

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA**

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AMBIENTE CONSTRUÍDO

Naiara Vilela Costa

Paredes Trombe na Zona Bioclimática 3: uma investigação sobre a influência de elementos construtivos no desempenho térmico.

Juiz de Fora

2024

Naiara Vilela Costa

Paredes Trombe na Zona Bioclimática 3: uma investigação sobre a influência de elementos construtivos no desempenho térmico.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Ambiente Construído da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ambiente Construído. Área de concentração: Interdisciplinar.

Orientadora: Prof^a. Dra. Sabrina Andrade Barbosa

Coorientador: Prof. Dr. Klaus Chaves Alberto

Juiz de Fora
2024

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Vilela Costa, Naiara.

Paredes Trombe na Zona Bioclimática 3 : uma investigação sobre a influência de elementos construtivos no desempenho térmico. / Naiara Vilela Costa. -- 2024.

87 f.

Orientadora: Sabrina Andrade Barbosa

Coorientador: Klaus Chaves Alberto

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído, 2024.

1. Parede Trombe. 2. Energia solar. 3. Bioclimatismo. 4. Simulação computacional. 5. Estratégia passiva. I. Andrade Barbosa, Sabrina, orient. II. Chaves Alberto, Klaus, coorient. III. Título.

Naiara Vilela Costa

Paredes Trombe na Zona Bioclimática 3: uma investigação sobre a influência de elementos construtivos no desempenho térmico.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Ambiente Construído da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ambiente Construído. Área de concentração: Interdisciplinar

Aprovada em 24 de junho de 2024

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dra. Sabrina Andrade Barbosa - Orientadora
Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Klaus Chaves Alberto - Coorientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. José Gustavo Francis Abdala – Convidado interno
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof^a. Dra. Aline Calazans Marques – Convidada externa
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Juiz de Fora, 11/06/2024.



Documento assinado eletronicamente por **Aline Calazans Marques, Usuário Externo**, em 24/06/2024, às 10:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Klaus Chaves Alberto, Coordenador(a)**, em 24/06/2024, às 10:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Sabrina Andrade Barbosa, Usuário Externo**, em 24/06/2024, às 13:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jose Gustavo Francis Abdalla, Professor(a)**, em 27/06/2024, às 13:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Uf (www2.uf.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **1827754** e o código CRC **F45C9189**.

Dedico este trabalho aos meus amados pais Prof. Andre Luiz Cardozo Costa e Prof.^a Dulciliene Vilela Costa, por seu amor incondicional, apoio constante, e pela fé que depositam na realização do meu sonho de seguir a carreira acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus que me guia e ilumina a minha caminhada diariamente.

Agradeço aos meus pais que sempre me apoiaram em todos os momentos e que acreditam em mim e na minha capacidade mais até do que eu mesma. Agradeço aos meus orientadores, pela paciência e dedicação para o meu aprendizado.

“Eu acredito que a obra de arquitetura deve preservar uma relação direta com a região, com o clima, com o fim ao qual ela se destina e, por conseguinte, com os materiais e processos construtivos. Tudo isso eu acho que faz parte de um todo, da escolha e do fazer. “

Severiano Porto

RESUMO

A Parede PT (PT) é uma estratégia arquitetônica passiva que utiliza a radiação solar para melhorar o desempenho térmico do ambiente construído. Suas investigações, contudo, têm sido focadas em climas frios severos e localizados no hemisfério norte. Este estudo tem como objetivo investigar, por meio de simulações computacionais, a influência de diferentes elementos construtivos do sistema PT no desempenho térmico de edificações localizadas em Juiz de Fora, na Zona Bioclimática 3. Dessa forma, este trabalho pretende verificar o impacto das dimensões das aberturas da camada interna de uma PT, da espessura e do material da camada interna, do material da camada externa, espessura da cavidade de ar e da inserção de uma chaminé solar associada à PT no desempenho térmico de um ambiente em períodos frios e quentes de uma cidade da Zona Bioclimática 3 (Juiz de Fora – MG). Por meio do uso de simulações computacionais realizadas no *software* Design Builder, os resultados de temperatura do ar e de conforto adaptativo são comparados a um ambiente base, sem PT, e analisados nos períodos de inverno e verão (uma semana no mês de janeiro e uma em julho). Os resultados obtidos indicam que a parede PT de forma geral promove um atraso térmico nas temperaturas do ar do ambiente interno no clima considerado, tanto no inverno quanto no verão; embora, neste último, em menor proporção. O melhor resultado constatado para o inverno foi na configuração de PT associada a Chaminé solar com respiradouro externo fechado, proporcionando um aumento de 21% da taxa de conforto do ambiente. No verão, o melhor cenário foi com a configuração de 30 cm de espessura da camada interna da PT, apresentando um ganho de 14% na taxa de conforto do ambiente. Esses resultados evidenciam que a PT pode proporcionar uma melhoria térmica no ambiente em ambas as estações analisadas. Contudo, é imprescindível salientar que a configuração ideal para uma estação pode não ser a mais eficiente para a outra.

Palavras-chave: Estratégia passiva; Energia solar; Bioclimatismo; Simulação computacional;

ABSTRACT

The PT wall (TW) is a passive architectural strategy that utilizes solar radiation to enhance the thermal performance of the built environment. However, investigations have predominantly focused on severe cold climates located in the Northern Hemisphere. This study aims to investigate, through computational simulations, the influence of different constructive elements of the TW system on the thermal performance of buildings located in Juiz de Fora, in Bioclimatic Zone 3. Thus, this work intends to examine the impact of the dimensions of the internal layer openings of a TW, the thickness and material of the internal layer, the material of the external layer, the thickness of the air cavity, and the integration of a solar chimney associated with the TW on the thermal performance of an environment during cold and warm periods in a mild mesothermal climate city (Juiz de Fora – MG). Utilizing computational simulations performed with the Design Builder software, the air temperature and adaptive comfort results are compared to a baseline environment without TW and analyzed during winter and summer periods (one week in January and one in July). The results indicate that the TW generally promotes a thermal lag in the air temperatures of the internal environment in the considered climate, both in winter and summer, though to a lesser extent in the latter. The best result observed for winter was the TW configuration associated with a solar chimney with a closed external vent, providing a 21% increase in the comfort rate of the environment. For the summer, the best scenario was with a 30 cm thick configuration of the internal PT layer, presenting a 14% gain in the ambient comfort rate. These results show that PT can provide a thermal improvement in the environment in both stations analyzed. However, it is essential to point out that the ideal configuration for one station may not be the most efficient for another.

Keywords: Passive strategy; Solar energy; Bioclimatism; Computer simulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema de Parede Trombe tradicional, (a) sem respiradouros e (b) com respiradouros. Fonte: Adaptado de Wang <i>et al.</i> (2020).	18
Figura 2 - Esquema de Parede Trombe com Chaminé Solar. Fonte: Adaptado de Rabani, Kalantar e Rabani (2019).....	19
Figura 3 - Tipos de PT, (a) Parede tradicional com sistema para fechamento de respiradouros, (b) PT Zigue-Zague, (c) PT de água com camada espessa preenchida por água, (d) PT de água com dutos preenchidos por água. Fonte: Autora.	28
Figura 4 - Tipos de PT, (e) Transparede solar, (f) PT Híbrida solar, (g) PT com material de mudança de fase, (h) PT Composta. Fonte: Autora.	29
Figura 5 - Tipos de PT, (i) PT fotovoltaica, (j) PT fluitizada, (k) PT Catalítica. Fonte: Autora.	31
Figura 6 - Modelo do ambiente com PT com respiradouros em corte e planta. Fonte: Autora	52
Figura 7 - Diferentes porcentagens das aberturas na camada mais espessa. Fonte: Autora	53
Figura 8 - Modelo de simulação Design Builder. Fonte: Autora.	56
Figura 9 - Radiação global e temperatura externa da cidade de Juiz de Fora. Fonte: Autora.	57
Figura 10 – Planta baixa e corte dos modelos dos protótipos 1 e 2 utilizados por Suzuki (2012). Fonte: Adaptado de Suzuki (2012).	58
Figura 11 - Resultado da simulação do protótipo 1 e 2 na configuração 1 Suzuki (a); replicação para validação (b). Fonte: Adaptado de Suzuki (2012).....	59
Figura 12- Temperaturas do ambiente com diferentes tamanhos de respiradouros no período de inverno para Juiz de Fora. Fonte: Autora.	62
Figura 13 - Temperaturas do ambiente com diferentes tamanhos de respiradouros no período de verão para Juiz de Fora. Fonte: Autora.....	63
..... Figura 14 - Temperaturas do ambiente com diferentes espessuras da camada de elevada massa térmica no período de inverno para Juiz de Fora. Fonte: Autora.	66
Figura 15 - Temperaturas do ambiente com diferentes espessuras da camada de elevada massa térmica no período de verão para Juiz de Fora. Fonte: Autora.	67
Figura 16 - Temperaturas do ambiente com diferentes materiais da camada de elevada massa térmica no período de inverno para Juiz de Fora. Fonte: Autora.	69
Figura 17 - Temperaturas do ambiente com diferentes materiais da camada de elevada massa térmica no período de verão para Juiz de Fora. Fonte: Autora.	70
Figura 18 - Temperaturas do ambiente com diferentes materiais da fachada envidraçada no período de inverno para Juiz de Fora. Fonte: Autora.....	72
Figura 19 - Temperaturas do ambiente com diferentes materiais da fachada envidraçada no período de verão para Juiz de Fora. Fonte: Autora.....	73
Figura 20 - Temperaturas do ambiente com diferentes espessuras da cavidade de ar no período de inverno para Juiz de Fora. Fonte: Autora.	75
Figura 21 - Temperaturas do ambiente com diferentes espessuras da cavidade de ar no período de verão para Juiz de Fora. Fonte: Autora.....	75
Figura 22 - Temperaturas do ambiente com Chaminé Solar aberta e fechada no inverno para Juiz de Fora. Fonte: Autora.	77

Figura 23 - Temperaturas do ambiente com Chaminé Solar aberta e fechada no período de verão para Juiz de Fora. Fonte: Autora.77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Referências bibliográficas de artigos de simulação.....	40
Tabela 2- Propriedades dos materiais de construção do ambiente de análise.....	51
Tabela 3- Transmitância conforme espessura da parede interna.....	53
Tabela 4- Transmitância material da camada de elevada massa térmica.....	54
Tabela 5 - Transmitância conforme material de camada de vidro.	55
Tabela 6 - Porcentagem de horas de conforto no verão e inverno, para dimensões de respiradouros.	64
Tabela 7 – Porcentagem de horas de conforto no verão e inverno, para a espessura da camada interna.....	68
Tabela 8 – Porcentagem de horas de conforto no verão e inverno, para o material da camada interna.	71
Tabela 9 – Porcentagem de horas de conforto no verão e inverno, para o material da camada externa.	73
Tabela 10 - Porcentagem de horas de conforto no verão e inverno, para a espessura da cavidade de ar.	76
Tabela 11 - Porcentagem de horas de conforto no verão e inverno, para a inserção de Chaminé solar.....	78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
PT	Parede Trombe
CS	Chaminé Solar
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ONU	Organização da Nações Unidas
PCM	<i>Phase Change Material</i> – Material de Mudança de Fase

SUMÁRIO

RESUMO	9
ABSTRACT	10
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	11
LISTA DE TABELAS.....	13
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	14
SUMÁRIO.....	15
1. INTRODUÇÃO.....	17
1.1. Contextualização do tema proposto	17
1.2. Caracterização do problema.....	20
1.3. Objetivos	22
1.4. Estrutura da Dissertação	23
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	24
2.1. Conceitos e grandezas sobre o Conforto Térmico	24
2.2. Modelos de Parede PT	27
2.4. Variações em elementos arquitetônicos	35
Aberturas de ventilação	35
Espessura da camada de elevada massa térmica	36
Material da camada de elevada massa térmica	37
Fachada envidraçada	38
Cavidade de ar	38
3. MÉTODO	51
3.1. Desenvolvimento do modelo de referência.....	51
3.2. Modelos alternativos.....	52
Dimensões de aberturas dos respiradouros.....	52
Espessura da camada interna	53
Material da camada interna	54
Material da camada externa.....	54
Espessura da cavidade de ar.....	55
Inserção da Chaminé Solar	55
3.3. Modelagem e simulação.....	56
3.4. Forma de análise dos resultados.....	56
3.5. Condições climáticas.....	57
3.6. Validação do Modelo	58
RESULTADOS E DISCUSSÃO	61

4.1. Presença e dimensões de respiradouros na camada mais espessa.....	61
4.2. Espessura da camada interna	65
4.3. Material da camada interna	68
4.4. Material da camada externa	71
4.5. Espessura da cavidade de ar	74
4.6. Inserção de uma Chaminé Solar ao sistema PT.....	77
4. CONCLUSÃO	79
REFERÊNCIAS	82

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização do tema proposto

A moderação no uso de energia e recursos naturais estão entre as principais iniciativas para o desenvolvimento humano, conforme observado no apelo global feito por meio dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) pela ONU (Organização das Nações Unidas, 2023). Entre os objetivos, a ação visa facilitar o acesso e promover a investigação de pesquisas e tecnologias de energia limpa, bem como estimular construções sustentáveis e resilientes utilizando materiais locais para alcançar um ideal de energia limpa e acessível, em consonância com cidades e comunidades sustentáveis. O décimo primeiro ODS, Cidades e Comunidades Sustentáveis estimula a procura de métodos e técnicas construtivas que possuam o mínimo de impacto ambiental, ou que sejam mais conscientes e econômicas. Assim, tendo em vista a importância do tema, essa pesquisa tem como foco investigar o uso de estratégias arquitetônicas passivas para promover o melhor desempenho de edificações.

As técnicas passivas de conforto têm recebido recentemente uma crescente atenção, como uma opção para diminuir o consumo de energia, reduzir as contas de energia e diminuir a pegada de carbono, tirando o melhor partido das condições climáticas locais e das características dos edifícios. As técnicas passivas consistem no uso de elementos naturais que aproveitem das formas de transmissão de calor (radiação, convecção e condução) evitando, assim, o uso de equipamentos mecânicos pelo edifício (Gu *et al.*, 2023).

O uso da energia solar tem sido considerado por se tratar de uma solução limpa, barata e capaz de atender às necessidades energéticas de edifícios (Alharbi *et al.*, 2022). Entre as soluções passivas, a Parede Trombe (PT) tem sido usada como uma solução que proporciona melhor conforto interno, tanto em edificações de climas quentes como o semiárido (AHMED, HAMADA e SALIH, 2019), quanto em climas mais frios com o desértico frio (Dabaieh *et al.*, 2019); adaptando-se ao clima local (Saadaatian *et al.*, 2012). Visto que a energia solar é um recurso gratuito e abundante, é essencial maximizar sua utilização para melhorar o desempenho térmico das edificações.

A PT é composta de uma camada de vidro colocada sobre uma parede de elevada massa térmica da fachada da edificação, formando uma cavidade de ar entre elas. Seu funcionamento ocorre de forma que a radiação solar incidente no sistema é captada pelo vidro e pela superfície absorvente que também a armazena por causa de sua elevada massa térmica. Essa energia é então transferida por meio de condução e radiação para o ambiente interior (Figura 1a). Quando há aberturas (respiradouros) na camada mais espessa (Figura 1b), processos convectivos também promovem a transferência de calor entre a cavidade e o ambiente interno (Bevilacqua et al., 2019). Assim, a PT é usualmente implementada como forma passiva de aquecimento, pois no inverno a cavidade de ar e a parede espessa funcionam como uma espécie de reservas de temperatura. No período de verão, contudo, é necessário o sombreamento para reduzir a incidência solar e aumentar a circulação do ar para que não gere um superaquecimento (Gu *et al.*, p.5, 2023), esse sombreamento pode ser gerado pela inserção de venezianas sobre o vidro da fachada ou uma espécie de prolongamento da cobertura na direção norte. A PT teve sua primeira documentação feita por Morse (1881) nos Estados Unidos, que idealizou e registrou a patente de um sistema de aquecimento e ventilação para apartamentos movido por raios solares, o qual tem sido estudado e aperfeiçoado até os dias atuais.

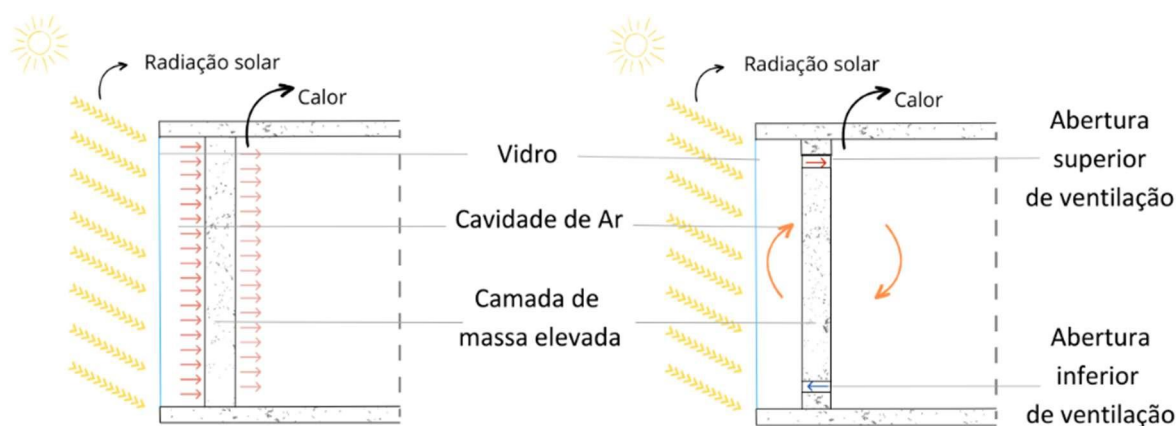


Figura 1 - Esquema de Parede Trombe tradicional, (a) sem respiradouros e (b) com respiradouros. Fonte: Adaptado de Wang *et al.* (2020).

Diversos estudos têm investigado variações e adaptações na PT, como: a inserção de vidro nos fechamentos laterais da parede para receber a radiação solar de mais de uma orientação (Rabani, Kalantar e Rabani,2019) (Rabani e Rabani,2019)

(Rabani, 2022); o uso de painel fotovoltaico (Lin *et al.*, 2019) (Abdullah *et al.*, 2022a) (Xiao, Qin e Wu, 2022) (Irshad *et al.*, 2022), o uso de venezianas introduzidas no espaço da camada de ar (Hong, Leung e He, 2019) (Islam *et al.*, 2021), o uso de PCM (*Phase Change Materials*) na face mais interna ou mais externa, ou até mesmo no centro da camada sólida (Li *et al.*, 2019) (Li *et al.*, 2024) (Zhou e Razaqpur, 2024) (Sheikholeslami e Al-Hussein, 2023) (Yang *et al.*, 2022) ou o uso de PCM em mais de uma camada da PT (Askari e Jahangir, 2023), bem como a concepção de sistemas mistos de PT e Chaminé solar (Rabani, Kalantar e Rabani, 2019).

A chaminé solar funciona como uma espécie de exaustor, sendo um método eficaz para melhorar a ventilação natural do espaço (Rabani, Kalantar e Rabani, 2019). No estudo de Rabani, Kalantar e Rabani (2019) os autores adicionaram uma chaminé solar composta de aço inoxidável de coloração escura com dimensões de 1 x 0,50 x 0,30 metros de altura, largura e profundidade, localizada no Iran. Esse modelo (Figura 2) possibilitou uma saída de ar superior e troca térmica por convecção, o que levou a um resultado de temperaturas mais amenas no interior do ambiente, diminuindo em 2°C a temperatura interna quando comparado ao modelo apenas com o sistema PT.

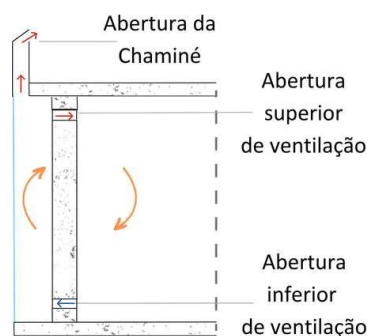


Figura 2 - Esquema de Parede Trombe com Chaminé Solar. Fonte: Adaptado de Rabani, Kalantar e Rabani (2019)

Além das estratégias mais inovadoras, ainda vem sendo produzidos trabalhos que investigam o desempenho de edifícios com o sistema de PT com variações de seus elementos construtivos, tais como a investigação das espessuras de suas camadas (Simões, Manaia e Simões, 2021) (Alharbi *et al.*, 2022) (Askari e Jahangir, 2023); rotinas de abertura dos vãos de respiração da camada mais espessa (Bevilacqua *et al.*, 2022) (Lin *et al.*, 2019); ou testando a funcionalidade da parede em

diferentes localidades (Simões, Manaia e Simões, 2021) (Ke *et al.*, 2022) (Elaouzy e El Fadar, 2022).

As variações nos elementos construtivos permitem que, dentro de um modelo simplificado, sejam identificadas as características da PT que mais contribuem para a melhoria térmica do local. Dessa forma, caso sejam necessárias adequações mais substanciais, o próximo passo estará bem fundamentado, indicando com precisão onde as modificações na PT devem ser feitas para otimizar o desempenho em relação ao clima específico. Para discutir a aplicação da PT em climas brasileiros, mais especificamente na Zona Bioclimática 3, será adotado um modelo típico com configurações semelhantes às de referências existentes. A escolha de um modelo típico permite uma comparação direta e uma melhor compreensão dos efeitos específicos de cada variação construtiva. Ao trabalhar com variáveis isoladas, será possível avaliar com precisão o impacto de cada alteração no desempenho térmico, fornecendo dados concretos para a otimização da PT conforme as características climáticas locais. Dessa forma, a pesquisa contribuirá para a criação de soluções mais eficazes e adaptadas às necessidades específicas da Zona Bioclimática 3.

1.2. Caracterização do problema

A produção científica atual a respeito do sistema PT é formada, em sua maioria, por estudos realizados no hemisfério norte (Elaouzy e El Fadar, 2022) (Simões, Manaia e Simões, 2021) (Abdullah *et al.*, 2022a) (LIN *et al.*, 2019) (Abdullah *et al.*, 2022b) (Zhou e Razaqpur, 2024) (Askari e Jahangir, 2023) (Xiao, Qin e Wu, 2022), com um pequeno número de estudos realizados no hemisfério sul (Agurto *et al.*, 2020a) (Sanchez e Hancoo, 2022) (Agurto *et al.*, 2020b) (Krüger, Suzuki e Matoski, 2013). Há pesquisas que buscam a eficiência do sistema tanto para momentos frios quanto para quentes, verificando soluções que evitem o superaquecimento da edificação em períodos quentes (Ahmed, Hamada e Salih, 2019).

Estudos de análise de desempenho da PT foram realizados em diferentes contextos climáticos, tais como mediterrâneos (Simões, Manaia e Simões, 2021), climas subtropicais (Krüger, Suzuki e Matoski, 2013), subtropicais úmidos (Ma *et al.*, 2018), semiáridos quente (Abdullah *et al.*, 2022b), áridos (Irshad *et al.*, 2022), desértico frio (Dabaieh *et al.*, 2019) e frio temperado (Dong *et al.*, 2019). Ainda são

poucos os estudos de PT desenvolvidos em países da América Latina. Em uma busca na plataforma Science Direct, onde o termo '*simulation trombe wall*' resultou em 32 estudos reportados entre os anos de 2018 e 2022, apenas um foi desenvolvido na América Latina (Sanchez e Hanco, 2022) totalizando 3% das produções em cinco anos. Esse fato pode ser explicado parcialmente por causa da menor demanda de aquecimento de tais países em comparação ao clima europeu e asiático, e pela maior aplicação de técnicas de aquecimento em tais regiões.

No Brasil, ainda são poucos os estudos na área que, em sua maioria, são resultados de dissertações e teses, a avaliação da PT de um objeto arquitetônico já existente (Bianco, 2016) (Luccas e Matoski, 2011), em canteiro experimental (Suzuki, 2012), ou em ambientes simulados por meio computacional (Cavalcanti e Caram, 2013) (Ziebell e Aymone, 2020). O único estudo indexado na base de dados *Science Direct* (até maio de 2024) foi o de Krüger, Suzuki e Matoski (2013). Os autores comprovaram a possibilidade de aplicar o sistema na cidade de Curitiba (zona bioclimática 1), onde montaram duas células de teste (uma com PT e outra não) e realizaram medições para a comparação. Eles concluíram que o sistema não precisa de muitas modificações para se mostrar eficiente no inverno subtropical, e que a angulação do sol no verão ajuda para que não haja superaquecimento nessa fase do ano. Dessa forma, é justificável a necessidade de se aprofundar o tema de PT em climas subtropicais. Assim, este trabalho pretende responder à seguinte questão:

- Qual o impacto de diferentes elementos construtivos no desempenho térmico do sistema de PT em edificações na Zona Bioclimática 3 tanto no período de inverno quanto no de verão?

Quanto ao desempenho térmico das edificações brasileiras, a ABNT NBR 15220 e a ABNT NBR 15575 são as principais fontes de norteamo de tais parâmetros. A primeira norma determina um zoneamento bioclimático para o território brasileiro, com recomendações construtivas e o detalhamento de estratégias de conforto térmico passivo ideais para cada zona (ABNT NBR 15220-3, 2005). Este trabalho foi desenvolvido para as condições climáticas da Zona Bioclimática de número 3 onde se encontra a cidade de Juiz de Fora – MG.

A segunda, a ABNT NBR 15575, é dividida em seis partes. A primeira apresenta diretrizes gerais e as seguintes com focos mais específicos nos elementos de uma edificação. As normas, em especial as partes 1 - “Requisitos Gerais”, (ABNT NBR 15575-1, 2013) e 4 - “Requisitos para os Sistemas de Vedações Verticais Internas e Externas” (ABNT NBR 15575-4, 2013), indicam que o edifício deve exercer um desempenho térmico para o verão, em que a temperatura interna máxima deve ser melhor (mais próxima de um ideal de conforto) ou igual a temperatura externa em local de sombra.

