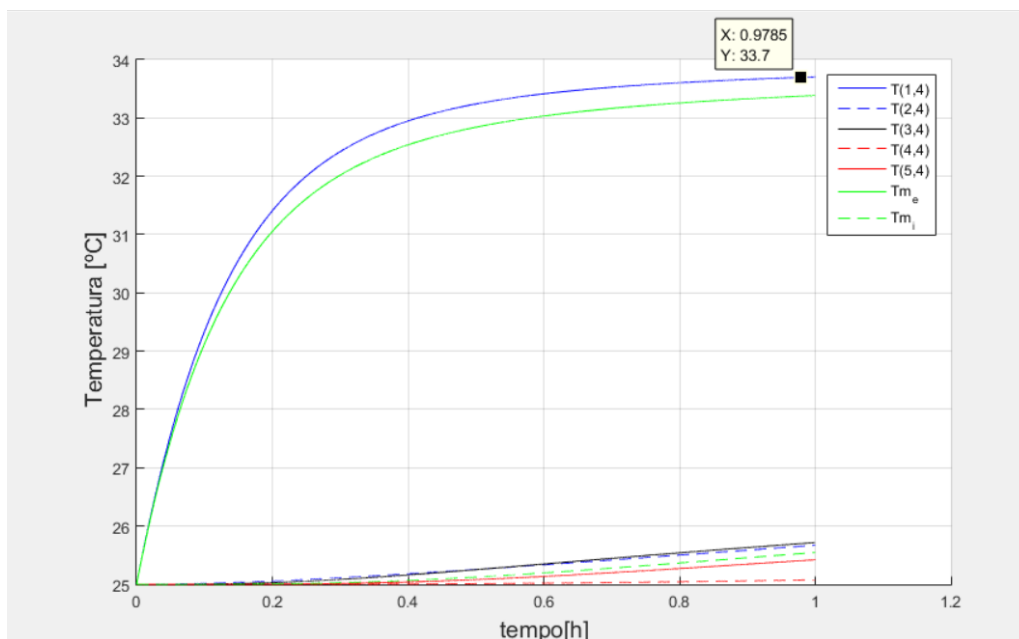
Figura 4.17 – Simulação de transmissão de calor em tijolos com EPS 7 para $I=400\text{W/m}^2$.



Fonte: Autoria própria.

Por último deste bloco de estudo, a simulação do tijolo com EPS nas cavidades e com incidência de 200W/m^2 , este informado na Fig. 4.18, e explicado na Tabela 4.7, as temperaturas máximas na parede (T (1,4)) que incide radiação foi de $33,69^\circ\text{C}$ e a temperatura máxima na parede interna ao tijolo (no ponto T (5,4)) foi de $25,17^\circ\text{C}$, que é uma diferença de temperatura de $8,46^\circ\text{C}$.

Figura 4.18 – Simulação de transmissão de calor em tijolos com EPS 7 para uma $I=200\text{W/m}^2$.



Fonte: Autoria própria.

4.5.3 Resultados da Simulação Numérica – BLOCO 3

Agora, comparando por fim o comportamento da transmissão de calor em ambientes internos de edifícios com o uso PCM como fonte passiva de retirar calor de ambientes internos, foi simulado o tijolo. O PCM utilizado foi hipotético, no qual se adequasse com as temperaturas externa do ambiente, devido a temperatura de mudança de fase e linguagem programação e programa do Matlab®. Na simulação todas as lacunas do tijolo foram preenchidas com o PCM e houve a variação do índice de radiação para os valores de: 200W/m^2 , 400W/m^2 e 800W/m^2 .

4.5.3.1 Análise de Simulação Computacional com Tijolo Preenchido de PCM

Conforme se observa, este estudo por ocorrer em ambiente computacional, precisara-se de uma maior especificidade de parâmetros de

programação para que então este utilizasse a configuração igual ao estudo experimental onde ocorreu apenas uma das fileiras a inserção do PCM e por este motivo o estudo numérico e computacional ocorreu com PCM nas duas as fileiras do tijolo (todas).

Tabela 4.8 – Temperaturas máximas Bloco 3 das simulações.

Descrição da Temperatura		T (1,4)	T (2,4)	T (3,4)	T (4,4)	T (5,4)	
Referência	Incidência de Radiação	Temperatura da parede externa do tijolo do lado quente	Temperatura interna da lacuna na 1ª fileira do tijolo	Temperatura da parede do tijolo central à parede	Temperatura interna da lacuna na 2ª fileira do tijolo	Temperatura da parede do lado interno da parede	Diferença entre T (1,4) e T (5,4)
Máximas temperaturas obtidas na simulação do tijolo PCM nas cavidades	I = 800W/m ²	42,12°C	27,0°C	27,11°C	34°C	26,14°C	15,98°C
	I = 400W/m ²	35,47°C	27,0°C	26,69°C	25,84°C	25,6°C	9,87°C
	I = 200W/m ²	32,15°C	27°C	26,47°C	25,47C	25,45°C	6,7°C

Fonte: Autoria própria.

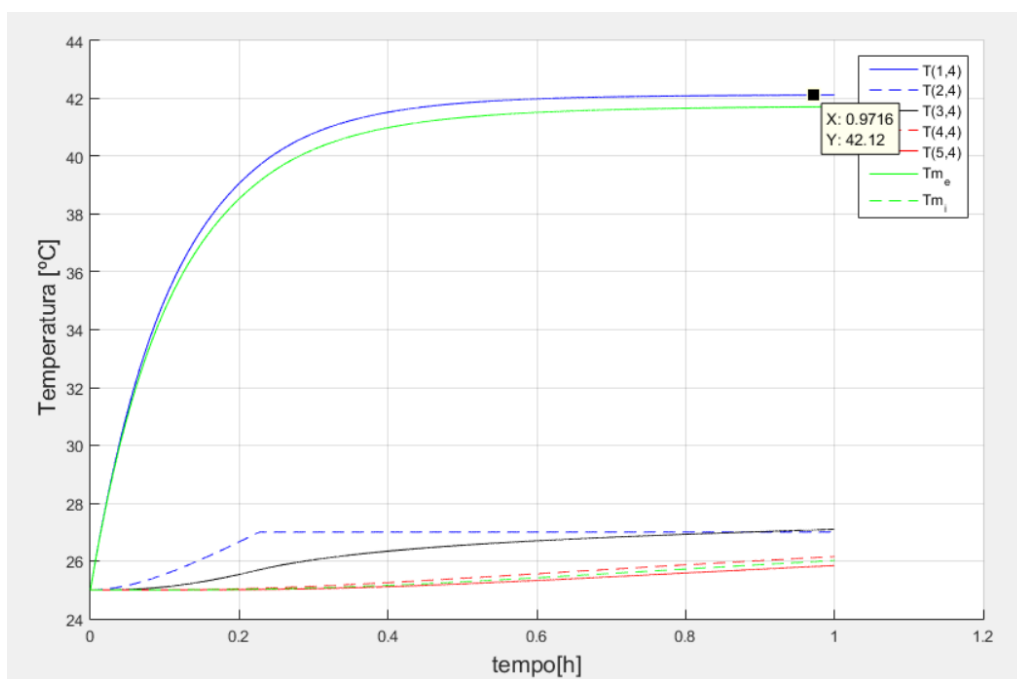
A verificação da simulação com incidência de radiação mais elevada, no valor de 800W/m² no tijolo, no qual foi inserido em suas cavidades o PCM, a temperatura máxima na parede externa do tijolo foi de 42,12°C (T (1,4)), como observa-se na Fig. 4.19 e a parte interna do ambiente a máxima temperatura

