



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo

CIBELE ELLER RODRIGUES

**DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES
RESIDENCIAIS EM MADEIRA INDUSTRIALIZADA NO
BRASIL COM O USO DE MATERIAIS DE MUDANÇA
DE FASE E DE SISTEMAS HÍBRIDOS**

CAMPINAS

2023

CIBELE ELLER RODRIGUES

**DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES
RESIDENCIAIS EM MADEIRA INDUSTRIALIZADA NO
BRASIL COM O USO DE MATERIAIS DE MUDANÇA
DE FASE E DE SISTEMAS HÍBRIDOS**

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, para obtenção do título de Doutora em Arquitetura, Tecnologia e Cidade, na área de Arquitetura, Tecnologia e Cidade.

Orientadora: Profa. Dra. Lucila Chebel Labaki

Coorientadora: Profa. Dra. Maria Gabriela Caffarena Celani

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA TESE DE DOUTORADO DEFENDIDA PELA ALUNA CIBELE ELLER RODRIGUES, ORIENTADA PELAS PROFA. DRA. LUCILA CHEBEL LABAKI E PROFA. DRA. MARIA GABRIELA CAFFARENA CELANI.

ASSINATURA DA ORIENTADORA

CAMPINAS

2023

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

R618d Rodrigues, Cibele Eller, 1991-
Desempenho térmico de edificações residenciais em madeira industrializada no Brasil com o uso de materiais de mudança de fase e de sistemas híbridos / Cibele Eller Rodrigues. – Campinas, SP : [s.n.], 2023.

Orientador: Lucila Chebel Labaki.
Coorientador: Maria Gabriela Caffarena Celani.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Materiais de mudança de fase. 2. Sistemas híbridos. 3. Construção de madeira. 4. Conforto térmico. 5. Eficiência energética. 6. Desempenho de edificações. 7. Arquitetura - Simulação por computador. I. Labaki, Lucila Chebel, 1943-. II. Celani, Maria Gabriela Caffarena, 1967-. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. IV. Título.

Informações Complementares

Título em outro idioma: Thermal performance of industrialized timber residential buildings in Brazil using phase change materials and hybrid systems

Palavras-chave em inglês:

Phase change material

Hybrid systems

Timber construction

Thermal comfort

Energy efficiency

Building performance

Architecture - Computer simulation

Área de concentração: Arquitetura, Tecnologia e Cidade

Titulação: Doutora em Arquitetura, Tecnologia e Cidade

Banca examinadora:

Lucila Chebel Labaki [Orientador]

Roberta Vieira Gonçalves de Souza

Alúcio Braz de Melo

João Roberto Gomes de Faria

Letícia de Oliveira Neves

Data de defesa: 06-12-2023

Programa de Pós-Graduação: Arquitetura, Tecnologia e Cidade

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0002-0637-5378>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/8661346266220396>

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E
URBANISMO**

**DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS
EM MADEIRA INDUSTRIALIZADA NO BRASIL COM O USO
DE MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE E DE SISTEMAS
HÍBRIDOS**

Cibele Eller Rodrigues

Tese de Doutorado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:

**Profa. Dra. Lucila Chebel Labaki
Presidente e Orientadora/Universidade Estadual de Campinas**

**Profa. Dra. Roberta Vieira Gonçalves de Souza
Universidade Federal de Minas Gerais**

**Prof. Dr. Aluísio Braz de Melo
Universidade Federal da Paraíba**

**Prof. Dr. João Roberto Gomes de Faria
Universidade Estadual Paulista**

**Profa. Dra. Letícia de Oliveira Neves
Universidade Estadual de Campinas**

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

Campinas, 06 de dezembro de 2023

A minha filha Elisa, tão esperada,
que nasceu junto com este doutorado.

AGRADECIMENTOS

O doutorado é, sem dúvida, o maior desafio que já enfrentei até o momento. Realizar uma pesquisa com metodologia coerente e obter resultados relevantes, bem como conciliar o trabalho e a estabilidade emocional, não são tarefas fáceis. Estou certa de que não teria conseguido chegar até aqui sem o encorajamento e o apoio de tantos que, de forma direta e indireta, contribuíram para a realização deste trabalho. A todos estes, minha profunda e sincera gratidão:

- A meus amados pais, Dalva e Sydnei, que sempre valorizaram a educação e me fizeram acreditar que eu poderia voar para muito além de meus limites aparentes. Obrigada por viajarem por horas para ser mais uma vez meu porto seguro e abdicar dos últimos meses para aliviar minha carga e me permitir completar esta pesquisa. Pai, obrigada pela paciência em revisar todo o texto da tese.
- A meu querido esposo, Lucas, que esteve a meu lado desde o início do doutorado, no namoro, no noivado e no casamento. Que me incentivou a fazer o período sanduíche na Alemanha, que não mediu esforços para trabalhar por nós dois quando precisei pedir licença do trabalho e que dia a dia demonstra um amor incansável. Obrigada por ser a real definição de parceiro e amigo, por ser a concretização do cuidado de Deus por mim.
- A minha orientadora, Dra. Lucila Labaki, por quem nutro profunda admiração. Obrigada por me aceitar como aluna especial em suas disciplinas e pelo apoio que me deu para entrar no programa. Estendo minha gratidão ao grupo de pesquisa do LACAF, a todos os colegas que contribuíram com comentários para melhorar este trabalho e que me fizeram sentir parte de algo maior.
- A minha coorientadora, Dra. Gabi Celani, que tão prontamente aceitou o convite de me orientar e foi crucial no delineamento da pesquisa. Obrigada por me encorajar e por me guiar no melhor caminho. Seu modo de tratar as pessoas e seu comprometimento com o trabalho são inspirações para minha vida profissional.

- À minha irmã, Cecília, que sempre se fez presente, a despeito da distância física e que me ajudou com as revisões de português das minhas apresentações. A minha amiga Laura que trilhou este caminho antes de mim e me ajudou incontáveis vezes. A tantos outros amigos e familiares que fizeram meus dias mais leves e torceram por mim.
- Ao Programa de Cooperação em Pesquisa Brasil-Alemanha PROBRAL, uma iniciativa conjunta da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) e do Serviço Alemão de Intercâmbio Acadêmico (DAAD) com fundos do Ministério Federal de Educação e Pesquisa - Alemanha (BMBF), que financiou parte desta pesquisa. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.
- À Universidade Estadual de Campinas, a todos os funcionários que se dedicam para manter a excelência do ensino e da instituição.
- À Technische Universität Kaiserslautern, na pessoa da Dra. Sabine Hoffmann e de todos os integrantes do grupo de pesquisa que me acolheram em 2020. Em especial, ao Mohamad Rida, que me ensinou a usar o ESP-r e pacientemente tirou todas as minhas dúvidas.
- Ao UNASP, Centro Universitário Adventista de São Paulo, instituição onde trabalho, pelo apoio financeiro e redução de carga horária no primeiro ano do doutorado, por me conceder as licenças que solicitei em 2020 e 2022, por disponibilizar os laboratórios de informática para as simulações e por ser uma instituição que valoriza o professor e se compromete com o aprendizado dos estudantes. Agradeço também a compreensão e amizade da então coordenadora do curso de Arquitetura e Urbanismo, Dra. Jussara Bauermann.
- A Deus, que me criou e dá sentido a minha existência. Seu amor, sua misericórdia, sua sabedoria infinita e sua presença me capacitam a vencer até mesmo os maiores desafios. “Porque o Senhor dá a sabedoria, e da sua boca vem a inteligência e o entendimento” (Provérbios 2:6; ARA).

RESUMO

Sistemas construtivos em madeira têm sido objeto de atenção internacionalmente devido a suas características sustentáveis de armazenamento de carbono e sua contribuição para a mitigação das mudanças climáticas. Entretanto, seu desempenho térmico, em geral, é inferior ao de alvenaria convencional para a maioria dos contextos climáticos do Brasil. A falta de inércia térmica, principal causa desse fato, pode ser compensada com algumas estratégias, como a incorporação de materiais de mudança de fase (*phase change materials* - PCM) e com o uso de sistemas híbridos com maior massa térmica. O objetivo deste trabalho é investigar o efeito dessas estratégias sobre o desempenho térmico de edifícios residenciais multifamiliares industrializados em madeira, mais especificamente nos sistemas de *wood frame* (WF) e de *cross laminated timber* (CLT), com a finalidade de adequá-los às demandas climáticas brasileiras. Na fundamentação teórica, foi apresentado um panorama dos sistemas construtivos em madeira disponíveis no Brasil, com ênfase nos de maior grau de industrialização. Realizou-se também um levantamento de pesquisas em desempenho térmico desses sistemas no Brasil. Constatou-se que os sistemas em madeira, em sua maioria, possuem desempenho térmico inferior ao da alvenaria convencional, principalmente em climas quentes e nos verões de climas subtropicais, em consequência de sua baixa capacidade térmica. A partir dessa constatação, foi estabelecida uma correlação entre as estratégias passivas recomendadas para as zonas bioclimáticas brasileiras e as possibilidades e limitações dos sistemas industrializados em madeira. Foi evidenciada a importância da inércia térmica, principalmente em ambientes naturalmente ventilados e o potencial da utilização de sistemas híbridos. A segunda parte do trabalho consistiu em um estudo experimental, baseado em simulações computacionais com o uso do programa de modelagem Energy Plus, seguindo o procedimento de simulação da NBR 15575/2021. A partir da definição de um modelo de referência de bloco residencial multifamiliar, foram avaliados diferentes cenários para definir as melhores estratégias de acordo com as condições de cada zona bioclimática. Entre essas estratégias, foram testados a adição de PCM em diferentes combinações de *wood frame* e CLT e o uso de sistemas híbridos, com laje mista de CLT e concreto, vigas de madeira e concreto e torre de sanitários em concreto maciço. Os resultados evidenciaram a necessidade de maior inércia térmica nas zonas bioclimáticas 3 a 8 em contraste com as zonas 1 e 2, que se beneficiaram de construções leves com isolamento térmico. Com a adição de PCM no ponto de fusão adequado para o clima, foi possível atingir o nível superior de desempenho da norma para todas as zonas bioclimáticas brasileiras. Os sistemas híbridos, por sua vez, não apresentaram uma melhora significativa no nível de desempenho em comparação ao PCM. Concluiu-se que existe potencial para a adequação térmica dos sistemas em madeira industrializada no Brasil por meio da incorporação de materiais de mudança de fase. O uso desse material na construção civil deve ser estudado e incentivado em conjunto com sistemas construtivos industrializados em madeira para o cenário climático do Brasil, podendo, assim, apoiar a consolidação desses sistemas que apresentam inúmeras vantagens na esfera da sustentabilidade.

Palavras-chave: Materiais de Mudança de Fase (PCM); Sistemas híbridos; Construção em Madeira; Inércia Térmica; Desempenho térmico.

ABSTRACT

Wood construction systems have been the subject of international attention due to their sustainable characteristics, such as carbon storage and contribution to mitigating climate change. However, their thermal performance is generally lower than that of conventional masonry in most climatic contexts in Brazil. The lack of thermal inertia, the main cause of this fact, can be compensated with some strategies such as incorporating phase change materials (PCM) and using hybrid systems with greater thermal mass. This study aims to investigate the effect of these strategies on the thermal performance of industrialized multifamily residential buildings made of wood, specifically using wood frame (WF) and cross-laminated timber (CLT) systems, with the purpose of adapting them to Brazilian climatic demands. The literature review provides an overview of wood construction systems available in Brazil, with emphasis on those with higher degrees of industrialization, and also includes a survey of research papers on the thermal performance of these systems in Brazil. It was found that wood systems, for the most part, have lower thermal performance than conventional masonry, especially in hot climates and in summers in subtropical climates, due to their low thermal capacity. Based on this, a correlation was established between the recommended passive strategies for Brazilian bioclimatic zones and the possibilities and limitations of industrialized wood systems. The importance of thermal inertia, particularly in naturally ventilated environments, was highlighted, as well as the potential of using hybrid systems. The second part of the study consisted of an experimental investigation through computer simulations using the Energy Plus modeling program, based on the simulation procedure of NBR 15575/2021. Different scenarios were evaluated for a reference model of a multifamily residential block to determine the best strategies according to the conditions of each bioclimatic zone. Among these strategies, the addition of PCM in different combinations of wood frame and CLT and the use of hybrid systems, including timber-concrete composite structures and precast concrete toilets, were tested. The results showed the need for greater thermal inertia in bioclimatic zones 3 to 8, contrasting with zones 1 and 2, which benefited from insulated lightweight constructions. With the addition of PCM at the appropriate melting point for each climate, it was possible to reach the standard's superior performance level for all Brazilian bioclimatic zones. Hybrid systems, in turn, did not show a significant improvement in performance levels compared to PCM. In conclusion, there is potential for thermal adequacy of industrialized wood systems in Brazil through the incorporation of phase change materials. The use of these materials in civil construction should be studied and encouraged in conjunction with industrialized building systems in wood for Brazil's climatic scenario, thus supporting the consolidation of these systems, which offer numerous advantages in terms of sustainability.

Keywords: Phase Change Material (PCM); Hybrid Systems; Wood Construction; Thermal Inertia; Thermal Performance.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de referência para as propriedades térmicas da envoltória por zona bioclimática.....	56
Tabela 2 – Transmitância e capacidade térmica das composições de parede externa e interna, entrepiso, piso térreo e cobertura.....	90
Tabela 3 – Propriedades de PCM de base biológica na literatura.....	93
Tabela 4 – Propriedades térmicas do PCM selecionado.....	96
Tabela 5 – Médias anuais de temperatura externa de bulbo seco, umidade relativa e amplitude térmica diária para os climas selecionados	101
Tabela 6 – Caracterização dos climas em relação aos intervalos de temperatura definidos pela NBR 15575.....	102
Tabela 7 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) para os casos base em alvenaria, WF e CLT para ZB1 (Curitiba, PR) ..	110
Tabela 8 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) para os casos base em alvenaria, WF e CLT para ZB2 (Santa Maria, RS)	112
Tabela 9 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) para os casos base em alvenaria, WF e CLT para ZB3 (Campinas, SP)	114
Tabela 10 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) para os casos base em alvenaria, WF e CLT para ZB4 (Brasília, DF) ..	115
Tabela 11 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) para os casos base em alvenaria, WF e CLT para ZB5 (Niterói, RJ)	117
Tabela 12 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) para os casos base em alvenaria, WF e CLT para ZB6 (Campo Grande, MS).....	118
Tabela 13 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) para os casos base em alvenaria, WF e CLT para ZB7 (Teresina, PI) ..	120
Tabela 14 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) para os casos base em alvenaria, WF e CLT para ZB8 (Belém, PA)	122
Tabela 15 – Pontos de fusão do PCM simulados por zona bioclimática	124

Tabela 16 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) pela adição de PCM nas paredes e forro – pontos de fusão de 21, 23, 25 e 27 °C – para ZB3 (Campinas, SP)	125
Tabela 17 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) pela adição de PCM com pontos de fusão mais adequados por caso para ZB1 (Curitiba, PR)	126
Tabela 18 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) pela adição de PCM com pontos de fusão mais adequados por caso para ZB2 (Santa Maria, RS)	127
Tabela 19 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) pela adição de PCM com pontos de fusão mais adequados por caso para ZB3 (Campinas, SP)	129
Tabela 20 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) pela adição de PCM com pontos de fusão mais adequados por caso para ZB4 (Brasília, DF).....	130
Tabela 21 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) pela adição de PCM com pontos de fusão mais adequados por caso para ZB5 (Niterói, RJ).....	131
Tabela 22 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) pela adição de PCM com pontos de fusão mais adequados por caso para ZB6 (Campo Grande, MS).....	132
Tabela 23 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) pela adição de PCM com pontos de fusão mais adequados por caso para ZB7 (Teresina, PI)	133
Tabela 24 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) pela adição de PCM com pontos de fusão mais adequados por caso para ZB8 (Belém, PA)	134
Tabela 25 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) com o uso de sistemas híbridos para ZB1 (Curitiba, PR)	137
Tabela 26 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) com o uso de sistemas híbridos para ZB2 (Santa Maria, RS)	138
Tabela 27 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) com o uso de sistemas híbridos para ZB3 (Campinas, SP).....	139
Tabela 28 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) com o uso de sistemas híbridos para ZB4 (Brasília, DF).....	141

Tabela 29 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) com o uso de sistemas híbridos para ZB5 (Niterói, RJ).....	142
Tabela 30 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) com o uso de sistemas híbridos para ZB6 (Campo Grande, MS).....	143
Tabela 31 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) com o uso de sistemas híbridos para ZB7 (Teresina, PI)	144
Tabela 32 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) com o uso de sistemas híbridos para ZB8 (Belém, PA).....	145
Tabela 33 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) pela adição de PCM nos modelos de WF-S e CLT-3 para ZB1 (Curitiba, PR)	147
Tabela 34 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) pela adição de PCM nos modelos de WF-S e CLT-3 para ZB2 (Santa Maria, RS)	148
Tabela 35 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) pela adição de PCM nos modelos de WF-S e CLT-3 para ZB3 (Campinas, SP)	149
Tabela 36 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) pela adição de PCM nos modelos de WF-S e CLT-3 para ZB4 (Brasília, DF)	149
Tabela 37 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) pela adição de PCM nos modelos de WF-S e CLT-3 para ZB5 (Niterói, RJ).....	150
Tabela 38 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) pela adição de PCM nos modelos de WF-S e CLT-3 para ZB6 (Campo Grande, MS).....	151
Tabela 39 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) pela adição de PCM nos modelos de WF-S e CLT-3 para ZB7 (Teresina, PI).....	152
Tabela 40 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) pela adição de PCM nos modelos de WF-S e CLT-3 para ZB8 (Belém, PA)	152

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Comparação dos sistemas construtivos de alvenaria convencional, steel frame, concreto-PVC e <i>wood frame</i>	25
Quadro 2 – Revisão da literatura: desempenho térmico de ambientes construídos em WF para climas brasileiros	58
Quadro 3 – Revisão da literatura: desempenho térmico de ambientes construídos em CLT para climas brasileiros	60
Quadro 4 – Critérios de avaliação do desempenho térmico segundo a NBR 15575 para pavimento tipo	104
Quadro 5 – Resumo dos resultados da Etapa 1: seleção de casos base	123

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Eficiência no processamento da madeira em diferentes décadas pela indústria norte-americana de produtos florestais.....	27
Figura 2 – Uso localizado da massa térmica para resfriamento e/ou aquecimento passivo	32
Figura 3 – Fazenda Catuçaba do Studio mk27	33
Figura 4 – Skaio, em Heilbronn, Alemanha. Edifício híbrido em CLT, MLC reforçado com estrutura metálica e núcleo de concreto armado.....	33
Figura 5 – Casa de troncos. À esquerda, habitação em troncos serrados de imigrantes no Paraná. À direita, uma habitação de alto padrão de troncos pré-fabricados no Canadá.	37
Figura 6 – À esquerda, construções em enxaimel em Frankfurt, Alemanha. À direita, entramados de madeira tipo <i>platform</i> e <i>balloon</i>	38
Figura 7 – Sistemas construtivos em madeira no Brasil, incluindo o grau de industrialização e a possibilidade de verticalização	41
Figura 8 – Níveis de pré-fabricação	41
Figura 9 – Esquema 3D do sistema construtivo <i>wood frame</i> – exemplo em edifício de três pavimentos, uma das possíveis aplicações do sistema	42
Figura 10 – Industrialização do sistema em <i>wood frame</i>	44
Figura 11 – Camadas de uma parede no sistema <i>wood frame</i>	45
Figura 12 – Detalhamento construtivo de paredes externas, internas e de geminação em <i>wood frame</i>	47
Figura 13 – Detalhamento construtivo de pisos e cobertura em <i>wood frame</i> baseado	48
Figura 14 – Esquema mostrando as camadas perpendiculares do CLT	49
Figura 15 – CLT no ambiente de fábrica, no canteiro de obras e na edificação finalizada, respectivamente	51
Figura 16 – Camadas de uma parede no sistema CLT – <i>cross laminated timber</i>	52
Figura 17 – Detalhamento construtivo do sistema em CLT.....	53

Figura 18 – Zoneamento bioclimático brasileiro de acordo com a NBR 15220-3:2005	55
Figura 20 – Relação entre transmitância térmica e capacidade térmica das paredes dos sistemas construtivos em <i>wood frame</i> e CLT com e sem isolantes térmicos e bloco cerâmico e de concreto. Destaque para as exigências do método simplificado da NBR 15575:2021	65
Figura 21 – Previsão do consumo de energia incorporada e operacional para 25, 50 e 100 na cidade de Sydney, Austrália. Os experimentos foram feitos com uma edificação em <i>wood frame</i> com adição	71
Figura 22 – Funcionamento esquemático dos materiais de mudança de fase nas edificações	73
Figura 23 – Operacionalização das variáveis da pesquisa	81
Figura 24 – Etapas das simulações – plano experimental	82
Figura 25 – Etapas do procedimento de simulação e indicadores de desempenho térmico da NBR 15575	84
Figura 26 – Planta do pavimento tipo representativo para as simulações	87
Figura 27 – ENRG Blanket. Manta de PCM de base biológica macroencapsulado ..	95
Figura 28 – Curva de Entalpia (em vermelho) e de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) (em preto) de dois PCM de base biológica da Phase Change Solutions. O mesmo padrão de curva ocorreu, apenas alterando as temperaturas de fusão e solidificação	96
Figura 29 – Padrão de ocupação, de uso da iluminação e de carga de equipamentos	97
Figura 30 – Cidades selecionadas para representar cada zona bioclimática.....	99
Figura 31 – Caracterização dos climas selecionados	99
Figura 32 – Modelo de apresentação dos resultados das simulações nas seções 4.1, 4.2 e 4.3	108
Figura 33 – Doze casos base.....	109
Figura 34 – Aumento do PHFT e redução da CgTT com a aplicação de PCM	135
Figura 35 – Etapa 2.2: adição de massa térmica / sistemas híbridos	137

Figura 36 – Percentual de horas de ocupação dentro da faixa de temperatura operativa e nível de desempenho para a zona bioclimática 1 (Curitiba, PR)	155
Figura 37 – Percentual de horas de ocupação dentro da faixa de temperatura operativa e nível de desempenho para a zona bioclimática 2 (Santa Maria, RS) ...	155
Figura 38 – Percentual de horas de ocupação dentro da faixa de temperatura operativa e nível de desempenho para a zona bioclimática 3 (Campinas, SP).....	156
Figura 39 – Percentual de horas de ocupação dentro da faixa de temperatura operativa e nível de desempenho para a zona bioclimática 4 (Brasília, DF)	157
Figura 40 – Percentual de horas de ocupação dentro da faixa de temperatura operativa e nível de desempenho para a zona bioclimática 5 (Niterói, RJ)	157
Figura 41 – Percentual de horas de ocupação dentro da faixa de temperatura operativa e nível de desempenho para a zona bioclimática 6 (Campo Grande, MS)	158
Figura 42 – Percentual de horas de ocupação dentro da faixa de temperatura operativa e nível de desempenho para a zona bioclimática 7 (Teresina, PI)	158
Figura 43 – Percentual de horas de ocupação dentro da faixa de temperatura operativa e nível de desempenho para a zona bioclimática 8 (Belém, PA).....	159
Figura 44 – Carga térmica total para a zona bioclimática 1 (Curitiba, PR).....	160
Figura 45 – Carga térmica total para a zona bioclimática 2 (Santa Maria, RS).....	161
Figura 46 – Carga térmica total para a zona bioclimática 3 Campinas, SP)	161
Figura 47 – Carga térmica total para a zona bioclimática 4 (Brasília, DF)	162
Figura 48 – Carga térmica total para a zona bioclimática 5 (Niterói, RJ)	162
Figura 49 – Carga térmica total para a zona bioclimática 6 (Campo Grande, MS) .	163
Figura 50 – Carga térmica total para a zona bioclimática 7 (Teresina, PI).....	163
Figura 51 – Carga térmica total para a zona bioclimática 8 (Belém, PA)	163
Figura 52 – Temperaturas operativas máximas e mínimas para a zona bioclimática 1 (Curitiba, PR).....	165
Figura 53 – Temperaturas operativas máximas e mínimas para zona bioclimática 2 (Santa Maria, RS).....	165

Figura 54 – Temperaturas operativas máximas e mínimas para a zona bioclimática 3 (Campinas, SP)	166
Figura 55 – Temperaturas operativas máximas e mínimas para a zona bioclimática 4 (Brasília, DF)	166
Figura 56 – Temperaturas operativas máximas e mínimas para a zona bioclimática 5 (Niterói, RJ)	167
Figura 57 – Temperaturas operativas máximas e mínimas para a zona bioclimática 6 (Campo Grande, MS)	167
Figura 58 – Temperaturas operativas máximas e mínimas para a zona bioclimática 7 (Teresina, PI).....	168
Figura 59 – Temperaturas operativas máximas e mínimas para a zona bioclimática 8 (Belém, PA)	168

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

α : absorptância à radiação solar da superfície

ACV: análise do ciclo de vida

APP: ambiente de permanência prolongada

APT: ambiente de permanência transitória

$A_{t,APP}$: área de superfície dos elementos transparentes

ATD: amplitude térmica diária

CA: consumo para aquecimento

CR: consumo para refrigeração

Cam.: camadas

CgTA: carga térmica de aquecimento

CgTR: carga térmica de refrigeração

CgTT: carga térmica total; RedCgTT: redução da carga térmica total da UH no modelo real em relação ao modelo de referência

CT: capacidade térmica; capacidade térmica das paredes externas (CT_{par})

CLT: *cross laminated timber* ou madeira lamelada colada cruzada

CNC: controle numérico por computador

COV: composto orgânico volátil

DATec: documento de avaliação técnica

DLT: *dowel laminated timber*, laminações com fixações mecânicas de cavilhas

EPS: poliestireno expandido

ESP-r: *Environmental Systems Performance – Research*, programa de simulação termoenergética

GHA: graus-hora de aquecimento

GHR: graus-hora de resfriamento

IBC: *International Building Code* ou Código Internacional de Construção

ICLT: *interlocking cross-laminated timber*, laminação com juntas de madeira

LVL: *laminated veneer lumber*

LSF: *light steel framing*

LSL: *laminated strand lumber*

LWF: *light wood frame* (LWF), equivalente à nomenclatura de *wood frame* (WF)

MDF: *medium density fiber board*

MDP: *medium density particle board*

MLC: madeira lamelada colada

NBR: norma brasileira

NLT: *nail laminated timber*, laminações com fixações mecânicas de pregos

OSB: *oriented strand board*

PBE Edifica: Programa Brasileiro de Etiquetagem de Edificações

PCM: *phase change material* ou material de mudança de fase

PET: polietileno tereftalato

PHFT: percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa; Δ PHFT: incremento do PHFT_{UH,real} em relação ao PHFT_{UH,ref}

PSL: *parallel strand lumber*

P_{V,APP}: percentual de abertura para ventilação

P_{t,APP}: percentual de elementos transparentes

RTQ-R: Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais

SiNAT: Sistema Nacional de Avaliações Técnicas

SIP: *structural insulated panel*

SLB: *Softwood Lumber Board*

SVVE: sistemas de vedações verticais externas

TBS: Temperatura de bulbo seco

TPO: poliolefina termoplástica

To: temperatura operativa; Tomín: temperatura operativa mínima; Tomáx: temperatura operativa máxima

U: transmitância térmica da superfície; transmitância térmica da parede (U_{par}), transmitância térmica da cobertura (U_{cob})

UH: unidade habitacional

WF: *wood frame*

ZB: zona bioclimática

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	36
2.1	Sistemas industrializados em madeira no Brasil	36
2.1.1	WF – <i>wood frame</i>	42
2.1.2	CLT – <i>cross laminated timber</i>	48
2.2	WF e CLT em relação as normas de desempenho térmico	53
2.2.1	Desempenho térmico de ambientes construídos em WF e CLT para climas brasileiros: revisão da literatura	57
2.3	Estratégias para a inércia térmica em construções de madeira	67
2.3.1	Inércia térmica <i>versus</i> isolamento térmico	67
2.3.2	Adição de massa térmica.....	70
2.3.3	Materiais de mudança de fase – PCM	73
3	MATERIAIS E MÉTODOS	79
3.1	Operacionalização das variáveis.....	80
3.2	Definição do plano experimental	81
3.2.1	Parâmetros da simulação	83
3.2.2	Simulação de PCM no EnergyPlus	85
3.3	Determinação dos sujeitos.....	86
3.3.1	Seleção da geometria	86
3.3.2	Sistemas construtivos e propriedades dos materiais	89
3.3.3	Seleção das propriedades do PCM	93
3.3.4	Padrões de ocupação, cargas internas e ventilação.....	96

3.4	Determinação do Ambiente.....	98
3.5	Coleta, análise e interpretação dos dados	101
3.5.1	Definição do nível final de desempenho por unidade habitacional e número de casos simulados.....	103
3.5.2	Número de casos simulados e parâmetros analisados.....	104
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	108
4.1	Etapa 1 – Seleção dos casos base	109
4.2	Etapa 2 – Incremento de inércia térmica.....	123
4.2.1	Etapa 2.1 Adição de PCM.....	123
4.2.2	Etapa 2.2: Adição de massa térmica (sistemas híbridos com concreto)	136
4.3	Etapa 3 – Modelos Econômicos.....	146
4.4	Resultados Gerais.....	153
4.4.1	PHFT – Percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa	154
4.4.2	CgTT – Carga térmica total.....	159
4.4.3	Tomax e Tomín – Temperaturas máximas e mínimas.....	164
5	CONCLUSÕES	169
	REFERÊNCIAS.....	173

1 INTRODUÇÃO

A escolha do sistema construtivo e, conseqüentemente, dos materiais utilizados em uma construção tem um impacto direto na sustentabilidade, no conforto ambiental e na eficiência energética da edificação. As repercussões dessa escolha são percebidas não apenas durante a obra, mas ao longo de toda a vida útil do edifício, até sua demolição ou desmontagem.

Dentro do atual contexto de grandes mudanças climáticas e esgotamento de recursos, faz-se necessária a busca por métodos construtivos que respondam adequadamente a sua função, mas que, ao mesmo tempo, contribuam para minimizar os impactos ao meio ambiente. Os dados atuais do setor da construção civil a colocam como responsável por 37% das emissões globais de dióxido de carbono relacionadas à energia, por 36% do uso global de energia e por quase 55% da eletricidade global total (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, 2021).

No Brasil, o sistema construtivo mais utilizado é o de alvenaria convencional, abrangendo em média 93,54% das edificações (ELETROBRAS, 2019). O sistema possui estrutura em concreto armado e utiliza nas vedações tijolos cerâmicos ou blocos de concreto, assentados com argamassa de cimento. Por um lado, essa é uma alternativa simples, devido à disponibilidade dos materiais necessários e à facilidade de mão de obra, que não requer alta qualificação. Por outro lado, a alvenaria convencional é um método de baixa industrialização, que gera um alto percentual de resíduos no canteiro de obra e que não permite desmontagem e remontagem. Além disso, o cimento, que em sua produção impacta o meio ambiente com emissões consideráveis de CO₂ (CASTRO et al., 2015), faz parte da composição da maioria dos materiais do sistema como lajes, vigas e pilares em concreto armado, argamassa de cimento, bloco de concreto, entre outros. Os sistemas pesados como o de alvenaria, utilizam mais recursos, exigindo fundações maiores e mais energia gasta no transporte dos materiais.

Na avaliação do ciclo de vida (ACV) de um edifício de ensino no centro-oeste do Brasil, observou-se que os sistemas de estrutura (em concreto armado), de vedação (em

tijolos cerâmicos e argamassa) e de cobertura (em estrutura metálica e telhas termoacústicas) foram os que mais contribuíram para o aumento do impacto ambiental, respectivamente (MEDEIROS; DURANTE; CALLEJAS, 2018). No estudo, os autores apontaram a necessidade de se buscar alternativas para os métodos construtivos convencionais. Os processos de fabricação do clínquer, base para o cimento, e do aço contribuem fortemente nas categorias de impacto da ACV, por isso, segundo os autores, deve-se considerar a substituição por materiais construtivos que utilizam menos clínquer e considerar a reciclagem do aço (MEDEIROS; DURANTE; CALLEJAS, 2018).

Para atingir as metas do Acordo de Paris, assinado em 2015, de limitar o aquecimento global, preferencialmente, em 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais, o setor da construção deve se descarbonizar quase completamente até 2050. Dentre as estratégias apontadas pelo Relatório de Status Global para Edifícios e Construção de 2021 está a redução da energia incorporada dos materiais construtivos, otimizando os processos de construção e utilizando materiais com baixa pegada de carbono (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, 2021).