1.3. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo **investigar, por meio de simulações computacionais, a influência de diferentes elementos construtivos do sistema PT no desempenho térmico de edificações localizadas na zona bioclimática brasileira 3.**

Assim, tendo em vista o desempenho térmico do sistema nos períodos de inverno e verão, foram determinados os seguintes objetivos secundários:

- 1) Traçar um panorama geral das pesquisas acerca da PT no Brasil e no mundo para a composição de uma fundamentação teórica;
- 2) Definir um modelo célula-teste em que seja implementada a PT;
- 3) Validar o modelo digital de ambiente com PT utilizado, a partir de replicação de um estudo em canteiro experimental (Suzuki, 2012);
- 4) Avaliar a influência de diferentes elementos construtivos no sistema PT (materiais e espessura mais adequados para a camada sólida, dimensões para respiradouros, tipo de vidros para a camada externa, espessura da cavidade de ar e inserção de chaminé solar);
- 5) Verificar o desempenho do sistema para verão e inverno.

1.4. Estrutura da Dissertação

Este trabalho foi dividido em introdução, seguida de quatro capítulos e a conclusão. A introdução apresenta a fundamentação do tema, sua justificativa e define os objetivos da pesquisa.

O segundo capítulo aborda a fundamentação teórica, introduzindo os conceitos pertinentes ao tema e apresentando o cenário atual da pesquisa acadêmica por meio de uma revisão da literatura. Esta revisão foi realizada a partir de trabalhos coletados na base de dados Science Direct, fornecendo uma visão abrangente e atualizada sobre o assunto.

O terceiro capítulo detalha os procedimentos metodológicos adotados na pesquisa, começando pela contextualização da cidade alvo do estudo e suas características climáticas. Além disso, são descritas as condições para simulação computacional, as ferramentas utilizadas, as formas de análise empregadas, totalizando com a validação do modelo proposto.

O quarto capítulo apresenta os resultados das simulações e a discussão, mostrando a temperatura do ar do ambiente interno dos diferentes casos testados através de gráficos comparativos bem como a taxa de dias em estado de conforto calculada a partir da temperatura operativa. A discussão dos resultados é feita de forma comparativa, com a finalidade de encontrar elementos construtivos com desempenhos adequados para o clima da zona bioclimática em questão, de acordo com as demandas da região simulada.

A conclusão do estudo apresenta a compilação de resultados relevantes sobre o modelo de aplicação da PT para o clima considerado, contribuindo para a compreensão geral de um modelo PT para climas quentes. Também são apresentadas as limitações da pesquisa e as indicações para trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica nesta pesquisa visa fornecer o arcabouço conceitual e analítico necessário para compreender, contextualizar e interpretar os fenômenos investigados. Assim, esta seção busca sintetizar e explorar as principais teorias, modelos e conceitos que informam e orientam o estudo sobre o tema Paredes Trombe. Inicialmente, foi realizada uma busca na base de dados *Science Direct* com o termo “*trombe wall*”. Em seguida foram filtrados e retirados os artigos que não correspondem a um experimento ou revisão do tema central.

Esse capítulo apresenta uma discussão das contribuições acadêmicas e práticas de estudos anteriores, estabelecendo um diálogo crítico com a literatura existente e delineando as lacunas ou questões emergentes que justificam a presente pesquisa. Através desta análise teórica, pretende-se não apenas consolidar um entendimento robusto do campo de estudo, mas também posicionar a pesquisa atual dentro de um contexto mais amplo, enriquecendo a compreensão e a relevância dos achados subsequentes.

O capítulo se inicia com uma apresentação geral sobre conceitos fundamentais no estudo das condições térmicas de um ambiente. Em seguida, é apresentada uma revisão dos principais modelos de PT que vem sendo estudados, bem como seus métodos de estudo mais comuns e suas variações em elementos arquitetônicos, como: aberturas de ventilação, espessura e material da camada de elevada massa térmica, fachada envidraçada e cavidade de ar.

2.1. Conceitos e grandezas sobre o Conforto Térmico

O conforto térmico é o termo utilizado para designar o momento em que o corpo humano perde temperatura para o ambiente, sem recorrer a nenhum mecanismo de termorregulação, ou seja, quando o corpo não necessita de esforço extra para proporcionar o seu equilíbrio térmico (Frota e Schiffer, 2007). Segundo Lamberts (2016), um projeto arquitetônico deve não apenas ser energeticamente eficiente, mas também promover o conforto térmico. Para alcançar esses objetivos, é essencial a implementação de estratégias passivas que garantam o conforto e reduzam a necessidade de uso de sistemas artificiais de climatização. Essa abordagem resulta

em economia de energia e, conseqüentemente, em maior eficiência energética. A ideia central é aproveitar as condições climáticas locais para criar uma arquitetura termicamente eficiente, consolidando assim o conceito de bioclimatologia.

Para compreender a forma com que as estratégias bioclimáticas podem ser aplicadas nas edificações promovendo o conforto térmico, primeiro fez-se necessário entender o funcionamento das trocas térmicas, as quais se originam de duas condições básicas. De acordo com Frota e Schiffer (2007), a primeira condição para a troca de calor consiste na existência de dois corpos com temperaturas diferentes. A segunda condição envolve a mudança de estado de agregação sem alteração de temperatura. Dentre as trocas térmicas, aquelas que envolvem mudança de temperatura são chamadas de trocas secas, enquanto as que não envolvem mudança de temperatura são denominadas trocas úmidas.

As trocas secas podem ser classificadas em três tipos: condução, convecção e irradiação. O processo de condução se realiza entre o contato de dois corpos, podendo ser sólidos, líquidos ou gases, através de seu contato molecular. Porém, por existir a presença de fenômenos convectivos nos fluidos, essa interação só se enquadra como condução quando não se verificam tais movimentos; logo a condução é uma característica mais presente nos sólidos. A convecção se dá pelo contato molecular de dois corpos, onde ao menos um deles possua a forma fluida (Lamberts, 2016). Vale acrescentar que: “o processo possui duas fases: na primeira o calor se transmite por condução, na segunda, a alteração sofrida pela temperatura do fluido modifica sua densidade provocando o movimento convectivo” (Lambert, 2016, p. 90). Assim, a convecção é o segundo estágio da condução quando um dos corpos é fluido e existe movimento. Já a radiação funciona por uma dupla transferência de energia. Esse processo ocorre quando um determinado corpo com maior temperatura tem parte de seu calor transformado em energia radiante, chegando até o corpo com menor temperatura onde essa energia é absorvida e novamente transformada em temperatura. Esse processo e suas proporções dependem das propriedades receptoras do material, essa propriedade se denomina emissividade no caso de ondas longas (baixas temperaturas) e de absorvidade no caso de ondas curtas (alta temperatura).

As trocas úmidas são as que correspondem a mudança de estado de agregação, como por exemplo a água mudando do estado líquido para o gasoso. Os mecanismos das trocas úmidas são a evaporação e a condensação, que equivalem respectivamente da mudança do estado líquido para o gasoso e do gasoso para o líquido (Frota e Schiffer, 2007).

Para que essas trocas térmicas possam ocorrer e para prever o comportamento dos materiais, existem índices tabelados por normas de desempenho. Com propósito de estabelecer a quantidade de calor que passa por um material e o quanto dele é retido, analisa-se a transmitância térmica (u) e a resistência térmica (r), que são variáveis inversamente proporcionais (ABNT NBR 15220, 2004). Dizer que ambas são inversamente proporcionais significa que, à medida que uma aumenta, a outra diminui. Assim, se a transmitância térmica de um material é alta, isso indica que o material permite a passagem de mais calor, resultando em uma baixa resistência térmica e o contrário também é verdadeiro, obedecendo a fórmula a seguir:

$$u = \frac{1}{Rt}$$

O atraso ou inércia térmica é o tempo que decorre entre uma variação térmica em um meio, e a sua manifestação na superfície oposta de um componente construtivo, quando este está submetido a um regime periódico de transmissão de calor. Esse fenômeno depende da capacidade térmica do componente construtivo (habilidade de um material em armazenar calor) e da ordem em que suas camadas estão dispostas (ABNT NBR 15220, 2004). Em outras palavras, o atraso térmico mede quanto tempo leva para que uma mudança de temperatura em um lado de um material se faça sentir no outro lado, influenciando diretamente o desempenho térmico das edificações.

A amplitude térmica, definida como a diferença entre a temperatura máxima e mínima em uma área ou período específico, é um indicador crucial para compreender o clima de uma região. Outro termo comumente visto em estudos sobre desempenho térmico é a irradiância. Ela consiste no fluxo de radiação solar, tanto direto quanto difuso, que incide sobre uma superfície unitária, considerando uma dada inclinação e orientação solar.

Para esclarecer os temas mencionados, Bevilacqua *et al.* (2024) descreve detalhadamente o processo de transmissão de calor em paredes espessas de uma PT. Nele, a energia térmica armazenada na parede é transferida para o ambiente interno por meio de radiação térmica e convecção. Adicionalmente, a inversão térmica que ocorre na cavidade de ar proporciona um ganho térmico adicional ao ambiente adjacente por convecção natural. Esses mecanismos combinados resultam em uma contribuição significativa para a conservação da temperatura interna da edificação.

A compreensão do conforto térmico em ambientes construídos está intrinsecamente ligada ao design e às características das estruturas arquitetônicas. Nesse contexto, os modelos de PT configuram-se como uma abordagem eficaz para otimizar o conforto térmico de edificações de maneira passiva. Esses modelos, desenvolvidos para maximizar a absorção, armazenamento e transmissão de calor solar desempenham um papel de regulação da temperatura interna dos espaços habitáveis, assim como será visto da seção subsequente.

2.2. Modelos de Parede PT

Saadaatian *et al.* (2012) classificou as PT em nove tipos: PT clássicas, PT em zigue-zague, PT de água, Transparedes solares, Paredes híbridas solares, PT com material de mudança de fase, PT compostas, PT fluidizadas e PT fotovoltaicas. As configurações de tais paredes variam desde aquelas que incorporam novos elementos em uma PT clássica como, por exemplo, um elemento de sombreamento para a fachada envidraçada, até aquelas que empregam componentes modificados como sistema de chaminés ou placas fotovoltaicas (Figuras 3, 4 e 5). Em relação aos modelos tradicionais de PT, há estudos que verificaram alternativas que consideraram sua utilização comparada com outros modelos e em diferentes localizações como o caso do estudo de Simões, Manaia e Simões (2021) e como o modelo de Charqui *et al.* (2023a) composto por vidro, cavidade de ar e parede sólida sem abertura.

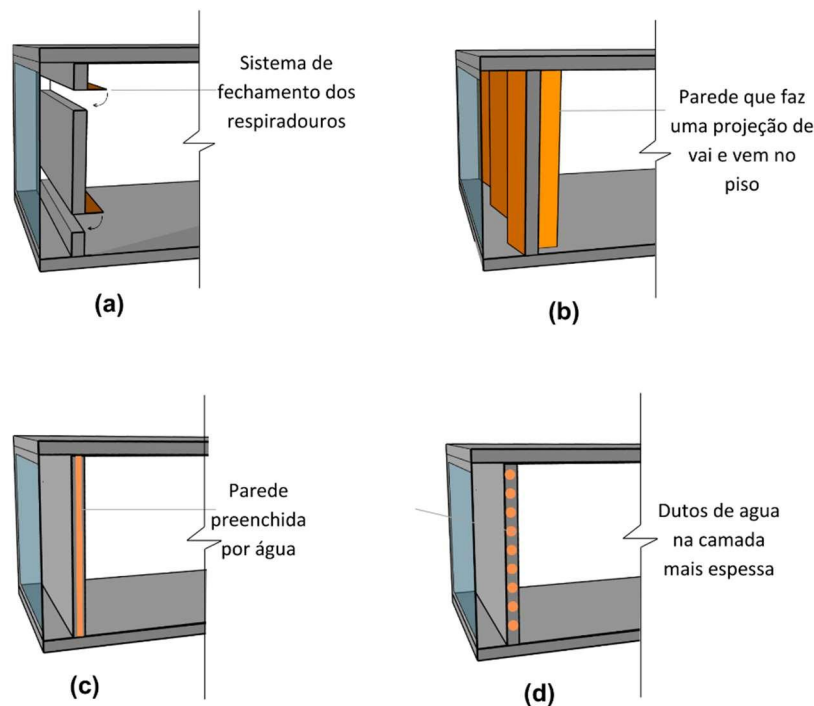


Figura 3 - Tipos de PT, (a) Parede tradicional com sistema para fechamento de respiradouros, (b) PT Zigue-Zague, (c) PT de água com camada espessa preenchida por água, (d) PT de água com dutos preenchidos por água. Fonte: Autora.

Chen *et al.* (2022) estudaram o modelo PT zigue-zague (Figura 2 – b). Eles analisaram um protótipo em escala reduzida construído em laboratório em que a estrutura e todos os seus elementos faziam um movimento de vai e vem com ângulos diferentes. Nesse caso, a luz solar foi substituída por lâmpadas QTH (lâmpadas de halogênio de quartzo e tungstênio) e obtiveram como resultados que os modelos com ângulos de 90° e 120° superam os demais em eficiência na velocidade do ar e na temperatura de superfície.

No caso do uso da água na PT, os tipos mais comuns de acomodação do líquido são em forma de preenchimento de uma parede (Zhou *et al.*, 2020) ou com o líquido em dutos ou canos compartimentados (Agurto *et al.*, 2020b). A água utilizada como uma forma de preenchimento de uma parede revestida de PCM (Figura 2 – c) pode ser usada tanto no lugar da camada de vidro do modelo tradicional, quanto como uma camada adicional localizada ao centro das camadas da PT cercada por cavidades de ar, assim como verificaram Zhou *et al.* (2020) em seus modelos de simulação. Diferentemente, Charqui *et al.* (2023a) utilizou a parede de água como substituição da camada de elevada massa térmica. Em relação aos dutos, Agurto *et*

al. (2020b) desenvolveram um estudo no Chile que teve como objetivo validar a eficiência de uma PT experimental pré-fabricada adaptada de baixo custo. Os dutos foram confeccionados de canos de PVC (Polímero Policloreto de Vinila) pintados de preto afastados de 1,5 cm e com uma camada de isolamento térmico por trás. Nesta versão de PT, a estrutura dos canos com o isolamento se configura como a camada de elevada massa térmica (Figura 2 – d).

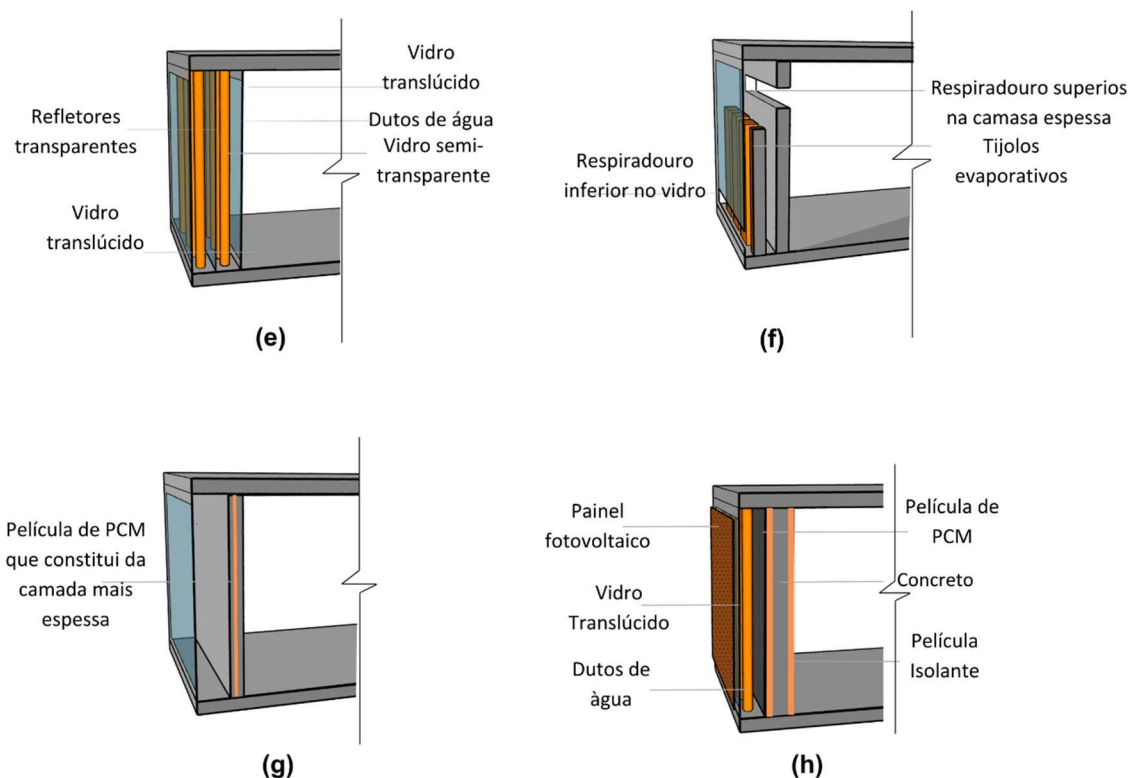


Figura 4 - Tipos de PT, (e) Transparende solar, (f) PT Hibrida solar, (g) PT com material de mudança de fase, (h) PT Composta. Fonte: Autora.

Para Saadaatian *et al.* (2012), entende-se como transparedes solares, ou mais especificamente “*transwall*”, uma parede de água modular transparente com estrutura metálica, que desempenha um papel estético com uma visualização do interior da edificação, ao mesmo tempo que recebe a radiação solar para o aquecimento passivo (Figura 3 – e).

Já as PT híbridas solares são aquelas que funcionam promovendo o aquecimento no inverno, e no verão o resfriamento do ambiente (Saadaatian *et al.*, 2012). Esses modelos usam tijolos cerâmicos evaporativos, como no estudo de Malero *et al.* (2011) na Espanha, que funciona com uma abertura inferior no vidro e

uma superior na camada espessa (Figura 3 – f). Há ainda casos mais complexos que unem mais de um tipo de estratégia, como o trabalho iraniano de Rabani, Kalantar e Rabani (2019) que adicionaram uma chaminé solar acoplada a um modelo PT testado anteriormente por Rabani e Rabani (2019) e compararam a diferença de desempenho no verão, gerando uma temperatura ambiente média na nova PT inferior à do tipo normal em cerca de 2 °C.

Em relação à PT com material de mudança de fase (PCM) há diversos tipos de aplicação, como por exemplo aplicação em dutos (Xu *et al.*, 2023), na camada mais espessa (Yang *et al.*, 2022), em módulos por trás da placa fotovoltaica localizada na fachada (Abdullah *et al.*, 2022b), como uma camada intermediária cercada por cavidades de ar e composta por fibras porosas de PCM (Saboori *et al.*, 2022) e outros. Recentemente, Xu *et al.* (2023) criaram um sistema de PT utilizando coletor solar de absorção direta baseado em pasta de mudança de fase formada pela dispersão de minúsculas partículas de mudança de fase em um fluido base. Esse fluido circula por um sistema de dutos localizados na face da camada espessa voltada para a cavidade de ar até um tanque que se localiza na cobertura, resultando em um ganho de calor auxiliar 39% maior que o do sistema PT tradicional no inverno da China.

No Marrocos, Mabrouki *et al.* (2023) aplicaram duas técnicas em seu modelo de PT. Para o verão, eles investigaram a incorporação de um dispositivo de sombreamento exterior na PT, ele se prolonga da laje de cobertura para evitar a incidência de radiação do verão e não gerar superaquecimento no ambiente. Para os períodos frios, foi incorporado o PCM do tipo Rubitherm RT-HC na camada sólida para otimizar a absorção e condução térmica no inverno (Figura 3 – g). Como resultado obtiveram que para o clima semi-oceânico, o melhor tamanho do dispositivo de sombreamento é de 0,9 m, e o melhor PCM para uma PT foi o RT 28 HC de espessura 3 cm.

As PT compostas são aquelas que consistem em várias camadas diferentes (Saadaatian *et al.*, 2012) (Figura 3 – h). Na China, Zhu *et al.* (2019) organizaram múltiplas camadas em busca de uma melhor eficiência térmica: primeiramente com a fachada de vidro com respiradouros controlados, seguida da cavidade de ar e camada espessa com respiradouros controlados composta de concreto, seguida de camadas

anexadas a ela de PCM, isolante térmico e PCM novamente. Com essas melhorias e a inclusão de PCM duplo atingiu-se uma melhora quantificada de 3,6 °C inferior e 0,1 °C superior ao do ambiente de referência no verão e no inverno, respectivamente.

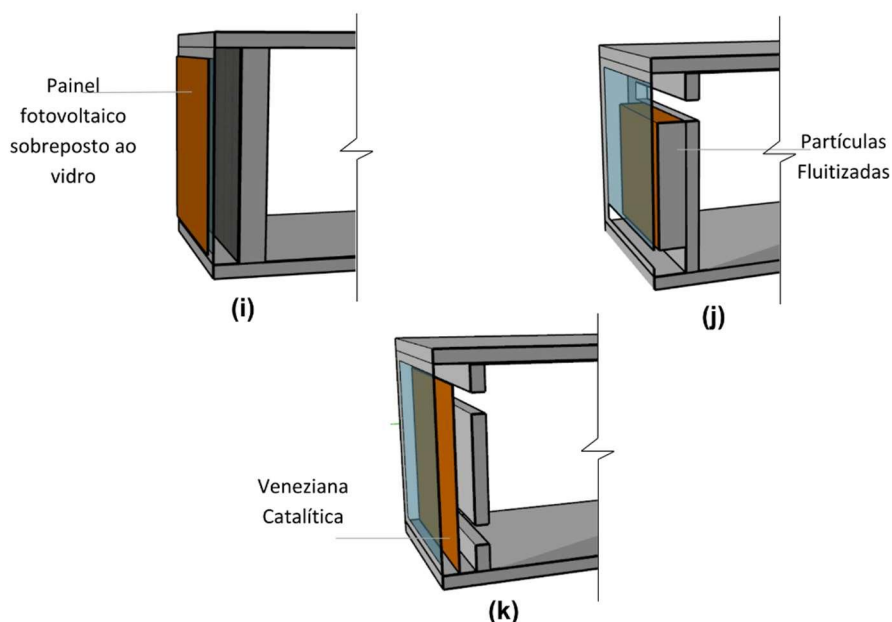


Figura 5 - Tipos de PT, (i) PT fotovoltaica, (j) PT fluitizada, (k) PT Catalítica. Fonte: Autora.

Em relação à PT fotovoltaica, Lin *et al.* (2019) fizeram uma comparação entre duas possibilidades de uso das placas: do lado de fora da fachada envidraçada ou do lado de dentro na cavidade de ar. Dessa forma, foram construídos dois ambientes teste iguais com exceção da localização da célula fotovoltaica. Como resultados, o modelo com as placas fotovoltaicas colocadas no exterior (Figura 3 – i) superou a captação de energia de 14,5% à 12%, e o modelo com as placas fotovoltaicas implementadas no interior da cavidade aumentou o aquecimento entre 38,2% e 27,9%. Os resultados comprovaram que as células bloqueiam parcialmente o vidro da radiação solar fazendo com que ele absorva menos calor e prejudicando o funcionamento inicial da PT e, no caso das placas colocadas dentro da cavidade, essas recebem radiação solar limitadas, diminuindo sua captação de energia.

Já as paredes fluidizadas são aquelas em que a cavidade de ar da PT tradicional é preenchida com um fluido altamente absorvente e de baixa densidade

(Saadaatian *et al.*, 2012). Tunç e Uysal (1991) realizaram um estudo em que descobriram que o fluido de transferência de calor está em contato direto com as partículas, aumentando a eficiência do aquecimento, pois o ar entra por uma abertura inferior do vidro, sobe o fluido batendo nas partículas e passa pelo filtro no topo para assim sair da cavidade pela abertura sólida (Figura 4 – j).

Já o modelo PT catalítica considera os efeitos da poluição do ar e vem sendo investigada como forma de filtrar purificar o ar. Esses modelos são classificados em PT térmico-catalítica e PT fotocatalítica (Figura 4 – k). Nesse caso, à medida que aumenta a intensidade da radiação solar, a eficiência térmica da PT fotocatalítica aumenta, porém a taxa de purificação do ar primeiro aumenta e, após um tempo, diminui. Essa diminuição se dá por causa do ar já estar atingindo temperaturas mais elevadas, e conseqüentemente, formar um vórtex mais rápido, passando pelos elementos catalizadores e tendo uma pequena baixa no índice de purificação (Wu, Xu e Xiao, 2020).

Diferentes configurações são utilizadas para adaptar a PT aos variados climas, finalidades e estações. Conforme observado, as necessidades específicas conduzem ao desenvolvimento de novos modelos. A necessidade de purificação do ar resultou no surgimento da PT catalisadora, e posteriormente a pandemia de COVID-19 reforçou essa demanda por higienização do ar. Após examinar um panorama geral dos modelos de PT estudados em âmbito global, destaca-se a relevância da aplicação de metodologias adequadas para a realização de investigações aprofundadas sobre esses modelos. Assim, a seção subsequente destina-se a revisar as metodologias mais empregadas em estudos referentes ao tema.

2.3. Metodologias comumente utilizadas

Os métodos mais usuais de investigações sobre PT são feitos por meio da avaliação e medição de construções existentes ou de protótipos físicos (Rabani, 2022), do uso de simulações numéricas a partir das medições realizadas (Yang *et al.*, 2022), ou com simulação digital de um modelo tridimensional (Simões, Manaia e Simões, 2021) (Askari e Jahangir, 2023) (Bevilacqua *et al.*, 2019).

Em relação aos casos com protótipos Szyszka, Bevilacqua e Bruno (2022) realizaram ensaios laboratoriais em câmara climática com a finalidade de calcular a eficiência térmica tendo como referência a radiação solar absorvida por 16 modelos que testaram a variação da temperatura do ar externo, a energia absorvida e o tempo de duração do fornecimento de energia para o ambiente. Outro exemplo de experimento em ambiente controlado é o estudo de Bairi *et al.* (2020). Os autores apresentaram um protótipo de um modelo tradicional comparado a um novo modelo PT que consiste na adição de placas de vidro dentro da cavidade de ar em uma orientação perpendicular à fachada envidraçada. Os resultados alcançaram uma melhora entre 10% e 14% nas taxas de transferência média de calor convectivo natural em relação ao modelo tradicional da PT. Por outro lado, os protótipos físicos também podem ser analisados em condições ambientais locais, assim como fez Rabani (2022) no Irã, que construiu um modelo em tamanho real de uma PT modificada, com três faces envidraçadas e com a instalação de sensores para a medição. Os resultados da PT com radiação recebidas nos três lados foram de um aumento da temperatura média em 6 °C em relação à PT normal.