foi de 25,82°C (T (5,4)), onde há então uma diferença entre temperaturas de 15,98°C.

Já para o caso em que a simulação com incidência de radiação de 400W/m² ocorreu temperaturas máximas na parte externa do tijolo de 35,47°C (T (1,4)) – Fig. 4.20 e para as máximas temperaturas na parte interna do ambiente, esta foi de 25,6°C (em T (5,4)), então a diferença foi de 9,87°C.

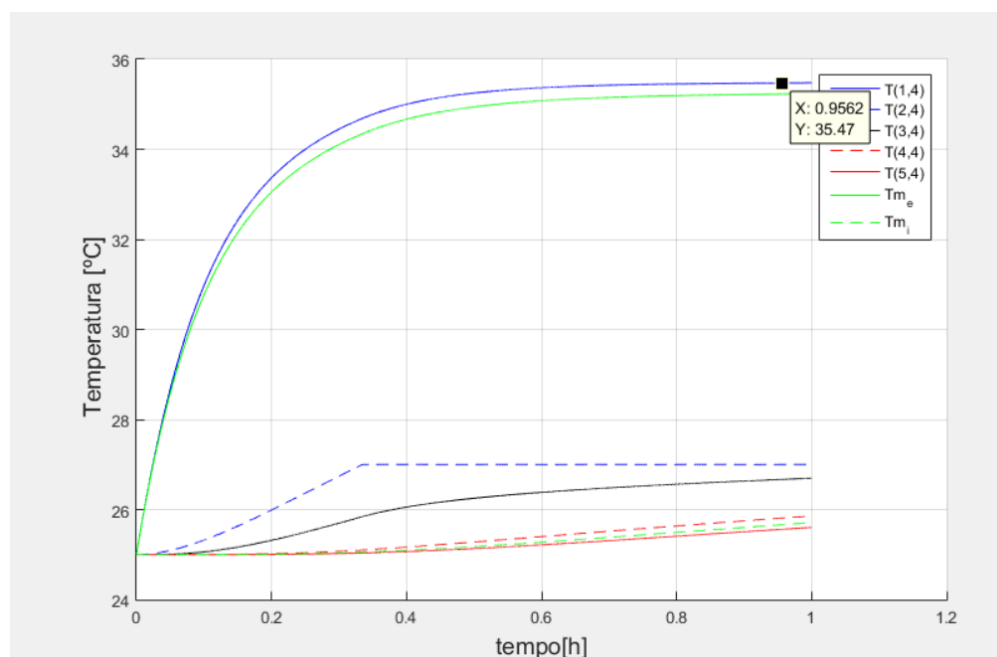
Ainda comparando-se, a simulação com incidência de 200W/m², descrita na Fig. 4.21, as temperaturas máximas, na parte externa ao tijolo (T (1,4)), foram de 32,15°C e a temperatura máxima na parte interna do ambiente foi de 25,45°C (T (5,4)), com uma diferença de 6,7°C ao longo das paredes do tijolo.

Figura 4.19 – Simulação de transmissão de calor em tijolos com PCM para $I=800\text{W/m}^2$.



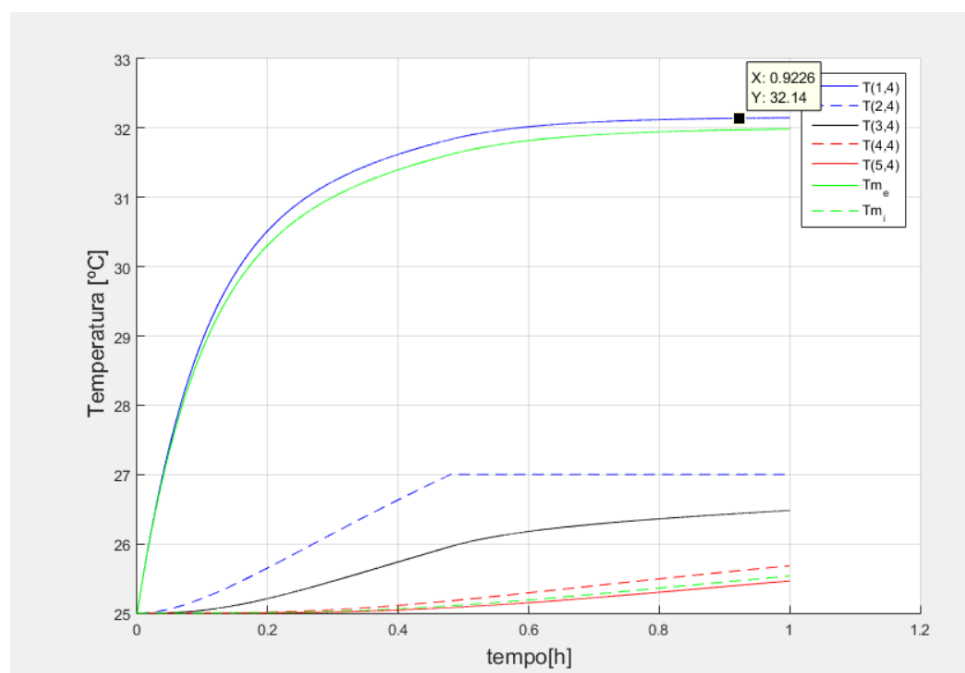
Fonte: Autoria própria.

Figura 4.20 – Simulação de transmissão de calor em tijolos com PCM para $I=400\text{W/m}^2$.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4.21 – Simulação de transmissão de calor em tijolos com PCM para uma $I=200\text{W/m}^2$.