A indústria da construção civil tem cada vez mais buscado aliar tecnologia e industrialização à sustentabilidade, garantindo maior controle de qualidade, precisão no processo, racionalização dos recursos, agilidade, maior desempenho e durabilidade (LACERDA; GOMES, 2014). O uso da madeira de reflorestamento, em especial em sua versão engenheirada¹, tem sido apontado como uma possível alternativa, contribuindo para a diminuição da pegada ambiental do setor.

O Quadro 1 compara o sistema de alvenaria convencional com três sistemas industrializados, baseado em Lacerda e Gomes (2014). Dentre os sistemas analisados, o *wood frame* (WF) se destaca pelo menor impacto ambiental na produção dos materiais, reduzindo as emissões de dióxido de carbono (CO₂) em até 73% e a

¹ O termo “engenheirada” ainda não faz parte do vocabulário ortográfico da língua portuguesa, entretanto é um termo frequentemente usado na indústria no Brasil, baseado na tradução livre da expressão em inglês *engineered wood*. Também utilizado em Shigue (2018).

geração de resíduos no canteiro de obras em até 85%, comparados à alvenaria convencional.

Quadro 1 – Comparação dos sistemas construtivos de alvenaria convencional, steel frame, concreto-PVC e wood frame

Sistema Construtivo	Nível de Industrialização	Redução do impacto ambiental na produção dos materiais	Redução de resíduos no canteiro de obras	Produtividade do sistema (homem-hora/m ²)	Inércia térmica	Isolamento térmico	Facilidade de manutenção e/ou Reforma
	Fabricação e canteiro de obras			Uso			
Alvenaria convencional	intermediário(a)	menor	menor	menor	maior	intermediário(a)	intermediário(a)
Steel Frame	maior	menor	maior	maior	menor	maior	maior
Painéis de PVC e concreto	maior	menor	maior	maior	intermediário(a)	intermediário(a)	intermediário(a)
Wood Frame	maior	maior	maior	maior	menor	maior	maior
LEGENDA: ■ menor ■ intermediário(a) ■ maior							

Fonte: organizado pela autora (2023), a partir de (LACERDA; GOMES, 2014).

A madeira é um material construtivo singular que tem sido usado desde as primeiras construções. É um material natural, que utiliza uma quantidade extremamente baixa de energia para extração e beneficiamento da matéria-prima em comparação com outros materiais de construção, como o concreto e o aço. Além de ser um recurso renovável, uma vez que novas árvores sejam plantadas em um manejo sustentável, a madeira contribui para o meio ambiente por sua capacidade de armazenar grandes quantidades de carbono, processo conhecido como sequestro de carbono. Uma tonelada de madeira para construção contém 510 quilogramas de carbono, o que corresponde a 1,8 tonelada de CO₂ (JESKA; PASCHA, 2015). Esse carbono fica armazenado na madeira mesmo após o material passar pelo processo de usinagem. No fim da vida de um edifício, a madeira pode ser reaproveitada em outros edifícios, na fabricação de móveis, como biomassa para a geração de energia, ou ainda retornar ao ciclo ecológico sem gerar resíduos não-degradáveis.

A busca pela sustentabilidade das décadas recentes tem apontado para o retorno do uso da madeira e o aumento de sua utilização na construção civil como algo benéfico. Muitos países têm incentivado a utilização do material por meio de políticas públicas e da revisão de códigos de obras e normas para regulamentar o uso de sistemas construtivos em madeira. Ludwig (2019) demonstrou, com um estudo de caso, como as leis alemãs têm influenciado no aumento do uso da madeira na construção civil do país; em um primeiro momento, ao permitir espaço para inovações construtivas, por meio de programas de incentivo e, em um segundo momento, ao restringir ou desincentivar padrões antigos, com aplicação de impostos e outros instrumentos legais.

Apesar das vantagens para o meio ambiente, existem algumas preocupações em relação às construções em madeira, sejam elas em relação à resistência ao fogo, à durabilidade/manutenção e à capacidade estrutural. Inovações tecnológicas na construção em madeira têm surgido para lidar com essas questões, permitindo a expansão desses sistemas, com todas as vantagens já mencionadas, incluindo a viabilização da construção de edificações de múltiplos pavimentos em madeira (HILDEBRANDT; HAGEMANN; THRÄN, 2017). De acordo com a Think Wood (2022), uma campanha de comunicação da iniciativa privada norte-americana *Softwood Lumber Board* (SLB), o Código Internacional de Construção (IBC) reconheceu o desempenho e a segurança das construções em madeira ao permitir até 06 pavimentos no código de 2018 e agora até 18 pavimentos no código de 2021, com a utilização de construções em madeira massiva².

Apesar do desmatamento ser um sério problema em alguns países, incluindo o Brasil, entre outros, as áreas ocupadas por florestas têm crescido. O reflorestamento e manejo sustentável é feito com taxas de colheita de 60-65% do crescimento da nova floresta, resultando em um aumento anual no número de árvores. Além disso, a porcentagem de áreas de florestas afetadas por colheitas anuais é de apenas 1,3%

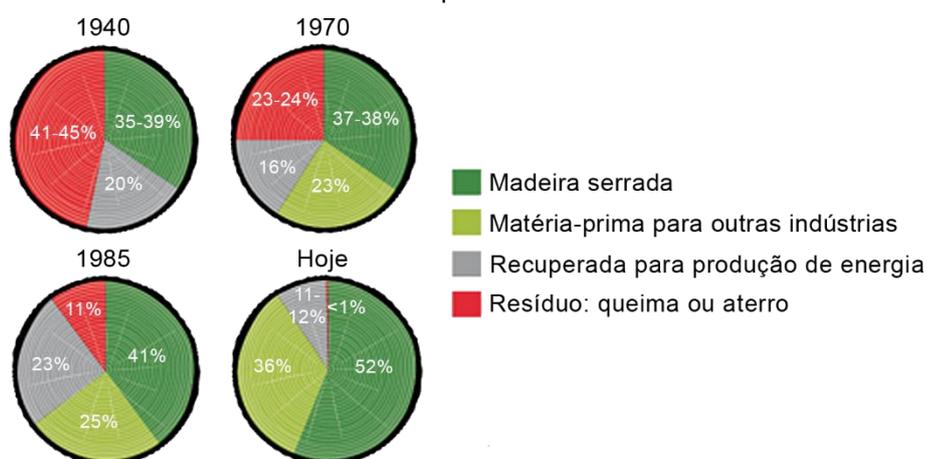
² Madeira massiva, em inglês *mass timber*, é um termo utilizado para designar os produtos e sistemas construtivos feitos com madeira em grandes seções, como exemplo, o *cross laminated timber* (CLT) e a madeira lamelada colada (MLC).

nos Estados Unidos e de 0,2% na Alemanha (DANGEL, 2016). As empresas brasileiras de madeira engenheirada trabalham com madeira de reflorestamento (MELLO, 2007), ou seja, a construção em madeira pode até mesmo contribuir para o aumento das florestas plantadas do país.

Ressalta-se, entretanto, que um problema encontrado nas áreas de reflorestamento no Brasil é o uso de espécies exóticas, muitas vezes invasoras, e a monocultura, pontos que não favorecem a fauna e flora locais. Nesse sentido, é possível e necessário desenvolver produtos de madeira engenheirada com o uso de espécies nativas, que podem ser cultivadas de modo menos impactante nos biomas brasileiros.

Outro aspecto importante é a otimização dos recursos quando o assunto é madeira. Antigamente, grande parte de uma árvore era descartada e incinerada. Hoje em dia, é possível utilizar praticamente toda a madeira coletada, seja por meio de elementos maiores como vigas e pilares, ou de partes menores em compósitos de madeira, como painéis OSB (*oriented strand board*), MDP (*medium density particle board*), MDF (*medium density fiber board*) etc. A Figura 1 mostra o aumento considerável na eficiência do processamento da madeira nos Estados Unidos, comparando as décadas de 1940, 1970, 1985 e atualmente. A porcentagem de resíduos diminuiu de 41-45% na década de 40 para menos de 1% com a tecnologia atual (DANGEL, 2016).

Figura 1 – Eficiência no processamento da madeira em diferentes décadas pela indústria norte-americana de produtos florestais



Fonte: Dangel (2016), tradução nossa.

Os sistemas construtivos industrializados em madeira podem ser mais eficientes em relação ao uso de recursos e mais flexíveis para acomodar novos materiais, incluindo materiais sustentáveis. Feitos de peças pré-fabricadas, são rápidos de construir e precisos, o que reduz o desperdício e contribui para um canteiro de obras mais limpo. Os sistemas industrializados também são mais convenientes para reformas de edifícios, pois são mais fáceis de montar e desmontar. Devido à sua natureza leve, as estruturas e fundações podem ser enxutas, pois as cargas são reduzidas em comparação a outros sistemas. O baixo peso específico da madeira, comparado por exemplo ao concreto, é uma vantagem estrutural, já que diminui os esforços e permite estruturas e fundações mais delgadas. Inclusive, tem-se utilizado edifícios em madeira para aumentar a densidade construtiva e habitacional em contextos urbanos consolidados, ou em regiões com edifícios históricos onde há restrição à construção de fundações volumosas ou profundas, contribuindo para o urbanismo sustentável. O baixo peso permite ainda que andares adicionais sejam construídos em edificações existentes, sem grandes modificações na fundação das estruturas originais (DANGEL, 2016).

Dentre os sistemas construtivos industrializados em madeira no Brasil têm-se o *wood frame* (WF), ou sistema de entramado leve de madeira, o *cross laminated timber* (CLT), ou sistema de madeira lamelada colada cruzada e, em menor escala, o *structural insulated panel* (SIP), ou painéis isolados estruturais e o *nail laminated timber* (NLT) ou madeira lamelada pregada. Além disso, têm-se os sistemas exclusivamente estruturais, a saber a madeira lamelada colada (MLC) e o *laminated veneer lumber* (LVL) ou folhas de madeira coladas, que são vigas e pilares que podem ser usados com diferentes tipos de vedação. Como esta é uma pesquisa voltada para o desempenho térmico, o foco está no comportamento das superfícies (paredes, lajes e coberturas), portanto os sistemas unicamente estruturais não serão analisados. Ademais, como o SIP é um desdobramento do WF, com desempenho similar a um painel de WF isolado e ainda utilizado em menor escala no cenário global, apenas os sistemas WF e CLT serão analisados.

O *wood frame* usa uma estrutura de madeira leve para suportar cargas estruturais e placas de diferentes tipos de materiais, como madeira compensada ou OSB, placas cimentícias e gesso acartonado. O espaço deixado entre as placas pode ser preenchido com materiais isolantes, como fibra de vidro, lã mineral, celulose, fibras naturais e diversos tipos de espuma, para fins térmicos e acústicos. O WF é amplamente utilizado em climas temperados, especialmente na América do Norte, onde é frequentemente combinado com sistemas ativos de aquecimento e refrigeração. Nos Estados Unidos, a maioria dos edifícios residenciais baixos é de *wood frame* (ARAUJO et al., 2016). Por sua vez, o CLT é uma tecnologia mais recente, criada na Europa, que utiliza um volume maior de madeira que o WF. Apesar de ser classificado como um sistema pesado dentre as edificações em madeira (madeira massiva), possui um peso específico e capacidade térmica reduzidos em relação à alvenaria e outros sistemas pesados.

O uso dos sistemas construtivos em madeira industrializada vem crescendo no Brasil nos últimos anos, mas como nossas condições climáticas são muito diferentes daquelas onde esses sistemas são tradicionalmente utilizados, é importante analisá-los e adequá-los a esse novo cenário. Uma diferença significativa entre os sistemas em madeira e a alvenaria convencional é a capacidade térmica, relacionada à quantidade de massa térmica. No processo de troca de calor entre um edifício e seu ambiente, o calor proveniente do sol é primeiramente absorvido pelas superfícies externas, como paredes e coberturas, e depois liberado para o interior. Quanto maior a massa térmica de uma parede, mais lenta será a transferência de calor e, portanto, maior será a inércia térmica. Por princípio, as estruturas pesadas podem reduzir as flutuações da temperatura interna do ar, tanto nos períodos mais quentes do dia ao armazenar o calor, como nos períodos mais frios, ao transmitir para o ambiente a carga térmica absorvida. O excesso de massa térmica também pode ser prejudicial, fazendo com que sejam necessárias quantidades excessivas de energia para aquecer um ambiente ou um tempo muito maior para esfriá-lo (SLEE; HYDE, 2015).

Por outro lado, nos climas frios é muito comum se trabalhar com o isolamento térmico associado a sistemas construtivos leves. A versão mais simples é o isolamento por meio de uma câmara de ar, utilizando-se chapas (de cimento, madeira ou gesso)

colocadas em ambos os lados da estrutura dos montantes do WF. No lugar da câmara de ar, também podem ser utilizados isolantes térmicos, como mantas de lã de vidro, lã de rocha e lã de PET. Diferentemente da inércia térmica que atrasa o fluxo de calor, o isolamento térmico é responsável por diminuí-lo, barrando parte do calor que passaria. Assim, os materiais isolantes funcionam muito bem nas estações frias, pois mantêm o calor no interior do edifício, evitando sua perda. Porém, em estações ou climas predominantemente quentes, as paredes externas isoladas podem dificultar a saída do calor, elevando a temperatura interna do ar nos períodos mais quentes (CHVATAL; CORVACHO, 2009). Apesar do isolamento ser uma excelente medida para o desempenho térmico de edificações, deve ser trabalhado e adaptado de acordo com o clima de cada local.

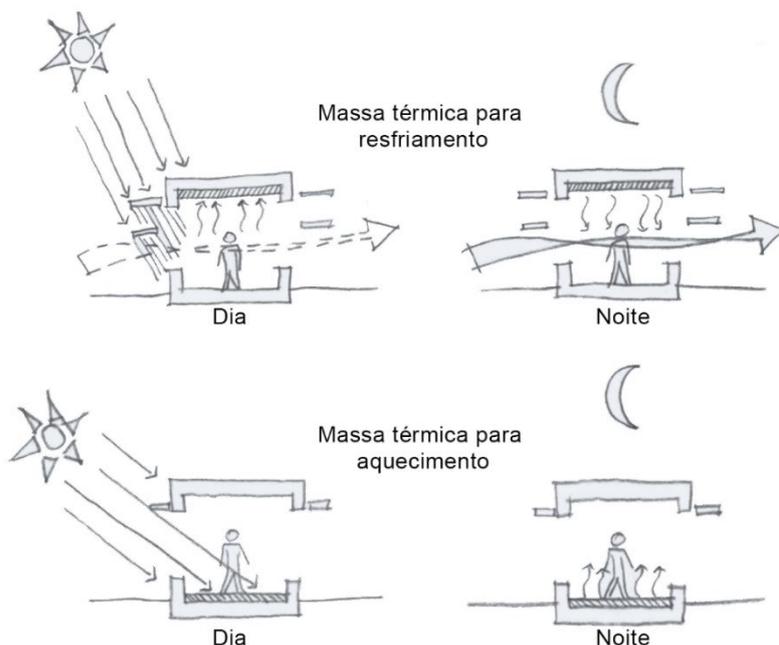
A inércia térmica e o isolamento térmico são efeitos térmicos diferentes. Enquanto a massa térmica atrasa a transferência de calor, o isolamento bloqueia parcialmente o fluxo de calor. Ambos os fenômenos são importantes para o projeto de edificações e devem ser utilizados de forma adequada para cada tipo de clima. Em termos gerais, o isolamento é eficaz para manter o calor no interior e funciona bem em ambientes condicionados artificialmente e em climas frios. Já a massa térmica é desejável em climas com altas amplitudes térmicas diurnas, pois reduz os picos diários de temperatura (SLEE; HYDE, 2015).

Zanoto, Rotter e Campos (2021) compararam o desempenho do sistema de *light wood frame* (WF) com o sistema de alvenaria convencional de bloco cerâmico e alvenaria estrutural de bloco de concreto. Foram analisados os quesitos segurança contra incêndio, desempenho acústico e desempenho térmico de acordo com a NBR 15575 (ABNT, 2013). Nos dois primeiros tópicos, o WF se mostrou superior aos demais. Entretanto, em relação ao desempenho térmico, o WF não atendeu aos critérios mínimos para as zonas bioclimáticas 4 e 5 e revelou algumas restrições em relação à cor das paredes externas para atender aos critérios das zonas 1, 2 e 3. A alvenaria com tijolo cerâmico atendeu a todas as zonas. Os autores reforçam as vantagens do sistema *wood frame* e sugerem, para melhorar o desempenho térmico, o uso de um sistema híbrido de WF e alvenaria.

Nas etapas preliminares desta pesquisa também foram levantadas estratégias alternativas para melhorar o desempenho dos sistemas leves em climas quentes. Os materiais de mudança de fase (PCM – *phase change materials*) foram identificados como produtos promissores que podem compensar a falta de massa térmica, pois são capazes de armazenar quantidades consideráveis de energia na forma de calor latente quando ocorre mudança de fase. Assim, aumentam a inércia térmica quando aplicados a edificações, sem adicionar quantidades consideráveis de massa térmica. Os PCM têm aplicações em diversas indústrias, como de embalagens, de condicionamento de ar, têxtil, aeroespacial, automotiva, eletroeletrônica, química, entre outras. Atualmente, há um crescimento no mercado mundial de PCM devido, principalmente, ao aumento de sua utilização no setor da construção civil. Destaca-se, também, a procura por PCM orgânico de base biológica, como os ácidos graxos, por questões de sustentabilidade (GLOBAL ADVANCED PHASE CHANGE MATERIALS (PCM) INDUSTRY, 2022). O PCM tem sido utilizado com sucesso em países que possuem climas semelhantes ao Brasil, como Austrália e Indonésia. A pesquisa sobre PCM ainda está em estágio inicial no Brasil e tem grande potencial de crescimento. Além disso, estudos realizados no país apresentam resultados positivos e ressaltam a necessidade de mais pesquisas sobre o tema (BRITO, 2017; ELLER et al., 2021).

Também é possível o uso pontual e aprimorado de materiais com alta massa térmica. Quando utilizados de forma correta, ou seja, na quantidade certa e no local certo, sua massa térmica ajuda a manter as temperaturas internas confortáveis. Apesar de manter um sistema majoritariamente leve pela construção em madeira, pode-se utilizar painéis feitos com materiais de maior inércia térmica, como o concreto, e posicioná-los estrategicamente na edificação. A Figura 2 mostra como a posição desses elementos, seja em lajes ou paredes, influencia no ganho ou perda de calor da edificação.

Figura 2 – Uso localizado da massa térmica para resfriamento e/ou aquecimento passivo



Fonte: Slee e Hyde (2015), modificado pela autora (2023).

Outra opção é a utilização de sistemas construtivos híbridos, aproveitando-se as qualidades de cada um da forma que mais se adequa às demandas de projeto. Uma residência na cidade de Catuçaba (SP) (Figura 3), exemplificou esse conceito ao utilizar paredes e cobertura de WF com isolante para simplificar a construção e reduzir as cargas estruturais, combinadas com piso de concreto, tijolos de terra e paredes leste-oeste de taipa de pilão para inércia térmica, além de outras estratégias como sombreamento e vidro duplo. Essa edificação atingiu nível A de eficiência energética pelo RTQ-R do PBE Edifica (SILVA et al., 2015). Na Alemanha, o Skaio (Figura 4), considerado o primeiro edifício híbrido em madeira, possui o subsolo e núcleo central em concreto armado, as demais paredes e lajes em CLT, suportadas por vigas e pilares em MLC reforçados em alguns pontos com perfis de aço (HOLZBAU-OFFENSIVE, 2022). Além deste, existem outros edifícios híbridos com madeira em fase de construção, como no distrito de Spinelli, Mannheim (FLÜWO, 2022). Ademais, o próprio CLT tem sido considerado para aumentar a inércia catuça das edificações de WF, em edificações com as paredes em WF e os entrespisos em CLT, por exemplo (DEWSBURY, 2016).

Figura 3 – Fazenda Catuçaba do Studio mk27



Fonte: ArchDaily (2021).

Figura 4 – Skaio, em Heilbronn, Alemanha. Edifício híbrido em CLT, MLC reforçado com estrutura metálica e núcleo de concreto armado



Fonte: Holzbau-offensive (2022).

Diante do exposto, entende-se que os sistemas construtivos industrializados em madeira são uma alternativa sustentável aos sistemas construtivos dependentes do concreto e do aço. Entretanto, o desafio é adaptar as tecnologias de WF e CLT aos

contextos climáticos brasileiros do ponto de vista do desempenho térmico. Assim, os objetivos, geral e específicos, deste trabalho são:

Objetivo geral:

- Qualificar o desempenho térmico de edificações residenciais construídas com sistemas industrializados em madeira no Brasil, por meio da incorporação de materiais de mudança de fase (PCM) e da combinação de sistemas híbridos para as oito zonas bioclimáticas brasileiras.

Objetivos específicos:

- Caracterização dos sistemas construtivos industrializados em madeira no Brasil com exemplificação das demandas bioclimáticas do contexto brasileiro em relação às características das edificações em madeira.
- Desenvolvimento de estudos analíticos, utilizando simulação computacional, aplicando PCM e sistemas híbridos às edificações em madeira.
- Análise das estratégias mais apropriadas e dos sistemas construtivos recomendados por zona bioclimática.

A partir disso, as principais questões trabalhadas nesta pesquisa foram: Quais estratégias de inércia térmica têm o maior impacto no desempenho térmico das edificações industrializadas em madeira para cada zona bioclimática? Quais são esses níveis de desempenho em comparação com os resultados para a alvenaria convencional? Quais zonas bioclimáticas mais se beneficiam dessas estratégias? Quanto é possível melhorar o nível de desempenho térmico dessas edificações? Qual a influência do ponto de fusão do PCM nos resultados? Qual a influência do posicionamento da massa térmica no ambiente para os resultados? O aumento da inércia térmica por meio de PCM e de sistemas híbridos melhora o desempenho térmico de construções em madeira industrializada para climas brasileiros?

A hipótese desta tese é que o uso adequado da inércia térmica faz com que as construções industrializadas em madeira tenham um desempenho térmico

equivalente ou superior ao dos sistemas construtivos em alvenaria convencional em climas brasileiros. Aumentando-se a inércia térmica de acordo com as necessidades do clima, seja pela incorporação de PCM ou de sistemas híbridos de maior massa térmica, é possível aumentar o conforto e a eficiência energética das edificações em madeira, contribuindo para a consolidação dessa tecnologia no país.

Para se alcançar os objetivos propostos, iniciou-se na fundamentação teórica uma revisão da literatura sobre os sistemas construtivos em madeira no Brasil, o estudo das normas de desempenho térmico em relação ao WF e CLT e o estudo da aplicação de estratégias para aumento da inércia térmica em edificações localizadas em regiões com climas similares aos do Brasil. Em materiais e métodos, descreveu-se a metodologia utilizada no trabalho. Após, foram apresentados os resultados e discussões e, na sequência, as conclusões.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção, foram apresentados os pontos relevantes à fundamentação teórica da pesquisa. Iniciou-se com a caracterização dos sistemas construtivos em madeira e seu grau de industrialização. A partir disso, foram selecionados dois sistemas industrializados presentes no Brasil, a saber, o *Wood Frame* (WF) e o *Cross Laminated Timber* (CLT). Esses dois sistemas foram estudados em relação ao desempenho térmico de ambientes construídos no Brasil.

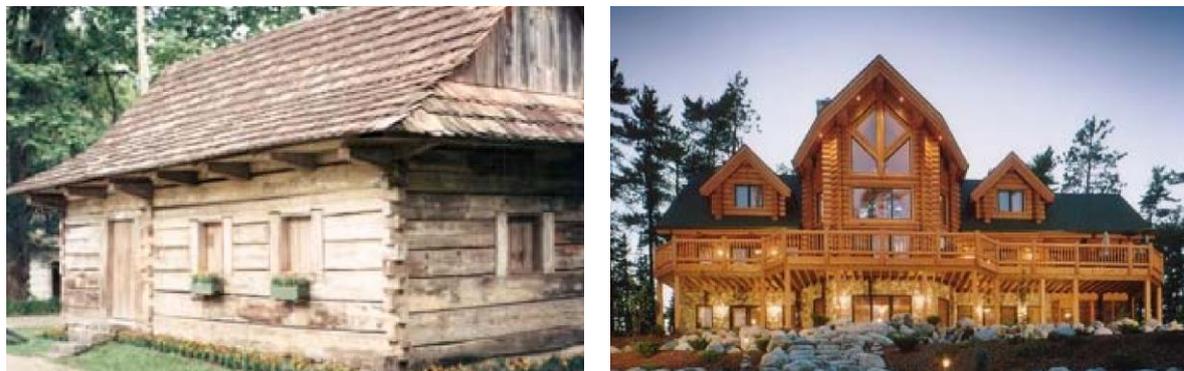
Uma vez definidos os sistemas construtivos, estudaram-se as normas e exigências técnicas em relação ao desempenho térmico no país. Conjuntamente, fez-se um estudo da classificação climática brasileira, buscando identificar as estratégias bioclimáticas adequadas para cada tipo de clima, em relação às demandas e características das construções em madeira.

Por fim, fez-se uma revisão bibliográfica das estratégias empregadas para a melhoria do conforto térmico em países com climas semelhantes. Por meio de estudos de caso foi possível exemplificar as melhores práticas e embasar as decisões para o delineamento da pesquisa.

2.1 Sistemas industrializados em madeira no Brasil

A madeira é um dos materiais de construção mais antigos do mundo devido à sua disponibilidade em muitas regiões e a facilidade com que pode ser trabalhada. Historicamente, têm-se registros de construções feitas unicamente de madeira, por meio do empilhamento de troncos, roliços ou serrados, conhecidos como *loghomes* ou *logstructures* (MELLO, 2007). Essa técnica primitiva foi aperfeiçoada ao longo dos anos, chegando a um grau elevado de pré-fabricação no corte das peças e na complexidade dos encaixes. A Figura 5 mostra, à esquerda, uma casa de troncos tradicional e, à direita, uma casa de alto padrão, em um sistema mais industrializado.

Figura 5 – Casa de troncos. À esquerda, habitação em troncos serrados de imigrantes no Paraná. À direita, uma habitação de alto padrão de troncos pré-fabricados no Canadá.



Fonte: Mello (2007).

Em locais onde a disponibilidade de matéria-prima em madeira não era tão farta, desenvolveram-se sistemas de entramados de madeira que formavam uma espécie de trama estrutural, que podia ser preenchida com terra, pedras ou tijolos. A essas estruturas tradicionais deu-se o nome de *colombage* ou enxaimel. No século XIX, surgiu um novo sistema de entramado, conhecido como *balloon frame*, que utilizava peças verticais finas e longas, que iam do térreo ao pavimento superior, ligadas por peças horizontais menores. Como uma evolução desse sistema, surgiu o *platform frame*, o atual *wood frame*. Nesse sistema, os pisos são construídos como plataformas e os entramados das paredes são fixados em cada piso (MELLO, 2007). Assim foi possível maior verticalização, normalmente até quatro pavimentos, podendo chegar a seis, e melhor desempenho em caso de incêndio, já que a interrupção da estrutura permite menor propagação do fogo. Os sistemas de entramados de madeira ou *wood frame* (WF), em geral, também podem ser industrializados em diferentes níveis, seja por meio da fabricação dos elementos (montantes, painéis, membranas hidrófugas etc.), até a fabricação completa de painéis de parede e cobertura, deixando para o canteiro de obras apenas a montagem e acabamento (DANGEL, 2016). A Figura 6 mostra um exemplo de construção tradicional em enxaimel e os sistemas de *balloon frame* e *platform frame*.

Figura 6 – À esquerda, construções em enxaimel em Frankfurt, Alemanha. À direita, entramados de madeira tipo *platform* e *balloon*



Fonte: figura à esquerda, arquivo pessoal; figura à direita Bahrani et al. (2018).

Outra vertente das construções em madeira foram os sistemas que separam completamente a estrutura da vedação. Com essa flexibilidade, foi possível ter uma estrutura em madeira composta por pilares e vigas (*post-and-beam construction*) e construir as paredes apenas como vedação nos mais diversos materiais possíveis, adequando-se à disponibilidade de material local e às demandas ambientais (MELLO, 2007). A industrialização também chegou para esse sistema, com o corte de peças cada vez mais preciso e com encaixes racionalizados.

No Brasil, historicamente, observa-se todos esses tipos de sistemas em maior ou menor grau. Há registros, por exemplo, de casas troncos empilhados no Paraná, como uma técnica trazida por imigrantes europeus. Também de influência da imigração europeia, têm-se edificações de enxaimel. A taipa de mão, conhecida por pau-a-pique, pode ser considerada um sistema de entramado vernacular brasileiro, desenvolvido da mistura de influências indígenas e portuguesas. A arquitetura indígena em si, muito antes da colonização, já se utilizava da madeira na construção de ocas, que são estruturas leves de madeira com grandes vãos e cobertas de palha. Outra técnica observada no Brasil foram as gaiolas de madeira, que podem ser entendidas como uma regionalização do enxaimel. Seria uma técnica entre o entramado e a estrutura de madeira. A estrutura de pilares e vigas em madeira maciça também foi muito utilizada no Brasil (MELLO, 2007).

Além dos sistemas mencionados, existem dois que são expressivamente brasileiros. O sistema de tábua e mata-juntas ou tábua e sarrafo é utilizado em edificações de baixo custo em várias regiões do Brasil. Ele é composto por uma trama simples de tarugos (peças de seção pequena) e tábuas verticais de madeira pregada, simples ou duplas, e acabado com mata-juntas ou sarrafos. Já na segunda metade do século XX, surgiram no país as casas pré-fabricadas em madeira, comercializadas até hoje. Elas são formadas por sistemas de encaixe de pilares, vigas e fechamento em tábuas de madeira com encaixe macho-fêmea. As paredes podem ser duplas ou simples e, normalmente, nas áreas molhadas é utilizada alvenaria convencional (MELLO, 2007).

A partir da Revolução Industrial, a madeira na construção cedeu espaço para o concreto e o aço. Suas características naturais não-uniformes e seus processos manuais de beneficiamento contradiziam os objetivos da industrialização da construção. Entretanto, nas últimas décadas, observou-se um retorno à madeira por duas causas não relacionadas. Em primeiro lugar, teve-se a busca por materiais mais sustentáveis e pela descarbonização do ambiente construído. Em segundo, o avanço tecnológico na industrialização da própria madeira a tornou um material mais previsível, uniforme e resistente. “Por isso, há muitas boas razões para supor que a madeira, como um dos materiais mais antigos do mundo, se tornará mais importante no futuro como material construtivo em formas sustentáveis de construção” (JESKA; PASCHA, 2015, p. 7, tradução nossa).³

O desenvolvimento tecnológico na indústria da madeira revolucionou a construção civil por meio da criação de produtos que superam as limitações da madeira maciça, com o avanço nos sistemas de conexão e da industrialização cada vez mais elevada dos processos (JESKA; PASCHA, 2015). Nesse sentido, a madeira engenheirada, do inglês *engineered wood*, é uma classe contemporânea de produtos e sistemas que combinam as propriedades naturais da madeira com tecnologias avançadas de

³ “Hence, there are many good reasons to assume that timber, as one of the oldest building materials in the world, will become more important in the future as a construction material in sustainable forms of construction.”