Suzuki (2012) também realizou um estudo com dois protótipos, porém em escala reduzida, um com PT e outro como referência sem PT, na cidade de Curitiba, no Brasil. A autora tinha o objetivo de provar capacidade da PT de aquecer e resfriar o ambiente, para isso testou diferentes configurações de aberturas tanto na fachada envidraçada quanto na camada interna. O resultado foi positivo tanto para o inverno quanto para o verão onde cada estação teve uma configuração com melhor desempenho. Para o verão a PT não ventilada para o exterior teve melhor resultado, para o inverno apenas a abertura superior da cavidade de ar para o exterior fechada foi a melhor opção.

Charqui *et al.* (2023a) no Marrocos, desenvolveram três tipos de PT: uma com modelo tradicional e sem respiradouros, o segundo com camadas de vidro e ar duplicadas (vidro + cavidade de ar + vidro + cavidade de ar + concreto), e o terceiro com a parede interna de elevada massa térmica composta por uma envoltória de concreto preenchida por água. Para a análise, os pesquisadores realizaram simulações utilizando um modelo matemático baseado no princípio de conservação de massas, momento e energia em regimes laminar e turbulento, resolvidas pelo

algoritmo SIMPLE. Os resultados indicaram que a PT com vidros duplos tem melhor desempenho do que vidros simples para configurações de inverno e verão.

Já o estudo de Ma *et al.* (2018), realizado no Japão, utilizou uma edificação já existente que possuía um PT que tem a cavidade de ar mais avantajada e com acesso pelos usuários. Os autores realizaram medições e simulações numéricas no software de cálculo de carga térmica dinâmica *THERB for HAM* para investigar métodos eficazes de utilização do calor do interior da PT, bem como possíveis melhorias estruturais. Com a pesquisa, perceberam que a capacidade da PT armazenar calor está diretamente ligada a uma queda gradual de temperatura do ambiente, ou seja, quanto mais o calor é guardado mais ele dura no ambiente.

É possível explorar a simulação computacional para avaliar o desempenho de edificações com PT. Gu *et al.* (2023) ressalta que um software baseado na transferência de calor e massa seria o ideal para encontrar um modelo de PT para condições climáticas estabelecidas dentro dele, e para isso destaca o uso do Energy Plus e do DesignBuilder para uma análise de desempenho abrangente para diferentes climas. A simulação computacional permite testar diferentes cenários sem a necessidade de construí-los fisicamente, oferecendo flexibilidade de configurações e de localidades e economia de tempo. Simões, Manaia e Simões (2021) compararam diferentes alternativas de projeto com o objetivo de melhorar o conforto interno de uma edificação fictícia utilizando o arquivo meteorológico da cidade de Évora (Portugal) carregado dentro do software DesignBuilder. Posteriormente compararam o desempenho desse mesmo modelo em diferentes localizações do clima mediterrâneo (Porto, Bragança, Sevilla, Murcia, Barcelona, Marseille, Napoli, Ancona, Venezia, Tunis, Algiers e Athens).

É possível perceber que as abordagens metodológicas das investigações atuais sobre o tema variam de acordo com as configurações a serem analisados, como aberturas, dimensões e materiais dos modelos com PT, e os recursos disponíveis. A depender do foco de estudo, a forma como é conduzido deve se adaptar. Tal como um estudo de ventilação vai se concentrar mais em fluxos de ar e dimensões de aberturas e menos nas propriedades térmicas dos materiais, as quais seriam mais importantes para um estudo que idealiza uma camada retentora mais

eficiente. Por essa razão, é de grande importância examinar cuidadosamente as principais variáveis que devem ser aprimoradas em uma PT, justificando assim o conteúdo que será abordado na seção seguinte.

2.4. Variações em elementos arquitetônicos

Cada elemento arquitetônico desempenha seu papel no funcionamento geral de uma PT, seja esse para promover a ventilação, aumentar a inércia térmica, absorver calor ou transmiti-lo em maior proporção para o interior. Os materiais e elementos construtivos se comportam termicamente em função de suas propriedades térmicas (Lamberts, 2016). Com o propósito de identificar as variações mais frequentes em estudos presentes em bases de dados, a presente seção acompanhada da tabela subsequente, oferecem uma seleção abrangente de pesquisas sobre o tema.

Aberturas de ventilação

No modelo mais simplificado de PT, a camada interna (parede de alta massa térmica) pode ter aberturas de respiração, conforme os estudos de Charqui *et al.* (2023a) e Simões, Manaia e Simões (2021). Sua inserção no modelo se justifica por facilitar a transferência de ar para o interior do cômodo por convecção, reduzindo as cargas de aquecimento (Mabrouki *et al.*, 2023). Essas aberturas de ventilação muitas vezes são controladas com mecanismos de fechamento, que podem ser acionados de forma programada dentro da simulação, assim como foi feito por Bevilacqua *et al.* (2019), onde encontrou que em localidades mais quentes, a PT deve explorar o uso de ventilação natural. Isso pode ser feito através de um gerenciamento adequado de aberturas para o exterior e melhoria do resfriamento da cavidade por meio da ativação de todas as aberturas.

Suzuki (2012) experimentou um modelo PT com 4 aberturas em Curitiba, duas na fachada, ligando a cavidade de ar ao exterior, e duas na camada interna, ligando a cavidade ao ambiente interno. Cada teste contou com uma combinação de aberturas acionadas, porém nenhum texto mostrou a abertura superior da fachada como vantajosa.

Além do controle de aberturas, outra variável importante trata-se de suas dimensões, uma vez que o aumento desproporcional das aberturas de ventilação compromete o desempenho da transferência de calor do canal de fluxo de ar (Wu, Wu e Xiao, 2023). Apesar de variáveis entre 5 cm e 30 cm gerarem pequenas diferenças de desempenho entre si em climas mais amenos (Simões, Manaia e Simões, 2021), em localidades com baixa radiação solar a melhoria da eficiência térmica é impactada quando o fluxo de calor é pequeno, indicando que a estratégia de ventilação forçada tem elevado potencial de aplicação (Wu, Wu e Xiao, 2023). A ventilação forçada funciona com a inserção de pequenos ventiladores ou circuladores de ar nas aberturas de forma a impulsionar o ar, o que gera vantagem para o problema de baixa radiação solar, por fazer com que aquela massa gire mais rapidamente e assim, um volume maior seja aquecido moderadamente, ao invés de um volume menor ser aquecido com mais intensidade (Wu, Wu e Xiao, 2023).

Espessura da camada de elevada massa térmica

A camada interna da PT possui elevada massa térmica, oferecendo uma função imprescindível para o funcionamento do sistema: ela absorve e retém o calor. A espessura e material de tal camada é um parâmetro que determina o período de transmissão do calor armazenado de fora para dentro, sendo variável entre regiões climáticas e devendo ser calculado individualmente para cada instalação (Saadaatian *et al.*, 2012). A espessura também pode variar de acordo com o material usado. Quando associamos mais de um material na camada, essa espessura pode ser somada ou subtraída. Como exemplo, Sanchez e Hancoco (2022) utilizaram uma parede de 25 cm feita com tijolos no Chile, Hou *et al.* (2021) utilizaram a parede de 24 cm feita com tijolos na China, Alqaed, Mustafa e Sharifpur (2022) verificaram espessuras de 10 a 40 cm de uma parede que intercalava tijolo e PCM, e Guo *et al.* (2023) na China utilizou um painel de aço inoxidável preenchido com adobe com a espessura de 30 cm. De forma diferente, o estudo de Charqui *et al.* (2023a) testou três larguras de um painel preenchido de água. Como resultados, eles identificaram que o aumento da largura da camada água proporcionou ligeira melhoria na eficiência - 3% maior - quando a camada de água é duplicada, indo de 10 cm de espessura para 20 cm.

Material da camada de elevada massa térmica

Charqui *et al.* (2023b) experimentaram materiais como tijolos de barro cozido e blocos sílico-calcários para a constituição da camada mais espessa em seu estudo realizado no Marrocos. Os resultados indicaram que a PT com tijolos sílico-calcários foi a mais indicada para o verão, pois apresenta mínimo fluxo de entrada e amortece a variações de temperatura interna. Já Ma *et al.* (2018) avaliaram uma parede com três materiais aglomerados (placas de gesso, concreto e espuma rígida) e observaram que armazenar calor leva a uma queda mais suave da temperatura noturna, permitindo uma extensão do período durante o qual o fluxo de ar circula na sala.

Zhu *et al.* (2019) também verificaram materiais aglomerados na camada espessa com adição de PCM originado de parafina, formando uma parede de 32 cm composta por concreto (24 cm), PCM (3 cm), placa isolante térmica (2 cm) e novamente PCM (3 cm). Como resultados, foi observada queda de demanda com resfriamento na sala de 9% no verão, além da redução de 15% da carga máxima de aquecimento do ambiente interno. Essa associação de mais de um tipo de material pode ser de grande valia para a versatilidade do sistema, pois um material com propriedades isolantes na face mais interna da camada espessa evita não só o superaquecimento no verão, como a perda de calor no inverno (Li e Chen, 2019).

Dabaieh *et al.* (2019) simulou uma PT com a camada espessa composta por pedras e com a face voltada para a cavidade de ar pintada de escuro para a maior absorção solar no clima desértico do Egito. Embora os resultados foram obtidos para um ano inteiro, para uma comparação mais pontual, foram analisados o dia 6 de julho para o verão e o dia 11 de fevereiro para o inverno, comparando a sala que foi inserida a PT e uma sala controle. Como resultado, no dia de verão obtiveram máximas de 29 °C na sala com PT e 30 °C na sala de controle, e no dia de inverno obtiveram na sala com PT e na sala controle mínimas de 6 °C e 10 °C, respectivamente. Dabaieh *et al.* (2019) propõem que para estudos futuros haja a inserção de uma camada de isolamento na face interior da camada de elevada massa térmica.

Fachada envidraçada

Para o funcionamento do sistema PT, deve-se seguir a premissa de que a camada mais externa (fachada envidraçada) esteja direcionada para receber os raios solares. Por isso, a edificação deve ser orientada para a linha do Equador, no caso do Brasil a orientação norte, de forma a receber a maior irradiância nos períodos de inverno. Devido à altura solar nos diferentes momentos do ano, no hemisfério sul a incidência de radiação no inverno é cerca de 20% maior na face vertical do que para as superfícies horizontais; já no verão ocorre o oposto, uma superfície horizontal chega a receber 15 vezes mais energia do que uma parede norte (Krüger, Suzuki e Matoski, 2013).

Diferentes estratégias em estudos de PT têm sido investigadas de forma que a fachada receba a maior quantidade de radiação solar. É comum tanto o uso de vidro simples de 2 mm (Baïri *et al.*, 2020), ou com 6 mm (Zhou *et al.*, 2020), quanto vidro duplo com variadas espessuras do espaço de ar, como vidros de 3 mm com espaço de 12 cm (Ma *et al.*, 2018), vidros de 3mm com espaço de 13 mm, vidros com 6mm e 10 cm de espaço (Charqui *et al.*, 2023a) e outros. Em alguns casos, para evitar o superaquecimento no verão, são utilizadas aberturas conversíveis no próprio vidro ou no material que faz sua moldura na fachada. Outros casos incluem ainda o sombreamento da fachada. A ativação diária das saídas de ar externas em vidro e do sistema de sombreamento permitem maximizar os benefícios energéticos em diferentes localidades da Europa (Bevilacqua *et al.*, 2019).

Cavidade de ar

A cavidade geralmente encontra-se logo após a fachada de vidro, criando uma espécie de duto de ar entre ele e a camada mais espessa. O ar acomodado nesse espaço que se aquece com o calor recebido pelo vidro e as dimensões dessa cavidade influenciam em como será o fluxo das massas de ar ou qual o volume de ar aquecido em cada inversão térmica. Camadas de ar estreitas levam a uma movimentação de ar mais rápida e conseqüentemente na redução do armazenamento de calor; camadas espessas, por outro lado, tende a reduzir a diferença de temperatura entre

o fluxo de ar na entrada e na saída do canal, diminuindo assim a quantidade de calor trazida para a sala (Guo *et al.*, 2023). Alharbi *et al.* (2022) indicou que a relação entre a altura da parede e a espessura da camada de ar deve ser de 1 para 10 em países da Ásia, Oriente Médio e alta África. Já Baïri *et al.* (2020) observou que o aumento da proporção entre 0,1 e 0,2 em relação à dimensão da altura, aumenta a transferência de calor convectiva natural na cavidade ativa em cerca de 13% na Europa. Por isso, é importante uma análise em cada caso, conforme o clima e as necessidades térmicas locais.

Diante das investigações de PT apresentadas anteriormente e a seguir na Tabela 1, é possível perceber que apesar de serem usuais experimentações com protótipos reais expostos ao clima local e de protótipos de laboratório, a simulação computacional apresenta maior flexibilidade, além de maior praticidade na correção de possíveis falhas no modelo. Destaca-se também que diversas variáveis podem ser alteradas em uma PT, desde a mudança de material, dimensões, ou associação de um novo elemento como por exemplo venezianas catalíticas ou painéis fotovoltaicos. Assim, devido à quantidade de variáveis que influenciam no desempenho térmico do sistema, fica claro que mesmo nos países com mais produções científicas acerca do tema ainda há investigações a serem exploradas, especialmente em climas subtropicais.

Tabela 1 - Referências bibliográficas de artigos de simulação.

Autores	Título	Clima	Método	Modelo	Dias testados	Local do experimento	Objetivos	Resultados
ABDULLAH <i>et al.</i> (2022a)	Effect of dusty weather on the performance of the PV/PT wall: Experimental assessment.	Climas semi-áridos quentes (classificação climática de Köppen-Geiger: BSh)	Protótipo simulado em condições de laboratório	Vidro com células fotovoltaicas + Ar 14 cm + Parede sólida com respiradouros	4 dias em abril	Protótipo simulado em condições de laboratório.	Comparar PT com respiradouros, um com ventiladores DC e outro sem ventiladores DC.	Os dias nublados diminuem a eficiência das células fotovoltaicas e do aquecimento do ar, os ventiladores melhoram o ganho de temperatura em ambos os casos, porém não ao ponto de disfarçar as perdas do clima.
ABDULLAH <i>et al.</i> (2022b)	Performance improvement of photovoltaic/PT wall by using phase change material: Experimental assessment.	Climas semi-áridos quentes (Classificação climática de Köppen-Geiger: BSh)	Sala de testes, protótipo físico.	Vidro com células fotovoltaicas + Ar 14 cm + Parede sólida com módulos PCM, respiradouros e ventiladores	31 de agosto e 8 de setembro	Protótipo simulado em condições de laboratório.	Analisar o impacto do PCM, ventilador DC e trocador de calor do sistema.	O PCM e o trocador de calor fizeram com que os valores de eficiência elétrica e térmica aumentassem. Combinando o ventilador DC e o permutador de calor aumentou os valores de eficiência elétrica e térmica.
AGURTO <i>et al.</i> (2020a)	Bioclimatic Prosthesis: Experimental dataset for a low-cost PT wall to existing social housing refurbishment for an intermediate valley (Chillán) city in the south of Chile.	Clima mediterrâneo (Csb Köppen)	Construído protótipo com sensores de medição	Vidro transparente + cavidade de ar + Parede + Bolsa de ar + camada sólida com respiradouros (canos de PVC cheios de água) + isolamento	Intervalos de tempo que cobrem o ano quase todo	Chillán, Valle interior do Chile (Lat: 33°27' S Long: 70°38' O).	Validar PT pré-fabricada, e feito das persianas noturnas com isolamento, sombreamento de verão e ventilador.	É um artigo atrelado a outro intitulado AGURTO <i>et al.</i> (2020b). esmos resultados.
AGURTO <i>et al.</i> (2020b)	Design and experimental study of a low-cost prefab PT wall to improve indoor temperatures in social housing in the Biobío region in Chile.	Mediterrâneo (Csb Köppen) e temperada mediterrânea (Csb (i) Köppen)	Construído protótipo com sensores de medição	Vidro transparente + cavidade de ar + Parede + Bolsa de ar + camada sólida com respiradouros (canos de PVC cheios de água) + isolamento	Intervalos de tempo que cobrem o ano quase todo	Santa Rosa de Chillán e Coronel, no Chile (Lat: 33°27' S Long: 70°38' O)	Validar PT pré-fabricada, e feito das persianas noturnas com isolamento, sombreamento de verão e ventilador.	As economias de energia calculadas foram de 44,14% e 25,35%, para Chillán e Coronel respectivamente. O consumo de energia no aquecimento situa-se entre 30% e 50% nos meses de maior consumo. Caso o período de aquecimento seja reduzido, a economia na primavera e no outono poderá atingir os 80%
AHMED, HAMADA e SALIH (2019)	Enhancement of the performance of Photovoltaic/PT wall system using the porous medium: Experimental and theoretical study.	Clima semiárido quente(Classificação climática de Köppen-Geiger: BSh)	Modelo físico (dois modelos simétricos)	Vidro 4mm + célula solar + placa de alumínio + duto para fluxo de ar / ou meio poroso 50 cm + parede sólida com respiradouros com ventilador	De dezembro de 2017 a fevereiro de 2018	Kirkuk, norte do Iraque(Lat: 33°20' N Long: 44°24' E)	Avaliar sistema híbrido fotovoltaico/PT com meio poroso (simulou com e sem esse meio poroso).	A inserção do meio poroso aumenta a sua eficiência térmica e eléctrica, bem como melhora as condições de conforto do ambiente. O vidro cobrindo as células solares aumenta a temperatura delas, o que diminui a potência e a eficiência da geração de energia eléctrica.

ALHARBI <i>et al.</i> (2022)	Installation of rectangular enclosures filled with phase change nanomaterials on the thrombus walls of a residential building to manage solar radiation in different seasons of the year.	-	Software COMSOL-Multiphysics	Uma sala medindo 3x4x3 m, com a espessura da uma parede sólida variando de 5 a 45 cm, com 4 placas de PCM anexadas a ela.	10 horas	-	Estudar o efeito da utilização de barreiras de PCM num período de ausência de radiação solar, e espessura da PT.	Parede mais espessa trás temperaturas mais altas e por mais tempo. O PCM dentro das barreiras inferiores solidifica mais cedo na PT do que as barreiras superiores, e as barreiras inferiores têm uma temperatura mais baixa do que as barreiras superiores.
ALQAED, MUSTAFA, e SHARIFPUR (2022)	Numerical study of the placement and thickness of blocks equipped with phase change materials in a PT wall in a room-thermal performance prediction using ANN.	-	Software COMSOL-Multiphysics de estudos numéricos	Vidro (com respiradouro inferior) + Ar + Parede sólida de 10 a 40 cm (com respiradouro superior)	-	-	Colocar blocos PCM e não PCM em um período de 600 min, e espessura da parede entre 10 e 40 cm	Quanto mais espessa a parede, mais tempo ela mantém a temperatura. No caso de uma parede de 10 cm, a temperatura da parede cai muito rapidamente e aproxima-se da temperatura do ar de entrada.
ASKARI e JAHANGIR (2023)	Evaluation of thermal performance and energy efficiency of a PT wall improved with dual phase change materials	Clima mediterrânico (Classificação climática de Köppen-Geiger: Csa)	Design Builder	PT com duas camadas de PCM, com estrutura comum e respiradouros em duas alturas apenas na camada sólida.	Frios (novembro, dezembro, janeiro, fevereiro e março) quentes (maio, junho, julho, agosto e setembro).	Teerã, Irã (Lat: 43°18' N Long: 44°5' E)	Estudar a espessura da cavidade de ar de uma PT de PCM de camada dupla.	A cavidade de ar de 20 cm apresenta melhor taxa de redução do consumo de energia. Superaquecimento de 2%, facilmente resolvido com sombreamento externo. Ao utilizar dois PCMs diferentes o consumo caiu 40% ao ano.
BAÏRI <i>et al.</i> (2020)	Enhancement of natural convection for improvement of PT wall performance. An experimental study.	Simulado em estado estacionário, em um ambiente térmico controlado	Protótipo de escala reduzida em laboratório	Vidro 2mm + Ar + Parede sólida com respiradores 60 mm+ Película de poliuretano extrudado 40 mm	-	-	Comparar uma parede comum e uma com divisórias em vidro, dentro da cavidade de ar.	A transferência média de calor convectivo natural é melhorada dependendo da cavidade, definida como a razão entre a distância das paredes ativas e sua altura. O aumento da proporção entre 0,1 e 0,2 aumenta a transferência de calor convectiva.
BEVILACQUA <i>et al.</i> (2019)	Are PT walls suitable passive systems for the reduction of the yearly building energy requirements?	Clima quente (Granada, Espanha), clima temperado (Pisa, Itália) e clima frio (Copenhague, Dinamarca).	DesignBuilder	Vidro duplos 3/13/3 mm + canal de ar 30cm + parede sólida de tijolo de barro com respiradouros 30cm. Brises externos verticais altamente refletivos com 2,5 cm de largura, posicionados a 1,25 cm.	Ano todo para energia, janeiro e julho para inverno e verão no estudo de temperatura do ar	Granada (Espanha), Pisa (Itália) e Copenhagem (Dinamarca) (Lat: 43°42' N Long: 10°24' E).	Simular três cidades com climas diferentes e entre dois tipos de edifícios, cronograma de respiradouros e venezianas externas.	No verão, a ativação diária das saídas de ar externas em vidro e do sistema de sombreamento permitiu maximizar os benefícios energéticos. Foram obtidas que reduções percentuais das necessidades de aquecimento tanto em climas moderados quanto severos

BEVILACQUA <i>et al.</i> (2024)	A validated multi-physical model for the optimization of an innovative PT Wall for winter use	Cfb - Clima temperado propriamente dito	ICEM CFD e ANSYS CFX 15.0	O ar caminha horizontal e verticalmente dentro da parede de baixo para cima. Vidro + superfícies absorventes + cavidade +isolamento +parede espessa.	Dia típico de inverno, sem dizer especificamente qual dia.	Rzeszow, Polónia (Lat: 50°2'28.75"N, Long: 21°59'56.44"E.)	Evitar perdas de calor pelo vidro com isolamento na parede interna associado a diferentes materiais e espessuras da cavidade de ar.	Não é produtivo reduzir a cavidade pois o fluxo térmico diminui. Materiais mais condutores para a parede divisória permite um aumento no fluxo térmico transferido para a sala adjacente.
BEVILACQUA <i>et al.</i> (2022)	Summer and winter performance of an innovative concept of PT wall for residential buildings	Clima mediterrânico (Classificação climática de Köppen-Geiger: Csa)	Design Builder	Vidro (com respiradouros) + Ar 30cm + Parede sólida de 40/37 (texto diz um e imagem cota outra) cm (com respiradouros)	Demonstrou, dias de dezembro e de julho representando inverno e verão	Crotone, Itália (Lat: 43°42' N Long: 10°24' E)	Analisar o impacto das rotinas de aberturas dos respiradouros.	A nível anual, foram determinadas economias de 10,5% no inverno e de 9,5% no verão, referindo-se a uma configuração de edifício sem sistema passivo. O sistema permite poupar 185 kg de CO2 emitido.
BIANCO (2016)	PT: um estudo experimental comparativo de desempenho térmico para aquecimento e arrefecimento da cidade de São Paulo.	Clima oceânico (Classificação climática de Köppen-Geiger: Cfb)	Protótipo construído em canteiro experimental.	Vidro (com respiradouro superior) + Ar 12 cm + Parede sólida de dupla camada de blocos de concreto cheios 39cm (com respiradouros)	Foram cinco intervalos de tempo entre os dias 23/06/2015 e 26/11/2015	São Paulo, Brasil (Lat: 25°25' S, Long: 49°16' O)	Estudar PT para a cidade de São Paulo, desempenho térmico com e sem PT.	O cenário 2 apresentou desempenho superior para aquecimento noturno em comparação ao cenário 1, o cenário 3 demonstrou melhor desempenho para arrefecimento.
CAVALCANTI (2013)	Paredes PT no Brasil: Análise do potencial de utilização para aquecimento e refrigeração.	Variados	Energy Plus	Vidro duplo 3 mm (abertura superior) + Ar + Parede sólida 15, 30 e 45 cm (com respiradouros)	Um dia de inverno (15/12) e um dia para o verão (15/12)	Curitiba, Santa Maria, Florianópolis, São Carlos, Garanhuns, Campo Grande, Cuiabá e Belém (Lat: 25°25' S, Long: 49°16' O)	Verificar desempenho térmico de três configurações: PT fechada, PT com promoção de ventilação e PT para aquecimento.	Em algumas cidades as aberturas apresentam desempenho melhor, solução de conforto quando controlada pelo usuário. Quando a latitude é menor que 15° foi observado que a PT na posição sul é mais vantajosa. E nas cidades mais quentes a proporção PT/fachada deve ser reduzida.
CAVALCANTI e CARAM (2013)	Avaliação do uso de fachada solar no litoral do nordeste brasileiro: o caso das Paredes PT	Clima de monção tropical (Classificação climática de Köppen-Geiger: Am)	Energy Plus	Vidro duplo 3mm (com respiradouros) + Ar + Parede sólida (com respiradouros)	Um dia de inverno (15/12) e um dia para o verão (15/12)	Fortaleza, Natal, Maceió e Salvador, Brasil (Lat: 25°25' S, Long: 49°16' O)	Investigar o desempenho térmico de uma edificação padrão a partir da utilização de PT.	PT ventiladas apresentou um resultado satisfatório. O aumento da cavidade diminui a temperatura interna, promovendo uma maior ventilação natural, a maior espessura da parede aumenta a inércia térmica.
CHARQUI <i>et al.</i> (2023a)	Numerical simulation of turbulent coupled heat transfer in a PT wall subjected to periodic thermal excitations	Temperatura ambiente exterior e radiação solar modeladas por funções sinusoidais com amplitude e média escolhidas para representar o clima temperado a quente de Marrocos	O método dos volumes finitos (FVM) e o algoritmo SIMPLE	Modelo 1 (vidro, ar e parede sólida sem abertura), Modelo 2 (vidro, ar, vidro, ar e parede sólida sem abertura) e Modelo 3 (vidro, ar e parede sólida preenchida de água e sem aberturas)	Um dia típico para o verão e um para o inverno (não disse especificamente qual).	Cidade no Marrocos (Lat: 33°35' N Long: 7°36' O)	Analisar modelos diferentes, com uma camada a mais de vidro ou com camada interna preenchida por água.	Uma PT com vidros duplos tem melhor desempenho do que vidros para inverno e verão. O aumento da largura da coluna de água resulta na melhoria da eficiência. O aumento da condutividade térmica da camada interna melhora a eficiência da PT de água, porém, o ambiente interno torna-se mais