Fonte: Autoria própria.

4.6 CONCLUSÕES PARCIAIS

Com essa análise, consegue-se observar que quanto maior a incidência de radiação solar, maior será a diferença de temperaturas entre a parte externa da edificação em relação à parte interna. Para todos os casos as diferenças entre as temperaturas na parte externa do ambiente como na parte interna denotavam cerca de 10°C a menos - como por exemplo, o caso do tijolo com ar nas cavidades, onde a incidência de radiação $800\text{W}/\text{m}^2$ houve uma diferença de temperaturas de $21,61^{\circ}\text{C}$; incidência de radiação de $400\text{W}/\text{m}^2$ a diferença foi de $12,04^{\circ}\text{C}$; e a incidência de $200\text{W}/\text{m}^2$ foi de $5,17^{\circ}\text{C}$.

Como observou-se na Tabela 4.6, a temperatura máxima com incidência de $800\text{W}/\text{m}^2$ houve uma maior diferença de temperaturas entre a parte externa e a parte interna do tijolo, onde esta diferença para o tijolo com ar nas cavidades foi de $21,61^{\circ}\text{C}$ e para o tijolo maciço foi de $19,19^{\circ}\text{C}$, sem contar com a diferença do aumento da temperatura ao longo do tempo, onde para o tijolo maciço houve uma rápida subida da temperatura, diferentemente do tijolo com ar nas cavidades, onde se tem uma curva de aumento da temperatura de forma mais constante ao longo do tempo.

Com isso, corroborou-se algo importante, que o tijolo convencional, com cavidades preenchidas de ar, a convecção natural nas cavidades efetivamente, onde sua aplicação se torna justificável por ser conveniente para o fim de conforto térmico em ambientes, comprovando que este método já atua como uma vantagem térmica e econômica.

Continuando a análise da aplicação do tijolo maciço, sem cavidades, inicialmente assim como na análise anterior, o tijolo com cavidades preenchidas de ar, quanto maior a incidência de radiação, maior será o limiar de diferença de temperatura (parte interna e externa do ambiente), para o caso de $800\text{W}/\text{m}^2$ essa diferença de temperaturas foi de $19,19^{\circ}\text{C}$, relação ao caso de $400\text{W}/\text{m}^2$, onde houve uma diferença entre essas temperaturas foi de $7,84^{\circ}\text{C}$, já para a incidência menor de $200\text{W}/\text{m}^2$, a diferença de temperaturas foi de $8,46^{\circ}\text{C}$.

Comparando-se agora o caso do tijolo com cavidades e o tijolo sem cavidades, percebe-se que o tijolo sem cavidade (maciço) obteve menores

temperaturas externas a este, no entanto as temperaturas na parte interna à edificação foram maiores comparando-as em todos os casos, que foi de $28,68^{\circ}\text{C}$ para a incidência de $800\text{W}/\text{m}^2$, $27,2^{\circ}\text{C}$ para a incidência de $400\text{W}/\text{m}^2$ e $25,17^{\circ}\text{C}$ para $200\text{W}/\text{m}^2$. Frisando também o fato de que as temperaturas neste modelo de tijolo (maciço) as temperaturas externas ao tijolo foram uma das mais altas do que as temperaturas externas de todos os outros casos, onde a maior temperatura foi de $48,43^{\circ}\text{C}$ e a maior temperatura interna ao ambiente foi de aproximadamente $28,68^{\circ}\text{C}$, ou seja, apenas uma diferença de $19,19^{\circ}\text{C}$.

Analisando-se agora a aplicação de materiais sólidos isolantes, para a simulação com fibra de coco, com incidência de $800\text{W}/\text{m}^2$, esta obteve uma diferença de temperaturas entre ambientes internos e externos do tijolo de até $21,61^{\circ}\text{C}$, o que seria menos de 1°C comparando-se com o tijolo com ar nas cavidades ($21,59^{\circ}\text{C}$). Já para o tijolo com cavidades preenchidas pelo material isolante (de temperatura) como o isopor, para este caso de estudo o EPS 7, obteve a diminuição da temperatura do ambiente interno de $21,14^{\circ}\text{C}$, ou seja, pouca é a diferença comparada ao caso do tijolo preenchido de fibra de coco e ($21,59^{\circ}\text{C}$), nesse caso, o EPS. Relacionando estas temperaturas, o tijolo com ar nas cavidades a diferença foi de $21,61^{\circ}\text{C}$. O que prova a inviabilidade do uso destes materiais isolantes que se pretende melhorar o conforto térmico em ambientes.

Para todos os casos, foi notório a diminuição das temperaturas da superfície interna do tijolo. Para o uso do PCM ficou perceptível a participação e efetiva justificativa do uso deste no resfriamento de ambientes sejam estes comerciais como residenciais.

Para o caso finalmente do PCM como isolante de temperatura e melhoria do conforto térmico em ambientes, as temperaturas internas do tijolo foram as mais baixas em todos as incidências de radiação $26,14^{\circ}\text{C}$ (para incidência máxima de $800\text{W}/\text{m}^2$). Sendo a temperatura externa do tijolo foi de $42,12^{\circ}\text{C}$ e com isso a temperatura interna ao tijolo também foi uma das mais baixas comparando-se aos demais casos, que foi de $25,82^{\circ}\text{C}$, sendo assim $16,3^{\circ}\text{C}$ a menos. Apesar desta diferença não ter sido a menor em comparação a outros casos, observou-se que existe um retardo significativo nas temperaturas internas do ambiente, onde a curva de temperatura se mantém mais baixa nos

primeiros minutos de simulação, diferentemente dos casos ademais, que a temperatura cresce quase que de forma linear ao longo da simulação. Então, com essa diferença de temperatura entre a parte interna e externa do ambiente onde este tijolo está haverá um ambiente interno com temperatura mais agradável e consequente melhor conforto térmico.

5 CONCLUSÕES

O uso do PCM PEG, utilizado como material de mudança de fase e aplicado de forma passiva na retirada de calor de ambientes no estudo experimental, foi percebido que o PCM obteve êxito em sua aplicação, uma vez que este obteve uma diferença temperaturas externas e internas do ambiente onde o tijolo se aplicou de 15,54° e 16,65°C (para o experimento com PCM e sem resfriamento).

Ainda explorando os resultados obtidos com o experimento em bancada, este realizado com o tijolo e a parte interna do ambiente sem resfriamento e com PCM já obteve uma diminuição de temperatura de 16,65°C e o experimento com resfriamento e com PCM esta diminuição aumentou para 17,86°C, o que confirma que o PCM agiu de forma a aumentar a inércia térmica e absorveu o excesso de calor do ambiente.