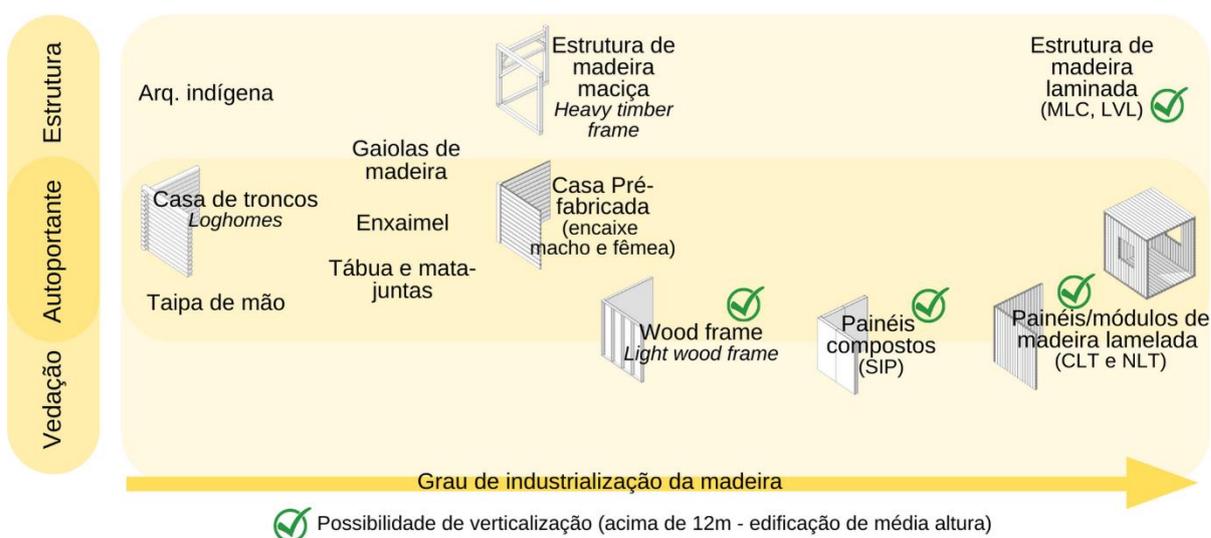
engenharia e produção. Dessa forma, nós, inconsistências e defeitos da matéria-prima são eliminados e, por meio da junção de partes menores (lâminas, placas, partículas, fibras etc.), foi possível criar elementos de grandes dimensões, com propriedades uniformes. Essa padronização minimizou problemas como encolhimento, deformações, rachaduras, torções e outras mudanças dimensionais, além de produzir elementos resistentes e capazes de vencer grandes vãos. As vantagens da madeira engenheirada atenderam às exigências do mercado, permitindo-lhe competir com o concreto e o aço (DANGEL, 2016).

Exemplos de madeira engenheirada são: madeira lamelada colada (MLC), em inglês *Glulam*, produzida por meio da colagem de lâminas paralelas de madeira e utilizada principalmente como vigas e pilares; painéis estruturais de madeira, como o compensado, formado por folhas de madeira coladas, e o painel OSB (*oriented strand board*) ou painel de tiras de madeira orientadas, também coladas; LVL (*laminated veneer lumber*) também formado por folhas de madeira coladas, mas usado como vigas, treliças, pranchas e caibros; PSL (*parallel strand lumber*) produzida pela colagem de tiras de madeira paralelas e usada como vigas e pilares; LSL (*laminated strand lumber*) similar à PSL, porém produzida com tiras menores; CLT (*cross-laminated timber*) produzida pela colagem intercalada, vertical e horizontalmente, de tábuas ou lamelas de madeira, formando grandes painéis estruturais com capacidade de carga bidirecional, usada como pisos, paredes estruturais e telhados; NLT (*nail laminated timber*) e DLT (*dowel laminated timber*), laminações criadas com fixações mecânicas de pregos e cavilhas respectivamente, alternativas às colas, favorecendo a qualidade do ar interno e facilitando o processo de desmontagem no fim da vida útil, seja para reuso, reciclagem ou descarte; ICLT (*interlocking cross-laminated timber*), similar ao CLT, porém sem utilização de colas, pregos ou cavilhas, apenas com juntas de madeira.

Em resumo, existem vários graus de industrialização dos sistemas construtivos em madeira. A Figura 7 resume os sistemas construtivos encontrados no Brasil, tanto históricos quanto contemporâneos e os classifica em relação ao grau de industrialização. Os métodos tradicionais referem-se a construções feitas de modo empírico, com materiais locais e ferramentas comuns. Já outros sistemas, como as

estruturas em madeira maciça e o sistema de tábua e mata-juntas, utilizam peças pré-cortadas, mas com grande parte da obra sendo realizada no canteiro. Aumentando o grau de industrialização, têm-se os sistemas que utilizam componentes pré-fabricados, em maior ou menor grau, como os kits de casas pré-fabricadas e o sistema WF por componentes.

Figura 7 – Sistemas construtivos em madeira no Brasil, incluindo o grau de industrialização e a possibilidade de verticalização



Fonte: elaborado pela autora (2023) com imagens adaptadas de Morgado et al. (2012).

A Figura 8 ilustra os níveis de pré-fabricação, classificando-os em componentes, painéis e módulos. Sistemas que produzem painéis completos em fábrica no Brasil são os sistemas WF, CLT e SIP, os quais também permitem a construção de edificações verticalizadas. Outro sistema usado no Brasil são as estruturas em MLC.

Figura 8 – Níveis de pré-fabricação



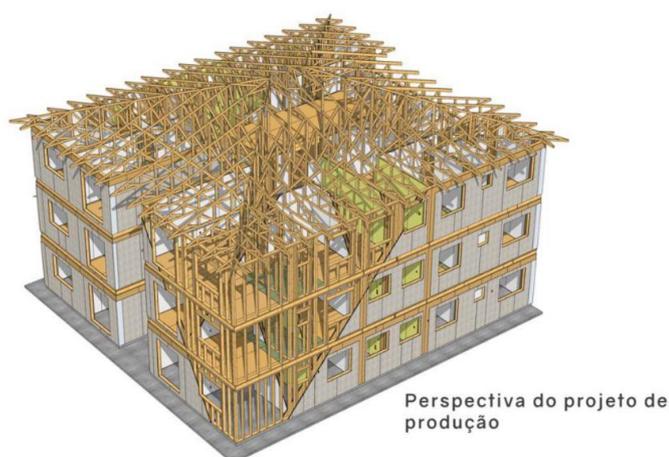
Fonte: Dangel (2016), tradução nossa.

Para este trabalho, foram selecionados os sistemas de *wood frame* (WF) e de *cross laminated timber* (CLT). Devido ao seu grau de industrialização, esses sistemas oferecem o potencial de escalabilidade e verticalização, considerando ainda a preocupação com uma densidade adequada para um urbanismo mais sustentável. Apesar de serem industrializados, os sistemas estruturais de MLC e LVL não serão analisados neste trabalho, uma vez que elementos lineares (vigas e pilares) não são considerados nas avaliações de desempenho térmico. É importante ressaltar que esses sistemas podem ser usados tanto com paredes e coberturas de WF e CLT ou em combinação com qualquer outro sistema.

2.1.1 WF – *wood frame*

O sistema construtivo em WF é composto por um entramado de peças de madeira maciça serradas com fechamentos em chapas (Figura 9). No Brasil, o WF pode ser empregado em edificações de até 4 pavimentos (térreo mais quatro pavimentos) (SINAT, 2020a). Enquanto a estrutura é sempre de madeira, as chapas podem variar de material. Normalmente é usada uma combinação de chapas de tiras/partículas orientadas (OSB – *oriented strand board*) ou chapas de compensado tratadas, chapas cimentícias e chapas de gesso acartonado (SINAT, 2020a). A estética final da edificação pode ser idêntica a dos métodos construtivos convencionais, além de permitir uma diversidade de acabamentos e revestimentos.

Figura 9 – Esquema 3D do sistema construtivo *wood frame* – exemplo em edifício de três pavimentos, uma das possíveis aplicações do sistema



Fonte: SINAT (2020).

O WF chegou ao Brasil por tentativas isoladas de empresas estrangeiras. O primeiro protótipo foi construído em 1973 pela empresa Gypsum com foco no uso do gesso. O segundo protótipo foi feito quase trinta anos mais tarde em 2001. Em 2009, houve mais uma tentativa de implantar o WF no país e foi criada uma comissão chamada Casa Inteligente, com o objetivo de trabalhar na normatização do sistema e do manejo sustentável da matéria-prima no Brasil e na busca de financiamento e visibilidade. Em 2013, foi construído o primeiro condomínio residencial com 280 unidades, financiado pelo programa de incentivo à construção de moradias da época, “Minha Casa, Minha Vida” na cidade de Pelotas (RS) (SOTSEK; SANTOS, 2018).

Em julho de 2023, foi publicada a NBR 16936: Edificações em *light wood frame*, que estabelece as diretrizes e condições de projeto e execução para este sistema. A norma se aplica a edificações de até dois pavimentos e trata das características dos materiais que compõem o sistema, do projeto estrutural e de instalações, da impermeabilização e da prevenção e combate ao incêndio (ABNT, 2023). Existe ainda uma diretriz do Sistema Nacional de Avaliações Técnicas (SINAT) publicada primeiramente em 2011 e com revisão em 2020 (SINAT, 2020a). Essa diretriz dispõe sobre a caracterização dos componentes do WF, os requisitos, critérios e métodos de avaliação do desempenho estrutural, hidrotérmico, acústico, da segurança contra incêndio, estanqueidade à água, durabilidade e manutenibilidade dos elementos. A empresa Tecverde também publicou o documento de avaliação técnica DATec nº 20 – “Sistema de construção TECVERDE: sistema leve em madeira”, fruto de ensaios e simulações do sistema (SINAT, 2020b).

Segundo Shigue (2018), a maior fabricante de WF no Brasil já possui mais de 85 mil m² construídos e há mais oito empresas no país que possuem fábrica própria. As tipologias construídas são predominantemente residenciais, incluindo casas térreas, sobrados, edifícios multifamiliares de até quatro pavimentos, tanto para habitação de interesse social como de alto padrão. Além disso, o catálogo se expandiu para a construção de hospitais, edificações institucionais, comerciais, entre outras (TECVERDE, 2022a).

Em fábrica, a produção pode acontecer tanto em 2D (painéis), como em 3D (módulos). A Figura 10 mostra o ambiente de fábrica e um canteiro de obras desses dois modelos produtivos e duas obras finalizadas: a fachada de um edifício de apartamentos e o interior de um hospital, todos no Brasil. Os painéis das paredes externas e internas saem de fábrica com contramarco, esquadrias incluindo vidros, instalações elétricas e hidráulicas. Além disso, são industrializados os entrespisos e as treliças da cobertura (TECVERDE, 2022b).

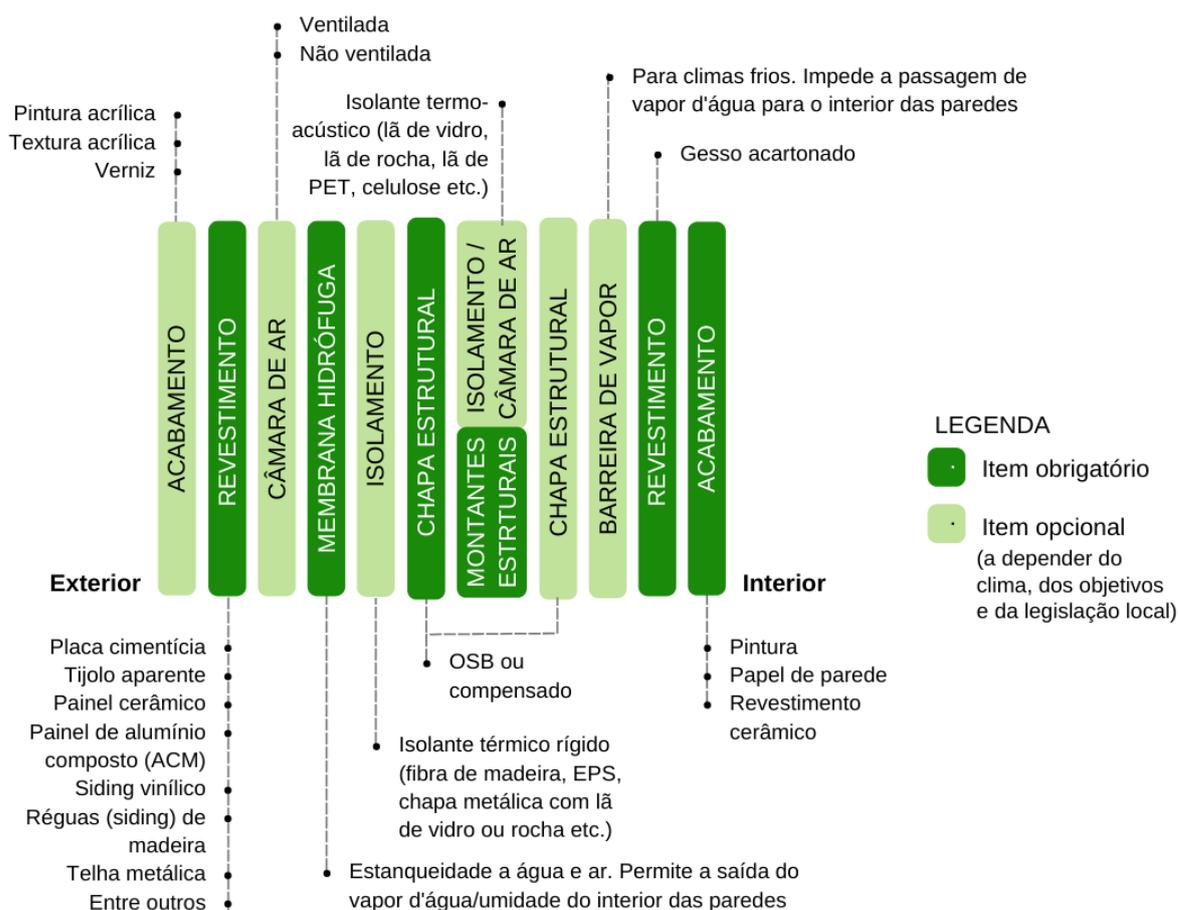
Figura 10 – Industrialização do sistema em *wood frame*



As imagens da esquerda mostram a produção em 2D dos painéis de WF, o canteiro de obras de um condomínio residencial e uma fachada finalizada. As imagens da direita mostram a produção dos módulos 3D, o canteiro de obras e a vista interna finalizada de um hospital. Fonte: Tecverde (2022b).

O sistema em camadas do *wood frame* permite diversas configurações para atender a diferentes demandas, sejam bioclimáticas, acústicas, estéticas, estruturais, entre outras. A Figura 11 apresenta um esquema das possibilidades de configurações das paredes em WF. Uma lógica similar, em camadas, se aplica aos detalhamentos de entrepisos e coberturas. Uma parede em WF é composta de montantes estruturais de madeira e de chapas estruturais ao menos na face externa (normalmente aplicada em ambas as faces), de um controle das intempéries com uma membrana hidrófuga e revestimentos externos e internos. Além dessas camadas principais, pode-se adicionar isolantes termoacústicos, seja em forma de placas rígidas em ambos os lados, externo e interno; ou em forma de mantas ou espumas no espaço entre montantes. Vários tipos de revestimentos e acabamentos podem ser aplicados a este sistema.

Figura 11 – Camadas de uma parede no sistema *wood frame*



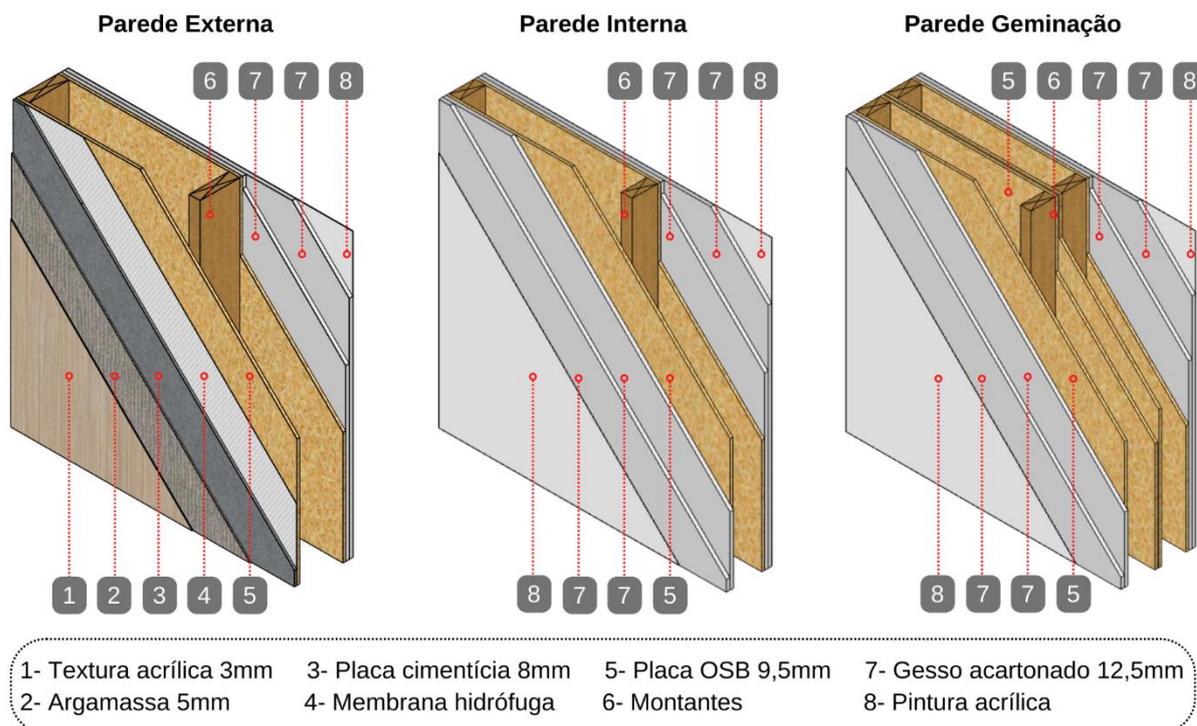
A cor verde escura destaca as camadas que são imprescindíveis para o sistema e a cor clara, as demais camadas, a depender da necessidade do projeto. Fonte: elaborado pela autora (2023).

Em locais de clima frio, costuma-se instalar uma barreira de vapor próxima ao revestimento interno para impedir que o vapor de água do interior da casa se infiltre na parede e se condense ao encontrar superfícies mais frias no interior da parede. Essa barreira é diferente da membrana hidrófuga, a qual é instalada na parte externa, próxima ao revestimento externo, e tem função de conferir estanqueidade à água e ao ar na edificação. A membrana hidrófuga, entretanto, permite a passagem de vapor d'água das camadas internas da parede para o exterior e essa respirabilidade evita o acúmulo de umidade e condensação dentro das paredes.

Uma vez que o *wood frame* é um sistema composto por camadas que podem variar dependendo do local, buscou-se caracterizar os detalhes construtivos de acordo com o que é feito no Brasil. As Figuras 12 e 13 foram criadas a partir do texto do DATec - documento de avaliação técnica – que dispõe sobre o sistema, para edifícios multifamiliares (SINAT, 2020b).

Na Figura 12, observa-se que as paredes de WF são feitas com uma estrutura base de montantes de madeira serrada, neste caso de seção 38mm x 140mm para as paredes externas e de 38mm x 89mm para as internas e de geminação. O principal revestimento externo utilizado no país são as placas cimentícias de 8mm, argamassa cimentícia, também chamada de *base coat* e acabamento de pintura ou textura acrílica. O revestimento interno é feito com chapas de gesso acartonado, com acabamento de pintura nas áreas secas e de placas cerâmicas nas áreas molhadas/molháveis. As chapas de gesso para essas áreas são do tipo resistentes à umidade.

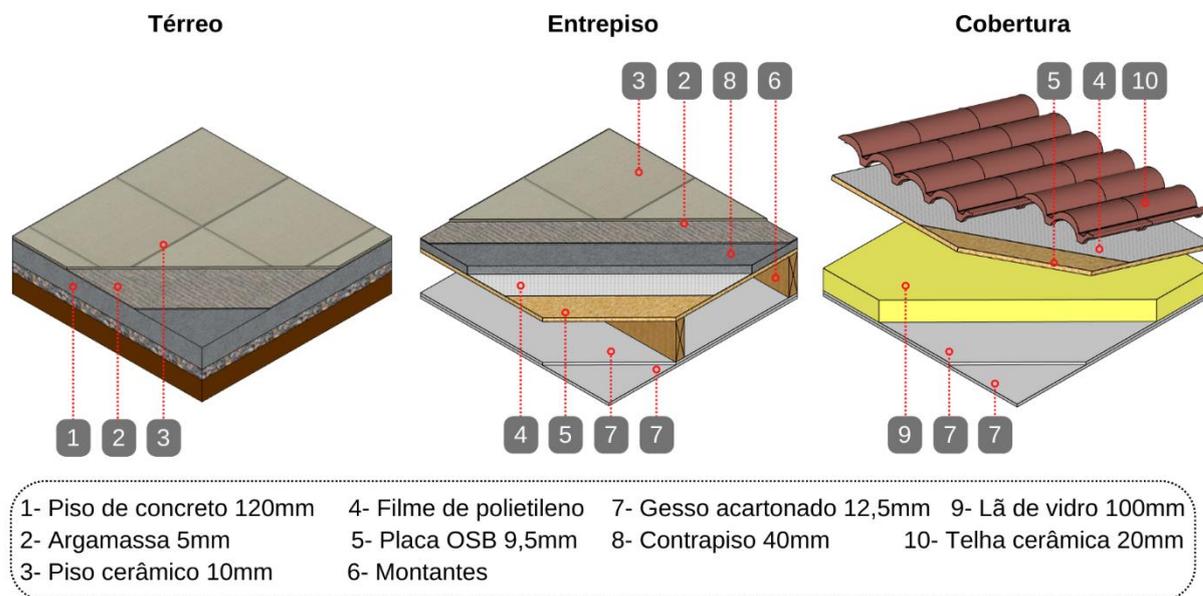
Figura 12 – Detalhamento construtivo de paredes externas, internas e de gemação em *wood frame*



Fonte: elaborado pela autora (2023), baseado nos dados de (SINAT, 2020b). Destaca-se que, neste caso, as placas de gesso acartonado são duplas, mas também é comum a utilização de camadas simples desse material no Brasil.

Esse sistema de paredes sem isolamento térmico, com chapas de OSB em cada lado dos montantes e duas camadas de gesso acartonado foi pensado para o Brasil para aumentar a inércia térmica das paredes e a resistência ao fogo. A realidade, entretanto, de outras construções em WF no Brasil é a utilização de camadas simples de gesso acartonado e, a depender do clima, isolantes térmicos entre montantes.

Conforme a Figura 13, o entrepiso é formado por barrotes de madeira serrada, neste caso de seção 45mm x 190mm, chapas de OSB por cima e dupla camada de chapa de gesso por baixo, atuando como forro. Além disso, acima do OSB é colocado um filme de polietileno para impermeabilização, um contrapiso de 40mm e placas cerâmicas. Outros tipos de piso também são possíveis no sistema WF. O térreo é feito a partir da fundação com materiais convencionais e a cobertura recebe um isolante térmico de lã de vidro de 100mm e telhas cerâmicas (Figura 13).

Figura 13 – Detalhamento construtivo de pisos e cobertura em *wood frame* baseado

Fonte: elaborado pela autora (2023), baseado nos dados de (SINAT, 2020b).

O desempenho térmico de edificações em *wood frame* no Brasil, será apresentado por meio de uma revisão da literatura na seção 2.2.

2.1.2 CLT – *cross laminated timber*

O *cross laminated timber* (CLT) é um tipo de madeira engenheirada que faz parte do grupo de sistemas construtivos denominados *mass timber*, ou madeira massiva, como traduzido por alguns autores brasileiros (SHIGUE, 2018). Diferentemente do *wood frame*, o CLT é um sistema robusto de painéis sólidos de madeira. É composto por pelo menos três camadas de lamelas de madeira coladas umas às outras perpendicularmente, ou seja, uma camada no sentido vertical (eixo y), a seguinte na horizontal (eixo x), assim por diante (Figura 14). Os painéis são feitos com camadas ímpares para que a orientação das tábuas seja a mesma nas camadas externa e interna. Com esse sistema é possível fabricar elementos que são maiores do que os tamanhos originais dos troncos das árvores. A disposição cruzada das fibras de madeira minimiza o comportamento indesejado da madeira maciça como distorções, trincas e variações de tamanho devido à umidade (JESKA; PASCHA, 2015). Além disso, o CLT se comporta de modo diferente ao WF em situações de incêndio,

apresentando maior resistência ao fogo, devido ao processo lento de carbonização das placas (GREEN, 2012; OLIVEIRA, 2018).

Figura 14 – Esquema mostrando as camadas perpendiculares do CLT



Fonte: Crosslam ([s.d.]).

O CLT surgiu a partir do conceito da madeira lamelada colada (MLC) que, por sua vez, foi desenvolvido no final do século XIX. Colar lamelas de madeira umas às outras permitia, inicialmente, a produção de peças maiores e mais resistentes. Percebeu-se também a possibilidade de trabalhar com elementos curvos. A MLC é empregada hoje, principalmente, na fabricação de vigas e pilares. Como desdobramento, na tecnologia CLT, são produzidos grandes painéis (CHACON, 2020).

A distribuição cruzada das tábuas melhora as propriedades estruturais dos painéis, permitindo o suporte de grandes cargas, possibilitando assim a verticalização da estrutura em vários pavimentos (CROSSLAM, 2022). O CLT pode ser usado tanto de forma autoportante, como para vedações. Neste caso, pode ser combinado com vários tipos de estruturas, incluindo MLC e LVL. O prédio mais alto já construído em madeira é o *Ascent* na cidade de Milwaukee, nos Estados Unidos. É um edifício de uso misto com 87 metros de altura e 25 pavimentos, construído com uma estrutura de MLC, paredes e pisos de CLT e dois núcleos centrais de concreto para estabilidade lateral. O prédio mais alto construído completamente em CLT é o HOAS, em Tuusula, na Finlândia, com 42 metros de altura e 13 pavimentos (ILGIN; KARJALAINEN, 2022).

A invenção do CLT se deu na década de 1990 na Europa, particularmente na Alemanha e na Áustria (TULONEN; KARJALAINEN; ILGIN, 2021). No Brasil, existem

duas fábricas de CLT. A pioneira Crosslam, presente no Brasil desde 2014, fabrica soluções em CLT e MLC e possui portfólio com residências unifamiliares, escolas, galpões, entre outros (CROSSLAM, [s.d.]). Além desta, existe a Urbem, do grupo Amata, uma fábrica de CLT e MLC que iniciou suas operações no começo de 2023 e possui capacidade produtiva de 80 mil m³/ano (ICIMOTO et al., 2021; URBEM, 2023). Recentemente, houve uma atualização da norma de projeto de estruturas de madeira, sendo que a parte 7 é destinada a métodos de ensaio para caracterização de madeira lamelada colada cruzada estrutural (ABNT, 2022).

O processo de produção dos painéis de CLT em fábrica é feito a partir das seguintes etapas: seleção da madeira, normalmente de Pinus Taeda tratada, de origem e produção sustentáveis; avaliação e remoção de defeitos; emenda das lâminas com junções tipo *finger-joints* (as lâminas têm espessuras que variam de 12-45mm e larguras que variam de 40-300mm, sendo 150mm o padrão); montagem dos painéis e posicionamento das camadas de forma perpendicular à anterior; colagem das camadas com adesivo a base de poliuretano; prensagem dos painéis com uma prensa a vácuo; corte dos painéis, que podem ser usinados em uma router CNC com precisão milimétrica e instalação de outros materiais e sistemas (CROSSLAM, [s.d.]). A Figura 15 mostra o painel de CLT sendo produzido em fábrica, sua instalação em canteiro de obra e o interior de uma edificação finalizada. Assim como o WF, o CLT também pode ser empregado na pré-fabricação volumétrica em módulos tridimensionais.

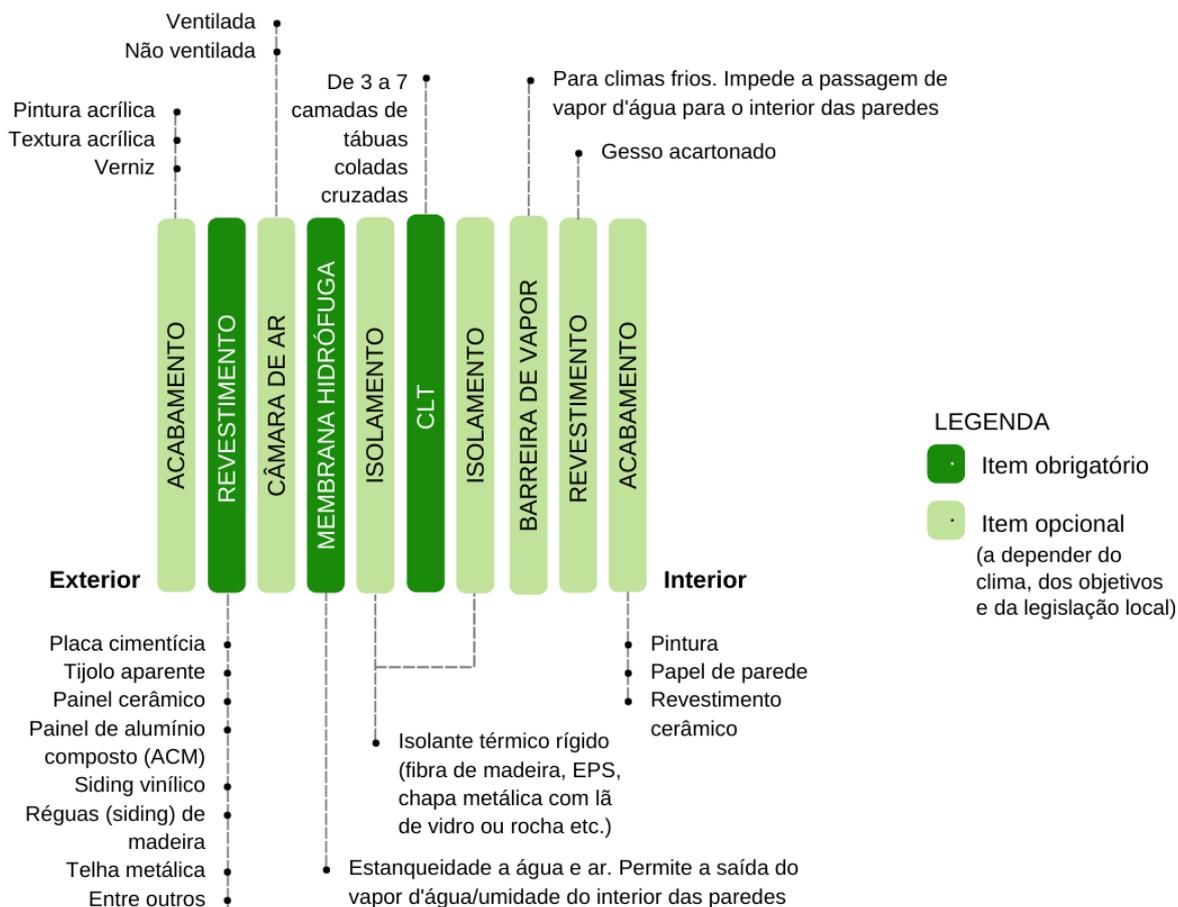
De modo semelhante ao WF, pode-se entender o sistema construtivo em CLT em camadas. A Figura 16 é um esquema que mostra as principais camadas de uma parede em CLT, bem como as camadas adicionais. Minimamente, é necessário o painel de CLT, composto por três, cinco ou mais camadas de lâminas de madeira, a membrana hidrófuga e um revestimento externo. Nos casos em que é necessário isolamento térmico, este pode ser feito com placas isolantes rígidas, posicionadas tanto na face externa quanto interna dos painéis de CLT.

Figura 15 – CLT no ambiente de fábrica, no canteiro de obras e na edificação finalizada, respectivamente



Fonte: Crosslam ([s.d.]).