								dependente das mudanças térmicas externas.
CHARQUI <i>et al.</i> (2023b)	Simulation and optimization of the thermal behavior of a PT wall under unsteady conditions	Clima semi-oceânico, Clima subtropical úmido, cfa Köppen e Geiger	Algoritmo SIMPLE foram utilizados em um código computacional escrito em linguagem FORTRAN	Vidro + Ar + Parede maciça (com variação de materiais e sem respiradouros)	Um dia típico para o verão e um para o inverno (não disse especificamente qual).	Marrocos (Lat: 33°35' N Long: 7°36' O)	Comparar a entrada e saída de ar pela camada sólida, e testar materiais como tijolos de barro cozido e blocos sílico-calcários	Um fluxo de entrada máximo é obtido durante o inverno se a PT for feita de tijolos de barro cozidos. Limita a dependência do ambiente das mudanças térmicas externas se for feito de blocos sílico-calcários, sendo indicada para o verão. Ao substituir o ar por argônio, criptônio, ou xenônio, o desempenho é melhorado.
CHEN <i>et al.</i> (2022)	Experimental studies on the energy performance of a novel wavy-shape PT wall.	Um sistema simulador solar foi construído em laboratório no lugar da luz natural externa	Protótipo simulado em condições de laboratório	Vidro + Ar + Parede sólida de 40 cm (em zigzag e todos os modelos tem 70 cm de altura)	–	Em lab	Estudar o material da camada sólida e formato zig zag	O aço inoxidável pintado com tinta preta é a melhor escolha para a camada interna. Os modelos de ângulo de interseção de 90° e 120° apresentam melhor desempenho que o modelo plano em de velocidade do ar, temperatura da superfície e do fluxo de ar. O de 60° apresentou pior desempenho.
DABAIEH <i>et al.</i> (2019)	An urban living lab monitoring and post occupancy evaluation for a PT wall proof of concept.	Clima desértico frio (BWk segundo a Köppen e Geiger)	Construção de modelo e avaliação de pós ocupação - POE	Persianas + Vidro + Película de lã de vidro + Ar + Parede sólida com respiradouros	Todo o verão e todo o inverno	Santa Catarina, em Sinai, Egito (Lat: 30°3' N Long: 31°14' E)	Comparar uma sala de controle sem PT e outra sala com o sistema empregado. Avaliação de pós-ocupação.	A PT teve um bom desempenho durante a maior parte dos dias de inverno, exceto durante a noite. Nas manhãs de verão não fazia diferença, pois a sala normalmente é fresca. Após o pôr do sol, a eficiência da parede era menor.
DONG <i>et al.</i> (2019)	Experimental investigation on the heating performance of a novel designed PT wall	Frio e temperado (Dwa segundo a Köppen e Geiger)	Medição em modelo real	Vidro + placa absorvedora + canal de ar + parede sólida	De 21 a 26 de março de 2017	Harbin, na China (Lat: 19°46' N Long: 90°29' O)	Comprovar a eficiência do com placa absorvedora dentro da cavidade de ar próxima ao vidro da fachada.	A temperatura do ar na sala de teste foi sempre superior à da sala de referência. A diferença de temperatura mais perceptível foi da manhã ou ao meio-dia. A temperatura diminuiu mais lentamente do que o sol
ELAOUZY, e EL FADAR (2022)	Impact of key bioclimatic design strategies on buildings' performance in dominant climates worldwide.	BWh (clima desértico quente), Csa (clima mediterrâneo quente de verão) e Dfb (continental quente-verão úmido)	EnergyPlus e OpenStudio Plugin	Vidro duplo + Ar 30 cm + Parede sólida 47 cm	–	Riade, Tetuão e Montreal (Lat: 33°35' N Long: 7°36' O)	Aplicar em diversos climas e associada a outras soluções bioclimáticas.	A PT pode poupar energia para Riade, Tetuão e Montreal respectivamente. Recomenda projeto de ventilação natural à climas temperados, e projetos de telhados e paredes verdes com uma ótima orientação de construção em climas frios.
GUO, <i>et al.</i> (2023)	Experimental and numerical study on indoor thermal	Clima subtropical úmido, cfa Köppen e Geiger	Construção de protótipo	Vidro orgânico transparente de 3mm + 50cm (variável) de bolsa	Dias 13 e 14 de janeiro de 2020	Songpan, China (Lat: 19°46' N Long: 90°29' O)	Investigar diferentes tamanhos de	A circulação de ar quente é acelerada devido a cavidade de ar. Cavidades de ar estreitas levam a

	environment of solar PT walls with different air-channel thicknesses in plateau.			de ar + painel de aço inoxidável preenchido com adobe de 30 cm			cavidade de ar e sua relação com a diferença de temperatura entre entrada e saída.	fluxo de ar mais rápido e redução do armazenamento de calor, porém grandes reduzirá a diferença entre o fluxo de ar na entrada e na saída do canal.
HONG, LEUNG e HE (2019)	Thermal behaviour of PT wall with venetian blind in summer and transition seasons	-	FLUENT, e algoritmo SIMPLE	Vidro com respiradouros e venezianas + canal de ar + parede sólida com respiradouros	Não simula um dia específico, apenas um "modo verão"	-	Comprovar a eficiência de diferentes modos de ventilação para o verão	A inserção da veneziana gera um aumento na ventilação. Para uma determinada radiação solar recebida pelas lâminas, um ângulo mais elevado das lâminas gera aumento na taxa de fluxo de massa de ar e diminuição na temperatura do ar de saída. A posição da persiana deve mudar conforme a estação do ano e a finalidade. A convecção da massa de ar é mais sensível na saída do que na entrada.
HOU <i>et al.</i> (2021)	Dynamic heat preservation at night for a PT wall with a built-in panel curtain in Western China	Clima quente e temperado, Cfa de acordo com a Köppen e Geiger. (Xi'an)	Simulação numérica ANSYS inc	Vidro 5mm + cavidade de ar fechada + Painel de cortina 3mm + Cavidade de ar circulante + (coberta ou não por camadas de PCM 2 cm e isolante térmico 4 cm) Parede de tijolos 24 cm (com respiradouros superior e inferior)	18 de janeiro e 9 a 24 de março de 2019	Xi'an, Yuzhong, Lhasa, Kunming, Xining, Yinchuan, Lanzhou e Turpan China (Lat: 19°46' N Long: 90°29' O)	Verificar a eficiência da PT com e sem PCM e camada isolante. Varia a espessura da cavidade de ar, abertura e inserção de painel de cortina na cavidade.	Atingiu quantidade de aquecimento é maior e o tempo de aquecimento é mais longo. A espessura da cavidade deve ser maior que 0,07 m, e o efeito varia dentro de uma pequena faixa quando ultrapassa 0,1 m. A espessura da cavidade fechada varia com o clima. A cortina de painel deve estar onde a resistência térmica da cavidade fechada é mais alta e o ar circulado na cavidade está em um estado de fluxo turbulento.
IRSHAD <i>et al.</i> (2022)	Parametric analysis and optimization of a novel photovoltaic PT wall system with venetian blinds: Experimental and computational study.	Cwa Köppen e Geiger Clima árido (Classificação climática de Köppen-Geiger: BWh)	Software ANSYS Fluent TM 18.2 e ANSYS Meshing TM	Vidro com células fotovoltaicas 4mm + Ar e venezianas + Parede sólida com dois respiradouros com ventuinhas 15 cm	Março a junho de 2019	Sala de teste experimental. Abha, província de Asir, Arábia Saudita (Lat: 24°41' N Long: 46°43' E)	Adicionar painel fotovoltaico e analisa o espaçamento da veneziana, o ângulo e a taxa de fluxo de ar.	Para a localidade simulada a configuração ideal do sistema é ter espaçamento cego de 45 mm, taxa de fluxo de ar de 0,2 m/s e ângulos VB de 60°. Através da integração das venezianas com o PT fotovoltaico, a geração máxima de energia dos painéis fotovoltaicos é aumentada em 8,6% nos períodos de tempo relatados.
ISLAM <i>et al.</i> (2021)	Numerical and experimental study on the performance of a Photovoltaic PT wall	Cwa Köppen e Geiger Clima árido (Classificação climática de	Simulação numérica com o software MATLAB	Vidro com respiradouro inferior 3,2mm ou Painel fotovoltaico + Venezianas + Ar + Parede sólida com dois	2 de março a 10 de julho de 2019	Abha, na Arábia Saudita (Lat: 24°41' N Long: 46°43' E)	Comparar a eficiência da PT fotovoltaica com venezianas com a	A taxa de transferência de calor na PT com veneziana é maior. O maior ganho de calor é devido ao vidro da PT com veneziana permitindo a passagem da radiação solar, que é

	system with Venetian blinds	Köppen-Geiger: BWh)		respiradouros controláveis (inferior e superior)			PT comum com venezianas	bloqueada no caso da PT fotovoltaica com veneziana.
KE <i>et al.</i> (2023)	Effects of the PCM layer position on the comprehensive performance of a built-middle PV-PT wall system for building application in the heating season	Clima subtropical úmido, cfa Köppen e Geiger	Sketup para modelagem e METLAB para cálculo	Vidro 3,2mm + Ar + Parede maciça (Cel. Fotovoltaica 1mm + PCM 20mm + Isolamento 50mm + concreto 200mm)	Foi simulado em uma semana típica de inverno.	Hefei,Urumqi, Xangai e Lhasa na China (Lat: 19°46' N Long: 90°29' O)	Investigar o desempenho de células fotovoltaicas com PCM associados. Efeitos da posição da camada PCM no desempenho.	O modelo com a camada de isolamento logo após as cel. Fotovoltaicas gerou melhor efeito elétrico, porém menos efeito térmico das demais. A parede sem camada de isolamento mostra um melhor equilíbrio térmico durante a noite. Para as áreas mais frias do inverno, o PCM deve ser mais interno.
KRÜGER, SUZUKI e MATOSKI (2013)	Evaluation of a PT wall system in a subtropical location	Clima oceânico, cfb Köppen e Geiger	Célula de teste em canteiro experimental.	Vidro duplo de 4mm e 5mm (com aberturas superior e inferior) + Ar + Camada sólida de blocos cimentícios (com aberturas superior e inferior)	Para o verão intervalos de tempo para a medição entre os dias 29/12/2011 e 29/01/2012. Para o inverno intervalos entre 24/05/2011 e 24/09/2011.	Curitiba – PR, Brasil (Lat: 25°25' S, Long: 49°16' O)	Avaliar os benefícios de um sistema de PT tanto para resfriamento quanto para aquecimento em um local subtropical em altitude elevada.	A ventilação superior da parede de armazenamento fechada enquanto mantém todas as outras aberturas abertas, tem o maior potencial para resfriamento interno no verão. A melhor configuração no período frio foi com a ventilação natural entre a PT e o interior, sem troca com o exterior.
LI <i>et al.</i> (2024)	Thermal comfort in a building with PT wall integrated with phase change materials in hot summer and cold winter region without air conditioning.	Clima subtropical úmido, cfa Köppen e Geiger	Construção de protótipo experimental e DesignBuilder	10 modelos diferente, sendo eles: parede comum, PT convencional e PT com pcm de fusão 18, 20,22,25 e 28 cada um nas opções interna ou externa a parede sólida.	Mediu no protótipo em três meses de inverno (dezembro a fevereiro) e em três meses de verão (junho a agosto)	Changsha, China (Lat: 19°46' N Long: 90°29' O)	Investigar tipos de PCM e melhor local de aplicação.	O PCM próximo à superfície interna, no verão, ajudou a controlar para não superaquecer. No inverno com o PCM interno mais calor foi liberado no interior, porém com temperatura média mais baixa durante o dia. Quando verão quente e inverno frio, deve ser dada prioridade a PT com PCM 25 colocado junto à superfície interna. Foram recomendados PCMs com temperatura de mudança de fase 7 °C.
LI <i>et al.</i> (2019)	Numerical study on thermal performance of PCM PT Wall	subtropical úmido (Köppen Cfa)	TRNSYS software	Vidro com respiradouros + Ar + Parede sólida com respiradouros (concreto+ PCM+ isolante+ PCM)	1 de junho a 31 de agosto para o verão e 1 de novembro a 31 de janeiro para o inverno	Wuhan, China (Lat: 19°46' N Long: 90°29' O)	Estudar diferentes configurações de abertura para verão e inverno de um novo modelo de parede com dupla camada PCM.	No verão o PCM externo impede parcialmente a entrada de calor, a parede ajuda a não ocorrer o superaquecimento de verão. No inverno o PCM interno evita que o calor absorvido se dissipe para fora, assim a parede armazena o calor e libera em momentos de baixa temperatura.

LI e CHEN (2019)	Numerical analysis on the thermal performance of a novel PCM-encapsulated porous heat storage PT-wall system	Clima subtropical úmido, cfa Köppen e Geiger	Simulação numérica COMSOL Mutiphysics, SIMPLER	Painel de vidro + camada de ar 10cm + PCM encapsulado poroso 6cm + camada de ar 8cm + parede sólida com respiradouros 10cm + painel isolante térmico.	Os seis dias mais ensolarados de dezembro.	Xangai, China (Lat: 19°46' N Long: 90°29' O)	Testar efeitos do novo tipo de parede composta que incorpora cápsulas granulares de PCM e sem PCM	A temperatura ambiente média pode ser aumentada durante a noite. A porosidade tem impacto no sistema de aquecimento, não houve efeito do tamanho do grão. O painel isolante térmico no local utilizado evita o superaquecimento no verão e evita a perda de calor no inverno.
LIN <i>et al.</i> (2019)	Experimental and numerical study on the performance of a built-middle PV PT wall system.	Clima subtropical úmido, cfa Köppen e Geiger	Medição em modelo real	Vidro com respiradouros + painel fotovoltaico + canal de ar + parede sólida com respiradouros	20,21 e 22 de dezembro de 2017	Hefei, na China (Lat: 19°46' N Long: 90°29' O)	Comparar duas PT com placa fotovoltaica junto ao vidro e afastada do vidro e de aberturas de respiradouros.	O modelo com a placa fotovoltaica afastada do vidro tem uma menor eficiência de geração de energia, porém o ganho térmico no modelo recuado é maior. Quando a posição das células fotovoltaicas está na faixa de 12 mm a 30 mm, a eficiência total atinge um máximo.
LUCCAS e MATOSKI (2022)	Estudo de viabilidade da aplicação de uma parede "PT" na região de Curitiba.	Clima oceânico, cfb Köppen e Geiger	Célula de teste em canteiro experimental.	Vidro duplo de 4mm e 5mm (com abertura inferior) + Ar + Camada sólida de blocos de concreto (com aberturas superior e inferior)	Durante os dias de 24 a 29 de maio de 2011, e durante os dias de 31 de maio de 2011 a 05 de junho de 2011.	Curitiba – PR, Brasil (Lat: 25°25' S, Long: 49°16' O)	Avaliar os benefícios de um sistema de PT tanto para resfriamento quanto para aquecimento em Curitiba.	A PT pode reduzir o consumo de energia, na utilização dos aparelhos elétricos, mas não chegar ao conforto sozinho. A PT tem eficácia maior para aquecer a edificação após o meio dia.
MA <i>et al.</i> (2018)	Study on the utilization of heat in the mechanically ventilated PT wall in a house with a central air conditioning and air circulation system.	Clima subtropical úmido, cfa Köppen e Geiger	Simulação de medições e cálculos numéricos são feitos com o software THERB for HAM	Vidro duplo de 3mm e cavidade de ar de 12cm. Parede sólida de sanduíche de placas de gesso com concreto e espuma rígida no interior (31cm). Cavidade com 1,36m. PT semelhante a uma varanda estufa.	todos os dias de fevereiro e março	Miyazaki, Japão (Lat: 35°41' N Long: 139°41' E)	Analisar nove modelos com diferentes combinações de métodos de ar condicionado, quantidades de fluxo de ar da PT.	A temperatura no interior da PT permanece elevada mesmo com a circulação de ar, resultando em aquecimento. O aumento da capacidade da PT de armazenar calor leva a queda mais suave da temperatura noturna. Há momentos que a PT pode aquecer a uma temperatura confortável.
MA <i>et al.</i> (2019)	Optimizing energy performance of a ventilated composite PT wall in an office building.	Subtropical úmido (Cfa segundo a Köppen e Geiger)	THERB for HAM	Vidro duplo (4 mm + ar 12mm+ 4mm) + Ar 35 cm + Concreto com respiradouros 35cm + Ar 65 mm + Isolamento 412 mm (lã de vidro e placa de gesso)	1 de novembro a 31 de março	Kitakyushu, em Fukuoka, no Japão (Lat: 35°41' N Long: 139°41' E)	Estudar o potencial de aquecimento da PT composta para um edifício de escritórios	É melhor fornecer ar da camada interna ventilada em dezembro, fevereiro e março. É melhor fornecer ar da camada de ar ventilada externa e da camada de ar ventilada interna juntos em novembro. Em janeiro é melhor não fornecer ar.

MABROUKI <i>et al.</i> (2023)	A study of a passive heating design employing a PT wall with PCM: A numerical investigation of the semi-oceanic climate in Morocco.	Clima semi-oceânico, Clima subtropical úmido, cfa Köppen e Geiger	Software DesignBuilder interface EnergyPlus	Vidro 3cm + Ar1,3 cm + Vidro 3 cm + Ar (variável)+ Parede maciça (leve e pesada)	Ano todo	Ifrane, Marrocos (Lat: 33°35' N Long: 7°36' O)	Estudar a espessura da camada PCM, espessura da bolsa de ar e parede sólida variando de leve e pesada.	O melhor comprimento de sombra é de 0,9 m. No clima semi-oceânico, o melhor PCM foi o RT 28 HC com uma espessura de 3 cm. As aberturas facilitam a transferência de ar para o interior por convecção, reduzindo a carga de aquecimento.
MELERO <i>et al.</i> (2011)	Passive evaporative cooling by porous ceramic elements integrated in a PT wall.	Clima oceânico (Classificação climática de Köppen-Geiger: Cfb)	-	Vidro (abertura inferior que funciona no verão) + Cavidade com tijolos evaporativos + Divisória sólida (com aberturas superior e inferior)	15 de janeiro e 15 de julho de um mesmo ano	Madri, Espanha (Lat: 42° 11' N, Long: 0° 20' 20" L)	Explorar a adição de tijolos evaporativos para a filtragem de ar e otimização do sistema PT.	A solução apresentou elevado nível de passividade e baixo consumo, menores emissões de CO ² e melhor qualidade do ar interior. A inserção de tijolos evaporativos permite que a PT funcione o ano todo.
RABANI, KALANTAR e RABANI (2019)	Passive cooling performance of a test room equipped with normal and new designed PT walls: A numerical approach	Clima mediterrânico (Classificação climática de Köppen-Geiger: Csa)	Modelo físico experimental.	Recebe radiação solar de três direções. vidro + canal de ar 30cm (com paredes laterais em vidro tbm) + parede sólida com respiradouros 20 cm + chaminé solar	30 de junho de 2015	Yazd, Irã (Lat: 43°18' N Long: 44°5' E)	Averiguar a funcionalidade da PT associada com uma chaminé solar e sistema de pulverização de água no verão.	A temperatura ambiente média na nova PT é inferior à normal. Pela manhã gera maior ventilação de ar do que o tipo normal, o tipo normal demora mais para estabelecer a ventilação natural, porém com o passar do tempo ganha mais velocidade. A eficiência média diária de é superior.
RABANI (2022)	Experimental comparison of energy and exergy analysis of a new designed and a Normal PT wall.	Clima mediterrânico (Classificação climática de Köppen-Geiger: Csa)	Modelo físico experimental.	Largura menor que a normal aumentando a área interior e pode receber radiação solar de três direções.	No dia mais frio do ano (5 de janeiro de 2021).	Yazd, Irã (Lat: 43°18' N Long: 44°5' E)	Comprovar novo design de PT com vidro nas laterais, associada à Chaminé solar.	A nova PT pode receber a radiação solar de três direções, o que deixa o absorvedor da PT exposto ao sol em todas as horas do dia e aumenta sua temperatura média. A temperatura máxima do ar do canal no novo tipo é mais alta do que no tipo normal, transferindo mais calor.
RABANI e RABANI (2019)	Heating performance enhancement of a new design PT wall using rectangular thermal fin arrays: An experimental approach.	Clima mediterrânico (Classificação climática de Köppen-Geiger: Csa)	Modelo físico experimental.	Vidro + Ar 30cm + Parede sólida de betão 20 cm Largura menor que a normal aumentando a área interior e pode receber radiação solar de três direções.	Janeiro e fevereiro de 2018	Yazd, Irã (Lat: 43°18' N Long: 44°5' E)	Analisar o efeito da aplicação de aleta térmica vertical na camada interna da PT com novo design, com três tipos de aletas de alumínio, latão e cobre.	Ambas aletas produziram uma distribuição de temperatura semelhante na sala. Porém, a aleta de cobre resultou em condições mais do que a aleta de alumínio. No verão o efeito do número de aletas promoveu distribuição de temperatura maior.

SABOORI <i>et al.</i> (2022)	A novel macro-scale machine learning prediction based on high-fidelity CFD simulations: A case study on the pore-scale porous PT wall with phase change material capsulation.	–	Uma combinação de Python-TensorFlow, para modelar o fluxo e as técnicas de Monte Carlo.	Vidro 2mm + Ar + Placa de PCM de fibras porosas 10mm + Placa de isolamento térmico 100mm (sem respiradouros em nenhuma abertura)	Um período de 24 horas, não especificado qual dia do ano.	–	Validar de novo modelo PT com uso de PCM poroso.	A eficiência térmica máxima ocorre quando a concentração de cápsulas de PCM é maior que $6,5 \times 10^3$ (cápsulas.cm ⁻³). A faixa ideal de porosidade da parede é entre 38 e 53%.
SANCHEZ e HANCCO (2022)	PT walls with porous medium insertion and their influence on thermal comfort in flats in Cusco, Peru	Clima oceânico subtropical das terras altas (Classificação climática de Köppen-Geiger: Cwb).	Autodesk® CFD	Vidro 8mm + Ar 20 cm + Parede sólida de tijolos com respiradouros 25 cm	Junho, julho e agosto para o inverno, janeiro para o verão, abril para o outono e outubro para a primavera	Cusco, no Peru (Lat: 12°02' S Long: 77°01' O)	Comparar habitações sem PT, com PT tradicional, e com PT com inserção de pastilhas de vidro e plástico.	O resultado do sistema com pastilhas de acrílico é melhor que o PT tradicional e até que a com pastilhas de vidro.
SHEIKHOLESLAMI e AL-HUSSEIN (2023)	Modification of heat storage system involving PT wall in existence of paraffin enhanced with nanoparticles	Clima mediterrânico (Classificação climática de Köppen-Geiger: Csa)	MATLAB e ANSYS FLUENT	Vidro + Ar + Parede de 30 cm com respirador (absorvedor, concreto, PCM, concreto e isolante)	Um dia ensolarado de outono.	Babol, Irã (Lat: 43°18' N Long: 44°5' E)	Estudar a inserção de materiais de mudança de fase nano-aprimorados.	A Aplicação de parafina aumenta a temperatura do ar na bolsa de ar interna.
SIMÕES, MANAIA e SIMÕES (2021)	Energy performance of solar and PT walls in Mediterranean climates.	Clima mediterrânico (Classificação climática de Köppen-Geiger: Csa)	DesignBuilder e EnergyPlus	Parede de tijolo maciço de armazenamento, com 35 cm com respiradouros de altura de 17cm. Vidro duplo de 6mm com cavidade de ar de 13,6 entre eles. Bolsa de ar de 28 cm.	De 15 de Outubro a 31 de Maio e de 1 de Junho a 30 de Setembro para ver aquecimento e arrefecimento.	Évora (em todas as fases), Porto, Bragança, Sevilla, Murcia, Barcelona, Marceille, Napoli, Ancona, Venezia, Tunis, Agiers e Athens (Lat: 38°43' N Long: 9°07' O)	Estudar dispositivos de sombreamento, espessura da parede e tamanho de aberturas com operação sazonal e diária.	A espessura da camada interna influencia na atenuação da amplitude térmica. A PT com venezianas proporciona redução anual de energia. Respiradouros com variáveis entre 5 e 30 cm, geram pequenas diferenças de desempenho. As localidades mais ao sul tiveram um desempenho menor no verão.
SZYSZKA, BEVILACQUA e BRUNO (2022)	A statistical analysis of an innovative concept of PT Wall by experimental tests	Condições de laboratório	Ensaio laboratoriais realizados em câmara climática	O ar caminha horizontal e verticalmente dentro da parede de baixo para cima. Vidro + superfícies absorventes + cavidade +isolamento +parede espessa.	Mede apenas fluxos de calor durante alguns minutos	Em laboratório.	Calcular a eficiência térmica de 16 testes realizados variando a temperatura do ar externo, a energia absorvida e o tempo de duração	A eficiência térmica foi influenciada principalmente pela potência do calor fornecido ao absorvedor, gerando uma alteração na eficiência térmica. Coeficiente de transferência de calor na parede, igual a 0,227 W/m ² K, comprovando a significativa resistência térmica.