Outro fato interessante foi de que o experimento que ocorreu sendo aplicado em apenas uma fileira do tijolo, no último experimento esta fileira com PCM foi posicionada mais próxima ao ambiente frio e com isso obteve-se uma diminuição maior de temperatura, que foi de 22,3°C, ou seja, uma diferença de 4,44°C a mais que o experimento com PCM e sem resfriamento.

Quando comparado estes mesmos resultados em relação ao modelo numérico simulado, com o tijolo e suas cavidades preenchidas de ar apenas, com incidência de 800W/m², houve uma diminuição dessas temperaturas de 21,61°, no entanto a temperatura externa e interna nesta simulação ocorreu uma curva de forma que cresceu mais rapidamente, o que não ocorreu na simulação do experimento com PCM, onde houve um certo achatamento da curva, e esta não subiu tão rapidamente como o tijolo com ar ou isolantes térmicos como a fibra de coco e EPS, assim como ocorreu com os experimentos realizados em bancada sem PCM.

Já para o uso do PCM no estudo onde se realizou as simulações as temperaturas da parte interna do tijolo que foi de 26,14°C, ou seja, uma diminuição para o caso do PCM no tijolo preenchido completamente (nas duas colunas de cavidades) e comparando-se com os demais casos além desse êxito, houve também a diminuição da temperatura do ambiente interno ao

tijolo, sendo uma das menores, de $26,14^{\circ}\text{C}$, perdendo apenas para as cavidades preenchidas com ar, que foi de $25,43^{\circ}\text{C}$.

Os resultados realizados corroboraram para a verificação de que o PCM detém o potencial de melhoria do desempenho térmico em edificações para o clima subtropical brasileiro, para assim proporcionar conforto térmico. No entanto, se faz necessário a aplicação do PCM mediante algumas viáveis para este fim, uma vez que as temperaturas, propriedades termofísicas são importantes para a seleção do PCM de maneira adequada às condições construtivas, de projeto e climáticas para a sua implementação.

Este estudo contribuiu academicamente ao avaliar PCMs em habitações no clima subtropical brasileiro e, na prática, ao propor uma solução inovadora para melhorar o desempenho térmico dessas habitações. Novas pesquisas são necessárias como forma de avaliar o impacto do uso desses materiais no Brasil, assim como ampliar a conscientização do mercado sobre o tema.

Por fim, agora comparando os trabalhos utilizando o PCM no experimento e no modelo numérico, para o primeiro caso do experimento em que o tijolo estava sem PCM e sem resfriamento, a diferença de temperaturas foi de $15,54^{\circ}\text{C}$, para o caso numérico essa diferença foi de $15,98^{\circ}\text{C}$ (com incidência de radiação de 800W/m^2). Como não houve nesse estudo uma comparação com resfriamento ou com diferentes localizações do PCM no tijolo pode-se dizer que a adição do PCM nas duas fileiras do tijolo corroborou para um melhor conforto térmico em decorrência do retardo na transmissão de calor ocasionada pela inserção do PCM nas paredes do tijolo.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros sugere-se a avaliação do uso de PCM em sistemas construtivos podendo-se aplicar este tijolo agora em ambientes reais, simulando paredes agora expostas ao calor da região. Construindo salas pequenas, e avaliando então os mesmos parâmetros de temperatura dentro e fora do tijolo, dentro da sala como forma de comparar este PCM e aplicá-lo avaliando sua aplicação e eficácia.

Além disso pode-se avaliar o desempenho térmico do PCM comparando-o com diferentes materiais de mudança de fase, além de dentro deste mesmo estudo ou em outro, pode-se utilizar outros modelos de tijolos que também são aplicados na construção civil.

Uma análise voltada para o custo-benefício também é necessária, tanto de aquisição do PCM como da economia de energia gerada por ele, tendo em vista que é um produto de baixo custo, com objetivo de melhoria no desempenho dessa aplicação aliando estratégias artificiais de ventilação e/ou controle de temperatura.

REFERÊNCIAS

- ABBAS, Hayder M.; JALIL, Jalal M.; AHMED, Sabah T.. Experimental and numerical investigation of PCM capsules as insulation materials inserted into a hollow brick wall. **Energy And Buildings**, [S.L.], v. 246, p. 111127, set. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111127>.
- ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15.220 - Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro: 2005.
- ABNT. NBR 15575-1:2013/Emenda 1:2021. Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 1: Requisitos Gerais, 2021.
- ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11752: Materiais celulares de poliestireno para isolamento térmico na construção civil e refrigeração industrial - Especificação. 3 ed. Rio de Janeiro, 2016. 6 p.
- ABHAT, A. Low temperature latent heat thermal energy storage: Heat storage materials, *Sol. Energy* 30 (4) (1983) 313–332
- ABRAVA, O uso do ar-condicionado e o consumo de energia elétrica [The use of air-conditioning and electricity consumption], 2013. Available in: <http://abrava.com.br/?p=11091> (Acesso em 09 de julho de 2024).
- ABRAHÃO, K. C. de F. J.; SOUZA, R. G. V. de. Estimativa da evolução do uso final de energia elétrica no setor residencial do Brasil por região geográfica. **Ambiente Construído**, v. 21, n. 2, p. 383-408, abr./jun. 2021. FapUNIFESP (SciELO).
- ABUKU, Masaru; JANSSEN, Hans; ROELS, Staf. Impact of wind-driven rain on historic brick wall buildings in a moderately cold and humid climate: numerical analyses of mould growth risk, indoor climate and energy consumption. **Energy And Buildings**, [S.L.], v. 41, n. 1, p. 101-110, jan. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.07.011>.

AGHOEI, Mojtaba Mousazadeh; ASTANBOUS, Atieh; KHAKSAR, Reza Yeganeh; MOEZZI, Reza; BEHZADIAN, Kourosh; ANNUK, Andres; GHEIBI, Mohammad. Phase change materials (PCM) as a passive system in the opaque building envelope: a simulation-based analysis. **Journal Of Energy Storage**, [S.L.], v. 101, p. 113625, nov. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.est.2024.113625>.

AL-YASIRI, Qudama; SZABÓ, Márta. Incorporation of phase change materials into building envelope for thermal comfort and energy saving: a comprehensive analysis. **Journal Of Building Engineering**, [S.L.], v. 36, p. 102122, abr. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.102122>.