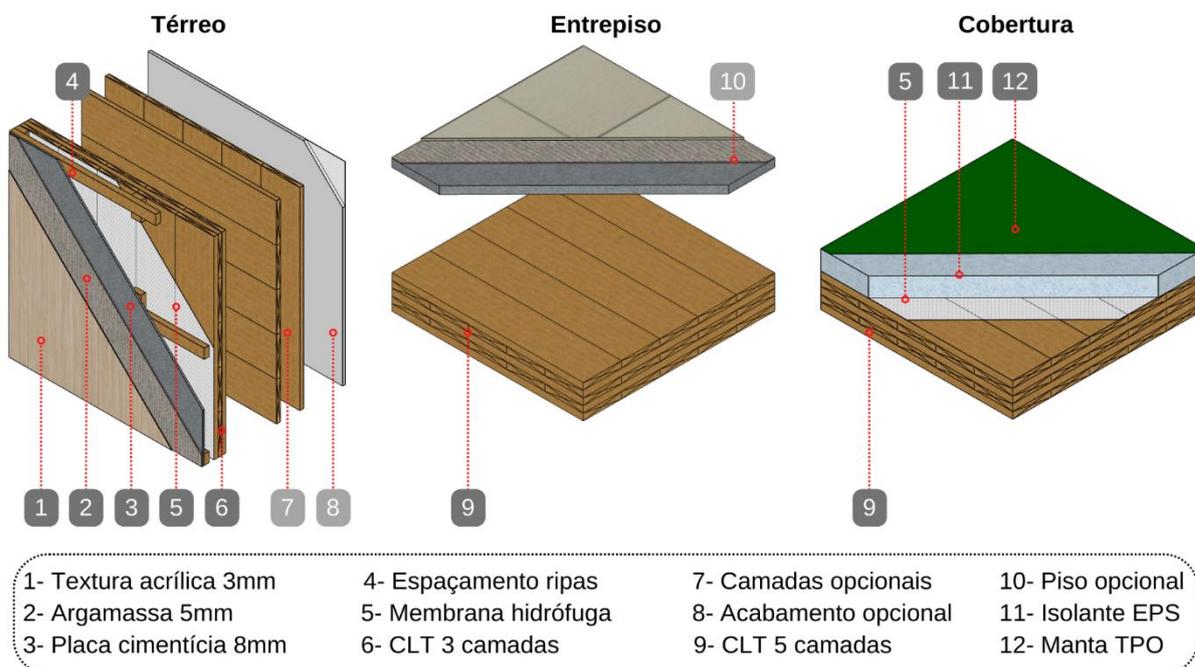
As paredes internas podem ser feitas apenas com o próprio painel, já que o CLT pode ser explorado como acabamento interno final, por meio de um processo de micro aparelhamento e lixamento da camada aparente. Dangel (2016), afirma que o uso da madeira aparente está relacionado a melhorias na saúde física e mental dos ocupantes, reduzindo o estresse. Entretanto, é importante utilizar a madeira de forma correta para que esta não seja fonte de compostos orgânicos voláteis (COV), a depender do tipo da madeira e dos produtos utilizados na laminação, na proteção contra fungos e xilófagos, e no acabamento (DANGEL, 2016). Além da madeira aparente, também é possível adicionar diversos revestimentos e acabamentos, assim como no *wood frame* (CROSSLAM, 2022).

Figura 16 – Camadas de uma parede no sistema CLT – *cross laminated timber*

A cor verde escura destaca as camadas que são imprescindíveis para o sistema e a cor clara, as demais camadas, a depender da necessidade do projeto. Fonte: elaborado pela autora (2023).

O detalhamento do sistema construtivo do CLT pode ser visto na Figura 17, desenvolvido a partir dos detalhes disponíveis no site de uma empresa brasileira (DETALHES CLT | CROSSLAM, [s.d.]). Os materiais de acabamento externo das paredes podem variar. As placas cimentícias com argamassa e pintura são muito usadas, assim como réguas de pinus tratado; em alguns casos, utiliza-se chapa metálica ondulada ou trapezoidal. Na Figura 17, optou-se por representar o sistema com placa cimentícia por ser mais próximo do WF. Da mesma maneira, o entrepiso pode ser feito com outros tipos de pisos adicionados, incluindo pisos de madeira. A cobertura é isolada com EPS e impermeabilizada com manta TPO. A fundação e o piso térreo seguem a configuração de sistemas convencionais.

Figura 17 – Detalhamento construtivo do sistema em CLT



Fonte: Elaborado pela autora (2023), baseado em (DETALHES CLT | CROSSLAM, [s.d.]).

O desempenho térmico de edificações em *cross laminated timber* no Brasil, será apresentado por meio de uma revisão da literatura na próxima seção.

2.2 WF e CLT em relação as normas de desempenho térmico

Não há normas de desempenho térmico específicas para os sistemas em madeira industrializada. A Diretriz SINAT nº 005 que dispõe sobre sistemas em *wood frame* (SINAT, 2020a) sugeriu a utilização dos parâmetros regulamentados pela NBR 15575 (ABNT, 2013), especificando que no caso do sistema WF é necessário que a avaliação seja feita por simulação. A NBR 15575, entretanto, foi atualizada recentemente incluindo emendas nas partes 1, 4 e 5, que dispõem diretamente sobre os requisitos de desempenho térmico. O RTQ-R do PBE Edifica, muito usado nas pesquisas pelo seu procedimento de simulação, também está em fase de substituição pela INI-R que, por sua vez, indica a utilização dos parâmetros da NBR 15575 atualizada (ABNT, 2021a). A norma brasileira de desempenho de edificações residenciais trabalha com zonas bioclimáticas brasileiras que são definidas na NBR 15220-3 (ABNT, 2005). Essa norma também se encontra em processo de revisão, mas até o momento desta

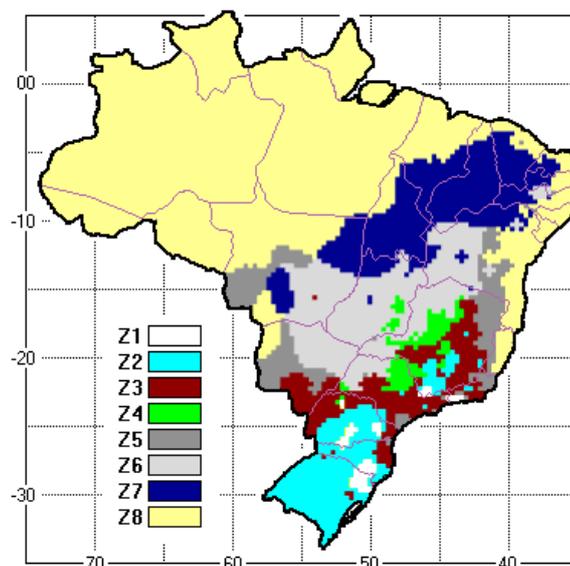
pesquisa, ainda não foi disponibilizada para consulta pública. Por isso, o zoneamento bioclimático utilizado seguiu o padrão de oito zonas, conforme a versão de 2005.

O Brasil foi dividido em oito zonas bioclimáticas (ZB 1 a ZB 8) (

Figura 18), definidas a partir da plotagem das médias mensais das temperaturas máximas e mínimas e médias mensais das umidades relativas do ar na carta bioclimática adaptada de Givoni. Essa é uma carta psicrométrica que define as estratégias bioclimáticas adequadas para cada clima, a depender da zona do gráfico em que as variáveis climáticas são plotadas. As zonas da carta correspondem às seguintes estratégias: A – zona de aquecimento artificial (calefação); B – zona de aquecimento solar da edificação; C – zona de massa térmica para aquecimento; D – zona de Conforto Térmico (baixa umidade); E – zona de Conforto Térmico; F – Zona de desumidificação (renovação do ar); G + H – Zona de resfriamento evaporativo; H + I – Zona de massa térmica de refrigeração; I + J – Zona de ventilação; K – Zona de refrigeração artificial; L – Zona de umidificação do ar (ABNT, 2005).

A zona bioclimática ZB 1 representa os climas mais frios do país, que necessitam de aquecimento artificial nas estações frias e se beneficiam do aquecimento solar passivo da edificação e de massa térmica para aquecimento. A ZB 2 é similar à ZB 1, mas se distingue por possuir verões mais quentes, portanto com necessidade de ventilação. A ZB 3 representa climas subtropicais úmidos que são favorecidos por aquecimento solar passivo e massa térmica para aquecimento nas estações mais frias e, ao mesmo tempo, da ventilação cruzada nas estações mais quentes. A ZB 4 é composta por climas que necessitam das mesmas estratégias da ZB 3, porém, por serem mais secos, precisam também de mais umidade, em estratégias como o resfriamento evaporativo, além de se beneficiarem da massa térmica para o resfriamento, devido à maior amplitude térmica diária. Nas ZB 5 e 6, os climas não necessitam mais de aquecimento solar da edificação, apenas de massa térmica para aquecimento e ventilação. A diferença entre os dois é que ZB 5 são climas úmidos e ZB 6, secos. A ZB 7 representa climas quentes e secos e a ZB 8, climas quentes e úmidos, ambos necessitando de ventilação (Figura 18).

Figura 18 – Zoneamento bioclimático brasileiro de acordo com a NBR 15220-3:2005



Fonte: LabEEE (2022a).

A NBR 15575 apresenta na parte 1 os requisitos gerais para o desempenho de edificações habitacionais e, na seção 11, os requisitos específicos para o desempenho térmico. A norma definiu três níveis de desempenho, a saber, mínimo (M), intermediário (I) e superior (S). O nível mínimo é de caráter obrigatório, podendo ser medido pelo procedimento simplificado. Já os níveis intermediário e superior são facultativos e podem ser avaliados apenas por meio de simulação (ABNT, 2021a).

No método simplificado, é necessário atingir valores mínimos de referência das propriedades térmicas e geometria da envoltória, de acordo com a zona bioclimática do local. Esses valores são definidos nas partes 4 e 5 da norma para sistemas de vedações verticais externas (SVVE) e de coberturas, respectivamente (ABNT, 2021b; ABNT, 2021c). Quando algum desses critérios não é atingido, deve-se avaliar o desempenho por meio do procedimento de simulação. As propriedades térmicas analisadas no procedimento simplificado são: transmitância térmica das paredes externas (U_{par}), capacidade térmica das paredes externas (CT_{par}) e transmitância térmica da cobertura (U_{cob}), resumidos na Tabela 1. Além desses, há parâmetros relativos à geometria: percentual de abertura para ventilação ($P_{v,APP}$), percentual de elementos transparentes ($P_{t,APP}$), área de superfície dos elementos transparentes ($A_{t,APP}$).

Tabela 1 – Valores de referência para as propriedades térmicas da envoltória por zona bioclimática

	ZB 1	ZB 2	ZB 3	ZB 4	ZB 5	ZB 6	ZB 7	ZB 8
Transmitância térmica da parede (U_{par})	$U_{par} \leq 2,7 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$	para $\alpha_{par}^* \leq 0,6$, $U_{par} \leq 3,7 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$						
		para $\alpha_{par} > 0,6$, $U_{par} \leq 2,5 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$						
Capacidade térmica da parede (CT_{par})	$CT_{par} \geq 130 \text{ kJ}/(\text{m}^2.\text{K})$							Sem requisito
Transmitância térmica da cobertura (U_{cob})	$U_{cob} \leq 2,30 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$	para $\alpha_{cob} \leq 0,6$, $U_{cob} \leq 2,3 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ **						
		para $\alpha_{cob} > 0,6$, $U_{cob} \leq 1,5 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ **						

* α é a absorvância à radiação solar da superfície externa da parede (α_{par}) ou da cobertura (α_{cob}).

** Para coberturas ventiladas na ZB 8, U_{cob} pode ser maior. O fator de correção e cálculo estão na NBR 15575.

Fonte: elaborado pela autora (2023), baseado na NBR 15575 (ABNT, 2021b; ABNT, 2021c).

Uma frase que se repete em alguns trabalhos brasileiros é que a madeira ou *wood frame* (a depender do trabalho) apresenta “excelente desempenho térmico (absorve 40 vezes menos calor que a alvenaria de tijolos)” (BALEN; PANSERA; ZANARDO, 2016; FERREIRA, 2018; GARCIA et al., 2014; LACERDA; GOMES, 2014; MOLINA; JUNIOR, 2010; SOTSEK RAMOS, 2019). Os trabalhos que incluíram a referência dessa afirmativa citaram o artigo de Molina e Junior (2010) que, por sua vez, não referenciaram outro trabalho nem fizeram esse cálculo no artigo. De fato, a madeira é um material naturalmente isolante. Comparado ao concreto e aço, sua condutividade térmica é muito menor, além de possuir bolsões de ar em sua estrutura celular, formando uma barreira natural contra as trocas térmicas. Entretanto, possuir baixa condutividade térmica é uma característica do material, não uma constatação de desempenho superior.

Nesse sentido, é importante ressaltar dois aspectos: primeiro, sistemas construtivos em madeira não são feitos apenas de madeira; existe uma composição de materiais em camadas que pode variar consideravelmente, alterando as propriedades térmicas do conjunto; segundo, não é possível afirmar que um material ou composição possui excelente desempenho térmico apenas por suas características térmicas, pois esse desempenho depende diretamente das condições bioclimáticas do local, ou seja, um mesmo material pode ser ideal para uma região e não corresponder às demandas térmicas de outro. Portanto, trabalhar as características dos materiais em relação às características climáticas é a chave para um projeto de alto desempenho térmico.

Como o WF e o CLT são tecnologias novas no Brasil, vindas de outros países, é necessária uma adequação às demandas climáticas do contexto brasileiro. A empresa Tecverde fez um estudo, seguindo as orientações da NBR 15575 (ABNT, 2013), e constatou que o sistema WF adotado atende os requisitos da norma apenas para algumas das zonas bioclimáticas em relação à condição padrão, mas chega a atender os requisitos para todas as zonas bioclimáticas se forem consideradas as melhores configurações de sombreamento, ventilação e uso de cores claras nas fachadas (SINAT, 2020b). Para a edificação multifamiliar de quatro pavimentos, as zonas mais críticas foram as ZB 2, 3, 4 e 5.

2.2.1 Desempenho térmico de ambientes construídos em WF e CLT para climas brasileiros: revisão da literatura

Para entender o atual cenário brasileiro, foi feita uma revisão da literatura, por meio de pesquisa nas bases de dados brasileiras a saber, o BDTD (Banco Digital de Teses e Dissertações), os anais de congresso do ENCAC (Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído) dos anos de 2019 e 2023 e do ENTAC (Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído) dos anos 2000 a 2022, a revista Ambiente Construído, a Capes teses e bases internacionais como Scopus, *Web of Science* e Google Acadêmico. Os termos de busca nas bases brasileiras foram ALL (“desempenho térmico” OR “conforto térmico”) AND (“*wood frame*” OR “*wood framing*” OR “CLT” OR “*cross laminated timber*”). Já nas bases internacionais utilizou-se a string de busca ALL (“*thermal performance*” OR “*thermal comfort*”) AND (“*wood frame*” OR “*wood framing*” OR “CLT” OR “*cross laminated timber*”) AND (“*Brazil*” OR “*Brazilian*”).

Foram selecionados trabalhos que analisaram o desempenho térmico de ambientes no sistema construtivo em WF e/ou CLT em climas brasileiros. Critérios de exclusão foram: trabalhos puramente bibliográficos; trabalhos qualitativos de avaliação multicritério; sistemas de madeira de chapas únicas ou materiais alternativos como bambu; trabalhos que analisaram o material isolado e não um ambiente/edifício; trabalhos antigos que se utilizaram de normas e procedimentos que não estão mais vigentes; trabalhos que analisaram o conforto de aves (galpão avícola) e não de humanos; trabalhos parecidos de um mesmo autor, sendo considerado o trabalho de

maior relevância (exemplo: artigos com mesmo conteúdo de dissertações ou teses); trabalhos de conclusão de curso.

Foram encontradas 16 publicações relevantes para WF e 8 publicações relevantes para CLT. O conteúdo dos trabalhos, incluindo o tipo de análise, os sistemas construtivos, a tipologia, o local/clima e os principais resultados, estão resumidos no Quadro 2 e no Quadro 3, para WF e CLT, respectivamente. Um estudo analisou tanto WF e CLT e os resultados para tal foram apresentados apenas no Quadro 3.

Quadro 2 – Revisão: desempenho térmico de ambientes construídos em WF para climas brasileiros

Nº	Referência	Tipo de análise	Sistemas Construtivos	Tipologia	Local / Clima	Principais resultados
1	AMORIN; VIEIRA, 2016	. Prescritivo RTQ-R . GHR, CA, nível de eficiência energética	. Bloco cerâmico . WF	. Residência unifamiliar geminada (sobrado)	Ribeirão das Neves, MG / . ZB 2, Aw	. WF não atende a capacidade térmica, apenas transmitância. . WF melhor desempenho para verão e inverno no térreo. . Necessidade de simulação. . Sugestões: sombreamento das aberturas, cobertura isolada e capacidade térmica adequada.
2	BORTONE; NUNES; GIGLIO, 2019	. Simulação (RTQ-R / EnergyPlus) . GHR, CA, Nível de eficiência energética	. Bloco cerâmico . WF com EIFS	. Multifamiliar: . Térreo . Intermed. . Cobertura 4 orientações	São Paulo, SP; Belém, PA / . ZB 3, 8 . Cfa, Af	São Paulo: . Verão (GHR): alvenaria tem melhor desempenho devido à massa térmica . Inverno (CA): WF + EIFS melhor devido à baixa transmitância . Nível geral: WF + EIFS, níveis A e B no térreo e intermed. para Norte e Sul . Desempenho melhor que a alvenaria no térreo e pior nos demais casos . Belém: resultados parecidos, com ligeira vantagem para alvenaria . Sugestões: Sombreamento das aberturas e revisão NBR 15575 (cobertura nem sempre é pior)
3	BORTONE et al., 2018	. Simulação (RTQ-R / EnergyPlus) . GHR, CA, CR, Nível de eficiência energética	1- WF 2- WF + lâ vidro 3- WF + lâ vidro, alta absorvância 4- WF + EIFS 5- Bloco cerâmico	. Residência unifamiliar térrea	Curitiba, PR; São Paulo, SP; Salvador, BA / . ZB 1, 3, 8 . Cfb, Cfa, Af	Curitiba e São Paulo: . Verão (GHR): alvenaria melhor resultado. Em ordem: 5, 4, 3, 2, 1. . Inverno (CA): WF + lâ vidro melhor. Em ordem: 2, 3, 1, 4, 5. . Ar-condicionado: WF + EIFS e alvenaria . Em geral: para naturalmente ventilado, a alvenaria tem melhor desempenho, já para condicionamento artificial, as opções com isolamento . Salvador: resultados melhores para casos 3 e 4. Baixa amplitude térmica, não necessita de massa térmica. . Sugestões: sombreamento das aberturas e baixa absorvância
4	CAMARGO, 2015	. Medição <i>in loco</i> (HOBOT) . NBR 15575 e NBR 15220 . Dias típicos de verão e inverno	. WF Tecverde. Isolante nas paredes de geminação	. Conjunto residencial: sobrados e casas térreas	Pelotas, RS / . ZB 2, Cfa	. WF não atende às normas na avaliação prescritiva . Nas medições <i>in loco</i> atende a todos os critérios da NBR 15575 para verão. Para inverno somente nos níveis 5% e 10% . Sugestões: diminuir a transmitância da cobertura e o atraso térmico, aumentar a capacidade térmica
5	LEITNER, 2019	. Medição <i>in loco</i> . Simulação . NBR15575	. WF. Isolante apenas nas paredes de geminação. . Bloco cerâmico	. Multifamiliar 3 pavimentos	Curitiba*, PR / . ZB 1, Cfb * Araucária, PR	. In loco 29/09. Simulação 05/01 e 10/07 . Atende parâmetros das medições <i>in loco</i> para o dia medido. . Atende os parâmetros de verão e inverno na simulação

N°	Referência	Tipo de análise	Sistemas Construtivos	Tipologia	Local / Clima	Principais resultados
6	MURARI et al., 2018	. Medições <i>in loco</i> (HOBO) . Simplificado NBR 15575:2013	. WF + lâ de rocha	. Residência unifamiliar	São Carlos, SP / . ZB 4, Cfa	. Temperaturas internas satisfatórias para todos os períodos avaliados (outono, inverno e verão) . Não atende à capacidade térmica mínima
7	NUNES; SANCHES; GIGLIO, 2020	. Simulação (EnergyPlus / ASHRAE 55) . GHR e GHA para (TRY 1954, 2020, 2050, 2080)	. Bloco cerâmico . Concreto maciço 10 cm . WF	. Residência unifamiliar	São Paulo, SP / . ZB 3, Cfa	. Aquecimento global: diminuição de GHA e aumento de GHR. . Desempenho inferior do WF - necessária adaptação . Paredes c/ mais capacidade térmica serão importantes para conforto
8	OLIVEIRA; SILVA, 2019	. Simulação (Domus) . Simplificado NBR 15575:2013 . Temp. interna jan. mai. set.	. WF . Bloco cerâmico . Bloco de concreto	. Residência unifamiliar	Caraúbas, RN / . ZB 8, Aw	. Todos atendem aos critérios de transmitância (ZB 8 não tem mínimo para capacidade térmica) . Temp. interna do bloco de concreto sempre maior que os demais . Nível E de eficiência energética da envoltória em WF e em bloco cerâmico e nível A para o bloco de concreto.
9	SILVA et al., 2015	. Simulação (EnergyPlus) . Temp. interna do ar . RTQ-R nível de eficiência energética	Híbrido: . WF + lâ PET. . taipa de pilão . Cobertura isolante . Piso concreto e tijolo de terra . Vidros duplos	. Residência unifamiliar. Off-grid 145 m ² .	Catuçaba, SP / . ZB 3, Cfb	. Temp. interna entre 19°-25° em 95% do ano. Para a sala, 69% (mais vidro) . Nível geral eficiência energética A . Importância de combinar sombreamento das aberturas, ventilação natural (incluindo noturna) e inércia térmica para este clima
10	SOTSEK et al., 2021	. Medições <i>in loco</i> (NBR 15575) . Método MADTEC - LWF	. WF + lâ de rocha	. Multifamiliar 4 pavimentos	Curitiba, PR / . ZB 1, Cfb	. Temperaturas dentro do exigido (interna menor que a externa no verão e $\geq 3^\circ$ no inverno) . Obs.: a medição de temperaturas foi feita na primavera (setembro), o que não condiz com o critério
11	VALDENEBRO; DIETRICH; INO, 2019	. Simulação (EnergyPlus). NBR 15575:2013 . ISO 13786 . ASHRAE 55	. Bloco de concreto . WF . WF + 03 tipos de isolantes (madeira mineralizada, celulose e EPS)	. Multifamiliar: . Térreo . Intermed. . Cobertura	São Carlos, SP / ZB 4, Cfa	. Todos WF atendem à transmitância e não atendem à capacidade térmica. Dentre as alternativas em WF, o isolamento de madeira mineralizada obteve melhor desempenho. Mais conforto com modelo híbrido com lajes de concreto (melhor que o padrão de bloco de concreto). Importância da massa térmica e o potencial dos modelos híbridos
12	VIEIRA et al., 2023	. Simulação (EnergyPlus) . NBR 15575-1:2021 . ASHRAE 55	. Wood frame com e sem PCM (23 °C), com e sem isolante (EPS) . Alvenaria	Unifamiliar	Curitiba, PR / ZB 1, Cfb	. A adição de PCM e isolante aumentaram as condições de conforto térmico. . WF sem PCM e sem isolante apresentou os piores níveis de conforto.
13	ZANOTO; ROTTER; CAMPOS, 2021	. Prescritivo e Simulação (NBR 15575:2013)	. WF + 02 tipos de isolantes . Bloco cerâmico . Bloco concreto	. Não mencionada	Oito zonas bioclimáticas. Cidades não mencionadas	. WF atende com cor clara, média e escura as ZB 6, 7 e 8 . WF atende apenas com cor clara e média as zonas 1 e 2 e "verão condição padrão" da ZB 3 . WF apenas com cor clara a "verão com ventilação" da ZB 3 . WF não atende as ZB 4 e 5 . Bloco cerâmico atende a todas
14	ZARA; SANTOS; GIGLIO, 2018	. Prescritivo e Simulação (RTQ-R/ Energy Plus) . GHR, CA, CR	. WF . WF + isolante . Bloco cerâmico	. Residência unifamiliar	São Paulo, SP / ZB 3, Cfa	. GHR: Importância da baixa absortância. Obs.: mesmo com abs. alta, a alvenaria teve desempenho superior . CR: resultados contrários ao GHR. A parede 1 de WF obteve melhor resultado e a alvenaria, pior. . Conclusões: WF com isolante, resultados próximos da alvenaria

15	ZARA, 2019	. Simulação (RTQ-R / EnergyPlus e JEPlus)	. WF . WF + isolante	. Residência unifamiliar	Curitiba, PR; São Paulo, SP; Belém, PA / . ZB 1, 3, 8 . Cfb, Cfa, Af	. Variáveis: GHR, CA, CR, equivalentes numéricos . Para sistemas leves, os parâmetros mais relevantes são absorvância, transmitância e contato com o solo.
LEGENDA: CA: consumo para aquecimento CLT: <i>cross laminated timber</i> CR: consumo para refrigeração EIFS: sistema de isolamento térmico exterior com EPS EPS: poliestireno expandido GHA: graus-hora de aquecimento GHR: graus-hora de resfriamento NBR: norma brasileira TRY: ano climático de referência WF: <i>wood frame</i> ZB: zona bioclimática RTQ-R: Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais						

Fonte: elaborado pela autora (2023).

Quadro 3 – Revisão: desempenho térmico de ambientes construídos em CLT para climas brasileiros

Nº	Referência	Tipo de análise	Sistemas Construtivos	Tipologia	Local / Clima	Principais resultados
1	FRANÇA; BOGO, 2019	. Medições in loco. . Simulação (NBR 15575:2013 / EnergyPlus)	. 10 paredes . 4 coberturas . CLT . CLT + isolante . WF . WF isolante . Bloco cerâmico . Bloco concreto	Residência unifamiliar térrea	Blumenau, SC / ZB 3, Cfa	. Verão, menor CR: B. cerâmico 14cm . Inverno, menor CA: CLT e WF . Verão: "o excesso de isolamento térmico prejudica a renovação do ar (sic) na edificação tornando-o quente" . Inverno: CLT isolado elimina a necessidade de aquecedores
2	KNOP; DISCONZI, 2023	. Simulação (EnergyPlus) . NBR 15575-1:2021	. CLT 3 cam.	Unifamiliar	Curitiba, PR; Brasília, DF; Teresina, PI; Recife, PE / . ZB 1, 4, 7, 8 . Cfb, Aw, Aw, Aw	. CLT apresentou nível superior de desempenho nas ZBs 1 e 4 e nível mínimo nas ZBs 7 e 8 . Necessidade de mais estudos para climas mais quentes
3	MAIDEL; TAVARES, 2020	. Simulação (Revit/ Green Building Studio)	. CLT + isolante . Bloco cerâmico . Bloco concreto	Edifício multifamiliar de 7 pavimentos	Curitiba, PR / ZB 1, Cfb	. Consumo de energia elétrica do CLT: 6% menos que bloco concreto e de 4% que bloco cerâmico. . Consumo de combustível para aquecimento: Maior no CLT, possivelmente devido às espessuras menores nos pavimentos mais altos para redução de carga.
4	MARTINS; SACHT, 2022	. Simulação (EnergyPlus) . NBR 15575-1:2021	. CLT 3 e 5 cam. com e sem isolante (EIFS) . Bloco de concreto	Multifamiliar térrea geminada	Foz do Iguaçu, PR / ZB 3, Cfa	. CLT apresentou desempenho mínimo. Entretanto, quando se substituiu o tipo de vidro, todos os cenários de CLT alcançaram nível superior de desempenho. . CLT desempenho superior ao da alvenaria nos períodos frios
5	NUNES et al., 2020	. Simulação (RTQ-R / EnergyPlus)	. 72 configurações: 6 paredes CLT, variações de absorvância, contato com solo e telhado. . Bloco cerâmico (0,4 absorv. parede e 0,75 cobertura)	. Residência térrea . Multifamiliar: . Térreo . Intermed. . Cobertura	Curitiba, PR; São Paulo, SP; Belém, PA / . ZB 1, 3, 8 . Cfb, Cfa, Af	Recomendações: . Belém: 3 cam. sem isolante e baixa absorvância. . SP: 5 cam. sem isolante e baixa absorvância. . Curitiba: 5 cam. com isolante 10 cm, baixa absorvância no telhado e alta nas paredes. . A eficiência energética no cenário com CLT foi melhor para São Paulo do que Belém. . As melhores configurações de CLT em todos os climas tiveram resultados melhores que a alvenaria
6	NUNES, 2020	. Simulação (RTQ-R / EnergyPlus)	. 4 tipos de CLT (3 e 5 cam., absorv. 0,6 e 0,2) . Bloco cerâmico (0,4 absorv. parede e 0,75 cobertura)	. Residência térrea . Multifamiliar: . Térreo . Intermed. . Cobertura	Cuiabá, MT; Rondonópolis, MT; Sinop, MT / . ZB 7, 6, 8 . Aw, Aw, Aw	. CLT de baixa absorvância apresenta desempenho superior que o bloco cerâmico de absorvância média. CLT na cor da madeira apresenta desempenho inferior.
7	NUNES; SANCHES; GIGLIO, 2020	. Simulação (RTQ-R / EnergyPlus)	. 4 configurações de CLT (3 e 5 cam., absorv. 0,6 e 0,2) . Bloco cerâmico (0,4 absorvância da parede e 0,75 da cobertura)	. Residência térrea . Multifamiliar: . Térreo . Intermed. . Cobertura	Brasília, DF; Santa Maria, RS / . ZB 4, 2 . Aw, Cfa	. A versão com 5 cam. e baixa absorvância obteve resultados melhores em todos os climas. . CLT de 3 cam. e alta absorvância com desempenho pior que alvenaria em alguns casos, mas o de 5 cam. e alta absorvância com desempenho superior . A absorvância da alvenaria é maior que das paredes em CLT que tiveram melhor desempenho.

N°	Referência	Tipo de análise	Sistemas Construtivos	Tipologia	Local / Clima	Principais resultados
8	PULGROSSI, NEVES, 2019	. Simulação (EnergyPlus)	. CLT 15 cm + taipa de pilão . Bloco cerâmico . Variação de janelas, paredes, laje, cobertura, e pintura externa	. Residência 2 pavimentos. 237 m ²	Campinas, SP / ZB 3, Cfa	. Variáveis: GHA, GHR, Temperaturas de dia de projeto verão e inverno . Alvenaria apresentou menor amplitude térmica interna e menor GHA e GHR, comparados ao CLT . Grande impacto da cobertura. Resultados melhores para a laje de concreto, que possui maior capacidade térmica.
LEGENDA: CA: consumo para aquecimento CR: consumo para refrigeração GHA: graus-hora de aquecimento GHR: graus-hora de resfriamento CLT: <i>cross laminated timber</i> NBR: norma brasileira WF: <i>wood frame</i> ZB: zona bioclimática RTQ-R: Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais cam.: camadas						

Fonte: elaborado pela autora (2023).

Os Quadros 2 e 3 mostram os resultados da revisão bibliográfica sobre o desempenho térmico de edificações em WF e CLT. Quanto ao tipo de análise, a maioria utilizou os parâmetros do Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R) do PBE Edifica (Programa Brasileiro de Etiquetagem de Edificações), ou da NBR 15575 (ABNT, 2013, 2021a). Em menor grau empregou-se parâmetros da ASHRAE 55 (ASHRAE, 2013) e da NBR 15220-3 (ABNT, 2005). A NBR 15575 foi revisada no ano de 2021 (ABNT, 2021a), então mas apenas os trabalhos mais recentes utilizaram essa versão. De igual modo, o RTQ-R, também foi alterado, passando a ser o INI-R (Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais) (INMETRO, 2021). 19 trabalhos usaram o método de simulação, 5 utilizaram medições *in loco* e 7 utilizam métodos prescritivos ou simplificados.

Em relação aos sistemas construtivos, existem várias combinações de camadas, tanto para o WF como para o CLT. O quadro não discriminou todas essas variações, apenas indicou quando há material isolante na composição, uma vez que há uma diferença maior nos resultados dentro das opções do próprio sistema, quando este possui isolante térmico ou apenas a câmara de ar. Também se observou a comparação desses sistemas com sistemas construtivos convencionais brasileiros, como a alvenaria de bloco cerâmico e bloco de concreto.

Dos 23 artigos, 22 analisaram tipologias residenciais, sendo 15 de unifamiliar térrea, 03 de unifamiliar com dois pavimentos, 06 estudos de multifamiliar com três pavimentos, 01 multifamiliar de quatro e 01 de sete pavimentos. Um trabalho não

mencionou a tipologia. A predominância da tipologia residencial nos estudos está em consonância com o mercado de construções em madeira industrializada no Brasil.

A maioria dos trabalhos (15 de 23) estudou os resultados para apenas um clima/cidade, com prevalência para cidades no sul do Brasil, principalmente quando há medição *in loco*. Os artigos que buscaram analisar os diferentes climas do Brasil, em geral, focaram em três grandes grupos: subtropical frio, como Curitiba (PR); subtropical quente, como São Paulo (SP); tropical quente e úmido como Manaus (AM), ou Belém (PA). Apenas um artigo apresentou simulações para oito cidades representativas das zonas bioclimáticas brasileiras, sem mencionar as cidades. É nítida a diferença nos resultados para climas distintos, ou seja, a seleção de materiais e estratégias de desempenho térmico varia conforme o clima.