SUZUKI (2012)	Avaliação do potencial de aquecimento/resfriamento de um sistema de climatização passiva	Clima subtropical húmido de inverno frio	Canteiro experimental	Vidro duplo com respiradouros 17cm + cavidade 20cm + camada sílica de bloco de concreto preenchido de concreto com respiradouros 24cm	Mede a temperatura do ar	Curitiba – PR, Brasil (Lat: 25°25' S, Long: 49°16' O)	Estudar a temperatura com múltiplas configurações de ventilação	Encontrou o melhor resultado para o inverno na configuração onde apenas a abertura superior para o ambiente externo é fechada.
TUNÇ e UYSAL (1991)	Passive solar heating of buildings using a fluidized bed plus PT wall system.	–	Cálculo numérico	Vidro + Cavidade de ar com uma ventoinha na parte inferior (fluidizada ou não) + Parede sólida (com aberturas inferior e superior)	–	–	Analisar a PT clássica, e fixar na cavidade de ar partículas de baixa densidade.	Na parede fluidizada o calor é extraído do sistema em função do comprimento do canal tem um resultado superior ao caso da PT clássica. Tais resultados indicam que a parede fluidizada é um conceito viável e superior.
WU, XU e XIAO (2020)	Air purification and thermal performance of photocatalytic-PT wall based on multiple physical fields coupling.	–	Software comercial de CFD COMSOL	Vidro de borossilicato de alta pureza com camada fotocatalítica + ar + placa absorvente + camada sólida (sem certeza, não descrevem bem no artigo)	Sem dia definido	–	Verificar uma PT que purifica o ar, e possui placa fotovoltaica.	Aumentando a radiação, a eficiência térmica da PT aumenta, mas a taxa de purificação do ar primeiro aumenta e depois diminui. A PT Fotocatalítica tem a eficiência máxima quando a largura é de 0,04 m, e a maior taxa de purificação é da largura 0,05 m.
WU, WU e XIAO (2023)	Effects of aspect ratio and inlet wind velocity on thermal characteristics of PT wall channel under different ventilation strategies: An indoor experiment.	Condições de laboratório	Condições de laboratório	Vidro + Ar + Parede maciça (placa de aquecimento, placa de polipropileno/PP e isolante)	–	Em laboratório.	Analisar as características térmicas do fluxo de ar.	Quando o fluxo de calor é superior a eficiência térmica primeiro aumenta e depois diminui. O aumento da ventilação de entrada pode comprometer o desempenho da transferência de calor do canal. A eficiência térmica é melhor com o fluxo de calor pequeno.
XIAO, QIN e WU (2022)	Proposal and application of comprehensive thermal comfort evaluation model in heating seasons for buildings with solar PT wall.	Clima subtropical úmido, cfa Köppen e Geiger	METLAB e indicador de cálculo SET	Vidro 3,2 mm (com respiradouros sem medida indicada q abrem e fecham) + Células fotovoltaicas + Ar 12 cm + Parede maciça 43 cm	Condições ambientais de um dia típico de inverno.	Hefei, na China (Lat: 19°46' N Long: 90°29' O)	Realizar uma avaliação do conforto térmico.	A PT solar pode ser usada para criar um ambiente térmico interno satisfatório, é mais aplicável em regiões mais quentes. Diferenças nos períodos de tempo gera diferentes indicadores de avaliação, o que levará a diferentes efeitos de economia de energia.
XU <i>et al.</i> (2023)	Thermal performance of a novel PT wall integrated with direct absorption solar collector based on phase change slurry in winter	Clima subtropical úmido, cfa Köppen e Geiger	Programa MATLAB e FLUENT.	Vidro + Ar + Duto de condução de pasta de mudança de fase+Parede maciça (com dois respiradouros).	Janeiro (inverno)	Hefei, China (Lat: 19°46' N Long: 90°29' O)	Estudar a inserção de materiais de mudança de fase nano-aprimorados.	A Aplicação de parafina aumenta a temperatura do ar na bolsa de ar interna.

YANG <i>et al.</i> (2022)	Transient analysis of buildings with PT wall in a southern envelope and strengthening efficacy by adding phase change material	Só cita que é clima frio da China	Simulação numérica com a equação Momentum.	Vidro + Ar + Parede sólida com respiradouros (com PCM ou sem)	Simula um dia de verão e um dia de inverno sem especificar qual dia. Depois simula médias mensais para o ano todo.	–	Relacionar o cômodo com e sem a parede e com parede de PCM.	A PT comum no lado sul do edifício aquece o espaço interior e altera o consumo de energia durante o inverno. A PT aqueceu o interior no verão, aumentando o consumo de energia. No inverno, o PCM armazena energia e durante a noite. No verão, o PCM pode atuar como escudo térmico para evitar a entrada de calor.
ZHOU <i>et al.</i> (2020)	Investigation on the thermal performance of a composite PT wall under steady state condition.	–	ANSYS Fluent	Vidro 6 mm + Ar 100 mm + película de PCM 12 mm + Parede de água + película de PCM 12 mm + Ar 100 mm + Parede sólida com respirador 30 cm/PCM 12 mm + Parede de água + PCM 12 mm + Ar 100 mm + Parede sólida com respiradouros 30 cm	–	–	Comparar dois tipos de PT com a inserção de uma espécie da parede de água cercada por PCM.	A PT de água apresenta o melhor desempenho térmico durante o dia. Isto porque ela é capaz de reduzir a convecção natural, sendo a melhor em eficiência térmica dos três tipos. A PT de água pode reduzir a perda de calor em comparação com a PT comum.
ZHOU e RAZAQPUR (2024)	CFD modeling and experimental validation of the thermal performance of a novel dynamic PCM PT wall: Comparison with the companion static wall with and without PCM.	Clima continental úmido quente (Classificação climática de Köppen-Geiger: Dfa).	Protótipo construído em laboratório, o clima não interferiu. ANSYS Fluent	Vidro com respiradouros 6mm + Ar + Camada absorvedora + Camada de PCM + Parede sólida de tijolos com respiradouros + Camada isolante (as quatro últimas camadas giram)	24 horas não específicas	Nankai, na China (Lat: 19°46' N Long: 90°29' O)	Validar 3 sistemas de PT, uma com a parede dinâmica proposta, a outra com uma parede estática análoga e a última idêntica à parede estática, porém sem PCM	A parede dinâmica pode reduzir a perda de energia através do vidro e a energia armazenada nos materiais sólidos da célula, ao mesmo tempo que aumenta a temperatura do ar condicionado dentro da célula.
ZHU <i>et al.</i> (2021)	Coupling optimization study of key influencing factors on PCM PT wall for year thermal management	Clima subtropical úmido (Köppen Cfa)	Transferência de calor TRNSYS e do software de otimização GenOpt	Vidro (com respiradouros controlados inferior e superior) + Ar + Parede sólida com dois respiradouros controlados 48 cm (inferior e superior)	Anual	Wuhan, na China (Lat: 19°46' N Long: 90°29' O)	Comparar PT tradicional com aplicação de PCM e não. Espessura da bolsa de ar e tamanho do sombreamento também.	A temperatura de fusão da camada de PCM de temperatura mais baixa foi de 16,5 °C a temperatura de fusão da camada de PCM de temperatura mais alta foi de 27,75 °C. A sala com a PT com PCM teve um aumento de 13,52% na a carga total anual de energia do edifício.
ZHU <i>et al.</i> (2019)	Numerical investigations on performance of phase change material PT wall in building	Clima subtropical úmido (Köppen Cfa)	Software TRNSYS	Vidro com respiradouros controlados 4mm + Ar + Parede sólida com respiradouros controlados de concreto 240mm + PCM 30mm + Isolante térmico 20 mm + PCM 30mm	1º de junho a 31 de agosto e de 1º de novembro a 31 de janeiro no inverno	Wuhan, China (Lat: 19°46' N Long: 90°29' O)	Validar novo modelo de PT integrado com painel de PCM de camada dupla.	Os materiais compostos de parafina mostraram-se adequados. O pico de carga de resfriamento na sala PCM foi reduzido. A temperatura na sala do PCM foi superior. O painel interno de PCM foi eficaz na prevenção do aquecimento durante o dia e no aquecimento durante a noite.

Fonte: Autora.

3. MÉTODO

Este capítulo apresenta o modelo de referência de edifício com PT, considerando suas características dimensionais e materiais usados. São ainda apresentados os modelos alternativos com os elementos construtivos que serão testados, a forma de modelagem e parâmetros de simulação, o clima definido e os parâmetros de análise usados nesta investigação.

3.1. Desenvolvimento do modelo de referência

O modelo de referência definido para este estudo é uma célula teste sem condicionantes externas tais como edificações ou vegetação ao entorno, com dimensões 5m x 5m x 3m (comprimento x largura x altura). O ambiente possui uma abertura na face sul com dimensão total livre de 2 m², aberta entre 8 e 18h para todo o ano, o que promove a ventilação e colabora com a inversão térmica dentro do ambiente. A PT foi modelada em toda a superfície da parede (para deixar mais evidente as alterações térmicas geradas por ela) voltada para a face norte seguindo o indicado por Krüger, Suzuki e Matoski (2013), que afirmam que o sistema deverá ser posicionado na edificação de forma que fique voltada para a linha do Equador para ter maior potencial de irradiância nos períodos de inverno. Em todos os casos testados as configurações básicas de materiais (Tabela 2) e as dimensões permaneceram inalteradas, excetuando-se aquelas relativa ao teste realizado. O modelo (Figura 6) e os materiais utilizados foram definidos com base nas referências Rabani (2022) e Sergei, Shen e Jiang (2020).

Tabela 2- Propriedades dos materiais de construção do ambiente de análise.

	Material	Espessura [cm]	Transmitância térmica [Wm ⁻² K ⁻¹]
Camada interna PT	Concreto	10	3,1
Camada de vidro PT	Vidro claro simples	6 mm	5,8
Demais paredes	Tijolo	15	0,9
	Argamassa	2	
Lajes (piso e teto)	Concreto	10	3,1

Fonte: Autora

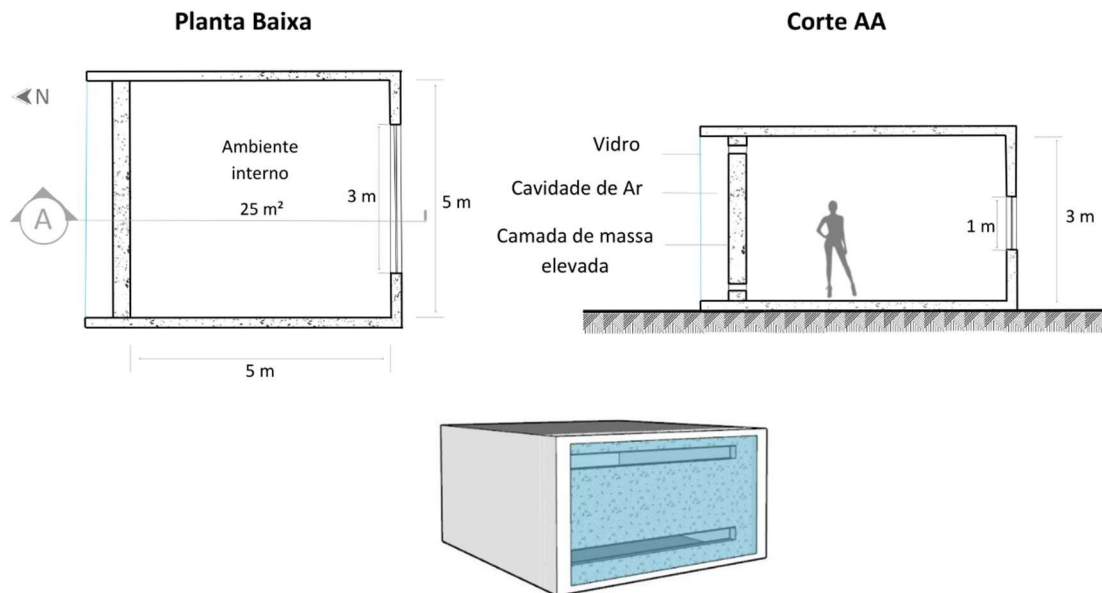


Figura 6 - Modelo do ambiente com PT com respiradouros em corte e planta. Fonte: Autora

As medidas da PT foram definidas a partir dos resultados de Sergei, Shen e Jiang (2020), que indica que a proporção ideal da espessura da bolsa de ar entre o vidro e a parede sólida é de cerca de 1/10 da altura da parede (Alharbi *et al.*, 2022), (Sergei, Shen e Jiang, 2020). Assim, para o modelo simulado neste estudo, a espessura da bolsa de ar foi de 30 centímetros. Para o material da camada de elevada massa térmica foi usado o concreto de 20 cm e a espessura da camada de vidro é de vidro simples de 6 mm, seguindo a referência de Zhou *et al.* (2020), Zhou e Razaqpur (2024) e Simões, Manaia e Simões (2020).

3.2. Modelos alternativos

Dimensões de aberturas dos respiradouros

Para a abertura dos respiradouros, em todos os casos eles foram configurados como 100% abertos, 24 horas por dia e sete dias por semana. Quanto à variação na dimensão dos respiradouros experimentados, foram escolhidos modelos de 10%, 17,5% e 30,5% de abertura dentro do total da superfície da camada espessa da PT. Assim, de um total de 15m² de superfície de parede espessa tem-se duas aberturas

de mesma dimensão, que somadas resultam nas porcentagens definidas, uma a 40 cm do piso, e outra no topo, a 40 cm da laje. As aberturas de 10% são de dimensão 4,4 m x 0,17 m, as de 17,5% são de 4,4 m x 0,30 m, e as de 30,5% são de 4,4 m x 0,52 m conforme Figura 7 .

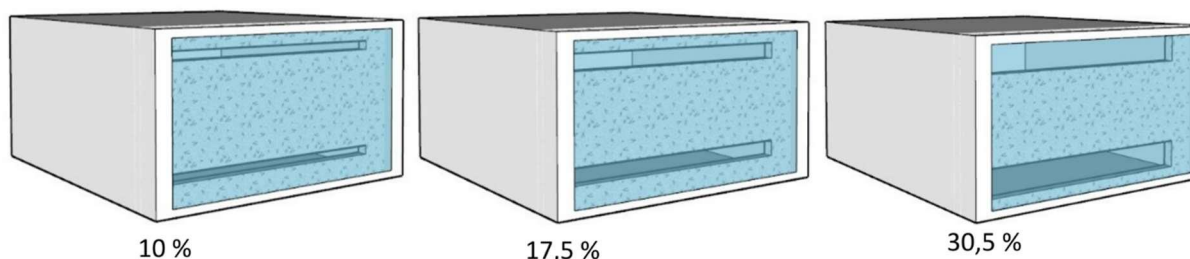


Figura 7 - Diferentes porcentagens das aberturas na camada mais espessa. Fonte: Autora

Espessura da camada interna

As espessuras já estudadas em pesquisas anteriores apresentam uma considerável variação a depender do objetivo a se alcançar. Assim, há modelos com 15 cm de espessura (Irshad *et al.*, 2022) e outros com 48 cm (Zhu *et al.*, 2021). Como este estudo investiga o uso da PT em clima ameno, em que há possibilidade de superaquecimento, as espessuras testadas iniciam em 10 cm, seguindo para 20 cm, como aconselhado por Rabani, Kalantar e Rabani (2019), e prosseguirão até o limite de 50 cm de espessura. As transmitâncias térmicas das paredes consideradas são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3- Transmitância conforme espessura da parede interna.

Espessura da parede de concreto (cm)	Transmitância térmica [Wm ² K ⁻¹]
10	3,12
30	2,38
50	1,90

Fonte: Autora

Material da camada interna

Para este teste foi alterado somente o material da camada de elevada massa térmica a partir do modelo de referência. Foram testados concreto, blocos de concreto vazados com argamassa e pedra basalto (Tabela 4). Além disso, foi considerada a adição de uma película isolante na face mais interna da camada, conforme experimento recomendado por Li e Chen (2019), de forma a evitar não só o superaquecimento no verão, como a perda de calor no inverno. O concreto foi escolhido por influência do estudo de Ma *et al.* (2018) que usa o concreto como um dos três materiais aglomerados da camada sólida para que o aumento da capacidade da PT de armazenar calor, levando a uma queda mais suave da temperatura noturna. Os blocos de concreto com argamassa são uma releitura de material vernacular local brasileiro do bloco sílico-calcários utilizado por Charqui *et al.* (2023b). Já a escolha da pedra basalto foi baseada no fato de ser o material de maior transmitância térmica fornecido pelo software DesignBuilder, para fins de comparação com os demais. Além disso, estudos já a identificaram como um dos fatores para garantir um bom resultado térmico (Dabaieh *et al.*, 2019), Ma *et al.* (2019) recomendam o estudo deste material para investigações futuras.

Tabela 4- Transmitância material da camada de elevada massa térmica.

Material da cama de elevada massa térmica para espessura de 10 cm	Transmitância térmica [Wm²K⁻¹]
Concreto	3,125
Bloco de concreto vazado com argamassa	1,368
Pedra Basalto	5,034

Fonte: Autora.

Material da camada externa

Os tipos de vidro testados são: o simples transparente, duplo transparentes e o simples na cor bronze (Tabela 5). Os vidros simples seguem exemplos das seguintes referências: (Baïri *et al.*, 2020) (Zhou *et al.*, 2020). O vidro duplo também já foi usado em diferentes estudos (Ma *et al.*, 2018) (Charqui *et al.*, 2023a) (Ma *et al.*,

2019). Já os testes com vidro bronze têm como objetivo verificar se a cor mais escura do mesmo pode ou não gerar uma maior retenção ou absorção de calor.

Tabela 5 - Transmitância conforme material de camada de vidro.

Tipo de vidro	Espessura	Transmitância térmica [Wm ⁻² K ⁻¹]
Simples transparente	6 mm	5,78
Duplo transparente	6/6/6mm	2,3
Simples bronze	6mm	5,78

Fonte: Autora.

Espessura da cavidade de ar

Foram testadas as seguintes espessuras: 10 cm, 30 cm e 50 cm. As definições consideraram a diferença de resultados nos climas já estudados (Li e Chen, 2019), (Alharbi *et al.*, 2022) Baiiri *et al.* (2020). As espessuras se limitam ao máximo de 50 cm pois segundo Gou *et al.* (2023), camadas muito espessas tendem a reduzir a diferença de temperatura entre o fluxo de ar na entrada e na saída do canal, diminuindo assim a quantidade de calor trazida para a sala.

Inserção da Chaminé Solar

Um novo elemento associado ao sistema da PT, a Chaminé Solar foi considerada nesta etapa. A união dos dois sistemas já foi proposta em estudos anteriores tais como: Rabani, Kalantar e Rabani (2019), Rabani e Rabani (2019) e Rabani (2022). Para a simulação de Chaminé Solar associada à PT o modelo básico inicial foi acrescido em 1,5 metros de altura, elevando a laje de fechamento superior e adicionando uma janela de ventilação no sentido oposto à fachada envidraçada, assim como mostra a (Figura 8). Dessa forma foi mantido o método de partir de um mesmo modelo básico (Figura 6), alterando apenas o elemento foco da seção de resultado.

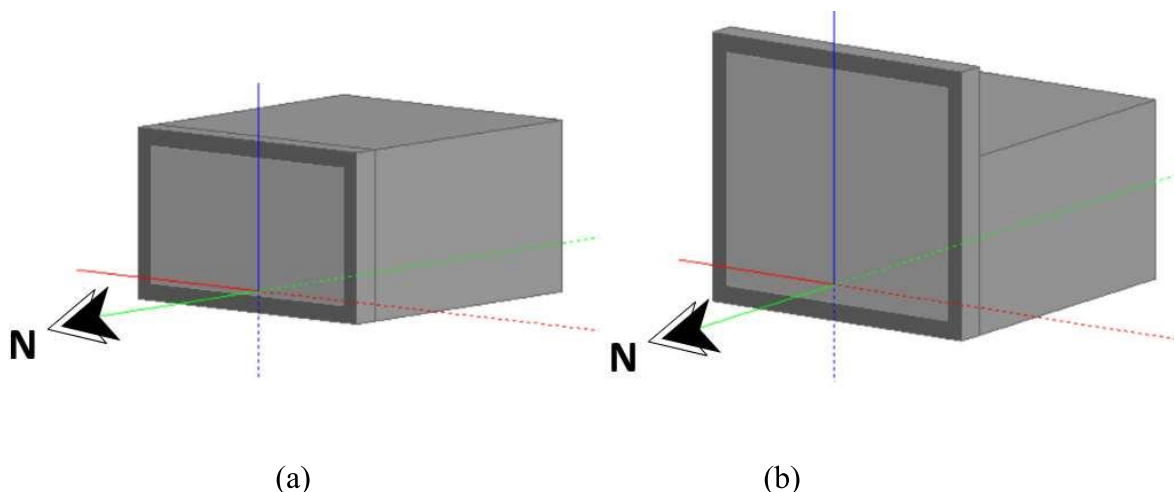


Figura 8 - Modelo de simulação Design Builder. Fonte: Autora.

3.3. Modelagem e simulação

Para a modelagem do protótipo do presente estudo, foi utilizado o Software DesignBuilder com a construção do modelo dentro da própria ferramenta. O modelo contém duas zonas térmicas, sendo uma no interior do ambiente e a outra na PT. O elemento que delimita as duas zonas térmicas foi a camada interna da PT, que foi configurada como “*partition*” ou parede de partição. Dessa forma, o *software* reconhece que esse elemento se liga às duas zonas e suas aberturas promovem trocas de ar entre elas (Figura 8).

Nas configurações, foram inseridas as especificações dos materiais tais como dimensões, propriedades térmicas e cronograma de horários para aberturas. Dessa forma, o tipo de simulação foi demarcado como térmica com ventilação exclusivamente natural, sem quaisquer influências extras, mantendo as abas HVAC e CFD desabilitadas. Nas opções de simulação foram escolhidos: a distribuição solar como interior e exterior completas, método de cálculo de sombreamento de recorte de polígono e algoritmo de modelagem difusa do céu simples.

3.4. Forma de análise dos resultados

Embora o software ofereça dados do ano completo com intervalos de dados de hora em hora, foram considerados dois intervalos, de 15 a 21 de janeiro e de 15 a 21 de julho, semanas típicas de verão e inverno, conforme feito por Bevilacqua *et al.*

(2019). Os dados de saída determinados para análise foram de temperatura do ar do ambiente interno e a temperatura operativa para cálculo de conforto. Os dados gerados foram exportados, tratados e analisados a partir da ferramenta Excel. Sua apresentação nesta dissertação foi feita de modo a comparar o desempenho de cada elemento construtivo testado e o desempenho da simulação de um cômodo com as mesmas dimensões e demais configurações, com exceção de não conter uma PT. Os resultados de temperatura também foram comparados com os resultados da temperatura do ar externo (*dry bulb temperature*).

3.5. Condições climáticas

O clima determinado para as simulações é o da cidade de Juiz de Fora MG, que está localizada na Zona Bioclimática 3. A cidade está localizada na latitude: 21° 45' 51" e longitude: 43° 20' 59", e segundo o Mapa de Climas do Brasil, o clima se caracteriza como Mesotérmico Brando (IBGE, 2002). Ele se caracteriza por um clima ameno, com verão e inverno bem-marcados e radiação global geralmente abaixo de 200 Wh/m² (Figura 9).

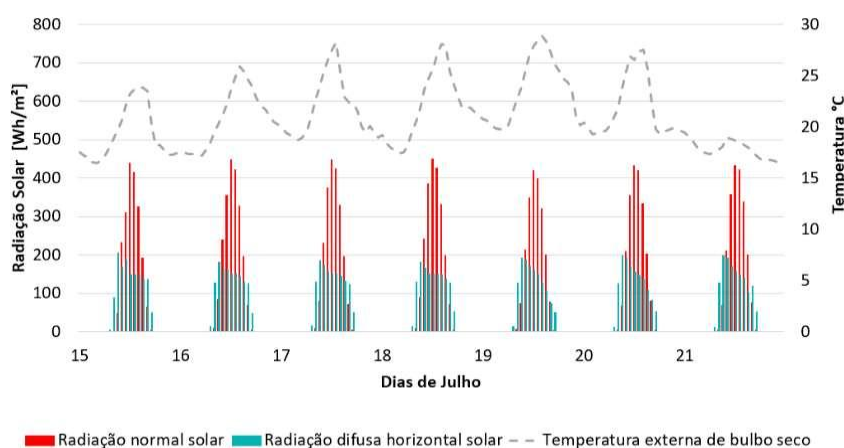


Figura 9 - Radiação global e temperatura externa da cidade de Juiz de Fora. Fonte: Autora.

Para a Zona bioclimática 3, a NBR 15220-3 recomenda que as vedações externas sejam de paredes leves refletoras, onde a classificação varia de acordo com o valor do atraso térmico (leves e leves refletoras tem valor máximo), e cobertura leve isolada. No verão é recomendado o sombreamento das aberturas e a ventilação cruzada, e no inverno é recomendado o aquecimento solar da edificação e vedações internas pesadas. Já no que se refere ao detalhamento das estratégias de

condicionamento térmico, a norma traz como recomendação ventilação cruzada a ser obtida observando o vento predominante, paredes internas mais robustas pois “[...] podem contribuir para otimizar o seu aquecimento no período frio, através da incidência de radiação solar” (ABNT NBR 15220-3, 2005, p. 11).

Os dois períodos de análise definidos configuram-se como as temperaturas médias do verão e do inverno, respectivamente. No período do inverno as temperaturas caem durante a noite e se concentram na maior parte do tempo abaixo dos 20°C. No período do verão, as temperaturas expressam uma amplitude térmica considerável, variando entre 3°C e 11°C. Essas temperaturas se concentram na maior parte do tempo abaixo de 18°C. Portanto, o clima mesotérmico brando da cidade de Juiz de Fora se mostra agradável e com verão e inverno bem-marcados.

3.6. Validação do Modelo

Para validação dos modelos do presente estudo, foi realizada uma comparação com os resultados obtidos por meio de simulação *in loco* da pesquisa de Suzuki (2012), que avaliou o potencial de aquecimento e resfriamento da PT no clima de Curitiba PR.