AMARAL, C.; VICENTE, R.; MARQUES, P.A.A.P.; BARROS-TIMMONS, A. Phase change materials and carbon nanostructures for thermal energy storage: a literature review. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 79, p. 1212-1228, nov. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.093>.

ARAÚJO, Paulo M. M; FELIX Filho, Luis F; BARBOSA, Jessyca J.. **ESTUDO DAS PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DA FIBRA DE COCO MINIMAMENTE PROCESSADA VISANDO APLICAÇÃO COMO ISOLANTE TÉRMICO**. Set. 2015. Disponível em: <https://periodicos.ufs.br/revipi/article/view/2979> Acesso em: 05 jun. 2025.

ARAÚJO, Iuri; BITTENCOURT, Leonardo. **USO DE COEFICIENTES DE VENTILAÇÃO MÉDIOS NA PREVISÃO DA VELOCIDADE MÉDIA HORÁRIA DO AR INTERNO**: 2021. 2021. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/encac/article/view/4515/3433>. Acesso em: 05 jul. 2025.

ASHRAE, ASHRAE Handbook e Fundamentals (1981). Atlanta, GA, USA.

ASHRAE, American Society of Heating, Refrigerating and AirConditioning Engineers. STANDARD 55-2010. **Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. Atlanta, Georgia, Estados Unidos: 2013.

BEN, Balanço Energético Nacional 2024: Ano base 2023 / Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro : EPE, 2024.

BLOCKEN, B.; DEFRAEYE, T.; DEROME, D.; CARMELIET, J.. High-resolution CFD simulations for forced convective heat transfer coefficients at the facade of a low-rise building. **Building And Environment**, [S.L.], v. 44, n. 12, p. 2396-2412, dez. 2009. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.04.004>.

BONIN, Thais; PEZZUTO, Claudia Cotrim. **Medição da refletância e análise de sua influência nos materiais de cobertura**. 2013. Anais do III Encontro de Iniciação e Desenvolvimento Tecnológico e de Inovação. Disponível em: https://www.puc-campinas.edu.br/websist/Rep/Sic08/Resumo/2013814_104933_361067412_resxpa.pdf. Acesso em: 09 jul. 2025.

CELLA, R. F. **Reciclagem de Espumas Semi-Rígidas de Poliestireno pela Dissolução em Terpenos e Secagem em Secador de Tambor**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Florianópolis, SC, 2012.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. (2013). Transferência de Calor e Massa: uma abordagem prática. 4. ed. **McGraw-Hill Educação**.

CHE, Wen Wei; TSO, Chi Yan; SUN, Li; IP, Danny Y.K.; LEE, Harry; CHAO, Christopher Y.H.; LAU, Alexis K.H.. Energy consumption, indoor thermal comfort and air quality in a commercial office with retrofitted heat, ventilation and air conditioning (HVAC) system. **Energy And Buildings**, [S.L.], v. 201, p. 202-215, out. 2019. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.06.029>.

CHEBLI, Fatiha; MECHIGHEL, Farid. Phase change materials: classification, use, phase transitions, and heat transfer enhancement techniques. **Journal Of Thermal Analysis And Calorimetry**, [S.L.], v. 150, n. 3, p. 1353-1411, 6

jan. 2025. Springer Science and Business Media LLC.

<http://dx.doi.org/10.1007/s10973-024-13877-z>.

CHURCHILL, S.W., CHU, H.H.S., Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate, *Int. J. Heat Mass Transf.* 18 (11) (1975) 1323–1

CLARKE, J.A., *Energy Simulation in Building Design*, **Butterworth-Heinemann**, Oxford, 2001.

COLE, R. J., STURROCK, N. S., The convective heat exchange at the external surface of buildings, **Building and Environment** 12 (1977) 207e214.

CORREIA, Camila Machado de Azevedo; AMORIM, Cláudia Naves David; SANTAMOURIS, Mattheos. Use of passive cooling techniques and super cool materials to minimize cooling energy and improve thermal comfort in Brazilian schools. **Energy And Buildings**, [S.L.], v. 312, p. 114125, jun. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114125>.

COSTEOUT DA SILVA BORGES, JACQUES. *COMPÓSITO de POLIURETANO de MAMONA E VERMICULITA PARA ISOLAÇÃO TÉRMICA*. pp. Natal-RN, Jan, 2009. **UFRN**
<https://repositorio.ufrn.br/server/api/core/bitstreams/d1d64468-e5a24853-b1439fc7bc0f5c2d/content>.

COSTA, Gleidson Martins da. Conforto térmico nos ambientes de estudo remoto dos discentes do Instituto Federal de Mato Grosso do Sul, campus Aquidauana. **Revista Edapeci**, [S.L.], v. 24, n. 2, p. 30-43, 1 ago. 2024. Revista EDAPECI. <http://dx.doi.org/10.29276/redapeci.2024.24.220219.30-43>.

CUNHA, Sandra; SARCINELLA, Antonella; AGUIAR, José; FRIGIONE, Mariaenrica. Perspective on the Development of Energy Storage Technology Using Phase Change Materials in the Construction Industry: a

review. **Energies**, [S.L.], v. 16, n. 12, p. 4806, 19 jun. 2023. MDPI AG.
<http://dx.doi.org/10.3390/en16124806>.

DEAR, R. de, BRAGER, G.S., Developing an adaptive model of thermal comfort and preference, *Build. Eng.* 104 (1) (1998). Disponível em:
https://toc.library.ethz.ch/objects/pdf03/e16_001368958_01.pdf. Acesso em:
 05 maio 2025.

DEKA, Priyam; SZLĘK, Andrzej. Thermal energy storage in buildings: opportunities and challenges. **Archives Of Thermodynamics**, [S.L.], p. 21-65, 6 nov. 2023. Polish Academy of Sciences Chancellery.
<http://dx.doi.org/10.24425/ather.2022.144405>.

DoE, E. E. R. E. Building Energy Data Book. Department of Energy. **Energy Efficiency & Renewable Energy**; 2011.

ELASHMAWY, Mohamed. Experimental study on water extraction from atmospheric air using tubular solar still. **Journal Of Cleaner Production**, [s. l.], p. 959-965, nov. 2019.

ELETROBRAS. (2021). Consumo de Energia no Brasil. Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE). **Balanco Energético Nacional/BEN 2021—Ano Base 2020**. Available online: www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-596/BEN2021.pdf (Acesso em: 09 de julho de 2024).

EPE, Nota Técnica DEA/007/2020, **Ações para a promoção da eficiência energética nas edificações brasileiras: No caminho da transição energética**, Ministério de Minas e Energia, 2020.