Os principais resultados foram listados na última coluna dos quadros. É preciso ressaltar que esses variaram de estudo para estudo, mesmo em relação a uma mesma zona bioclimática. Isso se deu em razão das diferenças no objeto de estudo e das possibilidades de configuração dos materiais. Entretanto, é possível observar alguns padrões ou recorrências.

No Quadro 2, para estudos sobre *wood frame*, muitos trabalhos apontaram para o fato de que o sistema não atingiu o mínimo exigido em relação à capacidade térmica, a qual deve ser maior ou igual a $130 \text{ kJ/m}^2\text{K}$, segundo o método simplificado da NBR 15575, seja na versão da norma utilizada nos estudos (ABNT, 2013) ou na versão atual (ABNT, 2021b). Já quando as edificações foram simuladas, o sistema construtivo atendeu às demandas das normas em alguns trabalhos.

Comparando o WF com a alvenaria de blocos cerâmicos, notou-se uma variação dos resultados a depender da zona bioclimática (ABNT, 2005). Para as zonas 1 a 3 a alvenaria tendeu a apresentar resultados melhores no verão para ambientes naturalmente ventilados, devido à massa térmica. Já no inverno, o WF isolado teve desempenho melhor e, quanto mais frio o clima, maior a necessidade de isolamento térmico. Os poucos trabalhos que estudaram a adição de ar-condicionado perceberam resultados melhores do WF com isolante em relação à alvenaria. Um trabalho estudou

a adição de PCM e de isolante térmico no WF para a cidade de Curitiba (ZB 1) e concluiu que a utilização desses aumentou as condições de conforto térmico, enquanto o WF sem PCM e sem isolante apresentou os piores níveis de conforto (VIEIRA; OLIVEIRA, 2021).

Um ponto interessante observado foi a melhora dos resultados em relação à alvenaria quando o WF foi simulado no pavimento térreo. Neste caso, pareceu haver uma quantidade ideal de massa térmica na compensação entre as paredes leves e o piso de concreto em contato com o solo. Zara (2019) apontou para o contato com o solo como um parâmetro relevante nas alterações de desempenho do WF e Valdenebro, Dietrich e Ino (2019) chegaram no melhor resultado como uma combinação de laje de concreto e paredes de WF, para a cidade de São Carlos (SP), na zona bioclimática 4.

Para a zona bioclimática 4, houve uma diferença nos resultados. Em Zanoto, Rotter e Campos (2021), o WF não atendeu aos parâmetros de desempenho da NBR 15575 (ABNT, 2013) em nenhuma das condições simuladas, tanto para a ZB 4, quanto para a ZB 5. Já em Murari et al. (2018) as medições *in loco* de uma residência unifamiliar localizada na ZB 4 apresentaram temperaturas internas satisfatórias para o dia típico de inverno. Com exceção de um trabalho que analisou todas as oito zonas, as ZB 5, 6 e 7 não foram estudadas.

Para a zona bioclimática 8, os resultados também variaram dependendo do estudo. Em Bortone, Nunes e Giglio (2019a) os resultados de WF e alvenaria foram parecidos, com leve vantagem para alvenaria. Já em Bortone et al. (2018) os casos de WF com isolante foram melhores; segundo os autores, como o clima apresenta baixa amplitude térmica, não necessita de tanta massa térmica para reduzir os picos de temperatura no interior.

Os estudos mostram a importância de se trabalhar com o clima para atingir os resultados desejados. Estratégias como inércia térmica (capacidade térmica) e ventilação adequadas, sombreamento das aberturas nos períodos quentes, cobertura isolada, e isolamento térmico no inverno/climas frios, foram as sugestões e soluções mais recorrentes encontradas nos trabalhos analisados. A utilização de sistemas

construtivos híbridos, de madeira e concreto, foi apontada como uma alternativa para atingir o desempenho desejado (VALDENEBRO; DIETRICH; INO, 2019).

As mudanças climáticas também foram um fator considerado. Nunes e Giglio (2020) analisaram o desempenho térmico de uma residência unifamiliar, comparando os resultados de bloco cerâmico, concreto maciço e *wood frame* para arquivos climáticos de quatro datas distintas: 1954, 2020, 2050 e 2080. Segundo os autores, o aquecimento global é responsável por diminuir a necessidade de aquecimento e aumentar a necessidade de resfriamento, o que faz com que o desempenho do WF seja progressivamente pior. A conclusão é que paredes com mais capacidade térmica serão importantes para o conforto nos próximos anos, no clima analisado (cidade de São Paulo, ZB 3, Cfa). Santamouris e Vasilakopoulou (2021) apresentaram estudos que corroboram para essas previsões; a energia global gasta com refrigeração é a que mais cresce, podendo aumentar de 200 a 2000% até 2050 e ultrapassar o consumo para aquecimento em 2070.

O Quadro 3 resumiu os resultados da pesquisa com CLT no Brasil. Um dos trabalhos o compou com o WF e encontrou resultados semelhantes para WF e CLT, com ligeira vantagem para o CLT (FRANÇA; BOGO, 2019). Os demais trabalhos compararam o CLT com alvenaria convencional de bloco cerâmico ou de bloco de concreto.

Diferentemente do WF, o CLT tendeu a apresentar resultados melhores que a alvenaria, dependendo da configuração e quantidade de camadas de madeira dos painéis. No trabalho de Nunes et al. (2020) as melhores configurações de CLT para ZB 8 foram paredes com painéis de 3 camadas, sem isolante. Para a ZB 3, painéis de 5 camadas sem isolante e para a ZB 1, painéis de 5 camadas com isolante. Essa é uma lógica similar aos resultados encontrados para WF, em que a necessidade de massa térmica aumenta em climas com maiores amplitudes térmicas e a necessidade de isolamento térmico é maior em climas com estações frias. A influência da absorvância das paredes externas é, também, significativa. Baixa absorvância tende a resultados mais satisfatórios, ou seja, utilizar o revestimento de régua/lambris de madeira sem pintura, pode ser prejudicial para o desempenho térmico (NUNES; SANCHES; GIGLIO, 2020).

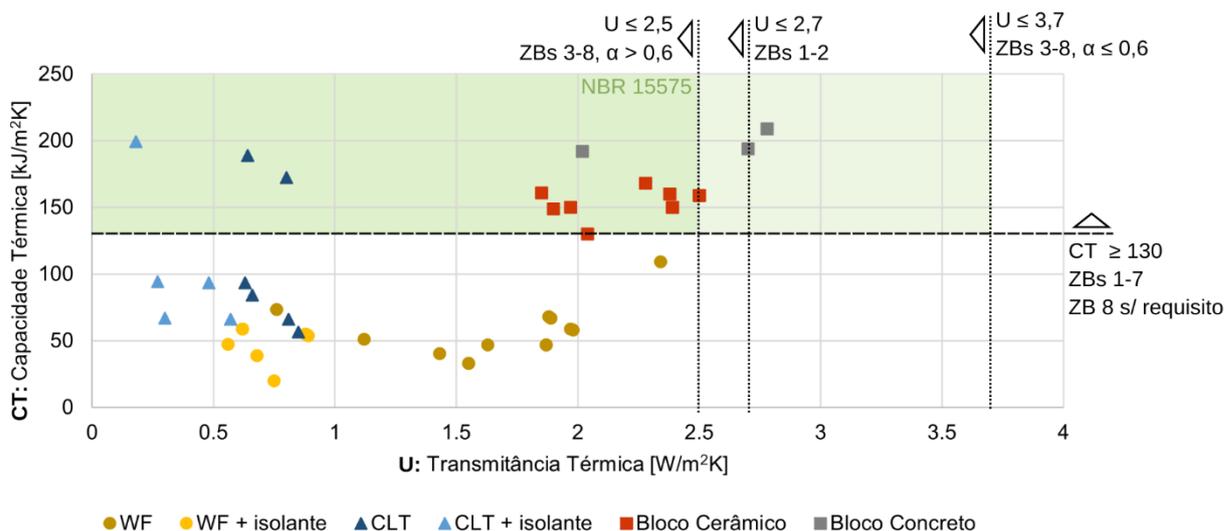
Em Knop e Disconzi (2023), o CLT apresentou nível superior de desempenho nas ZBs 1 e 4 e nível mínimo nas ZBs 7 e 8. Os autores concluíram que esse sistema construtivo desempenha melhor em climas amenos, mas precisa ser adaptado para atender melhor climas mais quentes. Em Martins e Sacht (2022), que estudaram o CLT para a ZB 3, na cidade de Foz do Iguaçu, notou-se que o CLT apresentou resultados superiores aos da alvenaria nos períodos frios. O nível de desempenho do CLT foi mínimo, entretanto, quando se substituiu o tipo de vidro, todos os cenários de CLT alcançaram nível superior.

Para entender melhor os sistemas de madeira industrializada em relação às normas de desempenho, compararam-se as propriedades térmicas das paredes encontradas nos trabalhos do Quadros 2 e 3 com as exigências do nível de desempenho mínimo da NBR 15575 (ABNT, 2021b; ABNT, 2021c). Os resultados são mostrados na Figura 19. Ressalta-se que a diferença nos valores de transmitância e capacidade térmica, principalmente nas paredes de WF, deve-se às possibilidades de composição do sistema em camadas, incluindo diferenças na espessura total das paredes e tipos de material.

Percebeu-se na Figura 19 que os sistemas em madeira possuem menor transmitância térmica, atendendo facilmente os critérios de todas as zonas bioclimáticas, independente da absorvância das superfícies externas. Além disso, o CLT apresentou valores mais baixos que o WF. A adição de isolamento térmico às paredes tanto de WF como de CLT reduziu ainda mais esse valor. A alvenaria convencional de bloco cerâmico apresentou valores próximos do limite de $2,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, mas ainda atendeu aos valores de transmitância térmica em todas as ZBs. Diferentemente do bloco de concreto que, para algumas situações e zonas, não atingiu o mínimo requerido.

Figura 19 – Relação entre transmitância térmica e capacidade térmica das paredes dos sistemas construtivos em *wood frame* e CLT com e sem isolantes térmicos e bloco cerâmico e de concreto.

Destaque para as exigências do método simplificado da NBR 15575:2021



Fonte: elaborado pela autora (2023) com os dados coletados dos trabalhos utilizados nos Quadros 2 e 3.

Em relação à capacidade térmica, entretanto, notou-se que os sistemas em madeira, em sua maioria, não atingiram o mínimo exigido pelo procedimento simplificado da NBR 15575 para a capacidade térmica nas zonas bioclimáticas 1 a 7, de 130 kJ/(m².K) (ABNT, 2021b). As paredes em CLT possuem uma capacidade térmica maior que as paredes de WF, mas ainda assim ficaram aquém do mínimo recomendado. Observou-se, entretanto, três configurações de paredes em CLT que superaram, inclusive, os valores de capacidade térmica das paredes de bloco cerâmico. Duas paredes são referentes à casa Habitech, do estudo de França e Bogo (2019), que consistiu em uma composição de 32 cm de espessura. A terceira, é uma parede com painel CLT de 15 cm de espessura e revestimento externo em madeira de pinus (PULGROSSI; NEVES, 2019). As demais paredes em CLT da amostra, tanto de painéis com 3 e 5 camadas, têm valores abaixo de 100 kJ/(m².K).

A capacidade térmica está diretamente ligada à inércia térmica da edificação. Concluiu-se que esse é um ponto crucial a ser trabalhado nos sistemas industrializados em madeira. Assim, o uso da quantidade adequada de massa térmica

e outras estratégias para o aumento da inércia térmica tem o potencial de melhorar o desempenho desses sistemas.

2.3 Estratégias para a inércia térmica em construções de madeira

Os sistemas construtivos em madeira possuem capacidade térmica relativamente baixa em comparação a sistemas convencionais de alvenaria. Por esse motivo, muitos trabalhos recentes têm proposto estratégias de projeto e detalhamentos para melhorar o desempenho térmico desses sistemas construtivos nos climas que necessitam de inércia térmica. O cenário de aquecimento global corrobora para essa necessidade, visto que, segundo Nunes e Giglio (2020), ondas de calor serão cada vez mais frequentes, aumentando a necessidade de resfriamento, enquanto a necessidade de aquecimento diminuirá; nesse cenário, a inércia térmica é importante para assegurar conforto e evitar riscos de superaquecimento das edificações

Os estudos conduzidos no Brasil apontam para a necessidade de adequar as tecnologias em madeira para a realidade climática do país. As construções industrializadas em madeira, sejam em WF ou em *mass timber* como o CLT, possuem flexibilidade para se trabalhar com diferentes camadas, incluindo o uso de materiais isolantes e/ou de alta capacidade térmica. Além disso, a madeira tem o benefício adicional de reduzir as pontes térmicas, uma vez que sua resistência térmica é maior do que a do aço e a da alvenaria. O CLT possui maior capacidade térmica que o WF, devido à maior quantidade de madeira utilizada e, portanto, mais massa térmica.

2.3.1 Inércia térmica *versus* isolamento térmico

A inércia térmica e o isolamento não se substituem, pois estão relacionados a dois processos diferentes no mecanismo de troca de calor. Na verdade, em muitos casos, uma combinação de ambos é desejável. Geralmente, materiais isolantes têm massa térmica muito baixa, sendo que materiais com massa térmica alta, geralmente, não são bons isolantes.

A inércia térmica, correntemente relacionada à maior quantidade de massa térmica, está relacionada à capacidade dos materiais em absorver calor e liberá-lo lentamente,

atuando como um amortecedor térmico. Esse processo diminui os extremos ou picos de temperatura interna e contribui para o atraso térmico, ou seja, os momentos mais quentes e mais frios do dia ocorrem em momentos distintos no interior da edificação em relação ao exterior. Isso significa que o calor acumulado durante o dia ajuda a aquecer o ambiente interno à noite e o frescor acumulado à noite contribui para temperaturas internas mais amenas pela manhã. Devido ao funcionamento desse processo, a inércia térmica é bem-vinda em climas em que há uma variação considerável na temperatura diária. Reardon et al. (2020) classifica a quantidade de massa térmica adequada para cada clima em função da média da amplitude térmica diária (ATD): baixa massa térmica para climas com ATD menor que 6 °C; massa térmica moderada para climas com ATD entre 6 °C e 10 °C; e massa térmica alta, para ADT acima de 10 °C. Esses mesmos intervalos são citados e utilizados por Brito (2015),

Pouca massa térmica, sem isolamento, significa que as temperaturas internas se aproximam mais das temperaturas externas. Ou seja, quando está quente do lado de fora, esse calor será sentido internamente e quando está frio na parte externa, a edificação também não será capaz de reter o calor interno e se esfriará rapidamente. Por outro lado, massa térmica em excesso pode ser prejudicial tanto para o desconforto por frio, ao se necessitar de grandes quantidades de energia para aquecer um ambiente, quanto por desconforto por calor, uma vez que a massa aquecida demorará a se esfriar.

Por outro lado, o isolamento térmico funciona como um bloqueador térmico, resistindo à passagem do fluxo de calor. Essa estratégia é amplamente usada em climas frios para impedir que se perca o calor gerado internamente, seja pelo metabolismo dos usuários, pelos equipamentos e sistemas internos ou por aquecedores. Outra vantagem de se isolar a edificação é quando se condiciona o ar interno de forma ativa, aliada à estanqueidade das aberturas e ao sombreamento (quando desejado). Uma envoltória completamente isolada e estanque permite manter as temperaturas internas estáveis e aumentar a eficiência energética dos sistemas ativos.

Entretanto, Roriz, Chvatal e Cavalcanti (2009) afirmam que o uso imprudente de isolantes térmicos em climas brasileiros pode trazer mais prejuízos do que benefícios, provocando maior desconforto térmico. No verão, pode ocorrer um superaquecimento, já que o calor, gerado por fontes internas ou advindo do ganho solar nas superfícies transparentes, pode ter dificuldade de sair devido à resistência térmica dos materiais isolantes. O recomendado para climas brasileiros são alternativas que combinam baixa absorvância e isolamento, inércia, sombreamento e ventilação adequados. Ademais, os climas do Brasil permitem o contato com o ambiente externo em grande parte do ano, portanto, as edificações naturalmente ventiladas são preferidas, principalmente ao se tratar de residências.

Quando a massa térmica e o isolamento térmico são usados em conjunto, é importante se atentar ao posicionamento da camada isolante. As pesquisas mostram que a camada de isolante na face interna reduz a inércia térmica da edificação, enquanto a camada de isolante localizada na face externa contribui para aumentar a inércia térmica do sistema (BRITO, 2015). Isso ocorre, pois o isolante na parte interna reduz as trocas de calor com os demais materiais das paredes, reduzindo sua capacidade térmica, logo, o calor gerado internamente, ao invés de ser absorvido pelos materiais construtivos, é mais facilmente transferido para o ar. Em contrapartida, o isolante na face externa aumenta a inércia térmica, pois há uma redução das trocas de calor com o ar externo, enquanto a massa térmica amortece as temperaturas no interior. É por isso que a NBR 15575-4 (2021b, p. 41) define para o cálculo da capacidade térmica das paredes externas:

No caso de paredes que apresentem, na sua composição, materiais isolantes térmicos de condutividade térmica menor ou igual a $0,065 \text{ W/(m.K)}$ e resistência térmica maior que $0,5 \text{ (m}^2\text{.K)/W}$, o cálculo da capacidade térmica deve ser realizado desprezando-se todos os materiais voltados para o ambiente externo, posicionados a partir do isolante ou espaço de ar.

Os materiais normalmente associados à alta massa térmica são pesados, densos e condutores de calor o suficiente para absorver e liberar calor. Na construção civil têm-se o concreto, as pedras e os tijolos e, também, a terra e a água, seja por meio de construções com terra e telhados verdes, ou das coberturas com espelhos d'água e até mesmo reservatórios de água no ambiente com essa função. Outros materiais são

os PCM (*phase change materials* ou materiais de mudança de fase) que absorvem calor ao mudar do estado sólido para o líquido e liberam calor ao mudar do líquido para o sólido. Quando um material muda de um estado para outro, ele absorve ou libera grandes quantidades de energia sem alterar sua temperatura, graças à energia latente. Utilizar a inércia térmica na construção significa aumentar potencialmente a pegada de carbono e a energia incorporada da edificação. Entretanto é importante lembrar que essa estratégia também permite diminuir significativamente os gastos com energia, reduzindo a energia operacional da edificação, além de melhorar o conforto (SLEE; HYDE, 2015).

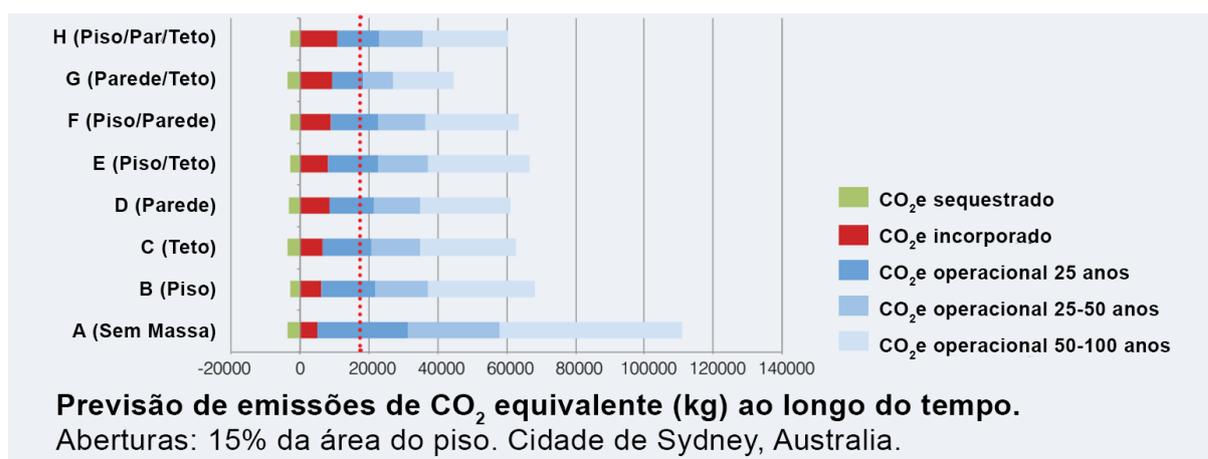
A localização da massa térmica é um fator que influencia o desempenho térmico. Como o ar quente é menos denso e tende a subir, a massa térmica para resfriamento pode ser usada no forro para absorver esse calor ao longo do dia e dissipá-lo à noite por meio da ventilação. Já a massa térmica localizada no piso é mais facilmente aquecida pelo sol que entra pelas aberturas e pode irradiar lentamente esse calor absorvido, aquecendo os ambientes (WILLEY, 2015). Nesse caso, o correto posicionamento do sistema de sombreamento é fundamental para permitir o sol nos períodos frios e para barrá-lo no verão. Outros fatores, são a ventilação e o sombreamento adequados, o que também implica no tamanho e no posicionamento das aberturas. Quando se deseja usar a massa térmica para resfriamento, é fundamental que haja ventilação cruzada e controlada para que brisas noturnas mais frescas possam entrar e retirar o calor do interior. Para isso, é necessário que o clima tenha amplitude térmica elevada, de pelo menos 6 °C ou 10 °C de diferença (SLEE; HYDE, 2015).

2.3.2 Adição de massa térmica

As edificações de madeira em WF são inerentemente leves. Compreendendo a necessidade de inércia térmica para os climas da Austrália, um estudo foi feito adicionando-se massa térmica ao piso, às paredes e/ou ao forro em oito combinações, como mostrado na Figura 20. Essa massa térmica é equivalente à massa térmica de um painel de concreto de 100 mm de espessura. A Figura 20 mostra os resultados para Sydney para aberturas com 15% da área do piso. Ao se comparar o experimento

A com os demais, notou-se a importância da massa térmica que, apesar de aumentar a energia incorporada, diminui o consumo de energia total ao longo da vida útil do edifício. Também se observou que há um limite na quantidade ideal e na localização da massa térmica (SLEE; HYDE, 2015).

Figura 20 – Previsão do consumo de energia incorporada e operacional para 25, 50 e 100 na cidade de Sydney, Austrália. Os experimentos foram feitos com uma edificação em *wood frame* com adição de massa térmica pontual



Fonte: Slee e Hyde (2015), tradução nossa.

A pesquisa foi conduzida para três climas representativos: climas mais frios (Hobart, Melbourne e Canberra), climas temperados quentes (Sydney e Perth), climas quentes e quentes e úmidos (Brisbane e Darwin). Para climas frios, observou-se que as construções leves melhoraram o desempenho no inverno, mas um pouco de massa térmica seria favorável no verão. Para o segundo tipo de clima, massa térmica no piso e nas paredes poderia ser benéfica, atentando-se para o limite útil da capacidade térmica de 160KJ/K.m^3 . Os autores sugeriram que sejam feitas simulações com pequenas variações na quantidade de massa térmica e no tamanho das aberturas. Para os climas quentes, recomendaram-se edificações leves com alguma massa adicional e bastante sombreamento (SLEE; HYDE, 2015).

Em suma, o estudo concluiu que para todos os climas australianos pesquisados, uma quantidade moderada de massa térmica poderia ajudar a reduzir as emissões totais de CO₂ ao longo da vida útil de edificações em *wood frame*, se estas durarem mais de 50 anos. Ademais, a pesquisa considerou improvável que edifícios de alta massa

térmica, portanto de alta energia incorporada, sejam mais eficientes do que edifícios mais leves, mesmo após 100 anos. Os autores, por fim, sugeriram que edifícios leves de madeira que incorporam massa térmica estrategicamente, juntamente com o controle da ventilação e do sombreamento, seriam melhores do que as construções convencionais (SLEE; HYDE, 2015).

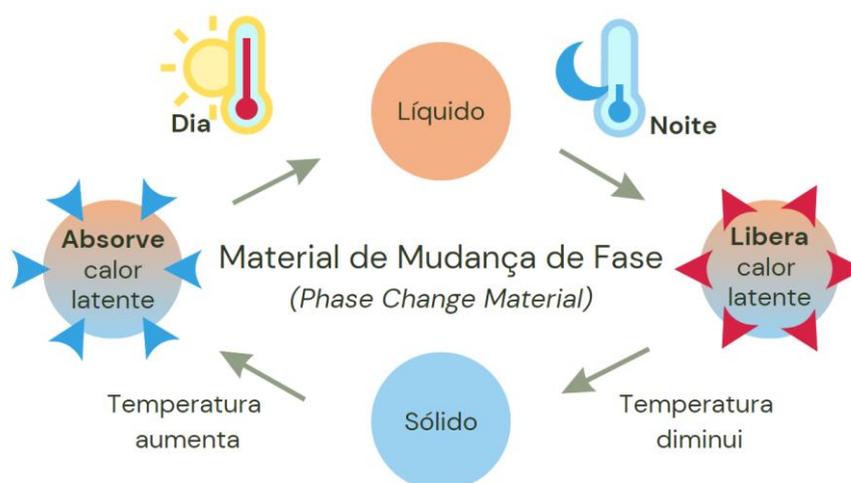
Outro estudo, também na Austrália, mostrou que edificações leves requerem um projeto cuidadoso para se adequarem ao clima. Afinal, aspectos que funcionam bem em um tipo de clima, podem ser prejudiciais em outros. Os principais resultados foram: para climas quentes observou-se um desempenho maior quanto maior fossem os beirais, devido à importância do sombreamento; em todos os climas, a mudança de vidros simples para vidros duplos teve um impacto significativo, entretanto aumentar a quantidade de isolantes térmicos trouxeram poucos benefícios, a menos que esta troca fosse feita em conjunto com o tipo de vidro e foi mais significativa em climas frios; acrescentar piso cerâmico na sala trouxe melhoras, pois ajudou a aumentar a massa térmica do sistema; a troca das paredes de WF por paredes de CLT melhorou o desempenho em todos os climas, com menor efeito para climas quentes e úmidos (DEWSBURY; NOLAN, 2015).

As edificações em CLT possuem mais massa térmica que WF e pesquisas recentes têm mostrado os benefícios de incorporar elementos de madeira massiva em estruturas leves de madeira (DEWSBURY; NOLAN, 2015). Em outro trabalho, do mesmo autor, Dewsbury (2016) advogou o uso de madeira massiva, a exemplo do CLT, como uma estratégia para aumentar a massa térmica de construções leves. Segundo ele, o uso estratégico desses sistemas são um caminho para a construção de edifícios de madeira leves, de baixo carbono e de alto desempenho térmico. Além da baixa transmitância térmica, aliada à capacidade térmica maior em relação ao WF, o CLT também apresenta propriedades de redução de infiltração, permeabilidade ao vapor e resistência a terremotos. Os resultados dos estudos de Dewsbury mostraram que, em muitas situações, a madeira massiva apresenta um desempenho térmico similar ou superior à alvenaria de bloco cerâmico e de concreto. Isso significou uma redução das cargas térmicas de refrigeração e de aquecimento e do amortecimento dos picos de consumo energético (DEWSBURY, 2016).

2.3.3 Materiais de mudança de fase – PCM

Os materiais de mudança de fase (PCM – *phase change materials*) são alternativas que aumentam a inércia térmica das edificações, sem aumentar significativamente sua massa térmica, o que é vantajoso tanto em situações em que se necessita de grande quantidade de massa térmica, quanto em sistemas leves, para não sobrecarregar a estrutura, além de ser uma alternativa para reformas. PCM é uma estratégia passiva que utiliza o calor latente produzido na mudança de fase de um material. Sua presença contribui para reduzir os picos da temperatura interna, melhorando o conforto térmico e reduzindo o consumo de energia quando usado em ambientes condicionados (REARDON et al., 2020). Quando as temperaturas sobem e atingem a temperatura de mudança de fase (temperatura de fusão para mudanças sólido-líquido), o material absorve uma grande quantidade de energia térmica do ambiente na forma de calor latente por meio de um processo endotérmico. Por outro lado, quando as temperaturas diminuem, o material libera calor em um processo exotérmico (SOUAYFANE; FARDOUN; BIWOLE, 2016) (Figura 21). Isso causa um atraso térmico, o que significa que a inércia térmica do edifício aumenta sem que haja uma grande alteração em sua massa.

Figura 21 – Funcionamento esquemático dos materiais de mudança de fase nas edificações



Fonte: elaborado pela autora (2023).

Muitos materiais podem funcionar como PCM. Considerando-se o número de aplicações possíveis, estes são classificados em três grupos: 1) PCM orgânico (parafínico e não parafínico), 2) PCM inorgânico (hidratos de sais e ligas metálicas) e 3) PCM de mistura eutética, que é uma mistura de materiais dos dois primeiros grupos (MEMON, 2014). Para ser usado como estratégia passiva em edificações, o PCM precisa ter pontos de fusão que ajudem a manter a temperatura interna dentro da zona de conforto térmico, o que depende em grande parte das características do clima local, mas variam entre 20 °C a 30 °C (SOUAYFANE; FARDOUN; BIWOLE, 2016). Outras propriedades termo-físicas, cinéticas, químicas, econômicas e ambientais também precisam ser consideradas, como: possuir alto calor latente, alto calor específico, alta condutividade térmica e alta densidade, estabilidade físico-química ao longo do tempo, ser não corrosivo, não inflamável, não tóxico, não explosivo, não poluente, de fácil reciclagem, com baixa energia incorporada, de fonte renovável, entre outros (LIU et al., 2018).

Um aspecto climático importante a ser considerado para aplicação do PCM é a amplitude térmica diária (ATD), definida pela diferença entre as temperaturas máximas e mínimas que ocorrem em um dia. Como estratégia passiva, o PCM conta com a variação da temperatura do ar ambiente para ser carregado ou descarregado (ou seja, para absorver ou liberar calor latente), assim, a temperatura dentro de um ambiente deve variar o suficiente ao longo de 24 horas para derreter e solidificar o PCM. Para que isso ocorra, é importante criar as condições de ventilação necessárias, em especial com o uso de ventilação noturna.

A maioria absoluta dos PCM usados em edifícios mudam de fase do estado sólido para líquido e vice-versa, embora também seja possível utilizar PCM que muda de fase de sólido para sólido, processo em que ocorre uma reorganização das moléculas e uma alteração na cristalização do material (FALLAHI et al., 2017). No caso de PCM sólido-líquido, como o material fica no estado líquido durante algumas partes do dia, é necessário que ele seja encapsulado. Isso pode ser feito tanto de forma microscópica, como macroscópica. Na microencapsulação, o PCM é transformado em microesferas envoltas em polímeros e incorporado aos materiais de construção como gesso, concreto ou argila. Na macroencapsulação, o PCM é colocado entre duas

membranas em uma espécie de manta com bolsos. Também pode ser contido em cápsulas, entre painéis, entre tijolos ou qualquer outro dispositivo que o contenha. O PCM pode ainda ser aplicado em forros, paredes, pisos, móveis, vidros, cortinas e outros objetos (AL-ABSI; ISA; ISMAIL, 2019).

Na indústria da construção civil, a maior parte do PCM utilizado é feito de parafina. A natureza não renovável deste material, por ser derivado do petróleo, tem levado muitos pesquisadores a investigarem alternativas mais sustentáveis. Existem opções mais sustentáveis que a parafina, como a classe de PCM de base biológica, que inclui álcoois, ésteres, glicóis e ácidos graxos. Menoufi et al., (2013) faz uma análise do ciclo de vida de três PCM: parafina, sal hidratado e éster (base biológica) e conclui que existem benefícios em se buscar alternativas como os materiais de base biológica, uma vez que são capazes de atender às demandas, tanto quanto as parafinas, sem o impacto ambiental destas.

De acordo com Akeiber et al. (2016), na subcategoria de PCM não parafínicos, as substâncias que apresentam maior potencial para aplicações na construção são os ácidos graxos, pois apresentam qualidades adequadas ao ambiente construído sob diferentes climas e condições, como alto calor latente, baixo superresfriamento⁴, temperaturas de fusão próximas da zona de conforto, não apresentam substâncias tóxicas, além do baixo impacto ambiental. Os ácidos graxos são encontrados em diversos óleos vegetais, gorduras e manteigas, como palmiste, coco, soja, algodão, amendoim, girassol, colza etc. Os ácidos graxos mais conhecidos são o ácido caprílico, ácido cáprico, ácido láurico, ácido mirístico, ácido palmítico, ácido esteárico e ácido oleico. Esses materiais também podem ser manipulados em laboratórios até certo limite para melhorar suas propriedades, como oxidação, inflamabilidade e até mesmo para variar o ponto de fusão, por meio da mistura de óleos vegetais em concentrações diferentes. As pesquisas nesse âmbito continuam a crescer, tanto que

⁴ O superresfriamento é um fenômeno natural que mantém um material de mudança de fase (PCM) em seu estado líquido a uma temperatura inferior à sua temperatura de solidificação. Para aplicações no ambiente construído isso é uma desvantagem, pois o calor latente é liberado a temperaturas mais baixas que o normal, comprometendo o conforto térmico.