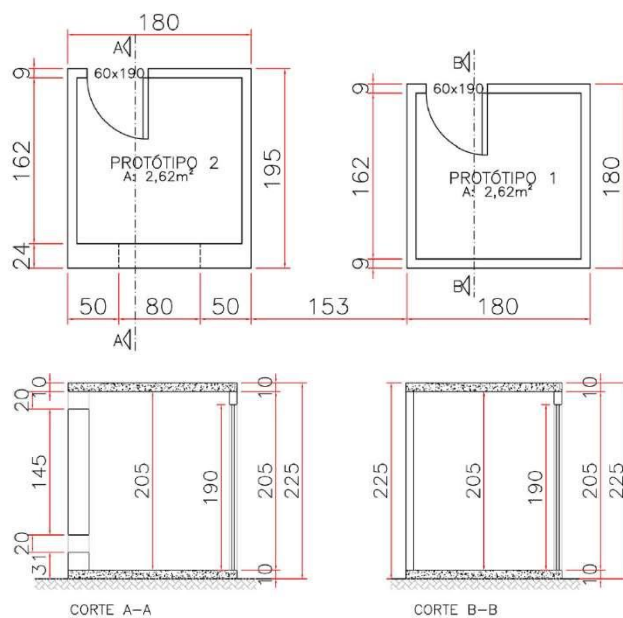
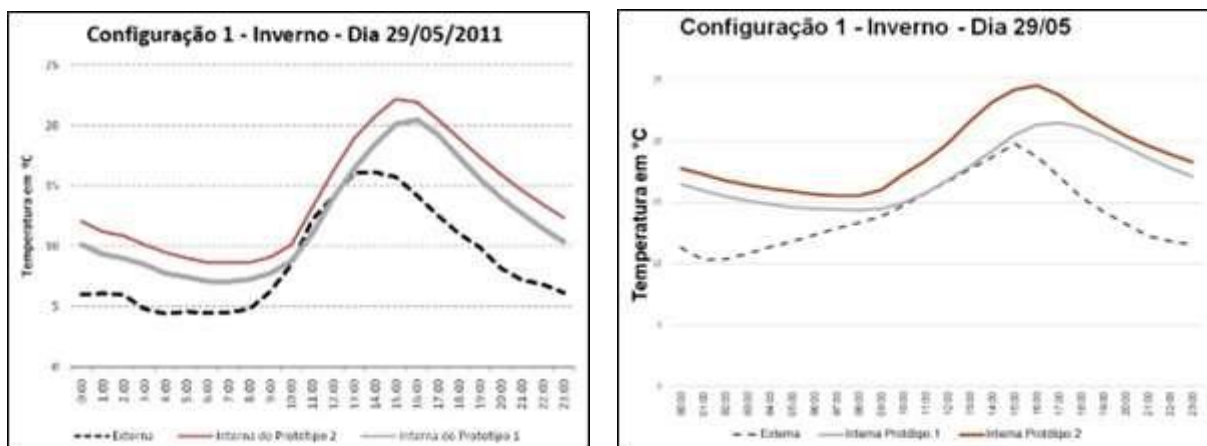


Figura 10 – Planta baixa e corte dos modelos dos protótipos 1 e 2 utilizados por Suzuki (2012). Fonte: Adaptado de Suzuki (2012).

Para a validação foi replicado no *software* DesignBuilder, o modelo com as características expressadas na Figura 10, seguindo o protótipo 1 e a configuração 1

do protótipo 2 determinados pela autora e simulados no dia 29 de maio de 2011. Os resultados do estudo e da replicação da simulação estão apresentados nas Figura 11 (a) e (b), respectivamente.



(a)

(b)

Figura 11 - Resultado da simulação do protótipo 1 e 2 na configuração 1 Suzuki (a); replicação para validação (b). Fonte: Adaptado de Suzuki (2012).

É importante considerar que as diferenças encontradas nos valores obtidos se devem a: i) o fato do arquivo bioclimático disponível da cidade de Curitiba ser do Aeroporto Internacional Afonso Pena, que se localiza a aproximadamente 24km do campo experimental da Universidade Federal do Paraná, local da simulação *in loco*, podendo gerar temperaturas com diferentes condicionantes; ii) a medição da temperatura externa realizada pelo autor foi através de um sensor HOBO situado dentro de um tubo de PVC revestido de papel alumínio e exposto ao tempo, enquanto no cenário da validação foi considerada a temperatura externa de bulbo seco do arquivo bioclimático; iii) pela aproximação das propriedades térmicas configuradas dos materiais, uma vez que essa replicação utilizou as propriedades termo físicas disponíveis no trabalho referência e na biblioteca editável do *software*.

Apesar das limitações apresentadas, o resultado se mostrou similar, com a temperatura externa como menor temperatura, seguida da simulação do protótipo 1 e logo o protótipo 2 como a maior temperatura, todos os três com curvas de formato análogo e com seus picos diários entre 14 e 15 horas. Nos momentos de máximas diárias o modelo de Suzuki (2012) atinge um aumento da temperatura de 11% no protótipo 2 em comparação ao protótipo 1, aumento o qual também ocorre no modelo

de validação, nesse caso com a porcentagem de 15%. Desta forma, percebe-se uma coerência dos dados obtidos por simulação quando comparados com os valores medidos em Curitiba.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente estudo serão apresentados os resultados de simulações de dimensões de aberturas dos respiradouros, espessura da camada interna, material de camada interna e externa, espessura da cavidade de ar e associação da PT à uma Chaminé solar.

4.1. Presença e dimensões de respiradouros na camada mais espessa.

No período de inverno, a inserção da PT tradicional sem respiradouros aumentou a temperatura do ambiente interno em até 3,7°C em relação ao caso sem PT em Juiz de Fora (Figura 12). Os modelos com respiradouros também resultaram em aumento da temperatura do ambiente interno. Mesmo no período de inverno, em que a temperatura do ar externo é relativamente baixa, as temperaturas do ambiente interno dos casos com respiradouros são mais altas que do caso sem respiradouro, especialmente nos momentos mais quentes do dia (final da tarde); atingindo uma diferença máxima de 2°C. Isso pode ser justificado pelos ganhos de calor convectivos vindos da cavidade nos momentos mais quentes do dia, em que há radiação solar incidente na fachada norte.

Outro resultado importante é que não foram observadas diferenças expressivas nas temperaturas dos ambientes dos modelos que variam as dimensões dos respiradouros. Essas variações foram entre 0,1 e 0,6°C durante o período de inverno analisado. Isso indica que aumentar as dimensões dos respiradouros não implica em consideráveis ganhos térmicos no ambiente interno devido à PT. Isso pode ser devido à baixa altura da PT considerada, o que não permite uma expressiva diferença de temperatura entre o ar na base e no topo da cavidade. Assim, a movimentação das massas de ar na cavidade e, conseqüentemente, entre a cavidade e o ambiente interno não é suficiente para promover expressivos ganhos ou perdas de calor. É possível que essa variação nas dimensões seja mais efetiva em edificações mais altas.

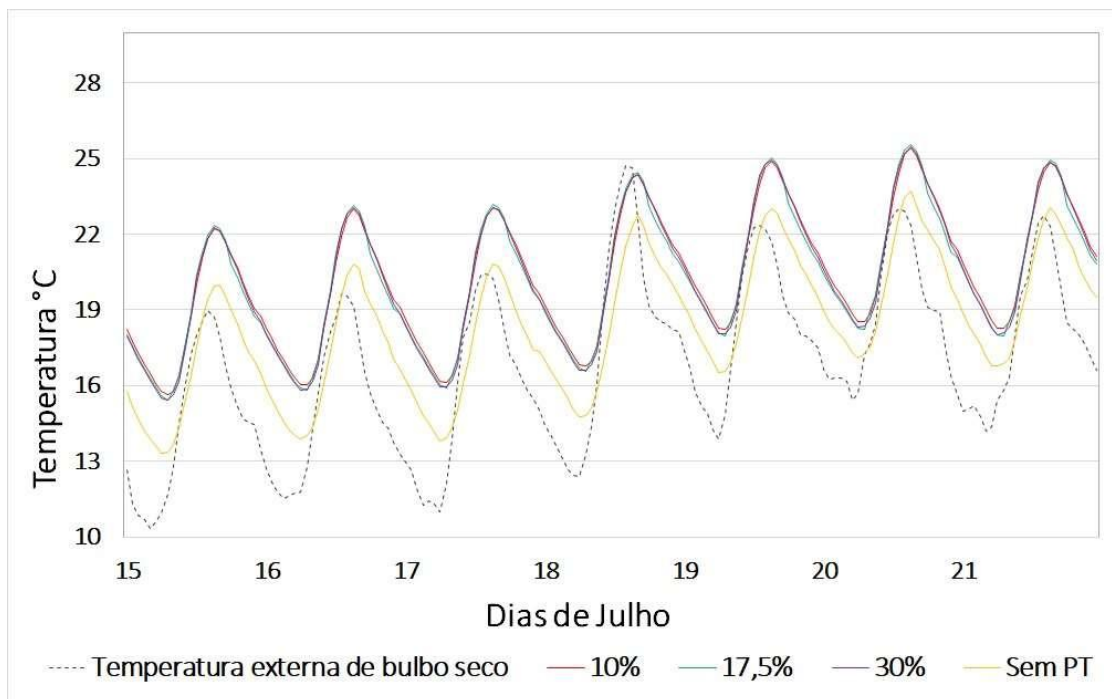


Figura 12- Temperaturas do ambiente com diferentes tamanhos de respiradouros no período de inverno para Juiz de Fora. Fonte: Autora.

Os resultados obtidos são similares aos encontrados e explicados por autores em diferentes contextos climáticos. Em Portugal, por exemplo, Simões, Manaia e Simões (2021) demonstraram a importância da troca de ar entre a cavidade da PT e o ambiente interno. No Brasil, estudos realizados por Bianco (2016), Cavalcanti e Caram (2013) e Ziebell e Aymone (2020) destacaram a importância da troca de ar para que o sistema PT consiga manter um maior número de dias do ano dentro da faixa de conforto térmico. A troca de massas de ar, associada à radiação solar, proporciona um ganho de temperatura mais rápido do que a irradiação do calor através da camada sólida isoladamente.

Na figura 12 são apresentados os resultados do verão. Em janeiro, as temperaturas do ar do ambiente interno para os modelos com PT são sutilmente maiores que o caso sem PT como nos momentos mais quentes dos três primeiros dias da simulação. As diferenças variam entre 0,1 e 1,3°C, a não ser em momentos com anomalias como os encontrados nos picos de temperatura do dia 17 e do dia 20. Nele a temperatura do ambiente interno sem PT tem uma drástica queda e subsequente volta ao padrão anterior. Isso indica que no período de verão, embora haja um aumento da temperatura com a inserção da PT, esse aumento é mais ameno

que no período de inverno, além de manter a temperatura mais baixa durante o início da noite. Isso pode ser explicado pela maior altura solar no verão, o que resulta em menor radiação incidente na PT. Dessa forma, os ganhos de calor são positivamente amenizados nesse período, considerando o clima estudado.

Similarmente a este estudo, a pesquisa de Bevilacqua *et al.* (2019) não identificou demanda maior por refrigeração do ambiente no período de verão. Já Bianco (2016), observou um potencial de resfriamento diurno no ambiente com PT devido ao atraso térmico dos ganhos de calor, que ocorreram ao final da tarde. O estudo de Cavalcanti e Caram (2013) também obteve redução de temperatura interna do ambiente com o sistema, porém seu modelo contava com uma abertura na fachada envidraçada para promover a ventilação cruzada no verão. Essas discrepâncias podem ser explicadas pelas diferenças do modelo utilizado ou condições climáticas locais.

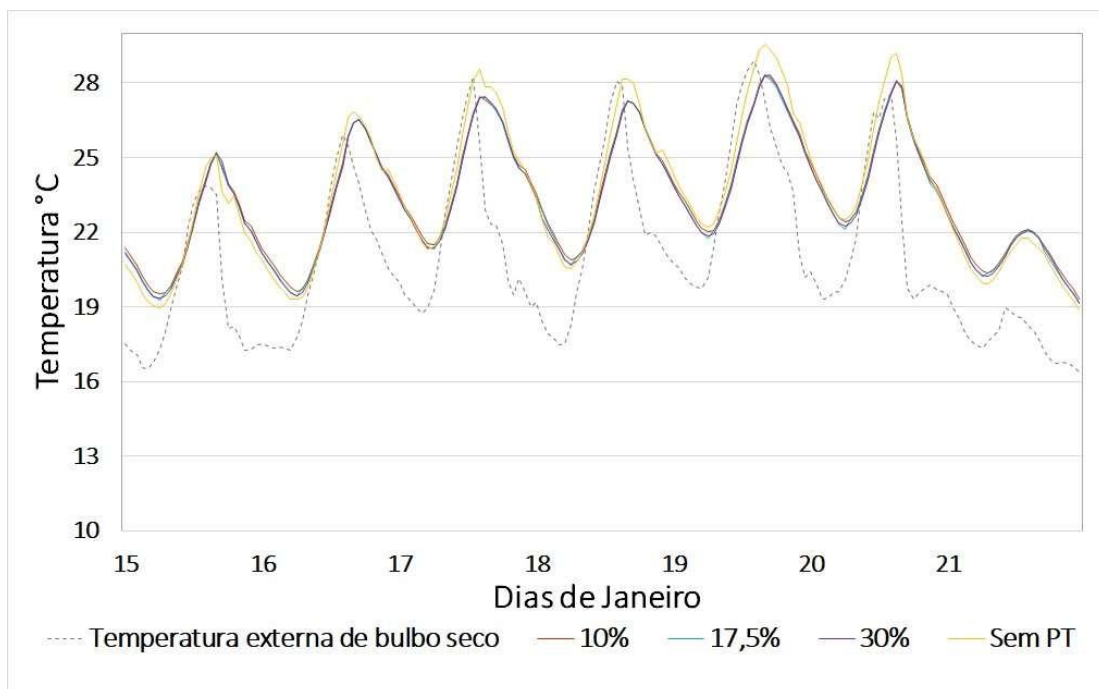


Figura 13 - Temperaturas do ambiente com diferentes tamanhos de respiradouros no período de verão para Juiz de Fora. Fonte: Autora.

Foi observado ainda que, diferentemente do inverno, os casos com e sem respiradouros resultaram em temperaturas do ar interno mais próximas, com uma diferença máxima de 0,7°C. Como nesse momento do ano a radiação incidente na

fachada é menor, o efeito da flutuação térmica também tende a ser menor e, portanto, a circulação do ar para os casos com respiradouro pode ser menos expressiva que no inverno. Isso resulta em menores ganhos de calor convectivos para o ambiente interno.

Em relação às diferenças encontradas para os casos com respiradouros de diferentes dimensões, no caso estudado a diferença máxima de temperatura do ar do ambiente interno resultante foi de 0,3°C. Essa diferença de temperatura foi atingida em um momento de queda de temperatura (15 de janeiro), conforme mostrado na Figura 12. O declínio da temperatura do ar externo gerou uma diferença de temperatura e, portanto, de pressão entre o ar da cavidade e o ar externo.

A Tabela 6 apresenta o conforto térmico para os dias de inverno e verão, destacando os respiradouros de 10% como mais eficientes termicamente. Essas informações também corroboram a teoria anterior de que os respiradouros apresentem o benefício de manter o ambiente em conforto térmico por períodos maiores. Apesar de, no presente caso, o aumento da dimensão de tais respiradouros gerar uma ligeira perda térmica durante o período da noite, especialmente para o caso do verão, com perda de 1% de taxa de conforto de uma dimensão de abertura para outra.

Tabela 6 - Porcentagem de horas de conforto no verão e inverno, para dimensões de respiradouros.

Ambiente		Cômodo sem PT	PT sem Respiradouros	Respiradouros de 10%	Respiradouros de 17,5%	Respiradouros de 30%
Porcentagem Verão	Frio	17%	17%	16%	18%	18%
	Confortável	70%	82%	81%	80%	79%
	Calor	13%	1%	3%	2%	3%
Porcentagem Inverno	Frio	56%	40%	38%	39%	39%
	Confortável	44%	60%	62%	61%	61%
	Calor	0%	0%	0%	0%	0%

Fonte: Autora.

Em relação às aberturas destaca-se que a de 10% apresentou o nível mais equilibrado de troca térmica, o que gerou as menores taxas de conforto em ambas as estações para PT com respiradouros. Vale destacar que para o verão o ambiente com PT sem aberturas apresentou melhor desempenho térmico. Isso esclarece não só a

influência das trocas térmicas para aquecimento como também corrobora para a criação de estratégias de redução de aquecimento no verão.

4.2. Espessura da camada interna

As Figura 14 e Figura 15 apresentam as temperaturas do ambiente interno durante um período de 7 dias em julho (inverno) e janeiro (verão), respectivamente para os casos com diferentes espessuras da camada mais espessa. Ao comparar cenários com e sem PT, fica evidente que sua presença aumenta a temperatura do ambiente ao longo do dia. Entretanto, não foram observadas diferenças expressivas na temperatura do ar no ambiente interno entre os casos testados, o que podem ser atribuídas à influência da ventilação natural nos modelos utilizados no presente estudo. Contudo, foram observadas temperaturas mais elevadas no caso com espessura de 10 cm, o que é devido à maior transmitância térmica desse modelo. Esses resultados se assemelham às conclusões tiradas em Alqaed, Mustafa e Sharifpur (2022), onde os autores apontam que os tijolos de material de mudança de fase (PCM) deixam o estado sólido mais rapidamente que os demais, indicando o rápido ganho de temperatura para se tornarem líquidos. Isso sugere que, tanto na referência citada quanto no presente estudo, há uma rápida absorção de calor e também rápida perda desse mesmo calor pela parede de 10 cm.

Mesmo durante o período de inverno, caracterizado por temperaturas externas relativamente baixas, observa-se que as temperaturas internas no ambiente com PT superam aquelas no cenário do mesmo ambiente sem adição de PT. Essa diferença é particularmente notável nos momentos mais quentes do dia, como durante o final da manhã e tarde, alcançando um pico de $4,8^{\circ}\text{C}$ às 14h no dia 17. Isto pode ser atribuído aos ganhos de calor convectivos originados dentro da cavidade durante os intervalos mais ensolarados do dia, quando a radiação solar impacta a fachada norte.

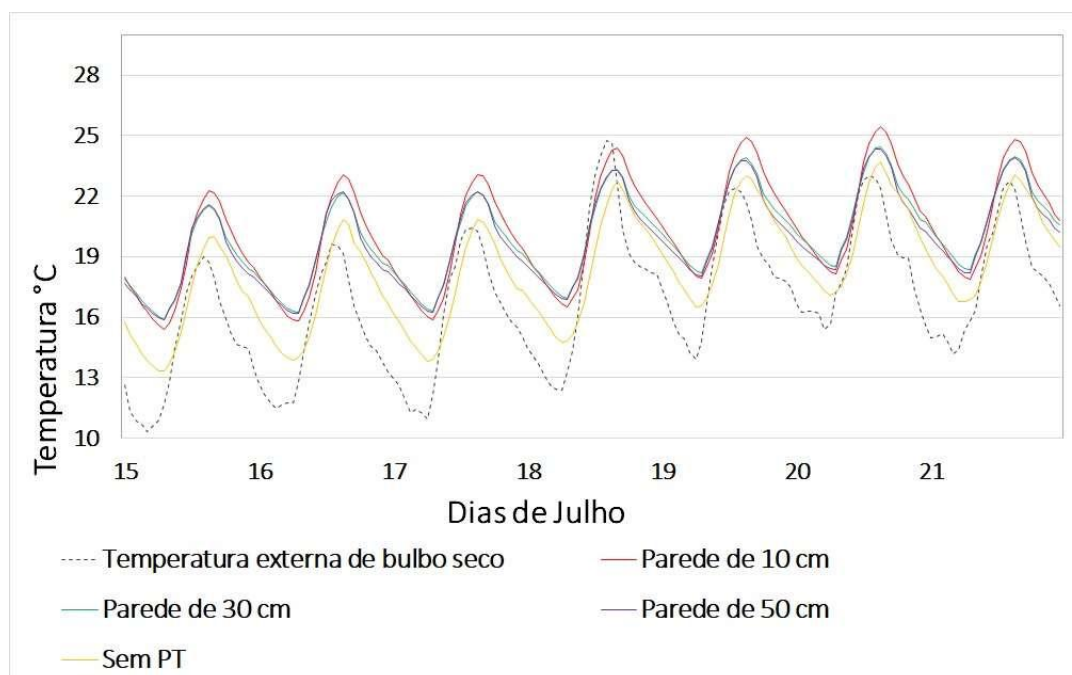


Figura 14 - Temperaturas do ambiente com diferentes espessuras da camada de elevada massa térmica no período de inverno para Juiz de Fora. Fonte: Autora.

Esses resultados contrastam com os apresentados por Alqaed, Mustafa e Sharifpur (2022). Os autores encontraram que a parede de 10 cm experimenta um declínio rápido de temperatura, enquanto a parede de 40 cm mantém sua temperatura por um período mais prolongado. No presente estudo, o caso com parede de 10 cm atinge temperaturas mais elevadas nos horários de picos térmicos, e apesar de ter uma perda de calor mais rápida, diminui proporcionalmente em relação à parede de 30 cm e 50 cm. É interessante notar ainda que as mínimas da parede de 10 cm são mais baixas que as demais; com valores que variam até 0,5 °C. Contudo, é importante considerar que no estudo de Alqaed, Mustafa e Sharifpur (2022), a PT é composta por uma camada sólida com fileiras de tijolos e PCM, com transmitâncias térmicas menores que a do presente estudo.

No período de verão, especificamente no dia 21 de janeiro, foi registrada uma notável queda de temperatura, conforme ilustrado na Figura 15. O ambiente sem PT acompanhou as condições externas, enquanto aqueles com PT mantiveram temperaturas internas um pouco mais elevadas. A diminuição da temperatura do ar externo resultou em uma ampliação da diferença de temperatura entre o ar externo e o ar na cavidade. Isso, por sua vez, gerou uma disparidade de pressão entre os dois

ambientes, melhorando o efeito de inversão térmica dentro da cavidade PT. Com a presença de respiradouros, ocorreu um influxo de ar em direção ao ambiente interno, contribuindo para os ganhos de calor e, conseqüentemente, para o aumento observado na temperatura do ar. Os resultados corroboram a afirmação de Cavalcanti e Caram (2013) a respeito de a maior espessura aumentar a inércia térmica promovendo um maior atraso térmico e amortecimento do comportamento da temperatura interna.

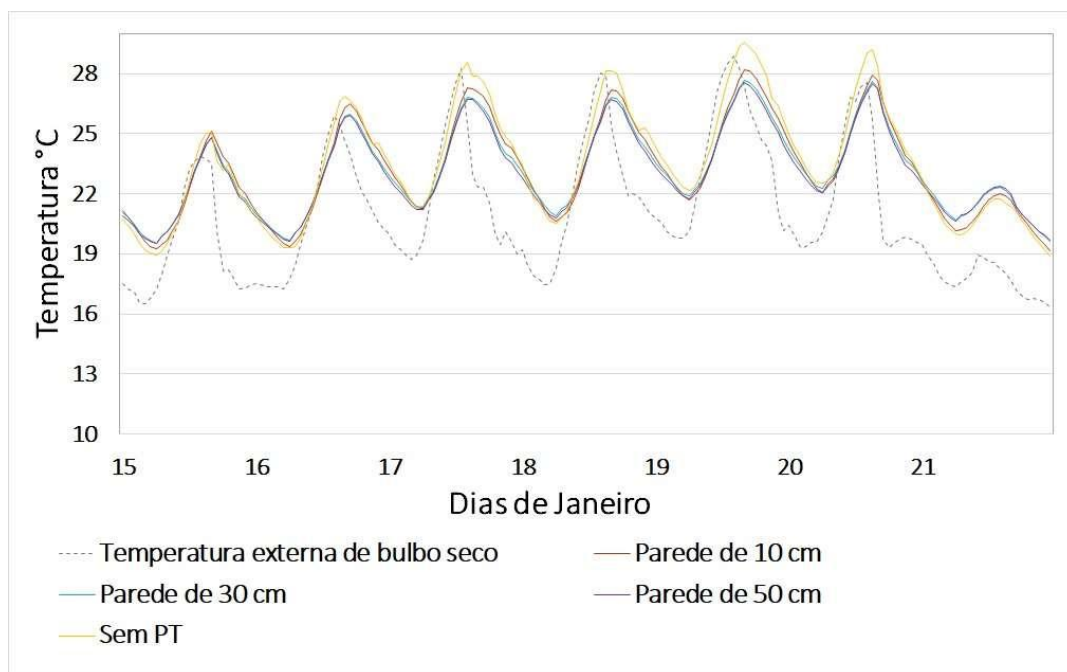


Figura 15 - Temperaturas do ambiente com diferentes espessuras da camada de elevada massa térmica no período de verão para Juiz de Fora. Fonte: Autora.

No verão, as diferentes espessuras da camada externa da PT não provocaram variações expressivas entre os resultados, principalmente entre os casos de 30 e 50 cm, mesmo o modelo com 10 cm não chegou a ter uma diferença de mais de 0,5 °C em relação ao caso de referência. Outro fator que vale destacar é que o principal efeito de baixa das temperaturas com a inserção da PT se concentra nos momentos de início da noite. No dia 19 de janeiro, os ambientes com PT de 30 e 50 cm resultaram em temperaturas até 1,3 °C mais baixa do que o caso de referência.

A Tabela 7 – Porcentagem de horas de conforto no verão e inverno, para a espessura da camada interna. apresenta o conforto térmico para os dias de inverno e verão. Os dados

esclarecem que mesmo a configuração de 10 cm apresentando a elevação de temperatura anteriormente vista no gráfico, não atinge nenhuma variação em relação ao nível de conforto. No inverno a parede de 10 cm e a de 30 cm apresentem porcentagens de conforto iguais, com um aumento de 17% de conforto em relação ao ambiente sem PT. Já no verão, os níveis de conforto evidenciam que a parede de 10 cm não é a melhor escolha, proporcionando um aumento de conforto de 9% em detrimento do aumento de 14% e 13% gerando pelas paredes de 30 cm e 50 cm respectivamente.

Tabela 7 – Porcentagem de horas de conforto no verão e inverno, para a espessura da camada interna.