FAN, X; PU Z; M. ZHU, M; JIANG, Z; XU, J. Solvent-free synthesis of PEG modified polyurethane solid-solid phase change materials with different Mw for thermal energy storage, *Colloid Polym. Sci.* (2021)
<https://doi.org/10.1007/s00396-020-04804-3>

FARAJ, Khaireldin; KHALED, Mahmoud; FARAJ, Jalal; HACHEM, Farouk; CASTELAIN, Cathy. Phase change material thermal energy storage systems for cooling applications in buildings: a review. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 119, p. 109579, mar. 2020. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2019.109579>.

FILIPPINI, Lorenzo Olivo; SARTORI, Gabriela; TORRES, Maurício Carvalho Ayres. The impact of PCM applications on thermal comfort in standardized preschool designs in 2 Brazilian climatic zones. **Building Simulation Conference Proceedings**, [S.L.], v. 17, n. 17, p. 2749-2756, 1 set. 2021. KU Leuven. <http://dx.doi.org/10.26868/25222708.2021.30855>.

GLOBALABC/UNEP (org.). **2022 Global Status Report for Buildings and Construction**. 2022. Disponível em:

<https://globalabc.org/resources/publications/2022-global-status-report-buildings-and-construction>. Acesso em: 05 out. 2024.

GHOLAMIBOZANJANI, Gohar; FARID, Mohammed. A Critical Review on the Control Strategies Applied to PCM-Enhanced Buildings. **Energies**, [S.L.], v. 14, n. 7, p. 1929, 31 mar. 2021. MDPI AG.

<http://dx.doi.org/10.3390/en14071929>.

GRACIA, Alvaro de; CABEZA, Luisa F.. Phase change materials and thermal energy storage for buildings. **Energy And Buildings**, [S.L.], v. 103, p. 414-419, set. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.007>.

GOMES, Ana Cláudia Franca; CORDEIRO, Carol Cardoso Moura; CALLEJAS, Ivan Julio Apolonio; ROCHA, Sônia Denise Ferreira. Thermal characterization of soil-cement bricks using mining tailings. **SciELO Brasil**, [s. l.], p. 19-26, mar. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0370-44672021750025>. Acesso em: 03 jul. 2025.

HUMPHREYS, M., NICOL, F., ROAF, S.. **Adaptive Thermal Comfort: Foundations and Analysis**, Routledge, London, UK, 2016.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). World Energy Outlook 2019 Electricity: electricity generation by fuel and scenario, 2018-2040. Electricity generation by fuel and scenario, 2018-2040. 2019. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019/electricity>. Acesso em: 04 mar. 2024.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Building Envelopes: Traking report, 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/building-envelopes>. Acesso em: 15 nov. 2022.

INCROPERA, F. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A.; DEWITT, D. P. Fundamentos de transferência de calor e de massa. 7. ed. 2017.

ISA, Mohd Hafizal Mohd; ZHAO, Xudong; YOSHINO, Hiroshi. Preliminary Study of Passive Cooling Strategy Using a Combination of PCM and Copper Foam to Increase Thermal Heat Storage in Building Facade. **Sustainability**, [S.L.], v. 2, n. 8, p. 2365-2381, 27 jul. 2010. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su2082365>.

JIA, Chao; GENG, Xiaoying; LIU, Fudan; GAO, Yanna. Thermal behavior improvement of hollow sintered bricks integrated with both thermal insulation material (TIM) and Phase-Change Material (PCM). **Case Studies In Thermal Engineering**, [S.L.], v. 25, p. 100938, jun. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.csite.2021.100938>.

KHUDHAIR, A. M.; FARID, M. M. A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials. **Energy Conversion and Management**, v. 45, n. 2, p. 263-275, jan. 2004. Elsevier BV.

KOU, Yan; WANG, Siyu; LUO, Jipeng; SUN, Keyan; ZHANG, Jian; TAN, Zhicheng; SHI, Quan. Thermal analysis and heat capacity study of polyethylene glycol (PEG) phase change materials for thermal energy storage applications. **The Journal Of Chemical Thermodynamics**, [S.L.], v. 128, p. 259-274, jan. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jct.2018.08.031>.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. Eficiência energética na arquitetura. 3. ed. Rio de Janeiro: **Eletrobras/PROCEL**, 2014. 366 p.

LEE, Wondu; KIM, Jooheon. A comprehensive review of research on organic-based phase-change thermal interface materials for thermal management of electric devices: methods, performance, and applications. **Polymer Testing**, [S.L.], v. 142, p. 108677, jan. 2025. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymertesting.2024.108677>.

LI, Mingli; CAO, Qi; PAN, Hong; WANG, Xingyu; LIN, Zhibin. Effect of melting point on thermodynamics of thin PCM reinforced residential frame walls in different climate zones. **Applied Thermal Engineering**, [S.L.], v. 188, p. 116615, abr. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116615>.

LI, Shaoxiong; LIU, Le; PENG, Changhai. A Review of Performance-Oriented Architectural Design and Optimization in the Context of Sustainability: dividends and challenges. **Sustainability**, [S.L.], v. 12, n. 4, p. 1427, 14 fev. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su12041427>.

LIU, L.; HAMMAMI, N.; TROVALET, L.; BIGOT, D.; HABAS, J.-P.; MALET-DAMOUR, B. Description of phase change materials (PCMs) used in buildings under various climates: a review. **Journal Of Energy Storage**, v. 56, p. 105760, dez. 2022. Elsevier BV.

LIU, Changyu; WU, Yangyang; ZHU, Yongjian; LI, Dong; MA, Lingyong. Experimental investigation of optical and thermal performance of a PCM-glazed unit for building applications. **Energy And Buildings**, [S.L.], v. 158, p. 794-800, jan. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.069>.

MABROUK, Riheb; NAJI, Hassane; BENIM, Ali Cemal; DHAHRI, Hacem. A State of the Art Review on Sensible and Latent Heat Thermal Energy Storage Processes in Porous Media: Mesoscopic Simulation. **Applied Sciences**, v. 12, n. 14, p. 6995, 11 jul. 2022.

MAHMUD, S.; ISLAND, A.K.S.; Laminar free convection and entropy generation inside an inclined wavy enclosure, *Int. J. Therm. Sci.* 42 (8) (2003) 1003– 1012.