Nazari, Jebrane e Terziev (2020) propõem uma encapsulação também de base biológica/vegetal, para que todo o sistema do PCM seja de origem vegetal.

No Brasil, as soluções em PCM para a construção civil ainda não chegaram, até o momento desta pesquisa, em 2023. Existe uma empresa brasileira no ramo de transporte e armazenamento de produtos para a indústria farmacêutica que lançou o primeiro PCM produzido no Brasil em 2019 (GRUPO POLAR, 2022). Segundo a empresa, uma das classes do produto tem temperaturas de 15 °C a 25 °C. Esses pontos de fusão condizem com aplicações para as edificações e indicam um potencial que o país tem de fornecer esse material ao se criar a demanda. Oliveira, Gonzales e Marques (2021) fizeram uma revisão sistemática da literatura acerca do uso de PCM para o ambiente construído em climas quentes e concluíram que o produto tem um grande potencial no Brasil para a redução do consumo energético das edificações. Os autores revisaram a aplicação do PCM nas edificações, bem como as espessuras recorrentes, as temperaturas de fusão recomendadas, o desempenho termoenergético obtido e as limitações e sugestões apresentadas. Outra revisão foi feita para os climas temperados úmidos comparáveis a climas brasileiros. Os resultados também indicaram uma aplicação promissora do PCM no país (VIEIRA; OLIVEIRA, 2021). A revisão mais recente feita por autores brasileiros acerca do uso de PCM reafirmou o potencial dessa classe de materiais na construção e reiterou a importância de se escolher o PCM ideal baseado nas condições climáticas (OLIVEIRA; LUCARELLI; CARLO, 2022)

Dentre os artigos selecionados nessas três revisões, quatro são brasileiros: Brito et al. (2017), Pons e Stanescu (2017), Brandalise, Almeida e Ordenes (2020) e Filippini et al. (2020).

No estudo sobre um PCM teórico aplicado a edifícios no Brasil, Brito et al. (2017) simularam dias típicos de verão para 8 cidades, representativas de cada zona bioclimática brasileira. Os autores concluíram que esses materiais podem impactar positivamente no desempenho térmico, principalmente de construções leves e podem trazer benefícios no verão para as zonas bioclimáticas 1 a 5.

Em Pons e Stanescu (2017), foi analisado um PCM orgânico natural na parede externa de alvenaria de uma sala comercial para oito zonas bioclimáticas brasileiras, aliado a três condições de condicionamento. Os autores concluíram que os melhores cenários de redução do consumo em relação a uma espessura viável de PCM ocorreram para as zonas 1 a 5, especialmente nas zonas 1 e 2. Em Brandalise, Almeida e Ordenes (2020), foi analisada uma habitação de interesse social com sistema leve e BioPCM para as cidades de Brasília (DF) e Santa Maria (RS), com dois pontos de fusão diferentes. Observou-se que o BioPCM de 25 °C apresentou resultados melhores para Brasília. Já em Santa Maria, este PCM foi mais indicado para o calor, enquanto o de 22 °C foi mais indicado para os períodos de desconforto por frio. Em Filippini et al. (2020), foi analisada uma pré-escola pública na ZB 3; observou-se uma melhora nos níveis de conforto térmico com a utilização de PCM.

Além dos trabalhos citados nas revisões, uma pesquisa anterior no Brasil já apontava para o potencial de redução do consumo de energia com a aplicação de PCM (STANESCU; PONS; SCHMID, 2015). Nesse caso, foi feito um estudo com PCM aplicado como camada adicional em uma construção de alvenaria, sem tipologia definida, para a cidade de Curitiba (PR). Nas conclusões, os autores também apontaram para o cuidado com o uso excessivo de isolamento térmico, benéfico no inverno, mas que pode aumentar a demanda de energia para refrigeração no verão.

Por fim, o trabalho de Aristófanis (2020), diferentemente dos demais, analisou a aplicação de PCM em municípios do semiárido brasileiro. As simulações foram feitas para um quarto de um edifício multifamiliar de interesse social. Os resultados mostraram que o PCM aumentou a inércia térmica do ambiente, mas que isso afetou negativamente o conforto térmico em 23% dos municípios analisados, enquanto beneficiou aproximadamente metade das cidades estudadas. Outro resultado encontrado é que a temperatura média anual do local é a variável mais determinante para o incremento de conforto, sendo que este é maior à medida em que a temperatura média anual é menor, podendo acentuar o desconforto por calor em alguns casos. A ATD também é relevante, pois em cidades com pouca amplitude térmica e médias acima da temperatura de conforto, o PCM atenua os picos e

estabiliza as temperaturas para fora da zona de conforto, enquanto em cidades com alta ATD, as temperaturas tendem a se estabilizar próximas à zona de conforto.

Existem outros estudos brasileiros que trabalharam a aplicação de PCM nos materiais construtivos, como a incorporação de PCM em argamassas e em blocos de solo-cimento. Entretanto, essas pesquisas não trataram do desempenho térmico de ambientes construídos com esses materiais e, portanto, não foram mencionadas aqui. Nenhum estudo no país trabalhou a combinação de PCM em sistemas de madeira industrializada.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A partir da pesquisa de fundamentação teórica, observou-se a necessidade de se realizar estudos analíticos para aprimorar o desempenho térmico de residências construídas com sistemas industrializados em madeira, por meio de estratégias para aumentar a inércia térmica desses sistemas.

Tendo como base a classificação de pesquisas por objetivo de Gil (2002), este trabalho tem objetivo explicativo. As pesquisas de objetivo explicativo “têm como preocupação central identificar os fatores que determinam ou que contribuem para a ocorrência dos fenômenos” (GIL, 2002, p. 42). Neste caso, serão feitos estudos para comparar estratégias e identificar as que mais influenciam no desempenho térmico do objeto de estudo.

Em relação aos procedimentos técnicos utilizados, esta pesquisa pode ser classificada como pesquisa de simulação (GROAT; WANG, 2002) ou como pesquisa experimental (GIL, 2002), uma vez que este último autor não considera a simulação como uma classe de pesquisa.

Segundo Groat e Wang (2002), a pesquisa por simulação é útil em situações em que escalabilidade e complexidade precisam ser consideradas. Neste caso, a melhoria do desempenho térmico dos sistemas apresentados envolve uma infinidade de cenários em contextos climáticos, combinações de materiais e estratégias diferentes. As simulações termoenergéticas de edificações levam em conta a geometria, as propriedades térmicas dos materiais e as condições climáticas do local. Tudo isso pode ser modificado, criando desdobramentos, os quais seriam de difícil reprodução em experimentos físicos, dada a escala do modelo e as diferentes localizações geográficas usadas.

A pesquisa de simulação está intrinsecamente relacionada à pesquisa experimental, uma vez que, assim como essa, trabalha isolando variáveis e observando seus efeitos. A diferença proposta por Groat e Wang (2002) é que a pesquisa de simulação é capaz de trabalhar com interações e relações de causa e efeito mais complexas do que em pesquisas puramente experimentais.

Gil (2002), não considera a pesquisa de simulação como uma classe de pesquisa, por isso, tendo por base as classificações deste autor, esta pesquisa se encaixa na pesquisa experimental. “A pesquisa experimental consiste em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto” (GIL, 2002, p. 47).

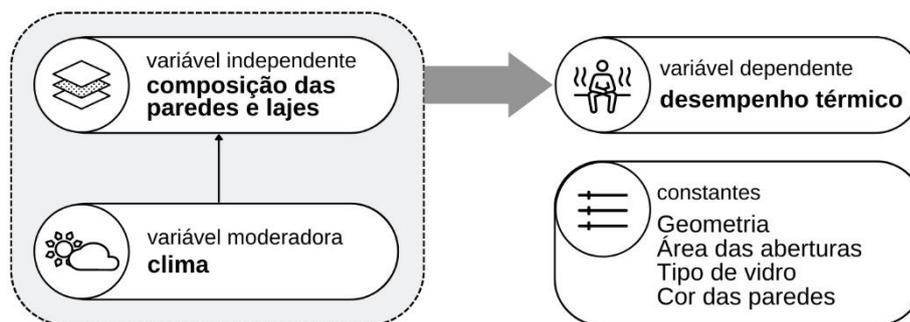
Para este tipo de pesquisa, o autor define nove etapas de planejamento. As duas primeiras já foram apresentadas na introdução, as demais serão usadas no restante deste capítulo para explicar as decisões tomadas para o delineamento do objeto de estudo e os cenários considerados. São estas as etapas do planejamento da pesquisa experimental, segundo Gil (2002, p. 93):

- a) Formulação do problema;
- b) Construção das hipóteses;
- c) Operacionalização das variáveis;
- d) Definição do plano experimental;
- e) Determinação dos sujeitos;
- f) Determinação do ambiente;
- g) Coleta de dados;
- h) Análise e interpretação dos dados;
- i) Apresentação das conclusões.

3.1 Operacionalização das variáveis

Para trabalhar a hipótese da pesquisa, quatro variáveis principais serão utilizadas, conforme a Figura 22, partindo das variáveis definidas por Marconi e Lakatos (2003): independente, dependente, moderadora e de controle. A variável independente é o fator manipulado pelo pesquisador que influencia ou determina a variável dependente. Neste caso em que se deseja pesquisar a influência da inércia térmica no desempenho térmico, a variável independente são as composições de paredes e lajes, que alteram a inércia térmica do sistema. A variável dependente, por sua vez, é o próprio desempenho térmico; é por meio das diferenças nessa variável que é possível perceber os resultados e os impactos das mudanças na variável independente.

Figura 22 – Operacionalização das variáveis da pesquisa



Fonte: elaborado pela autora (2023).

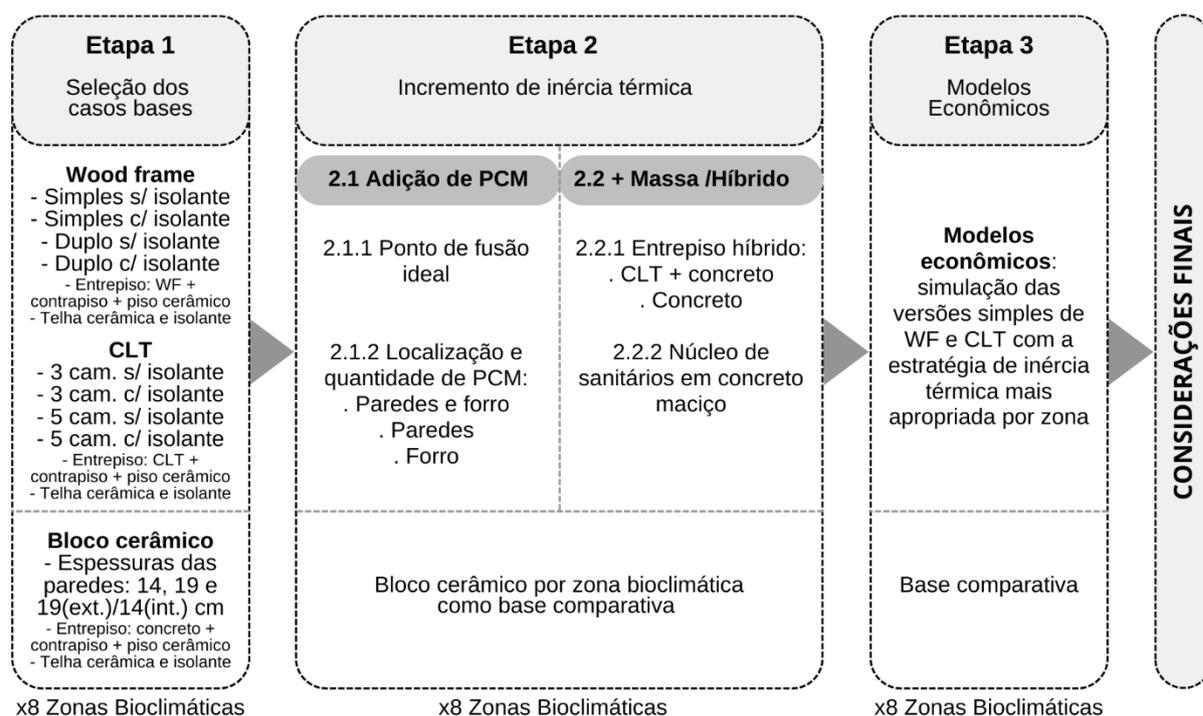
Todas as mudanças no sistema construtivo serão estudadas para cada uma das oito zonas bioclimáticas brasileiras. O clima é, portanto, a variável moderadora, que impacta a variável dependente (desempenho térmico), mas situa-se em nível secundário em relação à variável independente. Dessa forma, é possível compreender os resultados para cada situação climática. Os fatores mantidos constantes foram: a geometria da edificação, as áreas das aberturas, os tipos de vidro e a cor das superfícies externas (absortância), definida para todos os modelos como 0,2, cor clara. Esses fatores influenciariam o desempenho térmico, mas não são relevantes para a hipótese desta pesquisa. A seleção do caso base foi baseada nas práticas de construção vigentes e serão justificados nas subseções seguintes.

3.2 Definição do plano experimental

O plano experimental da pesquisa foi do tipo fatorial, em que há mais de uma variável independente no experimento (GIL, 2002). A Figura 23 mostra as etapas do trabalho de simulação. Em um primeiro momento, foram definidos os casos base para cada uma das zonas bioclimáticas. O objetivo foi partir de um caso que, ao mesmo tempo, correspondesse à realidade construtiva brasileira e fosse minimamente adequado para cada clima. Na Etapa 1, executaram-se as simulações para cada caso base; as lajes e coberturas foram mantidas iguais para cada sistema construtivo, mas as paredes foram modificadas. No caso do WF, experimentou-se com o sistema simples e o duplo (camada simples ou dupla de gesso acartonado, conforme caracterizado na seção 2.1.1 e 3.5.2) e com a presença ou ausência de isolamento térmico. Para o CLT, foram testados o número de camadas dos painéis e a presença ou ausência de

isolamento térmico. É possível aprofundar em pesquisas sobre isolamento térmico, em relação ao tipo de material, quantidade e posicionamento, mas esse não é o objetivo deste trabalho (nos casos com isolantes das paredes em WF e CLT, foi utilizado um material com resistência térmica de $2,0 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$). Para a alvenaria, foi testada a espessura dos blocos. O isolamento térmico não foi testado para estas, pois não é uma prática comum de construção no país. Os casos que apresentaram resultados melhores na Etapa 1 foram utilizados nas etapas subsequentes.

Figura 23 – Etapas das simulações – plano experimental



Fonte: elaborado pela autora (2023).

A partir dos casos base selecionados, a Etapa 2 acrescentou inércia térmica de duas maneiras: 1) adição de PCM, nas paredes e forro, apenas nas paredes e apenas no forro, testando, também, PCM com diferentes pontos de fusão para cada clima; 2) adição de massa térmica, testando sistemas híbridos de WF e CLT, a saber: laje mista de concreto e CLT, laje de concreto com vigas de madeira e torre de sanitários em concreto maciço. É comum edificações de múltiplos andares em madeira ter o núcleo central de escadas e elevadores em concreto por questões estruturais; essa estratégia acaba aumentando a inércia térmica da edificação. Partindo de uma lógica similar, foram pensados núcleos de sanitários em concreto, assim, cada unidade habitacional

teria seu incremento de inércia térmica, por meio das paredes e lajes em concreto dos sanitários.

A alvenaria de bloco cerâmico continuou a mesma da Etapa 1 para referência. Na Etapa 3, as melhores estratégias demonstradas na Etapa 2 foram simuladas para os modelos mais simples de WF e CLT (WF simples sem isolante e CLT de 3 camadas sem isolante), para analisar se os resultados permaneceram desejáveis mesmo nos modelos mais econômicos, reduzindo o gasto de material.

Os experimentos foram conduzidos em ambiente de simulação, por meio do programa EnergyPlus, uma vez que a simulação computacional é uma ferramenta que permite a visualização de diferentes cenários da realidade. O EnergyPlus é uma ferramenta de modelagem integrada avançada para simulação capaz de simular o consumo de energia e água de edifícios (ENERGYPLUS, 2022). O programa escolhido é validado, amplamente aceito em pesquisas acadêmicas e que atende aos requisitos do procedimento de simulação da NBR 15575 (ABNT, 2021a).

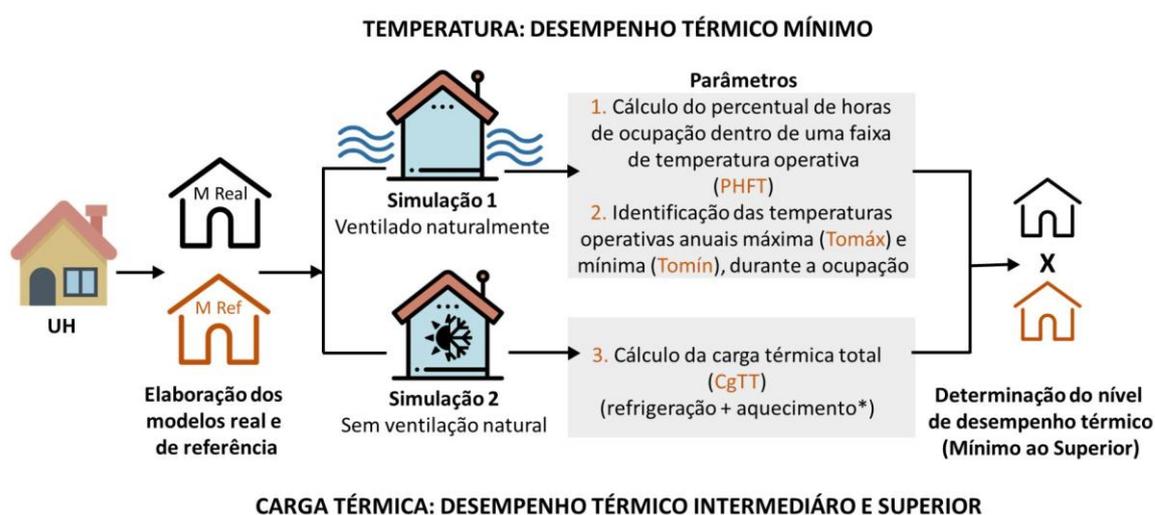
3.2.1 Parâmetros da simulação

Os parâmetros das simulações seguiram o procedimento de simulação da NBR 15575-1 (ABNT, 2021a). Esse é o método mais atual e adaptado à realidade brasileira, utilizado, inclusive, pelo Programa Brasileiro de Etiquetagem de Edificações (PBE Edifica). A vantagem desse procedimento é que leva em conta as diferenças na zona de conforto a depender da temperatura do ar externo e que considera os ambientes naturalmente ventilados na maior parte do tempo, mas também a carga térmica de aquecimento ou refrigeração quando as condições internas ultrapassam os limites de conforto. Dessa maneira, representa-se o contexto das edificações residenciais brasileiras de modo mais próximo do real.

Foram modelados os pavimentos térreo, tipo e cobertura de uma edificação multifamiliar e analisados os resultados dos ambientes de permanência prolongada (APP) das unidades habitacionais (UH) localizadas no pavimento tipo. A simulação foi feita de forma anual tanto para o modelo real (modelo de estudo), como para o modelo de referência, o qual possui a mesma geometria do modelo real, mas as propriedades

dos materiais e os percentuais de elementos transparentes seguem uma tabela pré-definida. Para atingir os níveis intermediário e superior, ambos os modelos foram simulados com e sem o uso da ventilação natural; no caso da ventilação natural, utilizaram-se janelas operáveis que funcionam de acordo com os dados de velocidade e direção do vento advindas do arquivo climático. Os resultados uniram as épocas do ano que não necessitaram de condicionamento artificial, com a carga térmica das épocas em que o condicionamento se fez necessário e a comparação do modelo real com o modelo de referência (Figura 24) (ABNT, 2021a).

Figura 24 – Etapas do procedimento de simulação e indicadores de desempenho térmico da NBR 15575



Fonte: LabEEE (2022b).

Os indicadores para o desempenho térmico pelo procedimento de simulação da NBR 15575 foram: percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa (PHFT), temperatura operativa anual máxima (T_{omax}), temperatura operativa anual mínima ($T_{omín}$) e carga térmica total (C_{gTT}). A partir desses indicadores, pôde-se classificar a unidade habitacional (UH) em três níveis: mínimo (M), intermediário (I) e superior (S) (ABNT, 2021a). O cálculo de cada parâmetro e do nível de desempenho está detalhado na seção 3.7.

3.2.2 Simulação de PCM no EnergyPlus

Um dos desafios de se trabalhar com simulação de PCM é a variação de suas propriedades térmicas a depender do seu estado, seja este sólido, líquido ou em transição (parte sólidas e líquidas). Entretanto, Arumugam, Ramalingam e Vellaichamy (2022) fizeram uma revisão e apontaram para vários estudos já realizados no EnergyPlus que demonstraram resultados satisfatórios para a modelagem e simulação de PCM no ambiente construído. Além disso, os autores concluíram que dentre os programas que podem avaliar efetivamente o desempenho do PCM nas edificações se encontram: TRNSYS, EnergyPlus, ANSYS, DesignBuilder e ESP-r. Dentre esses, o programa utilizado no maior número de estudos citados pelo artigo foi EnergyPlus.

Para simular o comportamento de PCM no EnergyPlus foi necessário mudar o algoritmo de equilíbrio de calor do default da função de transferência de calor (CTF) para um algoritmo de diferenças finitas de condução unidimensional, conhecido por CondFD (Conduction Finite Difference), capaz de simular propriedades térmicas variáveis. Dentro deste, existem duas opções para inserir as informações do PCM, o modo Crank-Nicholson e o modo completamente implícito (fully implicit) (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2022). Este último está disponível a partir da versão 7.1 e foi validado no estudo de Tabares-Velasco, Christensen e Bianchi (2012) por meio de uma verificação analítica, de testes comparativos e de validação empírica, tanto para PCM microencapsulados em drywall e isolantes, como macroencapsulados.

O algoritmo CondFD foi acoplado a uma função de entalpia-temperatura, usada para desenvolver um calor específico equivalente em cada intervalo de tempo (*time steps*). Os autores sugeriram a utilização de intervalos de tempo iguais ou menores que três minutos e espaçamentos entre nós menores que um terço do valor padrão para que o cálculo do PCM pudesse ser feito da melhor forma (TABARES-VELASCO; CHRISTENSEN; BIANCHI, 2012). Neste trabalho, foram considerados intervalos de tempo a cada 2 minutos, ou seja 30 intervalos por hora.

As configurações dos objetos do programa seguiram as informações do Apêndice B de Tabares-Velasco et al. (2012) com a atualização da opção que incluiu a histerese do PCM, representando curvas diferentes de entalpia para os processos de fusão e solidificação, ou seja, o uso do objeto `MaterialProperty:PhaseChangeHysteresis` ao invés de `MaterialProperty:PhaseChange`, conforme U.S. Department of Energy (2022). Nas simulações com PCM, aumentou-se o *timestep* de 6 (default) para 30, de acordo com a recomendação do U.S. Department of Energy (2022).

3.3 Determinação dos sujeitos

Esta pesquisa escolheu focar em edificações residenciais, baseado nos dados da fundamentação teórica. Mesmo assim, existem inúmeras tipologias e para cada uma, um desempenho diferente. Sendo assim, foi importante definir a tipologia a ser trabalhada e todas as características de seu funcionamento. Para isso, foram definidos abaixo a geometria, os padrões de ocupação, iluminação, carga de equipamentos, padrão de ventilação, sistemas construtivos e propriedades térmicas dos materiais.

3.3.1 Seleção da geometria

A seleção da geometria baseou-se em critérios apontados como relevantes na fundamentação teórica. A edificação analisada é residencial, considerando que os sistemas de WF e CLT são mais usados nessa tipologia, e multifamiliar, levando em conta a vantagem da verticalização, dada uma densidade ideal, para o urbanismo sustentável. O procedimento de simulação da NBR 15575 define que os pavimentos tipo devem ser modelados apenas uma vez, conseqüentemente, o modelo teve um pavimento térreo, um pavimento tipo e um pavimento de cobertura. Na prática, essa edificação poderia ter quantos pavimentos fossem necessários, ao se repetir o pavimento tipo, sem levar em consideração a mudança nos coeficientes de pressão do vento com a diferença de altura.

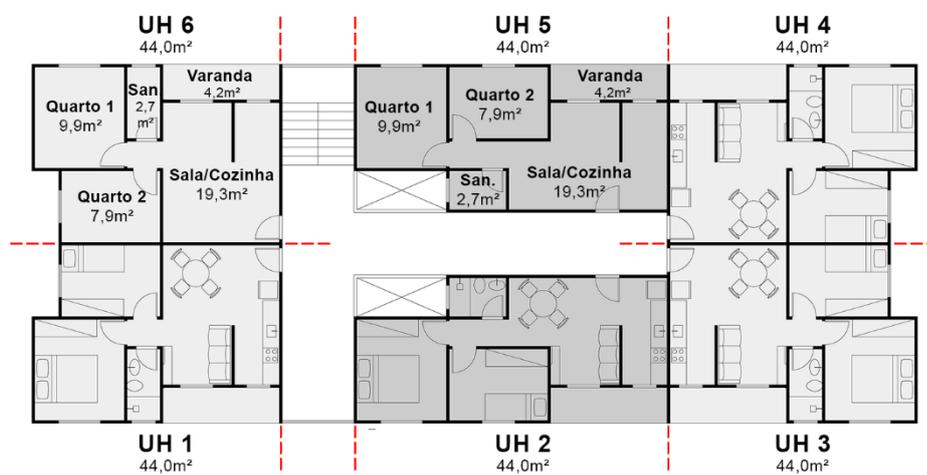
Segundo a pesquisa de posses e hábitos conduzida pela Eletrobrás, cada domicílio do Brasil tem em média 1,95 quartos, 0,92 sala de estar/jantar, 0,94 cozinha e 1,26 banheiros. Além disso, a média geral de área construída é de 75,88 m² e de 51,81 m²

para as classes D/E. A maioria (30,95%) das janelas está orientada para o norte, as cores predominantes das paredes externas (68,83%) são claras e 71,85% domicílios possuem janelas em mais de uma fachada (ELETROBRAS, 2019).

A partir da quantidade média de cômodos do estudo da Eletrobrás (2019) e do levantamento das áreas dos cômodos de edificações reais presentes na pesquisa de Triana (2016) que estuda as tipologias residenciais multifamiliares mais comuns no Brasil, foi desenvolvida uma planta para este trabalho. Dessa forma, foi possível partir de um padrão correntemente observado no país, ajustando os ambientes de acordo com as sugestões apontadas na fundamentação teórica.

A Figura 25 mostra a planta do edifício representativo criado para este estudo, com base na tipologia de edificação residencial multifamiliar dos estudos de Triana (2016). A planta contém quatro unidades habitacionais nas extremidades (duas fachadas externas) e duas unidades habitacionais no meio do edifício (uma fachada), todas com 44,0 m² e ambientes com áreas iguais. Cada UH possui dois quartos, um banheiro, uma cozinha e uma sala de estar/jantar.

Figura 25 – Planta do pavimento tipo representativo para as simulações



Fonte: elaborado pela autora (2023).

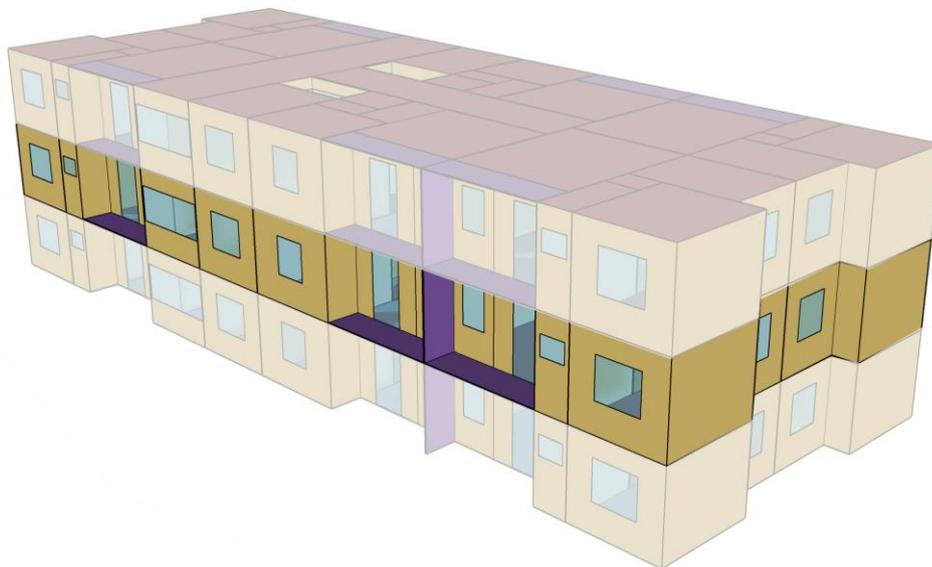
Priorizou-se posicionar a maioria dos ambientes de permanência prolongada na fachada norte (e sul). As dimensões das aberturas foram estabelecidas a partir das áreas de elementos transparentes definidos para o modelo de referência da NBR 15575, as quais também se aproximam dos tamanhos de aberturas encontrados no

estudo de Triana (2016). A área de elementos transparentes alcançou 17% da área de piso do ambiente e área efetiva de ventilação de 7,65 %. Para se atingir esse valor na sala foi colocada uma porta envidraçada uma varanda, que também funciona como elemento de proteção solar. As esquadrias são formadas por perfis de 50 mm de espessura em volta das aberturas de acordo com a NBR 15575-4 (ABNT, 2021a).

Ademais, os apartamentos das extremidades possuem ventilação cruzada por meio de duas fachadas; já as UHs no centro da edificação dispõem de uma fachada principal (norte ou sul) e de uma abertura nos sanitários voltada para um poço de luz/ventilação que permeia todos os andares e é aberto em cada pavimento com um guarda-corpo. A ventilação é fundamental para as estratégias de inércia térmica, ao retirar calor dos materiais por convecção ou, no caso do PCM, solidificando-o para o próximo período de aquecimento diurno, sendo, portanto, importante que todas as unidades habitacionais tenham essa possibilidade.

As simulações foram feitas para os seis apartamentos do pavimento intermediário com fachadas: 1) norte-oeste, 2) norte, 3) norte-leste, 4) sul-leste, 5) sul, 6) sul-oeste. Uma vez que o contato com o solo e com a cobertura influenciam na inércia térmica do sistema, optou-se por limitar o estudo ao pavimento intermediário (pavimento tipo) para se observar apenas o impacto das mudanças nos sistemas construtivos em madeira e alvenaria; a influência das paredes externas, internas e lajes (Figura 26). Ressalta-se que a edificação completa foi modelada e nenhuma superfície foi configurada como adiabática, conforme estipulado pela norma (ABNT, 2021a). As estratégias de inércia térmica foram aplicadas na edificação como um todo.

Figura 26 – Geometria da edificação modelada para a simulação termoenergética. Todos os pavimentos e ambientes foram modelados, mas os resultados foram analisados apenas para o pavimento tipo.



Fonte: elaborado pela autora (2023).

3.3.2 Sistemas construtivos e propriedades dos materiais

Os sistemas construtivos analisados foram o *wood frame* e o *cross laminated timber*, em relação à alvenaria convencional de bloco cerâmico. Além desses, foi necessário simular modelo de referência da NBR 15575, já que os cálculos de desempenho dependem da comparação com esse modelo. A Tabela 2 apresenta as propriedades térmicas de todas as composições de parede externa e interna, entrepisso, piso térreo e cobertura dos sistemas em análise, lembrando que apesar de focar no pavimento intermediário, toda a edificação foi modelada. As variações no WF e CLT condizem com o plano experimental apresentado na Figura 23. Para calcular as propriedades térmicas do blocos cerâmicos vazados, foi utilizado o modelo equivalente desenvolvido por Weber et al. (2017), usando os dados das paredes rebocadas em ambas as faces e blocos de 9x14x24 cm e 14x9x24 cm.