Ambiente		Sem PT	Parede de 10 cm	Parede de 30 cm	Parede de 50 cm
Porcentagem Verão	Frio	17%	18%	16%	17%
	Confortável	70%	79%	84%	83%
	Calor	13%	2%	0%	0%
Porcentagem Inverno	Frio	56%	39%	39%	43%
	Confortável	44%	61%	61%	57%
	Calor	0%	0%	0%	0%

Fonte: Autora.

Em relação às espessuras destaca-se que a de 10 cm apresentou maior variação térmica, a de 30 cm gerou as melhores taxas de conforto em ambas as estações. Já a parede com 50 cm absorveu calor no inverno, mesmo que com rendimento menor que as demais, e não absorveu no verão, provando não ser o melhor em absorver e reter o calor para o clima estudado.

4.3. Material da camada interna

As Figura 16 e Figura 17 apresentam as temperaturas do ambiente interno em julho (inverno) e janeiro (verão), respectivamente, considerando diferentes materiais para a camada mais espessa. Durante o período de inverno, observa-se uma semelhança nos resultados entre os ambientes com paredes de concreto e pedra basalto. No gráfico correspondente, as linhas representativas desses casos (amarela e vermelha) chegam a sobrepor-se e as diferenças de temperatura entre esses dois modelos chegam a no máximo 0,02 °C.

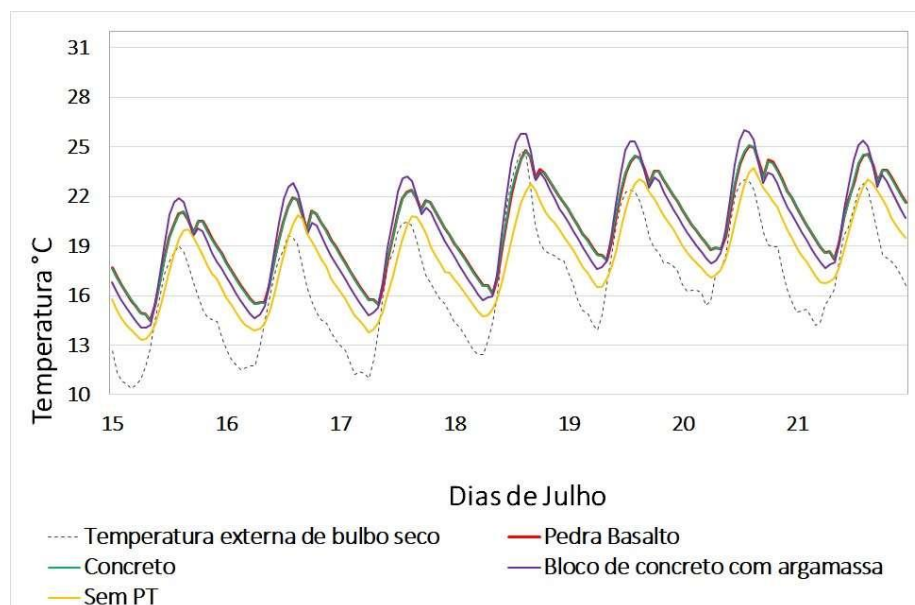


Figura 16 - Temperaturas do ambiente com diferentes materiais da camada de elevada massa térmica no período de inverno para Juiz de Fora. Fonte: Autora.

Por outro lado, a configuração de parede composta por blocos de concreto com argamassa apresenta um comportamento distinto, manifestando máximas diárias expressivamente mais elevadas em comparação com as demais. Essa diferença chega a atingir até 1,85 °C e 2 °C em relação às configurações de parede com pedra basalto e concreto, respectivamente.

Tais eventos podem ser interpretados como resultado da parede de bloco com argamassa possuir uma elevada capacidade de absorção e transferência de calor, porém uma capacidade relativamente limitada de armazenamento desse calor. Conseqüentemente, a parede, ao receber a energia térmica proveniente da radiação solar, imediatamente a transfere para o interior do ambiente, resultando no aumento das temperaturas.

Entretanto, durante os momentos de baixa temperatura do dia, que geralmente ocorrem nas primeiras horas da madrugada e no início da manhã, o caso com a parede de bloco de concreto com argamassa alcança valores inferiores em comparação com outros casos. Isso se deve ao fato de todo o calor absorvido pela parede durante o dia já ter sido transferido para o ambiente e dissipado, não havendo reservas adicionais de calor para manter as temperaturas noturnas.

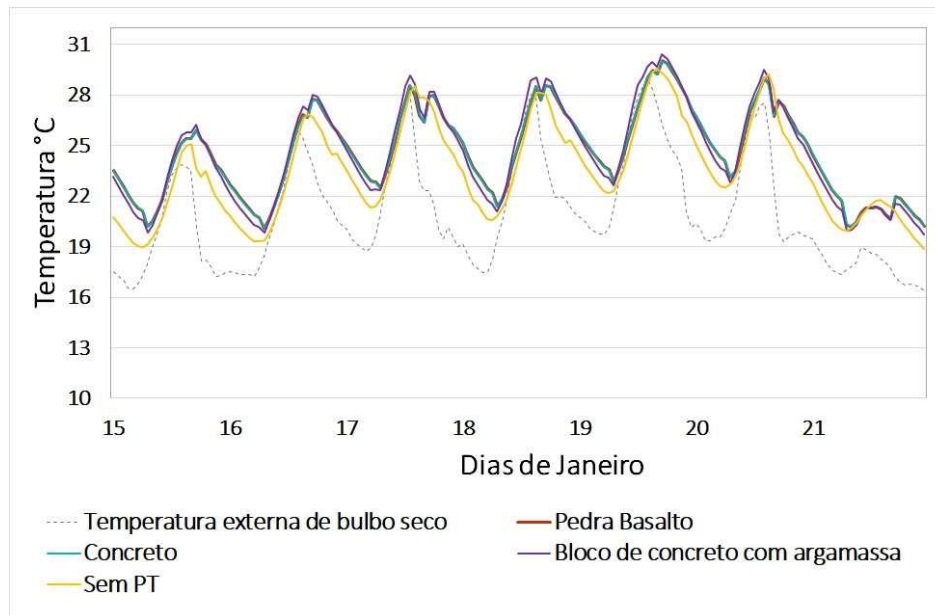


Figura 17 - Temperaturas do ambiente com diferentes materiais da camada de elevada massa térmica no período de verão para Juiz de Fora. Fonte: Autora.

Durante o verão (Figura 17), a similaridade nos resultados entre as paredes de concreto e pedra basalto se mantém. No entanto, o comportamento da parede de bloco de concreto com argamassa apresenta uma diferença menor que a apresentada no inverno. No dia com a maior discrepância, 15 de janeiro, a temperatura máxima difere em 0,8 °C em relação às outras duas configurações simuladas.

O padrão das temperaturas mínimas permanece consistente com o observado no inverno, sendo mais baixo no modelo com bloco de concreto e argamassa em comparação com os outros dois casos. Essa diferença é mantida em níveis reduzidos, em torno de 0,23 °C a 0,35 °C em relação aos outros modelos.

Além disso, verificou-se diferenças em relação ao tipo do material empregado e as horas em estado de conforto (Tabela 8). O uso de concreto ou pedra basalto resultaram em mais momentos confortáveis durante esse período do que o modelo com emprego de bloco de concreto. Contudo, ressalta-se que a diferença do concreto em relação aos demais materiais foi pequena, de 1% e 4% comparativamente aos casos de pedra basalto e bloco de concreto com argamassa, respectivamente.

Essas diferenças podem ser atribuídas à menor incidência de radiação solar proveniente da direção norte durante o verão. Isso faz com que o modelo de bloco de concreto com argamassa receba menos calor, resultando em uma resposta menos pronunciada em termos de absorção e transferência rápida de temperatura. Assim, durante o período noturno, a diferença é ainda menor, os materiais não recebem calor suficiente para transferir durante a noite e madrugada.

Tabela 8 – Porcentagem de horas de conforto no verão e inverno, para o material da camada interna.

Ambiente		Sem PT	Concreto	Pedra	Bloco
Porcentagem Verão	Frio	17%	7%	4%	8%
	Confortável	70%	74%	76%	71%
	Calor	13%	19%	20%	21%
Porcentagem Inverno	Frio	56%	36%	36%	41%
	Confortável	44%	64%	64%	59%
	Calor	0%	0%	0%	0%

Fonte: Autora.

A Tabela 8 apresenta o conforto térmico para os dias de inverno e verão, nota-se que houve um aumento do percentual de horas de conforto com a inserção de PT para todos os materiais empregados. Nesse período, a parede de pedra resulta no caso mais confortável atingindo 64% do tempo. Isso indica o potencial de redução dos momentos de desconforto por frio em locais mais frescos, como Juiz de Fora.

Em relação aos materiais destaca-se que o bloco de concreto com argamassa apresentou alta variabilidade térmica com pouca retenção de calor, o que gerou as menores taxas de conforto em ambas as estações. O concreto e a pedra basalto, por outro lado, tiveram desempenho similares na retenção de calor e liberação no período noturno. Isso indica que a escolha de materiais com transmitância térmica acima de $3 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ tem melhor potencial de manutenção de momentos mais confortáveis para cidades em climas amenos.

4.4. Material da camada externa

As Figura 18 e Figura 19 exibem as temperaturas internas ao longo do período de 7 dias nos meses de janeiro e julho. Foram analisados os cenários com diferentes tipos de vidro (simples transparente, duplo transparente e simples

bronze). Durante o inverno os tipos de vidros simples resultam em temperaturas internas mais elevadas quando comparados aos vidros duplos. Nos modelos com vidro simples transparente nota-se um aumento na temperatura interna do ambiente de 1,2°C. Este aumento foi maior que os casos com vidro simples bronze e vidro duplo transparente, 2°C e 2,7°C, respectivamente.

A maior transmissão de calor do vidro simples transparente propicia uma tendência de elevação da temperatura do ar dentro da cavidade, aumentando assim os ganhos de calor por convecção e contribuindo para o aumento da temperatura ambiente. No caso do vidro de bronze, parte do calor solar é retido no vidro antes de penetrar na cavidade, resultando em temperaturas mais baixas quando comparadas aos cenários de vidro transparente.

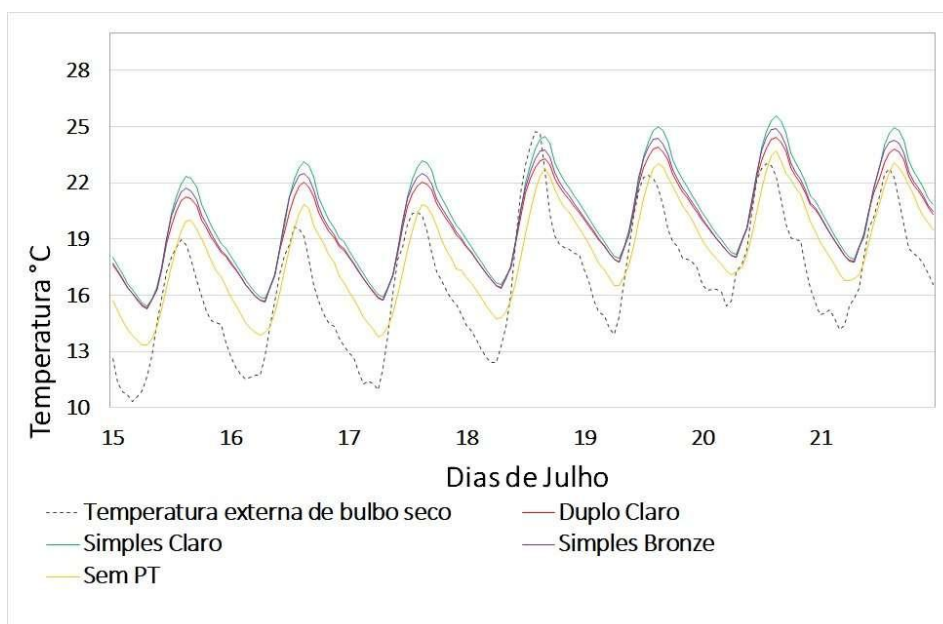


Figura 18 - Temperaturas do ambiente com diferentes materiais da fachada envidraçada no período de inverno para Juiz de Fora. Fonte: Autora.

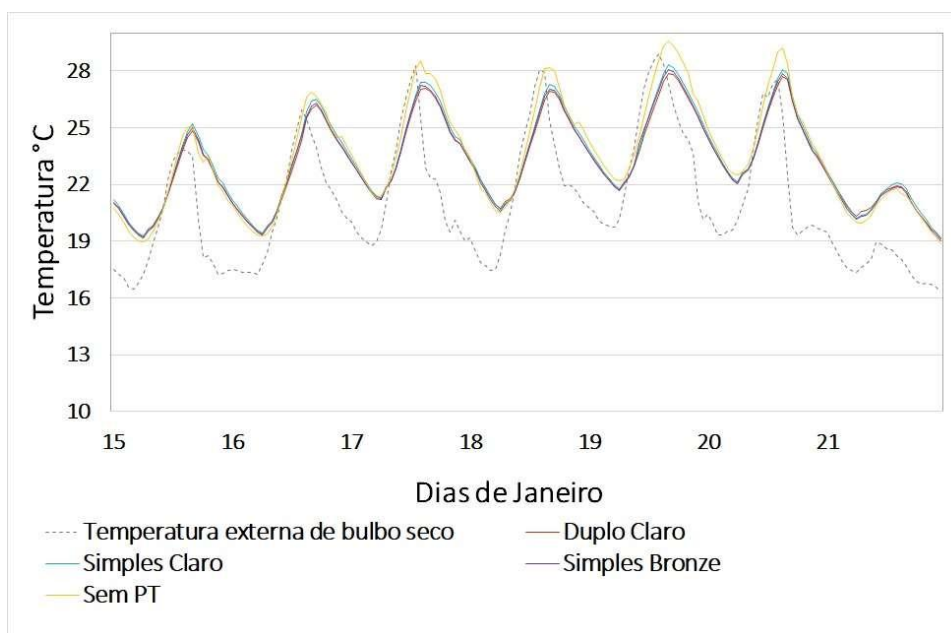


Figura 19 - Temperaturas do ambiente com diferentes materiais da fachada envidraçada no período de verão para Juiz de Fora. Fonte: Autora.

No verão (Figura 19), observa-se que as diferenças na temperatura do ar entre os casos não são proeminentes, embora o cenário com vidro simples transparente tenha apresentado uma diferença maior ao longo do dia em comparação com outros cenários. Durante o verão, todos os quatro tipos de vidro exibiram variações inferiores a 1 °C, o que apesar de não ser tão expressivo no gráfico, gerou resultados diferentes em relação ao índice de conforto.

Tabela 9 – Porcentagem de horas de conforto no verão e inverno, para o material da camada externa.

	Ambiente	Sem PT	Simples Claro	Duplo Claro	Simples Bronze
Porcentagem Verão	Frio	17%	18%	18%	19%
	Confortável	70%	80%	82%	80%
	Calor	13%	2%	0%	1%
Porcentagem Inverno	Frio	56%	39%	44%	42%
	Confortável	44%	61%	56%	58%
	Calor	0%	0%	0%	0%

Fonte: Autora.

A Tabela 9 apresenta o conforto térmico para os dias de inverno e verão, nota-se que pelas horas de conforto que o vidro simples claro tem o melhor desempenho para promoção de conforto térmico. No inverno o vidro simples claro apresenta o

melhor cenário, com o menor índice de frio e maior de conforto. Comparando os resultados de verão e inverno temos o vidro duplo demonstrando uma característica oposta, zerando a porcentagem de calor no verão que se encontrava em 13% na configuração sem PT e aumentando em 12% a porcentagem de conforto. Isso demonstra que é o tipo de vidro com melhor eficiência para o verão, diminuindo a absorção do sistema.

Em relação aos materiais, destaca-se que o vidro simples bronze apresentou retenção de calor mediana, o que gerou as taxas de conforto intermediárias em ambas as estações. Para o inverno a melhor escolha de vidro é o simples claro e para o verão o duplo claro, a aplicabilidade de um ou outro pode ser contornada em sua estação de menor desempenho com adições ao PT, como adição de venezianas sobre o vidro simples no verão. Os resultados reforçam a validade da escolha de Zhou *et al.* (2020) no vidro simples claro para aquecimento no inverno da China, e divergem dos resultados encontrados por Charqui *et al.* (2023a) de que vidros duplos tem melhor desempenho do que vidros simples para configurações de inverno e verão para o clima do Marrocos.

4.5. Espessura da cavidade de ar

As Figura 20 e Figura 21 apresentam as temperaturas do ambiente interno durante um período de 7 dias em julho (inverno) e janeiro (verão), respectivamente para os casos com diferentes espessuras da cavidade de ar. No inverno os resultados das três espessuras são similares, havendo variação apenas nas máximas diárias, onde o modelo com 50 cm tem um valor médio inferior aos demais em 0,5 °C. Esse comportamento indica que o volume de ar dentro da cavidade de 50 cm aquece mais lentamente, atingindo uma temperatura máxima levemente inferior.

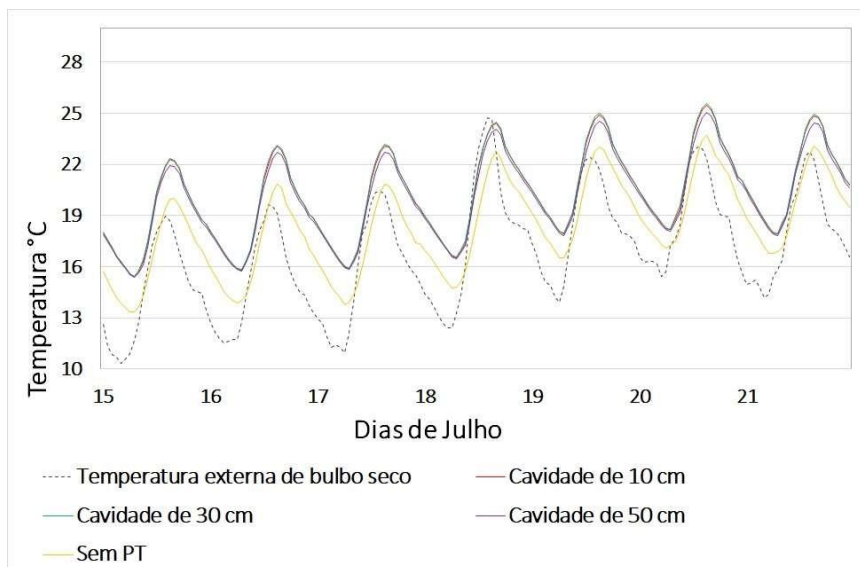


Figura 20 - Temperaturas do ambiente com diferentes espessuras da cavidade de ar no período de inverno para Juiz de Fora. Fonte: Autora.

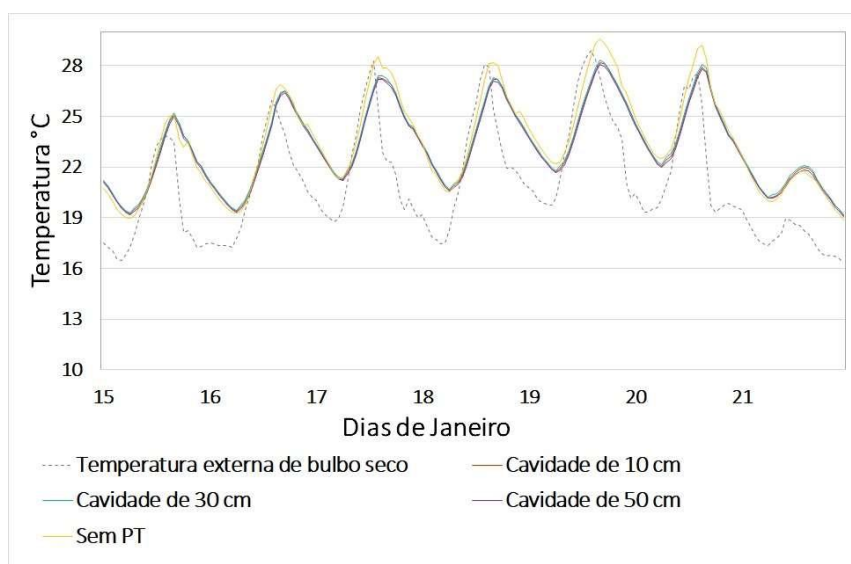


Figura 21 - Temperaturas do ambiente com diferentes espessuras da cavidade de ar no período de verão para Juiz de Fora. Fonte: Autora.

No verão (Figura 21), a variação térmica entre os modelos que já era pequena, se mostra ainda menos relevante, com uma diferença máxima média de 0,3 °C. Porém, vale ressaltar que máximas diárias são reduzidas quando comparados os ambientes com modelos PT com o ambiente referência, sem PT.

Tabela 10 - Porcentagem de horas de conforto no verão e inverno, para a espessura da cavidade de ar.

Ambiente		Sem PT	Cavidade de 10 cm	Cavidade de 30 cm	Cavidade de 50 cm
Porcentagem Verão	Frio	17%	18%	18%	19%
	Confortável	70%	79%	80%	80%
	Calor	13%	2%	2%	1%
Porcentagem Inverno	Frio	56%	39%	39%	42%
	Confortável	44%	61%	61%	58%
	Calor	0%	0%	0%	0%

Fonte: Autora.

Na Tabela 10, com a apresentação do conforto térmico para os dias de inverno e verão, nota-se que o aumento da cavidade de ar é positivo para o conforto térmico do verão e negativo para o do inverno. No inverno, o conforto dos modelos com cavidades de 10 cm e 30 cm se assemelha, já o caso com cavidade de 50 cm apresentou 3% menos confortável, corroborando a ideia de que o volume de ar dentro dela aquece de forma mais lenta com a radiação solar disponível. Já no verão, essa característica é positiva, fazendo com que a cavidade de 50 cm apresente a maior taxa de conforto juntamente a de 30 cm. As duas variam apenas em 1% nas horas de frio e calor, sendo a de 50 cm mais quente, comprovando que a cavidade mais larga tem um desempenho mais satisfatório com o aumento de incidência de radiação solar. Esses dados são similares aos resultados de Guo *et al.* (2023) que encontraram que o aumento da cavidade de ar tende a reduzir a diferença de temperatura entre o fluxo de ar na entrada e na saída do canal, dessa forma, diminuindo a quantidade de calor trazida para o ambiente.

Em relação às dimensões das cavidades, destaca-se que a de 30 cm apresentou trocas térmicas medianas, o que gerou as taxas de conforto mais eficientes em ambas as estações. Os resultados reforçam a validade da escolha de Alharbi *et al.* (2022), que indicou que a relação entre a altura da parede e a espessura da camada de ar deve ser de 1 para 10 em países da Ásia, Oriente Médio e alta África. Isso se contrasta aos achados de Baïri *et al.* (2020), que defende a proporção entre 0,1 e 0,2 em relação à dimensão da altura, na Europa. Assim, isso indica que as necessidades térmicas de localizações de Alharbi *et al.* (2022) se assemelham mais às necessidades da Zona Bioclimática 3 de Juiz de Fora.

4.6. Inserção de uma Chaminé Solar ao sistema PT

As Figura 22 e Figura 23 exibem as temperaturas internas ao longo do período de 7 dias nos meses de janeiro e julho. Ao analisar os cenários de PT com Chaminé Solar (CS) aberta e fechada no inverno é possível notar a perda de calor pela abertura da CS. No caso com a CS fechada a perda é pontual na temperatura máxima, já quando ela está aberta a temperatura se mantém inferior ao modelo PT comum durante a maior parte do dia.

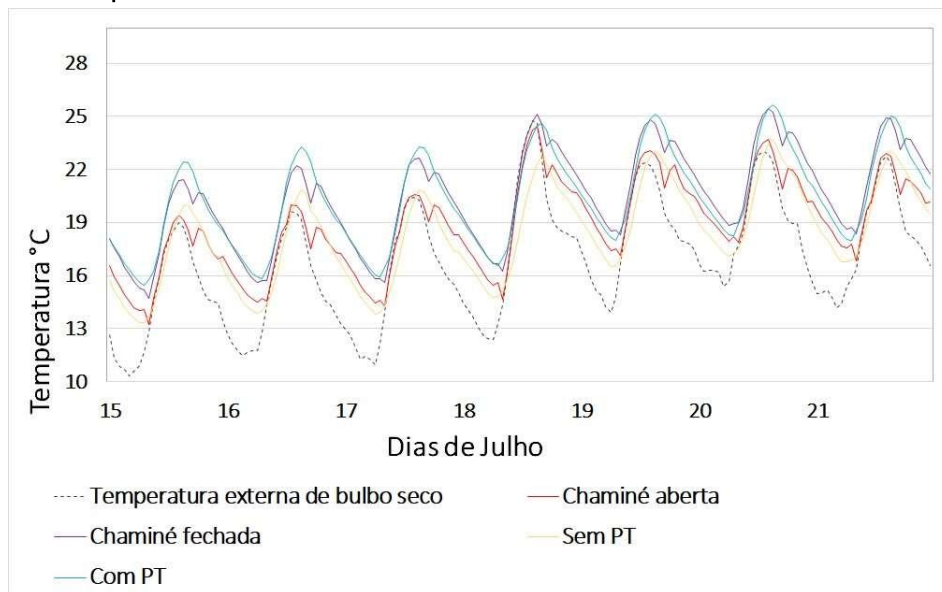


Figura 22 - Temperaturas do ambiente com Chaminé Solar aberta e fechada no inverno para Juiz de Fora. Fonte: Autora.