MAJD, Abdelkoddouss El; SAIR, Said; OUSALEH, Hanane Ait; BERARDI, Umberto; MOULAKHNIF, Kaoutar; BELOUAGGADIA, Naoual; YOUNSI, Zohir; BOUARI, Abdeslam El. Advancing PCM research in building efficiency: a comprehensive investigation into pcm selection and critical integration strategies. *Journal Of Building Engineering*, [S.L.], v. 96, p. 110485, nov. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110485>.

MARTINS, Larissa Arakawa; SOEBARTO, Veronica; WILLIAMSON, Terence. A systematic review of personal thermal comfort models. *Building And Environment*, [S.L.], v. 207, p. 108502, jan. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108502>.

MCADAMS, William H.. Heat Transmission. 1954. Disponível em: https://toc.library.ethz.ch/objects/pdf03/e16_001368958_01.pdf. Acesso em: 14 maio 2025.

MENG, D.; ZHAO, K.; WANG, A.; WANG B. Preparation and properties of paraffin/ PMMA shape-stabilized phase change material for building thermal energy storage, *J. Wuhan Univ. Technol.-Mater Sci. Ed.* 35 (1) (2020) 231– 239.

MEHLING, Harald; BRÜTTING, Michael; HAUSSMANN, Thomas. PCM products and their fields of application - An overview of the state in 2020/2021. *Journal Of Energy Storage*, [S.L.], v. 51, p. 104354, jul. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.est.2022.104354>.

MEHLING, Harald, CABEZA LF. Heat and cold storage with PCM: an up to date introduction into basics and applications. Berlin, Germany: Springer; 2008.

MIRSADEGHI, M.; CÓSTOLA, D.; BLOCKEN, B.; HENSEN, J.L.M.. Review of external convective heat transfer coefficient models in building energy

simulation programs: implementation and uncertainty. **Applied Thermal Engineering**, [S.L.], v. 56, n. 1-2, p. 134-151, jul. 2013. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.03.003>.

MOHAMED. "Improving the Performance of a Parabolic Concentrator Solar Tracking-Tubular Solar Still (PCST-TSS) Using Gravel as a Sensible Heat Storage Material." *Desalination*, vol. 473, no. 10.1016/j.desal.2019.114182, Jan. 2020, p. 114182, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.114182>.

NAVARRO, Lidia; GRACIA, Alvaro de; NIAL, Dervilla; CASTELL, Albert; BROWNE, Maria; MCCORMACK, Sarah J.; GRIFFITHS, Philip; CABEZA, Luisa F.. Thermal energy storage in building integrated thermal systems: a review. part 2. integration as passive system. **Renewable Energy**, [S.L.], v. 85, p. 1334-1356, jan. 2016. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.06.064>.

NEEPER, D.A.. Thermal dynamics of wallboard with latent heat storage. **Solar Energy**, [S.L.], v. 68, n. 5, p. 393-403, 2000. Elsevier BV.

[http://dx.doi.org/10.1016/s0038-092x\(00\)00012-8](http://dx.doi.org/10.1016/s0038-092x(00)00012-8).

OGUNBODE, Charles A.; DORAN, Rouven; BÖHM, Gisela. Exposure to the IPCC special report on 1.5 °C global warming is linked to perceived threat and increased concern about climate change. **Climatic Change (2020)**, Bergen, p. 361-375, nov. 2019.

OLIVEIRA, M. M.; LUCARELLI, C. de C.; CARLO, J. C. Uso de materiais de mudança de fase em sistemas construtivos: revisão integrativa de literatura. **Ambiente Construído**, v. 22, n. 3, p. 67-111, set. 2022. FapUNIFESP (SciELO).

OMER, Abdeen Mustafa. Renewable building energy systems and passive human comfort solutions. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 12, n. 6, p. 1562-1587, ago. 2008. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2006.07.010>.

PASARKAR, Neeraj P.; YADAV, Mukesh; MAHANWAR, Prakash. A.. A review on the micro-encapsulation of phase change materials: classification, study of synthesis technique and their applications. **Journal Of Polymer Research**, [S.L.], v. 30, n. 1, p. 12-28, 8 dez. 2022. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10965-022-03380-0>.

PNG, Z.M., SOO, X.Y.D., CHUA, M.H., ONG P.J., SUWARDI A., TAN, C.K.I., XU, J., ZHU, Q., Strategies to reduce the flammability of organic phase change Materials: a review, **Sol. Energy** 231 (2022) 115–128.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.11.057>

TAO, J., LUAN, J., LIU, Y., QU, D., YAN, Z., KE, X., Technology development and application prospects of organic-based phase change materials: an overview, **Renew. Sustain. Energy Rev.** 159 (2022).
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112175>

RATHOD, M. K.; BANERJEE, J. Thermal stability of phase change materials used in latent heat energy storage systems: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 18, p. 246-258, feb. 2013. Elsevier BV.

RATHORE, Pushpendra Kumar Singh; GUPTA, Naveen Kumar; YADAV, Devanand; SHUKLA, Shailendra Kumar; KAUL, Sanjay. Thermal performance of the building envelope integrated with phase change material for thermal energy storage: an updated review.. **Sustainable Cities And Society**, [S.L.], v. 79, p. 103690, abr. 2022. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2022.103690>.

ROMDHANE, S.B.; AMAMOU, A.; KHALIFA, R.B.; SAID, N.M.; YOUNSI, Z.; JEMNI, A. A review on thermal energy storage using phase change materials in passive building applications. *J. Build. Eng.* 2020, 32, 101563.
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101563>

ROWLEY, F. B., ALGREN, A. B., BLACKSHAW, J.L. Surface conductance as affected by air velocity, temperature and character of surface, *ASHRAE Transactions* 36 (1930) 429. [58]

ROWLEY, F. B., ECKLEY, W.A., Surface coefficients as affected by direction of wind, ASHRAE Transactions 38 (1932) 33 - 46.

SHI, Xuetong; YAZDANI, Maryam R.; AJDARY, Rubina; ROJAS, Orlando J.. Leakage-proof microencapsulation of phase change materials by emulsification with acetylated cellulose nanofibrils. **Carbohydrate Polymers**, [S.L.], v. 254, p. 117279, fev. 2021. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117279>.

SILVA, MARIA FLÁVIA BORGES. *Uso de Materiais de Mudança de Fase Como Alternativa Para a Melhoria Do Desempenho Térmico de Habitações No Clima Subtropical Brasileiro*. 31 Dec. 2022,
<https://repositorio.ufrn.br/items/4f48ded3-9230-4b48-b856-6a9f08f3142b>.
 Accessed 31 May 2025.

SOARES, N.; COSTA, J. J.; GASPAR, A. R.; SANTOS, P. Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency. *Energy and Buildings*, v. 59, p. 82-103, apr. 2013. Elsevier BV.