Tabela 2 – Transmitância e capacidade térmica das composições de parede externa e interna, entrepiso, piso térreo e cobertura

	U W/(m ² .K)	CT kJ/(m ² .K)		U W/(m ² .K)	CT kJ/(m ² .K)
Modelo Referência (NBR 15575)			Alvenaria - Bloco Cerâmico		
Parede Externa	4,40	220	Parede 14 cm	2,39	139
Parede Interna	4,40	220	Parede 19 cm	2,14	156
Entrepiso / Térreo	3,74	220	Entrepiso	3,17	348
Cobertura	2,06	229	Cobertura	0,37	250
Cobertura para ZB8	0,86	229	Térreo (Alvenaria, WF, CLT)	3,17	348
Wood Frame - WF			Cross Laminated Timber - CLT		
Parede Externa S	1,84	62	Parede Externa 3	1,30	72
Parede Externa D	1,73	72	Parede Externa 5	0,98	98
Parede Externa S Iso	0,39	64	Parede Externa 3 Iso	0,36	76
Parede Externa D Iso	0,39	73	Parede Externa 5 Iso	0,33	101
Parede Externa S PCM	1,69	85	Parede Externa 3 PCM	1,23	95
Parede Externa D PCM	1,60	94	Parede Externa 5 PCM	0,94	120
Parede Externa S Iso PCM	0,39	86	Parede Externa 3 Iso PCM	0,36	98
Parede Externa D Iso PCM	0,38	95	Parede Externa 5 Iso PCM	0,33	124
Parede Interna S	1,79	47	Parede Interna 3	1,61	57
Parede Interna D	1,59	56	Parede Interna 5	1,14	82
Parede Interna S Iso	0,42	48	Parede Interna 3 Iso	0,38	60
Parede Interna D Iso	0,41	68	Parede Interna 5 Iso	0,35	86
Parede Interna S PCM	1,65	69	Parede Interna 3 PCM	1,49	79
Parede Interna D PCM	1,48	88	Parede Interna 5 PCM	1,16	105
Parede Interna S Iso PCM	0,41	71	Parede Interna 3 Iso PCM	0,37	83
Parede Interna D Iso PCM	0,40	89	Parede Interna 5 Iso PCM	0,34	108
Entrepiso	2,48	141	Entrepiso	1,08	181
Entrepiso PCM	2,21	163	Entrepiso PCM	1,02	204
Entrepiso Massa	1,02	421	Entrepiso Massa	1,02	421
Cobertura	0,36	43	Cobertura	0,30	83
Cobertura PCM	0,35	65	Cobertura PCM	0,30	105
Cobertura Massa	0,30	323	Cobertura Massa	0,30	323
U: Transmitância Térmica	S: Camada simples de chapa de gesso	3: Painel de CLT de 3 camadas			
CT: Capacidade Térmica	D: Camada dupla de chapa de gesso	5: Painel de CLT de 5 camadas			
■ : CT ≥ 130 kJ/(m ² .K)					

Fonte: elaborado pela autora (2023).

Em verde, destacou-se as composições que possuem valores de capacidade térmica iguais ou superiores a 130 kJ/(m².K), recomendados pelo procedimento simplificado da NBR 15575 (ABNT, 2021b). Esse valor na norma é apenas para paredes externas. Percebeu-se o mesmo padrão observado na fundamentação teórica, que os modelos de alvenaria convencional atingiram a recomendação, mas o mesmo não ocorreu para WF e CLT. Destacou-se o aumento considerado da capacidade térmica do entrepiso

quando se adicionou massa térmica, para compensar o baixo valor das paredes. Por fim, o PCM acrescentou certa massa térmica por conta do material, mas produziu ou absorveu calor latente adicional de 230 J/g a cada mudança de fase.

A nomenclatura utilizada para cada composição construtiva foi definida a abaixo, com suas variações:

- **Ref. NBR / Referência NBR15575:** Modelo de referência, definido pela NBR 15575-4:2021, composto por paredes externas e internas, piso térreo e lajes de 10 cm de concreto maciço. Cobertura de laje de concreto de 10 cm e telha cerâmica; isolante térmico na cobertura de 0,67 m².K/W apenas para a ZB8.
- **Alv / Alvenaria:** Modelo em alvenaria, composto por paredes externas e internas de bloco cerâmico (espessura variável) com argamassa e reboco em ambos os lados de 2,5 cm cada. Piso térreo e lajes em concreto maciço de 10 cm de espessura, contrapiso de 4,5 cm e piso cerâmico de 1 cm de espessura. Cobertura de laje de concreto de 10 cm, isolante de lã de rocha de 10 cm e telha cerâmica.
 - **Alv-19-14cm:** paredes externas de bloco cerâmico de 19 cm de espessura (tijolo deitado); paredes internas de bloco cerâmico de 14 cm de espessura (em pé);
 - **Alv-19cm:** paredes externas e internas de bloco cerâmico de 19 cm de espessura (tijolo deitado);
 - **Alv-14cm:** paredes externas e internas de bloco cerâmico de 14 cm de espessura (em pé).
- **WF-:** Modelo em wood frame, composto por paredes externas e internas de wood frame conforme Figura 12. Piso térreo, lajes e cobertura conforme Figura 13.
 - **WF-S:** parede de WF e forro com camada simples de gesso acartonado;

- **WF-D:** parede de WF e forro com camada dupla de gesso acartonado (conforme Figura 12);
- **WF-S-iso / WF-D-iso:** parede de WF (simples ou dupla) com adição de isolante térmico de lã de rocha entre montantes (9 cm)
- **CLT-:** Modelo em cross laminated timber, composto por paredes externas e internas, piso térreo, lajes e cobertura de acordo com a Figura 17.
 - **CLT-3:** parede em CLT com painel de CLT de 3 camadas;
 - **CLT-5:** parede em CLT com painel de CLT de 3 camadas;
 - **CLT-3-iso / CLT-5-iso:** parede de CLT (painel de 3 ou 5 camadas) com adição de isolante térmico de espuma rígida de poliuretano de 6 cm de espessura.
- **PCM__:** adição de manta de PCM de 1 cm de espessura com o valor do ponto de fusão do material (Exemplo: PCM21, significa PCM com ponto de fusão de 21 °C). Nas paredes de WF, essa manta foi adicionada entre montantes, mais próxima da face interna da parede. Nas paredes de CLT, o PCM foi adicionado entre o painel de CLT e a chapa de gesso acartonado. Nos forros, foi colocado logo acima do gesso.
 - **PCM__-par / PCM__-forro:** PCM aplicado apenas nas paredes ou apenas no forro. Quando não especificado, o PCM foi aplicado nas paredes e forro.
- **Sistemas Híbridos:**
 - **Conc. Laje:** Substituição da laje em WF ou CLT por laje usada no sistema de alvenaria (concreto, contrapiso e piso cerâmico);
 - **Conc. Laje + CLT:** Substituição da laje em WF ou CLT por laje usada no sistema de alvenaria (concreto, contrapiso e piso cerâmico) sobre um painel de CLT de 5 camadas;

- **Conc. Sanit.:** Substituição das paredes e lajes dos sanitários por concreto maciço de 10 cm de espessura.

3.3.3 Seleção das propriedades do PCM

Na indústria da construção civil, a maior parte do PCM utilizado é feito de parafina. A natureza não renovável deste material, por ser derivado do petróleo, levou muitos pesquisadores a investigarem alternativas. Existem opções mais sustentáveis que a parafina, como a classe de PCM de base biológica, que inclui álcoois, ésteres, glicóis e ácidos graxos. De acordo com Akeiber et al. (2016), nessa subcategoria de PCM não parafínicos, as substâncias que apresentam maior potencial para aplicações na construção são os ácidos graxos, pois apresentam qualidades adequadas ao ambiente construído sob diferentes climas e condições, como alto calor latente e baixo super resfriamento.

Buscou-se na literatura, a partir disso, os principais PCM de base biológica utilizados e suas propriedades. Na plataforma Scopus, utilizou-se a string de busca “bio-based PCM”, e devido à natureza recente dos artigos, nenhum prazo foi estabelecido. Os dados coletados foram o tipo de PCM e as seguintes propriedades térmicas: temperatura de fusão (°C), temperatura de solidificação (°C), calor latente (J/g), condutividade térmica no estado sólido e líquido (W/m.K), calor específico (J/kg.K).

A busca gerou 35 resultados, 14 dos quais foram excluídos pelos seguintes motivos: 04 artigos que não incluíam as propriedades do PCM, 04 artigos nos quais o PCM tinha pontos de fusão superiores a 40 °C, 03 que usavam microencapsulação e três em que não foi possível ter acesso ao texto completo. Os dados coletados nos 21 artigos restantes foram apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades de PCM de base biológica na literatura

#	Referência	Tipo de PCM	T _F (°C)	T _S (°C)	L (J/g)	λ _S (W/m.K)	λ _L (W/m.K)	C _{p,S} (J/kg.K)	C _{p,L} (J/kg.K)
1, 2, 3	(AL-JETHELAH et al., 2019; ALOMAIR et al., 2018; EBADI et al., 2018)	Óleo de coco alimentício	24	-	103	0,228	0,166	3750	2010
4	(BIANCO et al., 2018)	Biológico B 35	35,7	30,6	190	0,161	-	1580	2090

#	Referência	Tipo de PCM	T _F (°C)	T _S (°C)	L (J/g)	λ _S (W/m.K)	λ _L (W/m.K)	C _{p,S} (J/kg.K)	C _{p,L} (J/kg.K)
5	(BOUSSABA et al., 2018)	Gordura de coco	22,63	17,44	106,17	0,182	-	-	-
6	(BOUSSABA et al., 2019)	Gordura hidrogenada de palmiste	26,53	23,30	74,35	~0,2	-	-	-
7	(CELLAT et al., 2020)	Mistura de ácidos graxos (cáprico e mirístico)	22	-	85	-	-	-	-
8	(DELCROIX et al., 2015)	BioPCM (soja e palma)	23	-	200	0,207	0,171	1900	2000
9	(FABIANI et al., 2019)	Gordura animal	25	-	23	-	-	-	-
10	(FARAJ et al., 2019)	1- Ácido cáprico 2- Biológico Q29-M91* 3- Óleo de coco 4- Gordura de palma* 5- BioPCM	29,2 29 28 26,53 29	- - - - -	162 180 254,5 74,35 219	- - 0,5* 0,2 0,2	- - - - -	- - 2100 - 1970	- - - - -
11	(GHADIM et al., 2019)	Mistura de álcoois e ésteres graxos 1- DD-MEP 2- DD-MÉS 3- DT-MEP 4- DT-MES	18 21 23 30	- - - -	224,45 201,91 210,15 209,38	- - - -	- - - -	- - - -	- - - -
12	(HU; YU, 2014)	Cera de soja	26,89	-	3,17	-	-	-	-
13, 14	(JEONG et al., 2013; JEONG et al., 2014)	Biológico (ácidos graxos)	29,38	-	149,2	0,154	-	-	-
15	(KANG et al., 2015)	Biológico (ácidos graxos)	29,24	-	147,2	0,2034	-	-	-
16	(MATHIS et al., 2018)	Biológico (PureTemp23)	23,4	-	201	0,25	0,15	1840	1990
17	(NAZARI; JEBRANE; TERZIEV, 2020)	Derivados de ácidos graxos*	10-43	-	100-180	-	-	-	-
18	(SAM et al., 2020)	Biológico (PureTemp25)	25	-	187	-	-	950	860
19	(VENKATESHWAR et al., 2019)	Óleo de coco	24	-	103	0,154	0,154	3750	2010
20	(VIK et al., 2017)	Biológico Q23-M51 (BioPCM)	23	18,5	-	0,2	-	1970	-
21	(YU et al., 2014)	Biológico	28,13	-	149,2	0,2	-	-	-

* citados de outros estudos
T_F: temperatura de fusão (°C)
T_S: temperatura de solidificação (°C)
L: calor latente (J/g)
λ_S: condutividade térmica no estado sólido (W/m.K)
λ_L: condutividade térmica no estado líquido (W/m.K)
C_{p,S}: calor específico no estado sólido (J/kg.K)
C_{p,L}: calor específico no estado líquido (J/kg.K)

Fonte: elaborado pela autora (2023).

O tipo de PCM denominado “biológico”, em inglês *bio-based*, é formado por uma mistura de óleos vegetais provenientes de matéria-prima subutilizada na indústria (YU et al., 2014). O mesmo produto denominado BioPCM que apareceu em três artigos diferentes (DELCROIX et al., 2015; FARAJ et al., 2019; VIK et al., 2017) é um tipo de PCM biológico, produzido por uma empresa norte-americana. Optou-se por utilizar este material para este estudo porque: 1) é um produto que está disponível no mercado especificamente para aplicações em construção; 2) possui todos os dados necessários para a entrada na simulação; 3) em fábrica, é possível manipular o ponto de fusão do produto para se adequar às demandas de diferentes climas; 4) é feito a

partir de um mix de óleos vegetais, manufaturado a partir de subprodutos da indústria do agronegócio; 5) é um material testado para manter suas propriedades mesmo após muitos ciclos de carga e descarga do PCM, ou seja, de mudanças de fase; 5) utiliza macroencapsulação de PCM em mantas de fácil instalação como camada adicional nas paredes e forros, chamadas de ENRG Blanket (Figura 27).

Figura 27 – ENRG Blanket. Manta de PCM de base biológica macroencapsulado



Fonte: Phase Change Solutions (2022).

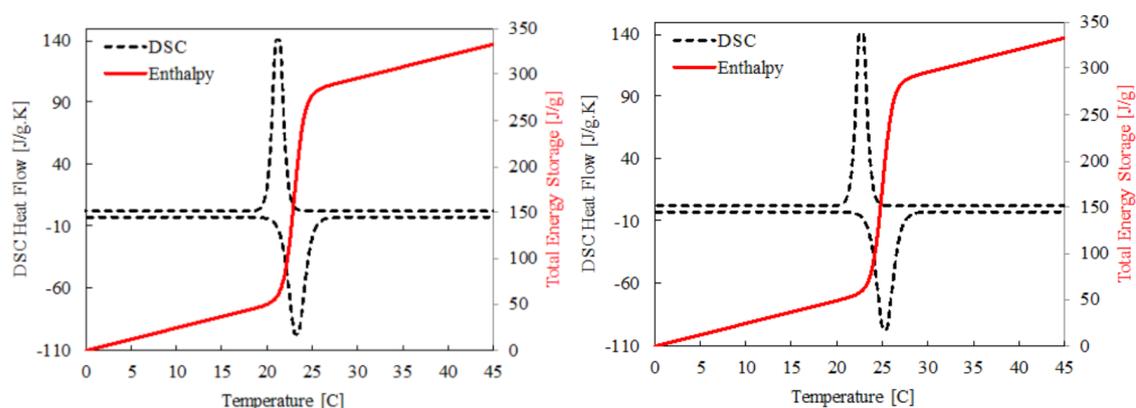
As propriedades usadas neste estudo foram retiradas de documentos técnicos disponibilizados pela empresa, resumidas na Tabela 4, de acordo com os dados de entrada necessários para o EnergyPlus (PHASE CHANGE SOLUTIONS, 2020a, 2020b, 2020c, 2020d). Para variar os pontos de fusão do PCM, modificou-se apenas as temperaturas de fusão e de solidificação, já que as curvas de entalpia possuem a mesma amplitude no material utilizado, conforme Figura 28.

Tabela 4 – Propriedades térmicas do PCM selecionado

Propriedades Térmicas	Valores
Calor latente durante todo o processo de mudança de fase	230000 J/kg
Condutividade Térmica (líquido)	0,19 W/m.K
Condutividade Térmica (sólido)	0,21 W/m.K
Densidade (líquido e sólido)	900 kg/m ³
Calor específico (líquido e sólido)	2500 J/kg.K
Diferença de temperatura na curva de fusão (alta e baixa)	2 °C
Diferença de temperatura na curva de solidificação (alta)	2 °C
Diferença de temperatura na curva de solidificação (baixa)	1 °C
Temperaturas de fusão	19, 21, 23, 25, 27 e 29 (°C)
Temperaturas de solidificação	T _{fusão} – 2 °C

Fonte: elaborado pela autora (2023), baseado em Phase Change Solutions (2020a, 2020b, 2020c, 2020d).

Figura 28 – Curva de Entalpia (em vermelho) e de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) (em preto) de dois PCM de base biológica da Phase Change Solutions. O mesmo padrão de curva ocorreu, apenas alterando as temperaturas de fusão e solidificação



a) BioPCM Q23 (Ponto de Fusão 23 °C)

b) BioPCM Q25 (Ponto de Fusão 25 °C)

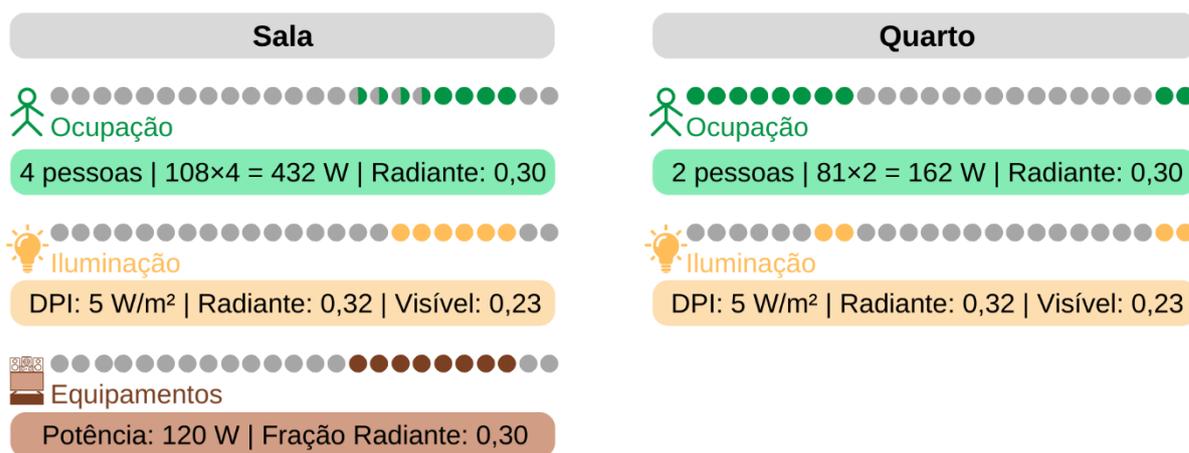
Fonte: Phase Change Solutions (2020a, 2020b).

3.3.4 Padrões de ocupação, cargas internas e ventilação

O padrão de ocupação dos ambientes pelos usuários, do uso da iluminação e de equipamentos foi considerado o mesmo para o modelo real e para o modelo de referência, para todos os dias do ano, segundo a NBR 15575 (ABNT, 2021a). “No caso de cozinhas e salas conjugadas, devem-se modelar os dois espaços internos no mesmo ambiente, considerando as especificações para o ambiente da sala” (ABNT,

2021a). Portanto, as unidades habitacionais possuem um ambiente de permanência prolongada (APP) de uso sala (sala/cozinha), dois APP de uso dormitório (quarto 1 e quarto 2) e um ambiente de permanência temporária (APT) (sanitário), além das áreas comuns que também foram modeladas como APT. Os padrões e valores para ocupação e cargas internas foram resumidos na Figura 29.

Figura 29 – Padrão de ocupação, de uso da iluminação e de carga de equipamentos



Fonte: elaborado pela autora, baseado na NBR 15575 (2021a).

O modelo com ventilação natural permitiu a abertura das janelas apenas nos períodos de ocupação do APP, quando a TBS interna foi igual ou superior a $19 \text{ }^\circ\text{C}$ e superior à TBS externa. As janelas dos sanitários foram consideradas sempre abertas, mas as janelas dos demais APT, fechadas. Já as portas internas foram deixadas abertas, e as externas ou portas de sanitários, fechadas. As portas envidraçadas de sacadas seguiram o mesmo padrão das janelas. Foram utilizados os parâmetros de infiltração por frestas de janelas e portas, quando fechadas, definidos pela norma. Os coeficientes de pressão foram os mesmos para o modelo real e de referência (ABNT, 2021a).

No modelo sem ventilação natural, todas as janelas e portas foram mantidas fechadas, com exceção das janelas dos sanitários. Além disso, foi utilizado um sistema de carga ideal com *setpoint* de $23 \text{ }^\circ\text{C}$ para refrigeração e de $21 \text{ }^\circ\text{C}$ para aquecimento (apenas para climas que precisam), com acionamento possível apenas nos horários em que o

APP está ocupado. O cálculo da carga térmica levou em conta tanto as cargas sensíveis como latentes (ABNT, 2021a).

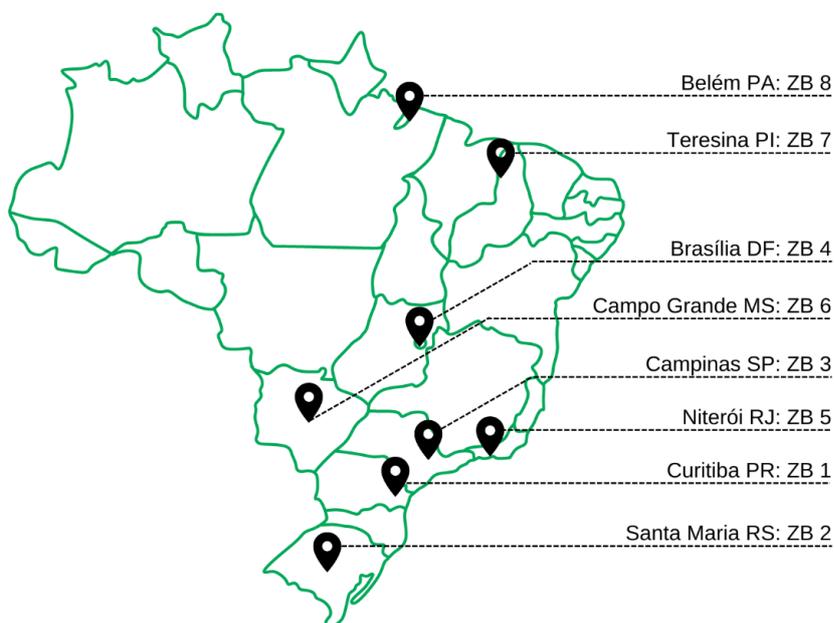
3.4 Determinação do Ambiente

As mesmas simulações foram feitas para diferentes localidades no Brasil, correspondentes a cada zona bioclimática. Dessa forma, foi possível avaliar o comportamento dos materiais no desempenho térmico da edificação, de acordo com cada demanda bioclimática.

A Figura 30 mostra as oito cidades escolhidas para representar as zonas bioclimáticas. Buscou-se escolher cidades em estados diferentes, localizadas nas cinco regiões geográficas. Para essa escolha, também se considerou a proposta recente de zoneamento climático brasileiro para edificações residenciais de Walsh, Cóstola e Labaki (2023), que tem sido usada como uma das bases para a atualização da NBR 15220-3 em relação ao zoneamento dos climas no Brasil. Esse trabalho propõe 10 zonas ao invés de 08, com maior diferença nas ZBs 7 e 8, que se subdividem em 8 e 10 e em 7 e 9, respectivamente.

Assim, para as ZBs 1 a 6, foram selecionadas cidades que se mantêm nas mesmas zonas tanto na norma atual quanto na proposta de Walsh, Cóstola e Labaki (2023). Para a ZB 1 foi escolhida a cidade de Curitiba (PR). Para a ZB 2, a cidade de Santa Maria (RS). Para a ZB 3, a cidade de Campinas (SP). Para a ZB 4, a cidade de Brasília (DF). Para a ZB 5, a cidade de Niterói (RJ) e para a ZB 6, a cidade de Campo Grande (MS). Já para a ZB 7 foi designada a cidade de Teresina (PI), que corresponde à zona 10 e para a ZB 8, a cidade Belém (PA) referente à zona 9 na proposta de Walsh, Cóstola e Labaki (2023).

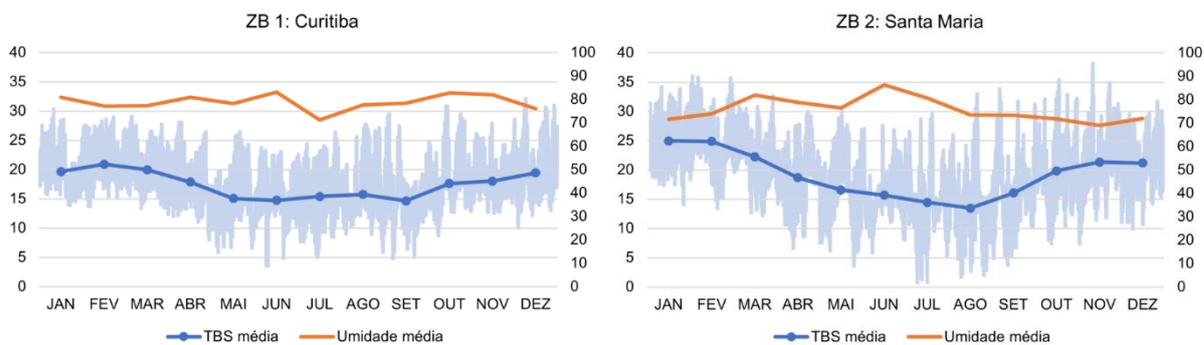
Figura 30 – Cidades selecionadas para representar cada zona bioclimática

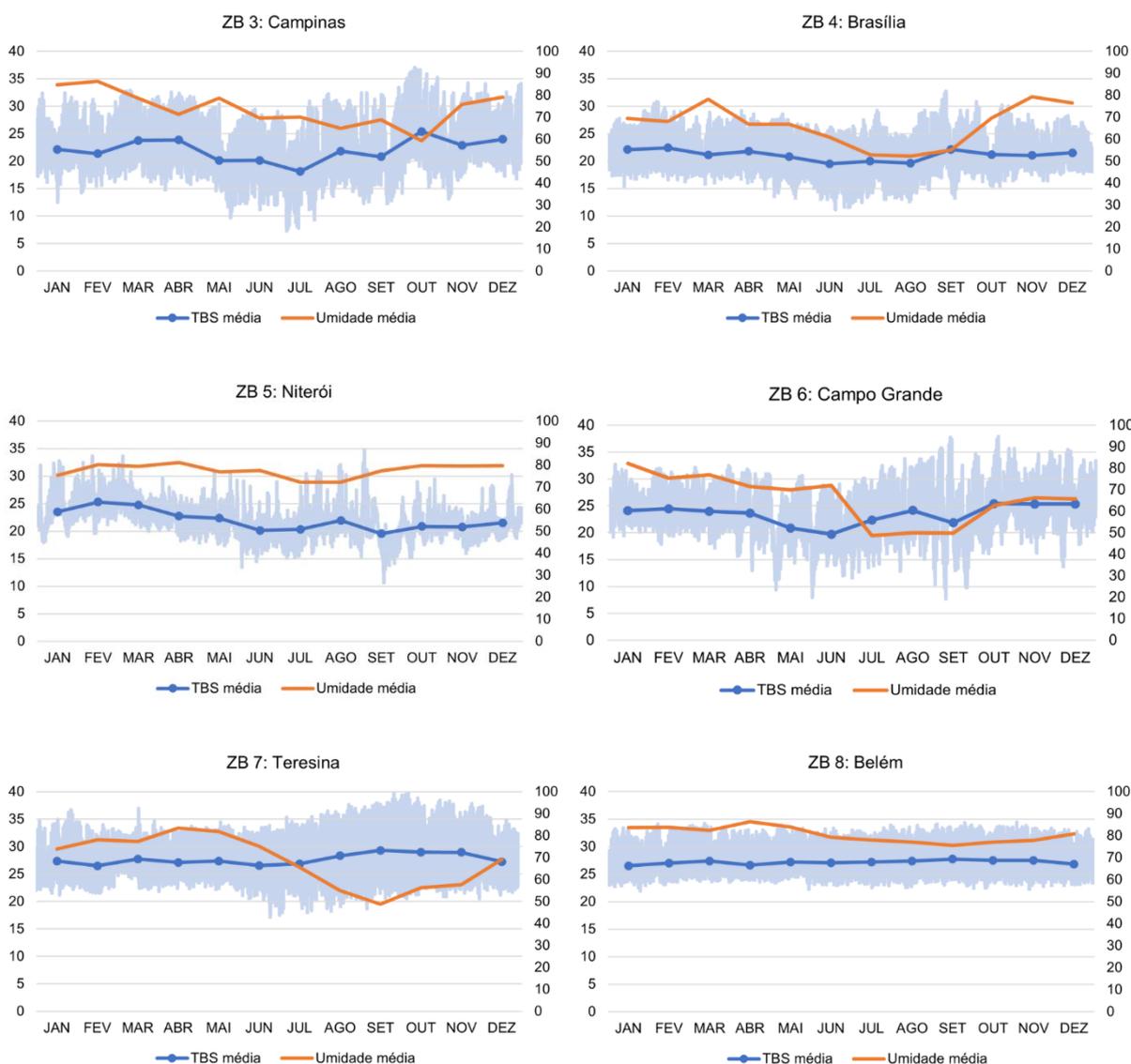


Fonte: elaborado pela autora (2023).

Foram utilizados os arquivos climáticos utilizados do INMET de 2018, de acordo com a base padrão de arquivos climáticos para a NBR 15575, disponibilizada pelo Labeee (2021). A Figura 31 apresenta a característica dos climas selecionados, baseadas nos dados de temperatura de bulbo seco (TBS) em de 0 a 40 °C e umidade relativa (0 a 100 %). A TBS horária é plotada no gráfico em azul claro e a média mensal é plotada em azul escuro. A linha laranja representa a média mensal da umidade relativa.

Figura 31 – Caracterização dos climas selecionados





À esquerda, em azul, temperatura de bulbo seco externa em (°C).

À direita, em laranja, umidade relativa [%].

Fonte: elaborado pela autora (2023), baseado nos arquivos climáticos INMET, 2018.

A Tabela 5 mostra as médias anuais de temperatura externa de bulbo seco (TSB_m), de umidade relativa (UR_m), e de amplitude térmica diária (ATD_m). A TSB_m tende a aumentar em zonas com números maiores. Os climas mais úmidos condizem com as ZB 1, 2, 3, 5 e 8 e os climas mais secos com as ZB 4, 6 e 7, conforme a NBR 15220-3 (ABNT, 2005). Em relação à amplitude térmica diária, percebeu-se que, exceto a ZB 5, todas as demais apresentaram valores superiores a 6 °C. As zonas 2, 3, 6 e 7 têm valores acima de 10 °C.

Tabela 5 – Médias anuais de temperatura externa de bulbo seco, umidade relativa e amplitude térmica diária para os climas selecionados

Zona	Cidade	TBS _m	UR _m	ATD _m
ZB 1	Curitiba (PR)	17,4	78,7	8,9
ZB 2	Santa Maria (RS)	19,0	75,7	10,3
ZB 3	Campinas (SP)	22,0	73,9	11,7
ZB 4	Brasília (DF)	21,1	66,2	9,3
ZB 5	Niterói (RJ)	21,9	77,5	5,6
ZB 6	Campo Grande (MS)	23,4	65,8	10,5
ZB 7	Teresina (PI)	27,7	68,5	11,5
ZB 8	Belém (PA)	27,2	80,4	8,3

TBS_m Média anual da temp. externa de bulbo seco (°C)

UR_m Média anual da umidade relativa (%)

ATD_m Média anual da amplitude térmica diária (°C)

Arquivo climático utilizado: INMET 2018

Fonte: elaborado pela autora (2023).

3.5 Coleta, análise e interpretação dos dados

Depois de definidos os dados de entrada, apresentados acima, partiu-se para a etapa de simulação dos cenários e, por conseguinte, para a análise e interpretação dos resultados.

A partir do dado de saída da temperatura operativa horária de cada ambiente de permanência prolongada do modelo com ventilação natural, foi possível definir (ABNT, 2021a):

1. o percentual de horas de ocupação dos APP dentro de uma faixa de temperatura operativa (PHFT_{APP});
2. a temperatura operativa anual máxima (Tomá_{XAPP}) de cada APP nos períodos de ocupação;
3. a temperatura operativa anual mínima (Tomín_{APP}) nos períodos de ocupação, apenas para zonas bioclimáticas 1, 2, 3 ou 4.
4. com os valores por APP, os valores de PHFT_{UH}, Tomá_{XUH} e Tomín_{UH} para toda a unidade habitacional.