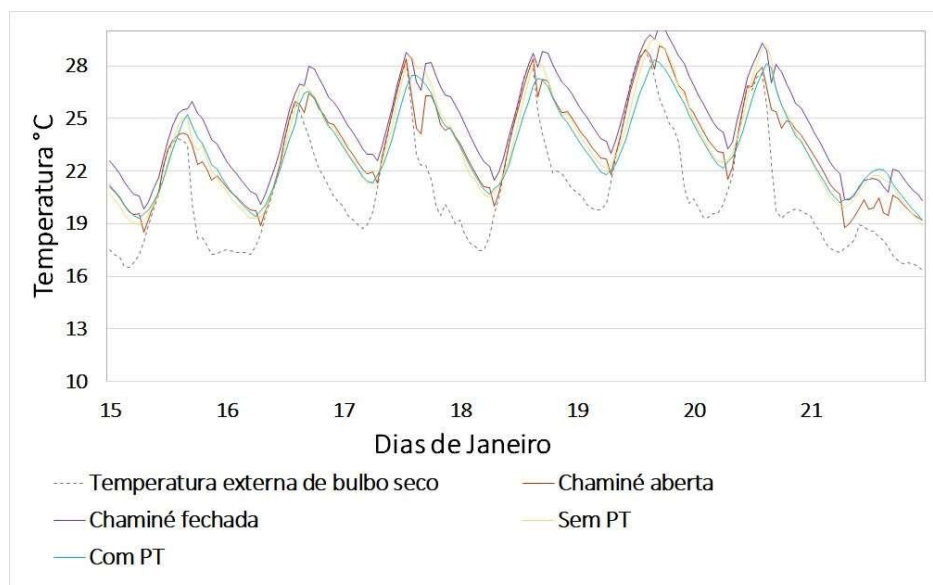


Figura 23 - Temperaturas do ambiente com Chaminé Solar aberta e fechada no período de verão para Juiz de Fora. Fonte: Autora.

As simulações de verão (Figura 23) ilustram que o maior equilíbrio térmico fica com o modelo com PT, e que a inserção da CS fechada gera um superaquecimento. Mesmo a CS aberta não proporciona o efeito de exaustão esperado, como nos estudos de Rabani, Kalantar e Rabani (2019) e Rabani e Rabani (2019), a não ser pelo momento atípico encontrado no dia 21. Os resultados obtidos nessa seção contrariam o esperado pelas bibliografias internacionais e reforça o encontrado por Suzuki (2012) para Curitiba. No estudo, o modelo que obteve melhores resultados foi o com a configuração que simula uma PT não ventilada para o exterior (configuração ilustrada na figura 9 no item 3.6 do presente trabalho). As evidências encontradas indicam que a PT com adição de CS nas configurações propostas não trazem benefícios para o ambiente no verão, não servindo para o seu objetivo de tornar a PT mais eficiente para diferentes estações.

Tabela 11 - Porcentagem de horas de conforto no verão e inverno, para a inserção de Chaminé solar.

Ambiente		Sem PT	Chaminé sempre aberta	Chaminé sempre fechada	Com PT
Porcentagem Verão	Frio	17%	14%	5%	17%
	Confortável	70%	75%	76%	80%
	Calor	13%	11%	20%	3%
Porcentagem Inverno	Frio	56%	49%	35%	39%
	Confortável	44%	51%	65%	61%
	Calor	0%	0%	0%	0%

Fonte: Autora.

Na Tabela 11 - Porcentagem de horas de conforto no verão e inverno, para a inserção de Chaminé solar., que apresenta o conforto térmico para os dias de inverno e verão. Nota-se que o aumento da cavidade de ar e da fachada envidraçada proporcionado pela inserção da CS é positivo para o conforto térmico. Quando a abertura superior é fechada a PT com CS supera os níveis de conforto da PT individualmente. Isso mostra que as alterações vistas no gráfico anterior baseado em temperatura do ar, também são refletidas na taxa de conforto com a temperatura operativa. Já no verão, a CS independentemente de estar aberta ou fechada não oferece vantagem em relação a PT sozinha, apresentando menores níveis de conforto e inclusive, no caso da abertura fechada ocorre o aumento dos momentos de calor. Esses fatos divergem do estudo Iraniano de Rabani, Kalantar e Rabani (2019), que encontraram que a eficiência média

diária de resfriamento da PT com CS é superior à do tipo normal em cerca de 8,63%, demonstrando o comportamento diferente para climas diferentes.

4. CONCLUSÃO

Este estudo teve como objetivo verificar o impacto de aberturas na camada interna de uma PT e suas dimensões, da espessura e do material da camada interna, do material da camada externa e da espessura da cavidade de ar no desempenho térmico de um ambiente em períodos frios e quentes de uma cidade da Zona Bioclimática 3 (Juiz de Fora – MG).

Os resultados obtidos indicaram que a PT de forma geral promoveu elevação nas temperaturas do ar do ambiente interno no clima considerado, tanto no inverno quanto no verão; embora este último, em menor proporção. Dessa forma, os resultados indicaram as seguintes constatações:

- Para os modelos de PT com respiradouros, o aumento da temperatura foi de até 3,7°C do ambiente em relação ao mesmo caso sem PT. O respiradouro na PT potencializa o ganho de calor no ambiente servido pela PT devido às contribuições convectivas. Não foram observadas, contudo, variações expressivas na temperatura do ar do ambiente com PT em relação aos casos com diferentes dimensões nos respiradouros, mas foi encontrada uma diferença de até 4% na taxa de conforto entre as dimensões consideradas.
- Para os modelos que experimentaram as espessuras da camada interna, foi notado que as diferenças de temperatura se concentram mais nos momentos mais quentes do dia. Porém, em relação ao modelo sem PT fica clara a elevação de temperatura em momentos de aumento de radiação solar como durante o final da manhã e tarde. As diferenças entre os momentos confortáveis resultaram em até 5% de discrepância entre as espessuras simuladas (10, 30 e 50 cm) durante o verão. Em relação ao modelo sem PT, o modelo com 30 cm de espessura da camada chegou a uma diferença de 14%, principalmente nos momentos de queda de temperatura, quando se mantinham sempre mais frescos que o modelo sem PT.
- Os modelos que consideraram os materiais concreto e pedra basalto para a camada espessa da PT apresentaram similaridades. O caso mais divergente

foi a parede de bloco, que resultou em uma taxa de conforto 5% menor que as demais configurações. A parede de bloco gerou um ambiente mais quente nas máximas diárias e mais frio nas mínimas, ou seja, com maior amplitude térmica do ambiente. Durante o verão, a parede de pedra liderou a taxa de conforto com 76%, seguida da de concreto e bloco com taxas 2% e 5% respectivamente inferiores.

- Nos casos em que os vidros colocados na camada externa foram testados, durante o inverno, o modelo que foi configurado com o do tipo simples claro se manteve com a maior temperatura que os demais (duplo claro e simples bronze), tanto nas máximas quanto nas mínimas diárias, demonstrando possuir o maior nível de absorção de calor. Durante o verão, foi apresentado o vidro duplo com a taxa de conforto 2% superior aos vidros simples, provando que o vidro duplo se trata do menos absorvente dos vidros utilizados.
- A partir dos resultados dos modelos que variaram a espessura da cavidade, foi possível observar que o comportamento das dimensões no inverno se assemelhou, com exceção do caso de 50 cm. Este último resultou em temperaturas do ar menos elevadas que os demais, o que refletiu na taxa de conforto; o modelo de 50 cm apresentou 3% inferior aos modelos de 10 e 30 cm. Já no verão, os três modelos apresentaram apenas 1% de diferença no conforto, o que indica que a dimensão da cavidade tem mais impacto no inverno que no verão.
- O caso com Chaminé Solar (CS) se mostrou com desempenho inferior à PT comum no verão e com um pequeno ganho de conforto de 4% no inverno para o caso de ventilação da CS fechada.

Os resultados obtidos indicam que a parede PT de forma geral promove um atraso térmico nas temperaturas do ar do ambiente interno no clima considerado, tanto no inverno quanto no verão; embora, neste último, em menor proporção. O melhor resultado constatado para o inverno foi na configuração de PT associada a Chaminé solar com respiradouro externo fechado, proporcionando um aumento de 21% da taxa de conforto do ambiente. Já para o verão, o melhor cenário foi o com configuração de 30 cm de espessura da camada interna da PT, apresentando um ganho de 14% na taxa de conforto do ambiente. Esses resultados evidenciam que a PT pode

proporcionar uma melhoria térmica no ambiente em ambas as estações analisadas. Foi provado que a fachada norte não recebe radiação suficiente no verão para o superaquecimento, apesar de em alguns casos elevar a temperatura de modo que adaptações no modelo possam contornar o fato.

As principais limitações do presente trabalho consistem no modelo considerado se configurar como uma célula teste (sem considerar o entorno) e possuir apenas um pavimento. A influência de ambientes e edificações adjacentes, e cavidade de maiores alturas também podem gerar diferentes resultados, principalmente em relação aos casos com respiradouros de diferentes dimensões e com cronogramas de abertura, embora seja comum a implementação da PT em edificações baixas. Outros limitadores foram a não parametrização do modelo e a análise em apenas uma localidade.

Ainda há um campo vasto de possibilidades de investigação das PT, para explorar este campo seria importante o desenvolvimento de estudos que testem aberturas na camada de vidro, que simulem a aplicação do sistema em cidades de outras Zonas Bioclimáticas brasileiras, que verifiquem o comportamento de novos materiais associados a PT no Brasil, tais como PCM na camada interna, venezianas na fachada, elementos de sombreamento, camada interna preenchida por água. Além disso, ainda podem ser desenvolvidos novos estudos que simulem a inclinação e curvatura tanto da PT, quanto da CS. Esta observação aponta que o campo de pesquisa na área de PT no Brasil ainda é vasto e repleto de possibilidades.

REFERÊNCIAS

ABDULLAH, A. A.; ATALLAH, F. S.; AHMED, O. K.; e ALGUBURI, S. Effect of dusty weather on the performance of the PV/PT wall: Experimental assessment. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 39, p. 102419, 2022a.

ABDULLAH, A. A.; ATALLAH, F. S.; AHMED, O. K.; e DAOUD, R. W. Performance improvement of photovoltaic/PT wall by using phase change material: Experimental assessment. **Journal of Energy Storage**, v. 55, p. 105596, 2022b.

AGURTO, L.; ALLACKER, K.; FISSORE, A.; AGURTI, C.; DE TROYER, F.; e REBOLLEDO, B. Bioclimatic Prosthesis: Experimental dataset for a low-cost PT wall to existing social housing refurbishment for an intermediate valley (Chillán) city in the south of Chile. **Data in Brief**, v. 30, p. 105547, 2020a.

AGURTO, L.; ALLACKER, K.; FISSORE, A.; AGURTI, C.; DE TROYER, F. Design and experimental study of a low-cost prefab PT wall to improve indoor temperatures in social housing in the Biobío region in Chile. **Solar Energy**, v. 198, p. 704-721, 2020b.

AHMED, Omer K.; HAMADA, Khalaf I.; SALIH, Abdulrazzaq M. Enhancement of the performance of Photovoltaic/PT wall system using the porous medium: Experimental and theoretical study. *Energy*, v. 171, p. 14-26, 2019.

ALHARBI, K. A. M.; ALDOSARI, O.; SINA, N.; AYBAR, H. Ş.; FUXI, S.; ALKHATIB, S. E.; e ABD ALLAH, A. M. Installation of rectangular enclosures filled with phase change nanomaterials on the thrombus walls of a residential building to manage solar radiation in different seasons of the year. **Journal of Building Engineering**, v. 57, p. 104732, 2022.

ALQAED, Saeed; MUSTAFA, Jawed; SHARIFPUR, Mohsen. Numerical study of the placement and thickness of blocks equipped with phase change materials in a PT wall in a room-thermal performance prediction using ANN. **Engineering Analysis with Boundary Elements**, v. 141, p. 91-116, 2022.

ASKARI, Minoo; JAHANGIR, Mohammad H. Evaluation of thermal performance and energy efficiency of a PT wall improved with dual phase change materials. **Energy**, v. 284, p. 128587, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575: Edificações Habitacionais – Desempenho Parte 1: Requisitos Gerais - Referências - Elaboração. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575: Edificações Habitacionais – Desempenho Parte 3: Requisitos para os Sistemas de Pisos - Referências - Elaboração. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575: Edificações Habitacionais – Desempenho Parte 4: Requisitos para os Sistemas de Vedações Verticais Internas e Externas - Referências - Elaboração. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575: Edificações Habitacionais – Desempenho Parte 5: Requisitos para os Sistemas de Coberturas - Referências -Elaboração. Rio de Janeiro, 2013.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de Norma 02-135: Desempenho Térmico de Edificações. Rio de Janeiro. 2004

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

BAÏRI, A., MARTÍN-GARÍN, A., ADEYEYE, K., SHE, K., & MILLÁN-GARCÍA, J. A. Enhancement of natural convection for improvement of PT wall performance. An experimental study. **Energy and Buildings**, v. 211, p. 109788, 2020.

BEVILACQUA, P., BENEVENTO, F., BRUNO, R., & ARCURI, N. Are PT walls suitable passive systems for the reduction of the yearly building energy requirements? *Energy*, v. 185, p. 554-566, 2019.

BEVILACQUA, Piero. BRUNO, R., GALLO, S., & SZYSKA, J. A validated multi-physic model for the optimization of an innovative PT Wall for winter use. **Journal of Building Engineering**, p. 108915, 2024.

BEVILACQUA, Piero; BRUNO, R.; SZYSZKA, J.; CIRONE, D.; e ROLLO, A. Summer and winter performance of an innovative concept of PT wall for residential buildings. **Energy**, v. 258, p. 124798, 2022.

BIANCO, Corina. **Parede PT:** um estudo experimental comparativo de desempenho térmico para aquecimento e arrefecimento da cidade de São Paulo. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

CAVALCANTI, Fernando. CARAM, Rosana. Avaliação do uso de fachada solar no litoral do nordeste brasileiro: o caso das Paredes PT. **Revista Brasileira de Energia Solar**. São Paulo. Vol. 4. 2013.p. 40 - 46. Disponível em: <https://rbens.org.br/rbens/article/view/93/93>. Acesso em: 20 dez. 2022.

CHARQUI, Z., EL MOUTAOUAKIL, L., BOUKENDIL, M., HIDKI, R., ZRIKEM, Z., e ABDELBAKI, A. Numerical simulation of turbulent coupled heat transfer in a PT wall subjected to periodic thermal excitations. **Energy and Buildings**, v. 278, p. 112631, 2023a.

CHARQUI, Z., BOUKENDIL, M., EL MOUTAOUAKIL, L., HIDKI, R., ZRIKEM, Z., e ABDELBAKI, A. Simulation and optimization of the thermal behavior of a PT wall under unsteady conditions. **Materials Today: Proceedings**, v. 72, p. 3780-3785, 2023b.

CHEN, H., LIU, S., EFTEKHARI, M., LI, Y., JI, W., & SHEN, Y. Experimental studies on the energy performance of a novel wavy-shape PT wall. **Journal of Building Engineering**, v. 61, p. 105242, 2022.

DABAIEH, M., MAGUID, D., EL MAHDY, D., & WANAS, O. An urban living lab monitoring and post occupancy evaluation for a PT wall proof of concept. *Solar Energy*, v. 193, p. 556-567, 2019.

DONG, Jiankai., CHEN, Z., ZHANG, L., CHENG, Y., SUN, S., e JIE, J. Experimental investigation on the heating performance of a novel designed PT wall. *Energy*, v. 168, p. 728-736, 2019.

ELAOUZY, Y.; EL FADAR, A. Impact of key bioclimatic design strategies on buildings' performance in dominant climates worldwide. *Energy for Sustainable Development*, v. 68, p. 532-549, 2022.

FERNANDES, Jorge; BRAGANÇA, R. M. E. L. Princípios de Sustentabilidade na Arquitetura Vernacular em Portugal. **Congresso Construção 2012**, Coimbra, Portugal, 2012.

FROTA, Anésia. B.; SCHIFFER, Sueli. T. R. Manual de conforto térmico: Arquitetura, Urbanismo. 8. ed. São Paulo: Nobel, 2007. 243 p.

GU, W., LI, G., XIERMAIMAITI, A., & MA, T. A review of recent techniques in performance augmentation and evaluation metrics of PT walls. *Energy and Buildings*, p. 113693, 2023.

GUO, Shu-rui; JIANG, Xing-chi; JIA, Yong-hong; XIANG, Ming-li; LIAO, Yu-xuan; ZHANG, Wen-tao; HUANG, Ru-yi; LONG, En-shen. Experimental and numerical study on indoor thermal environment of solar PT walls with different air-channel thicknesses in plateau. *International Journal of Thermal Sciences*, v. 193, p. 108469, 2023.

HONG, Xiaoqiang; LEUNG, Michael KH; HE, Wei. Thermal behaviour of PT wall with venetian blind in summer and transition seasons. *Energy Procedia*, v. 158, p. 1059-1064, 2019.

HOU, L., LIU, Y., LIU, T., YANG, L., FENG, Y., e GAO, Q. Dynamic heat preservation at night for a PT wall with a built-in panel curtain in Western China. *Solar Energy*, v. 213, p. 284-299, 2021.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa de clima do Brasil**. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, 2002. Disponível em: https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/climatologia/mapas/brasil/Map_BR_clima_2002.pdf

IRSHAD, K.; ALGARNI, S.; ISLAM, N.; REHMAN, S.; ZAHIR, M. H.; PASHA, A. A.; e PILLAI, S. N. Parametric analysis and optimization of a novel photovoltaic PT wall system with venetian blinds: Experimental and computational study. *Case Studies in Thermal Engineering*, v. 34, p. 101958, 2022.

ISLAM, N.; IRSHAD, K.; ZAHIR, M. H.; e ISLAM, S. Numerical and experimental study on the performance of a Photovoltaic PT wall system with Venetian blinds. *Energy*, v. 218, p. 119542, 2021.

KE, W.; JI, J.; ZHANG, C.; XIE, H.; TANG, Y.; e WANG, C. Effects of the PCM layer position on the comprehensive performance of a built-middle PV-PT wall system for building application in the heating season. **Energy**, v. 267, p. 126562, 2023.

KRÜGER, Eduardo; SUZUKI, Eimi; MATOSKI, Adalberto. Evaluation of a PT wall system in a subtropical location. **Energy and Buildings**, v. 66, p. 364-372, 2013.

LAMBERTS, Roberto. Desempenho térmico de edificações. **Universidade Federal**, 7ª ed, 2016.

LI, J., Zhang, Y., Zhu, Z., Zhu, J., Luo, J., Peng, F., e Sun, X. Thermal comfort in a building with PT wall integrated with phase change materials in hot summer and cold winter region without air conditioning. **Energy and Built Environment**, v. 5, n. 1, p. 58-69, 2024.

LI, S., Zhu, N., Hu, P., Lei, F., e Deng, R. Numerical study on thermal performance of PCM PT Wall. **Energy Procedia**, v. 158, p. 2441-2447, 2019.

LI, Wei; CHEN, Wei. Numerical analysis on the thermal performance of a novel PCM-encapsulated porous heat storage PT-wall system. **Solar Energy**, v. 188, p. 706-719, 2019.

LIN, Y.; Ji, J.; Zhou, F.; Ma, Y.; Luo, K.; e Lu, X. Experimental and numerical study on the performance of a built-middle PV PT wall system. **Energy and Buildings**, v. 200, p. 47-57, 2019.

LUCAS, André. MATOSKI, Adalberto. Estudo de viabilidade da aplicação de uma parede "PT" na região de Curitiba. In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLOGIA DA UTFPR, 2011, Curitiba. Disponível em: <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/32979113/Artigo_PT_SICITE_2011.reduzido-libre.pdf?1394036508=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DESTUDO_DA_VIABILIDADE_DA_APLICACAO_DA_PA.pdf&Expires=1678156530&Signature=KpbZnkl63NggajKUKsAC1IBZVH9RGBzGxbNOI1Tk768SzRfVG~hveixjyLQS84g46U~RqG0SD3gHUNed3Xms6vnDVEVDi-dbkBv0VVQZLvKpOO2lmkDNEFgTFZ8AutPDYtQaCTmqPvGRX3ILh6h50tiTfKYuNv19PBM4eA5s2f~BPLmsgtDpqTfwaH5DTGJ8QLTuTca8rfq9mAsv3~2fEE47bBPmE6Xt~zFw45~vvTOWbWWu~O50INowf7HPVEC9uZ07FmMirQV6XvZu2sXPKAlipUg-s~E5t7x5pFrJuQW0SLmnAlrISTNP9V0Cavt25rFHQL~a3qw05xX25tYONA__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA>. Acesso em: 19 dez. 2022.

MA, Q., FUKUDA, H., LEE, M., KOBATAKE, T., KUMA, Y., e OZAKI, A. Study on the utilization of heat in the mechanically ventilated PT wall in a house with a central air conditioning and air circulation system. **Applied Energy**, v. 222, p. 861-871, 2018.

MA, Qingsong ; FUKUDA, H.; WEI, X.; e HARIYADI, A. Optimizing energy performance of a ventilated composite PT wall in an office building. **Renewable energy**, v. 134, p. 1285-1294, 2019.

MABROUKI, A.; KARIM, YB; HASSANI, HO; JAMALI, Y.; e KHALDOUN, A. A study of a passive heating design employing a PT wall with PCM: A numerical investigation of

the semi-oceanic climate in Morocco. **Materials Today: Proceedings**, v. 72, p. 3626-3631, 2023.

MELERO, S., MORGADO, I., NEILA, F. J., & ACHA, C. Passive evaporative cooling by porous ceramic elements integrated in a PT wall. **Architecture & sustainable development**, v. 2, p. 267, 2011.

MORSE, Edward S. **Heating and ventilation of apartments by solar rays**. US patent. n. 246.626, 6 conjuntos. 1881.

ONU. Organização das Nações Unidas. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. 2023. Disponível em <<https://brasil.un.org/pt-br>> Acesso em 10/10/2023

RABANI, Mehran; KALANTAR, Vali; RABANI, Mehrdad. Passive cooling performance of a test room equipped with normal and new designed PT walls: A numerical approach. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 33, p. 69-82, 2019.

RABANI, Mehran. Experimental comparison of energy and exergy analysis of a new designed and a Normal PT wall. **Energy**, v. 260, p. 125050, 2022.

RABANI, Mehran; RABANI, Mehrdad. Heating performance enhancement of a new design PT wall using rectangular thermal fin arrays: An experimental approach. **Journal of Energy Storage**, v. 24, p. 100796, 2019.

SAADATIAN, Omid. SOPIAN, K. LIM, C.H. ASIM, Nilofar. SULAIMAN, Meu. PT walls: A review of opportunities and challenges in research and development. Volume 16, Edição 8, Páginas 6340-6351, 2012.

SABOORI, T., ZHAO, L., MESGARPOUR, M., WONGWISES, S., e MAHIAN, O. A novel macro-scale machine learning prediction based on high-fidelity CFD simulations: A case study on the pore-scale porous PT wall with phase change material capsulation. **Journal of Building Engineering**, v. 54, p. 104505, 2022.

SANCHEZ, Patrick Facelli; HANCCO, Lisset Mercado. PT walls with porous medium insertion and their influence on thermal comfort in flats in Cusco, Peru. **Energy and Built Environment**, 2022.

SERGEI, Kostikov; SHEN, Chao; JIANG, Yiqiang. A review of the current work potential of a PT wall. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 130, p. 109947, 2020.

SHEIKHOLESLAMI, M.; AL-HUSSEIN, Hazim RA. Modification of heat storage system involving PT wall in existence of paraffin enhanced with nanoparticles. **Journal of Energy Storage**, v. 58, p. 106419, 2023.

SIMÕES, N.; MANAIA, M.; SIMÕES, I. Energy performance of solar and PT walls in Mediterranean climates. **Energy**, v. 234, p. 121197, 2021.

SZYSZKA, Jerzy; BEVILACQUA, Piero; BRUNO, Roberto. A statistical analysis of an innovative concept of PT Wall by experimental tests. **Journal of Building Engineering**, v. 62, p. 105382, 2022.

SUZUKI, Eimi Veridiane. **Avaliação do potencial de aquecimento/resfriamento de um sistema de climatização passiva**. 2012. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

TUNÇ, Murat; UYSAL, Mithat. Passive solar heating of buildings using a fluidized bed plus PT wall system. **Applied energy**, v. 38, n. 3, p. 199-213, 1991.

WANG, Dengjia. HU, Liang. DU, Hu. LIU, Yanfeng. HUANG, Jianxiang. XU, Yanchao. LIU, Jiaping. Classification, experimental assessment, modeling methods and evaluation metrics of PT walls. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. China, vol 124, Pag. 109772, 2020.

WU, Shuang-Ying; XU, Li; XIAO, Lan. Air purification and thermal performance of photocatalytic-PT wall based on multiple physical fields coupling. **Renewable Energy**, v. 148, p. 338-348, 2020.

WU, Shuang-Ying; WU, Long-Fei; XIAO, Lan. Effects of aspect ratio and inlet wind velocity on thermal characteristics of PT wall channel under different ventilation strategies: An indoor experiment. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 141, p. 110800, 2023.

XIAO, Lan; QIN, Liang-Liang; WU, Shuang-Ying. Proposal and application of comprehensive thermal comfort evaluation model in heating seasons for buildings with solar PT wall. **Applied Thermal Engineering**, v. 213, p. 118774, 2022.

XU, B., GAN, W. T., WANG, Y. L., CHEN, X. N., FEI, Y., e PEI, G. Thermal performance of a novel PT wall integrated with direct absorption solar collector based on phase change slurry in winter. **Renewable Energy**, 2023.

YANG, L., Dhahad, H. A., Chen, M., Huang, Z., Anqi, A. E., Rajhi, A. A., & Qader, D. N. Transient analysis of buildings with PT wall in a southern envelope and strengthening efficacy by adding phase change material. **Journal of Building Engineering**, v. 55, p. 104670, 2022.

ZHOU, L., HUO, J., ZHOU, T., e JIN, S. Investigation on the thermal performance of a composite PT wall under steady state condition. **Energy and Buildings**, v. 214, p. 109815, 2020.

ZHOU, Shiqiang; RAZAQPUR, A. Ghani. CFD modeling and experimental validation of the thermal performance of a novel dynamic PCM PT wall: Comparison with the companion static wall with and without PCM. **Applied Energy**, v. 353, p. 121985, 2024.

ZHU, N., DENG, R., HU, P., LEI, F., XU, L., e JIANG, Z. Coupling optimization study of key influencing factors on PCM PT wall for year thermal management. **Energy**, v. 236, p. 121470, 2021.

ZHU, N., LI, S., HU, P., LEI, F., e DENG, R. Numerical investigations on performance of phase change material PT wall in building. **Energy**, v. 187, p. 116057, 2019.

ZIEBELL, Clarissa. AYMONE, José Luis. Seleção de concepção de Paredes PT. **Design em pesquisa**. Porto Alegre, vol 3. 2020, p. 546-563.