SPARROW, E. M., J.W. RAMSEY, J. W., MASS, E.A.. Effect of finite width on heat transfer and fluid flow about an inclined rectangular plate, *Journal of Heat Transfer* 101 (1979) 204.

SPONSELLER, Daniel; BLAISTEN-BAROJAS, Estela. Solutions and Condensed Phases of PEG2000 from All-Atom Molecular Dynamics. **The Journal Of Physical Chemistry B**, [S.L.], v. 125, n. 46, p. 12892-12901, 16 nov. 2021. American Chemical Society (ACS).
<http://dx.doi.org/10.1021/acs.jpcc.1c06397>.

SUN, Xiaoqin; ZHANG, Yuan; XIE, Kun; MEDINA, Mario A.. A parametric study on the thermal response of a building wall with a phase change material (PCM) layer for passive space cooling. **Journal Of Energy Storage**, [S.L.], v. 47, p. 103548, mar. 2022. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.est.2021.103548>.

TYAGI, V.V.; CHOPRA, K.; KALIDASAN, B.; CHAUHAN, Aditya; STRITIH, U.; ANAND, Sanjeev; PANDEY, A.K.; SARđ, Ahmet; KOTHARI, Richa. Phase change material based advance solar thermal energy storage systems for building heating and cooling applications: a prospective research approach. **Sustainable Energy Technologies And Assessments**, [S.L.], v. 47, p. 101318, out. 2021. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.seta.2021.101318>.

VEDRTNAM, Ajitanshu; KALAUNI, Kishor; SOARES, Nelson; SALAZAR, Brian; OSTERTAG, Claudia P.; TAYLOR, Hayden K. Phase change materials for climate-adaptive buildings: a review framed by tropical and mediterranean climates. **Journal Of Energy Storage**, [S.L.], v. 125, p. 116938, jul. 2025. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.est.2025.116938>.

VENKATRAMANAN, K.; PADMANABAN, R.; ARUMUGAM, V.. Acoustic, Thermal and Molecular Interactions of Polyethylene Glycol (2000, 3000, 6000). **Physics Procedia**, [S.L.], v. 70, p. 1052-1056, 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.phpro.2015.08.224>.

VIEIRA, J. C. **Uso de Materiais de Mudança de Fase como alternativa para a melhoria do desempenho térmico de habitações no clima subtropical brasileiro**. Dissertação de mestrado—Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais: [s.n.].
<https://sig.cefetmg.br/sigaa/verArquivo?idArquivo=4550708&key=74eb8eb684fd8edaf0ca2cdce43e7932>

VIJAYAN, D.s.; MOHAN, A.; REVATHY, J.; PARTHIBAN, D.; VARATHARAJAN, R.. Evaluation of the impact of thermal performance on various building bricks and blocks: a review. **Environmental Technology & Innovation**, [S.L.], v. 23, p. 101577, ago. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eti.2021.101577>.

WALTON, G. N., Passive Solar Extension of the Building Loads Analysis and System Thermodynamics (BLAST) Program, United States Army Construction Engineering Research Laboratory, Champaign, IL, 1981.

WANG, Gang; LI, Xiangli; CHANG, Chang; JU, Hengjin. Multi-objective passive design and climate effects for office buildings integrating phase change material (PCM) in a cold region of China. **Journal Of Energy Storage**, [S.L.], v. 82, p. 110502, mar. 2024. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.est.2024.110502>.

WANG, X. et al. Design, characteristic and application of phase change materials for sustainable and energy efficient buildings: A review. *Energy and Buildings*, p. 111923, fev. 2022.

WANG, Xiaonan; LI, Wengui; LUO, Zhiyu; WANG, Kejin; SHAH, Surendra P.. A critical review on phase change materials (PCM) for sustainable and energy efficient building: Design, characteristic, performance and application. **Elsevier B.V: Energy & Buildings**, [s. l], p. 0378-7788, 5 fev. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111923>.

Acesso em: 09 jun. 2025.

YANG, Yingying; WU, Weidong; FU, Shunyu; ZHANG, Hua. Study of a novel ceramsite-based shape-stabilized composite phase change material (PCM) for energy conservation in buildings. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 246, p. 118479, jun. 2020. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118479>.

YU, Xiaokun; LUAN, Jingde; CHEN, Wei; TAO, Jialu. Preparation and characterization of paraffin microencapsulated phase change material with double shell for thermal energy storage. **Thermochimica Acta**, [S.L.], v. 689, p. 178652, jul. 2020. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.tca.2020.178652>.

ZAHIR, Md. Hasan; IRSHAD, Kashif; SHAFIULLAH, Md; IBRAHIM, Nasiru I.; ISLAM, A.K.M. Kausarul; MOHAISEN, Khaled Own; SULAIMAN, Fahad A.Al.. Challenges of the application of PCMs to achieve zero energy buildings under hot weather conditions: a review. **Journal Of Energy Storage**, [S.L.], v. 64, p. 107156, ago. 2023. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.est.2023.107156>.

ZAHIR, Md. Hasan; IRSHAD, Kashif; SHAFIULLAH, Md; IBRAHIM, Nasiru I.; ISLAM, A.K.M. Kausarul; MOHAISEN, Khaled Own; SULAIMAN, Fahad A.Al.. Challenges of the application of PCMs to achieve zero energy buildings under hot weather conditions: a review. **Journal Of Energy Storage**, [S.L.], v. 64, p. 107156, ago. 2023. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.est.2023.107156>.

ZHAN, Haoxiang; MAHYUDDIN, Norhayati; SULAIMAN, Raha; KHAYATIAN, Fazel. Phase change material (PCM) integrations into buildings in hot climates with simulation access for energy performance and thermal comfort: a review. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 397, p. 132312, set. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132312>.

ZHENG, Xiong; BAO, Yanqiong; HUANG, An; YU, Linfeng; QIN, Guangzhao. Temperature dependence of thermophysical properties of polyethylene glycol in solid/liquid phase change region. **The Journal Of Chemical Thermodynamics**, [S.L.], v. 180, p. 107022, maio 2023. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jct.2023.107022>.

ZHOU, Yuekuan; ZHENG, Siqian; LIU, Zhengxuan; WEN, Tao; DING, Zhixiong; YAN, Jun; ZHANG, Guoqiang. Passive and active phase change materials integrated building energy systems with advanced machine-learning based climate-adaptive designs, intelligent operations, uncertainty-based analysis and optimisations: a state-of-the-art review. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 130, p. 109889, set. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2020.109889>.