Antes de calcular o PHFT foi necessário definir os limites da faixa de temperatura, com base nos intervalos de temperatura. Estes, por sua vez, foram definidos a partir

da média anual da temperatura externa de bulbo seco. Assim, conforme a Tabela 6, as temperaturas operativas dos ambientes de permanência prolongada (APP) das zonas 1, 2, 3, 4, 5 e 6 deveriam ficar entre 18 °C e 26 °C e dos APP das zonas 7 e 8, devem ser menores que 30 °C. Temperaturas fora da faixa significam desconforto, devendo ser compensadas com o uso de condicionamento artificial no modelo sem ventilação natural. Para as ZB 7 e 8, não há limite definido para a temperatura mínima, pois são climas predominantemente quentes. A diferença das temperaturas limites das faixas de temperatura operativa condiz com a adaptação humana ao conforto em relação às condições climáticas locais (ABNT, 2021a).

O $PHFT_{APP}$, percentual de horas de ocupação do APP dentro da faixa de temperatura operativa, foi definido pelo número de horas em que o APP foi ocupado e com temperaturas dentro da faixa, dividido pelo número de horas totais no ano em que o APP foi ocupado. O $PHFT_{UH}$ foi calculado pela somatória do $PHFT_{APP}$, dividido pelo número de APP. A partir deste, foi definido o $\Delta PHFT$, que foi o incremento do $PHFT_{UH,real}$ em relação ao $PHFT_{UH,ref}$ ($PHFT_{UH,real} - PHFT_{UH,ref}$) em porcentagem (%). As $Tomáx_{UH}$ e $Tomín_{UH}$ pelos valores de temperatura operativa mais extremos, considerando os períodos de ocupação de todos os APP (ABNT, 2021a).

Tabela 6 – Caracterização dos climas em relação aos intervalos de temperatura definidos pela NBR 15575

Zona	Cidade	TBS _m *	Intervalo TBS _m	Faixa To _{APP} **
ZB 1	Curitiba (PR)	17.4	Intervalo 1 (< 25,0 °C)	18,0 °C < To _{APP} < 26,0 °C
ZB 2	Santa Maria (RS)	19.0	Intervalo 1 (< 25,0 °C)	18,0 °C < To _{APP} < 26,0 °C
ZB 3	Campinas (SP)	22.0	Intervalo 1 (< 25,0 °C)	18,0 °C < To _{APP} < 26,0 °C
ZB 4	Brasília (DF)	21.1	Intervalo 1 (< 25,0 °C)	18,0 °C < To _{APP} < 26,0 °C
ZB 5	Niterói (RJ)	21.9	Intervalo 1 (< 25,0 °C)	18,0 °C < To _{APP} < 26,0 °C
ZB 6	Campo Grande (MS)	23.4	Intervalo 1 (< 25,0 °C)	18,0 °C < To _{APP} < 26,0 °C
ZB 7	Teresina (PI)	27.7	Intervalo 3 (≥ 27,0 °C)	To _{APP} < 30,0 °C
ZB 8	Belém (PA)	27.2	Intervalo 3 (≥ 27,0 °C)	To _{APP} < 30,0 °C

* TBS_m Média anual da temperatura externa de bulbo seco

** To_{APP} Temperatura operativa do APP

Arquivo climático utilizado: INMET 2018

Fonte: elaborado pela autora (2023)

Já a partir do dado de saída de carga térmica de refrigeração e de aquecimento (quando houver) dos ambientes de permanência prolongada do modelo sem ventilação natural foi possível definir (ABNT, 2021a):

1. o somatório anual dos valores horários da carga térmica de refrigeração ($CgTR_{APP}$), para os períodos em que o APP esteve ocupado e T_o excedeu a faixa de temperatura considerada no PHFT;
2. o somatório anual dos valores horários da carga térmica de aquecimento ($CgTA_{APP}$), apenas para climas com média anual da temperatura externa de bulbo seco inferior a 25 °C, para os períodos em que o APP esteve ocupado e T_o excedeu à faixa de temperatura considerada no PHFT;
3. com os valores por APP, o somatório anual dos valores horários da carga térmica total da UH ($CgTT_{UH}$)

A $CgTT_{UH}$ equivale à soma de todas as cargas térmicas ($CgTR_{APP} + CgTA_{APP}$) de todos os APP de uma UH, expressa em kWh/ano. O critério da $CgTT_{UH}$ foi considerado apenas para a obtenção dos níveis de desempenho intermediário e superior. Com a $CgTT_{UH}$ foi possível calcular a $RedCgTT$ (Equação 1), que é a redução da carga térmica total da UH no modelo real em relação ao modelo de referência, expressa em porcentagem (ABNT, 2021a).

$$\text{Equação 1} \quad RedCgTT = \left[1 - \frac{(CgTT_{UH,real})}{(CgTT_{UH,ref})} \right] \times 100$$

Os dados de saída (temperatura operativa e cargas térmicas) foram considerados em relação à faixa de temperatura pré-definida e às horas em que o APP esteve ocupado.

3.5.1 Definição do nível final de desempenho por unidade habitacional e número de casos simulados

Os critérios de avaliação e definição dos níveis de desempenho foram calculados de acordo com o Quadro 4, abaixo.

Quadro 4 – Critérios de avaliação do desempenho térmico segundo a NBR 15575 para pavimento tipo

Mínimo (M)		Intermediário (I)	Superior (S)			
PHFT	PHFT _{UH,real} > 0,9.PHFT _{UH,ref}	$\Delta\text{PHFT} (\text{PHFT}_{\text{UH,real}} - \text{PHFT}_{\text{UH,ref}}) \geq \Delta\text{PHFT}_{\text{mín}}$ Para PHFT _{UH,ref} ≥ 70%, $\Delta\text{PHFT}_{\text{mín}} = 0$ Para PHFT _{UH,ref} < 70%, $\Delta\text{PHFT}_{\text{mín}} = 28 - 0,27 \times \text{PHFT}_{\text{UH,ref}}$ (pav. tipo)				
		Tomáx _{UH,real} ≤ Tomáx _{UH,ref} + 1 °C (pav. tipo)				
Tomín	Tomín _{UH,real} ≥ Tomín _{UH,ref} - 1 °C. Apenas para ZB 1, 2, 3 e 4.					
CgTT	Não considera	RedCgTT ≥ RedCgTT _{mín}		RedCgTT ((1 - (CgTT _{UH,real} / CgTT _{UH,ref}) × 100) ≥ RedCgTT _{mín}		
		Para PHFT _{UH,ref} < 70%, RedCgTT _{mín} = 0		RedCgTT _{mín} = Tabela abaixo		
		Para PHFT _{UH,ref} ≥ 70%, RedCgTT _{mín} = Tabela abaixo		RedCgTT _{mín} = Tabela abaixo		
			CgTT _{UH,ref} / A _{p,UH} < 100	CgTT _{UH,ref} / A _{p,UH} ≥ 100		CgTT _{UH,ref} / A _{p,UH} < 100
	Tipo	22	25	Tipo	45	50

Fonte: elaborado pela autora (2023), baseado em ABNT (2021a).

3.5.2 Número de casos simulados e parâmetros analisados

Cada modelo precisou ser simulado duas vezes, considerando que a NBR 15575 pede uma simulação com ventilação natural e outra sem ventilação natural. Além disso, todos os casos foram simulados para cada uma das oito zonas bioclimáticas. Foram listados abaixo o número de simulações por etapa e o número total de casos simulados:

Etapa 1 – Seleção dos casos base:

- 12 casos base (modelo de referência da NBR 15575, Alvenaria 14 cm, Alvenaria 19 cm, Alvenaria 19 e 14 cm, WF simples, WF simples com isolante,

WF duplo, WF duplo com isolante, CLT 3 camadas, CLT 3 camadas com isolante, CLT 5 camadas, CLT 5 camadas com isolante)

- 8 zonas bioclimáticas
- 2 arquivos de simulação por caso (ventilado naturalmente e sem ventilação natural, segundo a NBR 15575)
- Total da Etapa 1: 192 simulações

Etapa 2 – Incremento de Inércia Térmica:

Etapa 2.1 – Adição de PCM:

Etapa 2.1.1 – Ponto de fusão ideal:

- 2 casos base (um de WF e outro de CLT)
- Adição de PCM nas paredes e forros com pontos de fusão diferentes: média de 3 pontos de fusão diferentes por caso
- 8 zonas bioclimáticas
- 2 arquivos de simulação por caso (ventilado naturalmente e sem ventilação natural, segundo a NBR 15575)
- Total da Etapa 2.1.1: 96 simulações

Etapa 2.1.2 – Localização e quantidade de PCM:

- 2 casos base (um de WF e outro de CLT)
- Adição de PCM nas paredes e adição de PCM no forro: 2 casos
- 8 zonas bioclimáticas
- 2 arquivos de simulação por caso (ventilado naturalmente e sem ventilação natural, segundo a NBR 15575)

- Total da Etapa 2.1.2: 64 simulações

Etapa 2.2 – Adição de massa com sistemas híbridos:

Etapa 2.2.1 – Entrepiso híbrido:

- 2 casos base (um de WF e outro de CLT)
- Laje de concreto com CLT e laje de concreto com vigas em madeira: 2 casos
- 8 zonas bioclimáticas
- 2 arquivos de simulação por caso (ventilado naturalmente e sem ventilação natural, segundo a NBR 15575)
- Total da Etapa 2.2.1: 64 simulações

Etapa 2.2.2 – Núcleo de sanitários em concreto maciço:

- 2 casos base (um de WF e outro de CLT)
- Troca das superfícies dos sanitários por concreto maciço: 1 caso
- 8 zonas bioclimáticas
- 2 arquivos de simulação por caso (ventilado naturalmente e sem ventilação natural, segundo a NBR 15575)
- Total da Etapa 2.2.2: 32 simulações

Etapa 3 – Modelos Econômicos:

- 2 casos base (um de WF e outro de CLT)
- Adição de PCM (ponto de fusão ideal): 1 caso
- 8 zonas bioclimáticas

- 2 arquivos de simulação por caso (ventilado naturalmente e sem ventilação natural, segundo a NBR 15575)
- Total da Etapa 3: 32 simulações

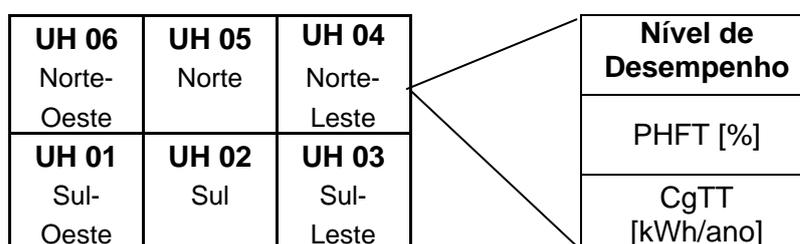
Total de simulações: 480; total de casos simulados: 240 casos.

A partir dos resultados das simulações de cada caso, foram analisados os parâmetros definidos pela NBR 15575, que são: PHFT (percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa), CgTT (carga térmica total em kWh/ano), CgTA (carga térmica de aquecimento), CgTR (carga térmica de refrigeração), Tomáx (temperatura operativa máxima), Tomín (temperatura operativa mínima) e nível de desempenho (superior, intermediário ou mínimo).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados das simulações foram apresentados nas subseções abaixo. A seção 4.1 mostrou os resultados da Etapa 1 das simulações, selecionando os casos base que orientaram as demais etapas. A seção 4.2 apresentou os resultados da Etapa 2, em que foram acrescentadas estratégias de inércia térmica aos casos base, tanto em relação à adição de PCM, quanto à incorporação de sistemas híbridos de maior massa térmica. A seção 4.3 mostrou os resultados da Etapa 3, que combinou a melhor estratégia da Etapa 2 com os modelos mais econômicos de WF e CLT. Os resultados das seções 4.1, 4.2 e 4.3 foram divididos por zonas bioclimáticas e apresentados para cada unidade habitacional do pavimento tipo, em relação ao nível de desempenho, percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa e carga térmica total, como exemplificado na Figura 32.

Figura 32 – Modelo de apresentação dos resultados das simulações nas seções 4.1, 4.2 e 4.3



ZB_ | Sistema Construtivo

Fonte: elaborado pela autora (2023).

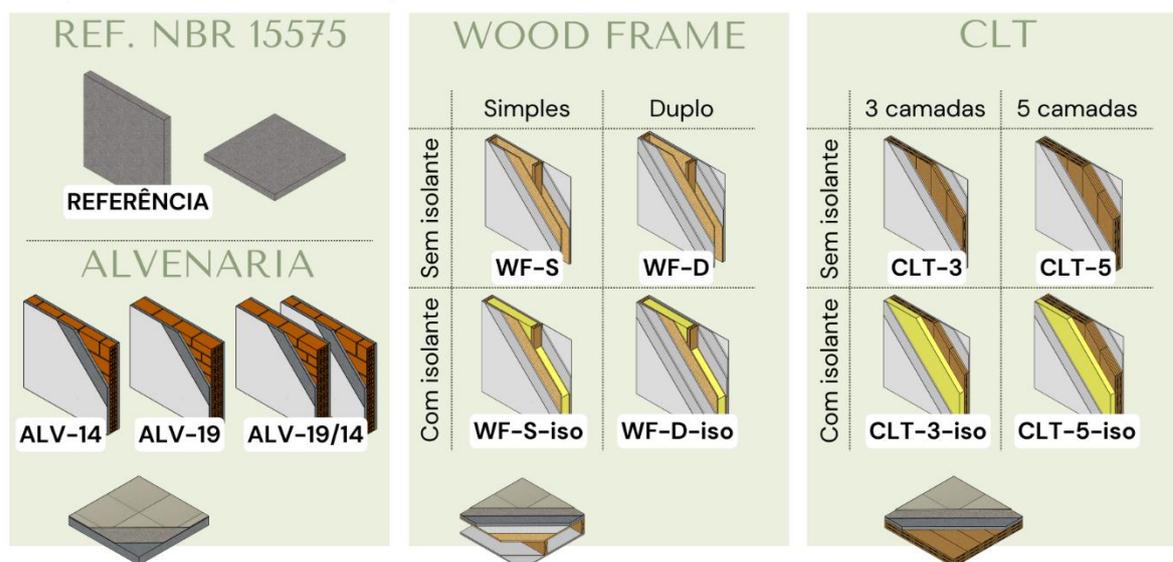
Além dos resultados por unidade habitacional por zona bioclimática (seções 4.1, 4.2 e 4.3), foram apresentados os resultados gerais do pavimento tipo na seção 4.4, incluindo os dados de temperaturas operativas máximas e mínimas e a carga térmica de aquecimento e refrigeração. Assim, foi possível trabalhar com gráficos-resumo contendo os principais casos analisados por parâmetro e por zona bioclimática.

Na seção de discussão, foram ressaltados os principais resultados e discutidas as repercussões das estratégias de inércia térmica por zona bioclimática.

4.1 Etapa 1 – Seleção dos casos base

Foram selecionados 12 casos base por zona bioclimática, baseados na prática construtiva brasileira. Esses casos foram graficamente resumidos na Figura 33, abaixo.

Figura 33 – Doze casos base



Fonte: elaborado pela autora (2023).

Da Tabela 7 à 14, os resultados foram divididos em três colunas. A primeira mostrou o modelo de referência da NBR 15575, feito com paredes e lajes maciças de 10 cm de concreto, bem como os casos com paredes de alvenaria de bloco cerâmico, assentados com o tijolo na vertical (14 cm), na horizontal (19 cm) e uma combinação de paredes externas com a espessura do tijolo de 19 cm e as internas com 14 cm. A segunda coluna concentrou os casos de *wood frame* com camadas simples e duplas de gesso acartonado, com e sem isolante térmico. Já a terceira, os modelos de CLT com três e cinco camadas de madeira, com e sem isolante térmico.

A Tabela 7 mostra os resultados das simulações da Etapa 1 para a zona bioclimática 1, representada pela cidade de Curitiba (PR). Para Curitiba (PR), observou-se que todas as UHs em alvenaria apresentaram níveis de desempenho superior, exceto uma (fachada sul – alvenaria 19-14 cm) que obteve nível intermediário. Para o sistema construtivo em WF, todas as UHs em WF simples sem isolante não atenderam ao

nível mínimo da norma, pois tiveram Tomáx maior que 1 °C (média de 29 °C) em relação à Tomáx do modelo de referência (média de 27,6 °C). O mesmo se deu para três UH no modelo de WF simples com isolante, em que a média da Tomáx para as UHs que não atingiram o mínimo foi 27,5 °C no modelo de referência e de 28,6 °C no WF-S-iso. Todas as UHs em WF duplo com isolante, bem como os modelos em CLT apresentaram nível de desempenho superior.

Os melhores resultados, ou seja, os que apresentaram maiores níveis de desempenho, maiores percentuais de PHFT e menores valores de CgTT, foram: 1) para alvenaria: Alvenaria de 14 cm; 2) para WF: WF-D-iso; 3) para CLT: CLT-5-iso. Dentre esses, o melhor resultado geral foi encontrado no modelo de CLT de 5 camadas com isolante térmico. O maior valor de PHFT foi de 98,5% na UH com fachadas para norte e oeste (16,7% a mais em relação ao modelo de referência da NBR). A UH com o menor CgTT, de 81 kWh/ano, foi a sul-oeste (618 kWh/ano a menos que o modelo de referência).

Observou-se que o clima de Curitiba (PR) se beneficia do uso de isolantes térmicos, aliado à maior massa nos modelos de madeira industrializada. Em relação à orientação das UHs, sete dos doze casos apresentaram valores maiores de PHFT e menores de CgTT para a UH norte-leste; para os outros cinco, valores maiores de PHFT para a orientação norte-oeste e CgTT menores para sul-oeste. Além disso, os valores de PHFT variaram entre 74,8% e 98,5% e os valores de CgTT variaram de 81 kWh/ano a 879 kWh/ano para esse clima.

Tabela 7 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) para os casos base em alvenaria, WF e CLT para ZB1 (Curitiba, PR)

Ref. NBR e Alvenaria			Wood Frame			Cross Laminated Timber		
MÍN.	MÍN.	MÍN.	INSUF.	INSUF.	INSUF.	SUP.	SUP.	SUP.
81.8%	80.9%	83.3%	82.8%	81.0%	83.7%	97.8%	97.2%	97.7%
572	665	551	407	472	392	119	152	135
MÍN.	MÍN.	MÍN.	INSUF.	INSUF.	INSUF.	SUP.	SUP.	SUP.
77.5%	74.8%	80.0%	80.9%	78.5%	82.2%	97.6%	96.6%	97.7%
699	879	617	432	520	414	115	153	124
ZB1 Referência NBR15575			ZB1 WF-S (gesso simples)			ZB1 CLT 3 camadas		

SUP.	SUP.	SUP.
86.3%	84.5%	88.6%
278	345	223
SUP.	INT.	SUP.
82.2%	78.5%	85.0%
379	506	307

ZB1 | Alvenaria 19-14 cm

SUP.	SUP.	SUP.
86.6%	84.7%	88.7%
259	312	215
SUP.	SUP.	SUP.
82.2%	78.6%	85.1%
359	465	299

ZB1 | Alvenaria 19cm

SUP.	SUP.	SUP.
89.4%	87.3%	91.7%
189	250	145
SUP.	SUP.	SUP.
85.6%	81.1%	88.6%
272	392	211

ZB1 | Alvenaria 14cm

SUP.	INSUF.	SUP.
96.5%	95.6%	96.4%
151	177	169
INSUF.	INSUF.	SUP.
96.0%	95.0%	96.2%
122	148	144

ZB1 | WF-S + isolante

INT.	INT.	SUP.
85.2%	83.5%	86.3%
317	372	303
SUP.	SUP.	SUP.
82.7%	80.1%	84.2%
366	448	339

ZB1 | WF-D (gesso duplo)

SUP.	SUP.	SUP.
97.6%	96.9%	97.5%
96	119	120
SUP.	SUP.	SUP.
96.9%	96.2%	97.2%
86	98	104

ZB1 | WF-D + isolante

SUP.	SUP.	SUP.
97.8%	97.2%	97.7%
108	136	130
SUP.	SUP.	SUP.
97.6%	96.6%	97.7%
89	113	107

ZB1 | CLT 3 cam. + isolante

SUP.	SUP.	SUP.
94.1%	92.3%	95.2%
109	139	107
SUP.	SUP.	SUP.
91.7%	88.4%	93.3%
146	194	126

ZB1 | CLT 5 camadas

SUP.	SUP.	SUP.
98.5%	97.7%	98.3%
90	124	112
SUP.	SUP.	SUP.
98.2%	97.5%	98.3%
81	95	93

ZB1 | CLT 5 cam. + isolante

Fonte: elaborado pela autora (2023).

A Tabela 8 apresenta os resultados das simulações da Etapa 1 para a zona bioclimática 2, representada pela cidade de Santa Maria (RS). Observou-se que todas as UHs em alvenaria apresentaram níveis de desempenho mínimo, exceto uma (fachada norte-leste – alvenaria 14 cm) que obteve nível superior. Para o sistema construtivo em WF, todas as UHs em WF sem isolante térmico, seja este simples ou duplo, obtiveram níveis mínimos de desempenho. A adição de isolante melhorou os níveis de desempenho do WF, variando entre superior e intermediário, a depender da UH. Para o sistema construtivo em CLT, todos os modelos com isolante térmico obtiveram nível superior.

Os melhores resultados, ou seja, os que apresentaram maiores níveis de desempenho, maiores percentuais de PHFT e menores valores de CgTT, foram: 1) para alvenaria: Alvenaria de 14 cm; 2) para WF: WF-D-iso; 3) para CLT: CLT-5-iso.

Dentre esses, o melhor resultado geral foi encontrado no modelo de CLT de 5 camadas com isolante térmico. O maior valor de PHFT foi de 80,7% na UH norte-leste (17,9% a mais em relação ao modelo de referência da NBR). A UH com o menor CgTT, de 1126 kWh/ano, foi a sul-oeste (1098 kWh/ano a menos que a referência).

Observou-se que o clima de Santa Maria (RS) se beneficia do uso de isolantes térmicos nos modelos de madeira industrializada. Em relação à orientação das UHs, todos os doze casos apresentaram valores maiores de PHFT para a orientação norte-leste. Valores menores de CgTT foram encontrados em cinco casos para a UH norte-leste, em quatro casos para a UH sul-oeste e em três casos para a UH sul-leste. Além disso, os valores de PHFT variaram entre 58,2% e 80,7% e os valores de CgTT variaram de 1126 kWh/ano a 2441 kWh/ano para esse clima.

Tabela 8 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) para os casos base em alvenaria, WF e CLT para ZB2 (Santa Maria, RS)

Ref. NBR e Alvenaria			Wood Frame			Cross Laminated Timber		
MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	INT.	INT.	INT.
61.0%	60.4%	62.8%	66.4%	64.8%	68.2%	78.4%	76.2%	79.9%
2305	2430	2280	1601	1694	1529	1332	1425	1281
MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	INT.	INT.	INT.
60.0%	58.2%	60.4%	64.9%	62.6%	66.4%	77.1%	74.3%	78.5%
2224	2441	2245	1589	1723	1533	1310	1428	1264
ZB2 Referência NBR15575			ZB2 WF-S (gesso simples)			ZB2 CLT 3 camadas		
MÍN.	MÍN.	MÍN.	INT.	INT.	INT.	SUP.	SUP.	SUP.
69.3%	67.9%	72.2%	76.8%	75.0%	78.3%	78.4%	76.2%	79.9%
1364	1463	1256	1316	1372	1293	1252	1321	1222
MÍN.	MÍN.	MÍN.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
66.9%	64.6%	69.2%	75.6%	73.1%	77.0%	77.1%	74.3%	78.5%
1423	1582	1335	1223	1297	1228	1163	1229	1157
ZB2 Alvenaria 19-14 cm			ZB2 WF-S + isolante			ZB2 CLT 3 cam. + isolante		
MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	INT.	MÍN.	SUP.
69.5%	68.2%	72.3%	67.4%	66.0%	69.7%	73.6%	71.7%	76.4%
1331	1408	1240	1523	1608	1445	1281	1353	1222
MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	SUP.
67.1%	64.8%	69.3%	65.4%	63.2%	67.0%	70.9%	67.5%	73.1%
1388	1522	1318	1528	1659	1477	1261	1368	1220
ZB2 Alvenaria 19 cm			ZB2 WF-D (gesso duplo)			ZB2 CLT 5 camadas		

MÍN.	MÍN.	SUP.
71.3%	69.8%	74.2%
1278	1375	1181
MÍN.	MÍN.	MÍN.
68.7%	66.0%	71.3%
1327	1480	1239

ZB2 | Alvenaria 14 cm

INT.	SUP.	SUP.
77.6%	75.6%	79.2%
1275	1335	1244
SUP.	SUP.	SUP.
76.2%	73.4%	77.6%
1189	1268	1191

ZB2 | WF-D + isolante

SUP.	SUP.	SUP.
79.1%	77.0%	80.7%
1227	1295	1195
SUP.	SUP.	SUP.
78.0%	75.3%	79.3%
1126	1190	1129

ZB2 | CLT 5 cam. + isolante

Fonte: elaborado pela autora (2023).

A Tabela 9 mostra os resultados das simulações da Etapa 1 para a zona bioclimática 3, representada pela cidade de Campinas (SP). Observou-se que as UHs em alvenaria apresentaram níveis de desempenho intermediário e superior. Para os sistemas construtivos em WF e CLT, o desempenho variou entre os níveis intermediário e mínimo, sendo que os modelos sem isolante térmico tiveram melhor desempenho melhor, comparado aos seus pares com isolante. Todas as UHs do modelo de 5 camadas em CLT obtiveram nível intermediário.

Os resultados que apresentaram maiores níveis de desempenho, maiores percentuais de PHFT e menores valores de CgTT, foram: 1) para alvenaria: Alvenaria de 19 cm; 2) para WF: WF-D; 3) para CLT: CLT-5. Dentre esses, o melhor resultado geral foi encontrado no modelo de alvenaria. Dentre os sistemas em madeira, destacou-se o modelo em CLT de 5 camadas sem isolante térmico. Para este, o maior valor de PHFT foi de 83,3% nas UHs sul-oeste e sul-leste (3,2% e 5,4% a mais em relação ao modelo de referência da NBR, respectivamente). A UH do CLT-5 com o menor CgTT, de 405 kWh/ano, foi a sul-oeste (1098 kWh/ano a menos que o modelo de referência).

Observou-se que para o clima de Campinas (SP) os modelos em alvenaria demonstraram um desempenho superior às opções em madeira, seja WF ou CLT, com ou sem isolante térmico, o que corroborou a hipótese deste trabalho e apontou para a necessidade de adequar termicamente esses modelos. Em relação à orientação das UHs, nove e onze dos doze casos apresentaram valores maiores de PHFT e menores de CgTT, respectivamente, para a orientação sul-oeste. Além disso, os valores de PHFT variaram entre 71,1% (CLT-3-iso) e 87,3% (Alv-19cm) e os valores de CgTT variaram de 981 kWh/ano (Alv-19cm) a 2359 kWh/ano (Ref-NBR) para esse clima.

Tabela 9 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) para os casos base em alvenaria, WF e CLT para ZB3 (Campinas, SP)

Ref. NBR e Alvenaria			Wood Frame			Cross Laminated Timber		
MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	INT.	INT.	INT.	INT.
75.0%	73.3%	75.7%	77.5%	75.7%	79.2%	79.3%	76.7%	81.3%
2193	2359	2248	1812	1932	1722	1613	1765	1512
MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	INT.
80.1%	78.3%	77.9%	80.2%	78.7%	80.3%	82.5%	80.4%	82.7%
1667	1821	1904	1580	1670	1583	1371	1482	1370
ZB3 Referência NBR15575			ZB3 WF-S (gesso simples)			ZB3 CLT 3 camadas		
SUP.	INT.	SUP.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	INT.
84.9%	82.6%	86.3%	76.8%	75.0%	78.3%	75.4%	71.1%	78.4%
1179	1318	1104	1316	1372	1293	1816	2022	1682
INT.	INT.	SUP.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.
87.0%	84.9%	86.8%	75.6%	73.1%	77.0%	80.8%	76.3%	80.3%
1003	1139	1030	1223	1297	1228	1435	1662	1497
ZB3 Alvenaria 19-14 cm			ZB3 WF-S + isolante			ZB3 CLT 3 cam. + isolante		
SUP.	INT.	SUP.	INT.	INT.	INT.	INT.	INT.	INT.
85.0%	82.9%	86.5%	78.6%	76.4%	80.6%	79.4%	76.4%	81.8%
1173	1300	1097	1687	1821	1587	1543	1702	1429
INT.	INT.	SUP.	MÍN.	MÍN.	INT.	INT.	INT.	INT.
87.3%	85.2%	86.9%	81.7%	79.7%	81.9%	83.3%	80.7%	83.3%
981	1122	1025	1439	1550	1444	1262	1404	1290
ZB3 Alvenaria 19 cm			ZB3 WF-D (gesso duplo)			ZB3 CLT 5 camadas		
INT.	INT.	SUP.	MÍN.	MÍN.	INT.	MÍN.	MÍN.	INT.
84.3%	81.9%	85.9%	75.4%	71.6%	78.8%	75.6%	71.3%	78.7%
1222	1362	1135	1835	2014	1669	1776	1979	1636
INT.	INT.	INT.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	INT.
86.7%	84.6%	86.4%	81.2%	76.8%	80.4%	81.3%	76.6%	80.7%
1027	1172	1066	1409	1653	1502	1385	1622	1453
ZB3 Alvenaria 14 cm			ZB3 WF-D + isolante			ZB3 CLT 5 cam. + isolante		

Fonte: elaborado pela autora (2023).

A Tabela 10 mostra os resultados das simulações da Etapa 1 para a zona bioclimática 4, representada pela cidade de Brasília (DF). Observou-se que todas as UHs em alvenaria apresentaram níveis de desempenho superior. O desempenho foi mínimo para todas as UHs em WF-S, WF-S-iso, WF-D-iso, CLT-3, CLT-3-iso e CLT-5-iso. Três UHs no sistema de WF-D e CLT-5 alcançaram nível intermediário e uma UH, nível superior em CLT-5.

Os resultados que apresentaram maiores níveis de desempenho, maiores percentuais de PHFT e menores valores de CgTT, foram: 1) para alvenaria: Alvenaria de 19 cm; 2) para WF: WF-D; 3) para CLT: CLT-5. Dentre esses, o melhor resultado geral foi encontrado no modelo de alvenaria. Dentre os sistemas em madeira, destacou-se o modelo em CLT de 5 camadas sem isolante térmico. Para este, o maior valor de PHFT foi de 95,5% (0,1% a menos em relação ao modelo de referência da NBR) e o menor valor de CgTT foi de 273 kWh/ano (31 kWh/ano a menos que o modelo de referência), ambos na UH sul-oeste.

Observou-se que para o clima de Brasília (DF) os modelos em alvenaria demonstraram um desempenho superior às opções em madeira, seja WF ou CLT, com ou sem isolante térmico. Em relação à orientação, a UH sul-oeste apresentou valores maiores de PHFT e menores de CgTT em todos os casos. Além disso, os valores de PHFT variaram entre 87,1% (CLT-3 e CLT-3-iso) e 98,4% (Alv-19cm) e os valores de CgTT variaram de 100 kWh/ano (Alv-19cm) a 781 kWh/ano (CLT-3-iso) para esse clima.

Tabela 10 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) para os casos base em alvenaria, WF e CLT para ZB4 (Brasília, DF)

Referência NBR e Alvenaria

MÍN.	MÍN.	MÍN.
92.6%	91.5%	90.6%
540	640	720
MÍN.	MÍN.	MÍN.
95.6%	94.6%	93.1%
304	385	501

ZB4 | Referência NBR15575

SUP.	SUP.	SUP.
98.0%	97.7%	97.9%
125	139	133
SUP.	SUP.	SUP.
98.4%	98.0%	98.1%
102	122	121

ZB4 | Alvenaria 19-14 cm

Wood Frame

MÍN.	MÍN.	MÍN.
91.4%	90.7%	91.2%
564	608	587
MÍN.	MÍN.	MÍN.
93.1%	93.0%	92.4%
444	458	500

ZB4 | WF-S (gesso simples)

MÍN.	MÍN.	MÍN.
88.5%	86.3%	89.2%
737	856	716
MÍN.	MÍN.	MÍN.
91.9%	90.1%	90.8%
507	616	601

ZB4 | WF-S + isolante

Cross Laminated Timber

MÍN.	MÍN.	MÍN.
89.6%	87.1%	90.4%
619	743	591
MÍN.	MÍN.	MÍN.
92.4%	90.8%	92.0%
453	538	491

ZB4 | CLT 3 camadas

MÍN.	MÍN.	MÍN.
89.6%	87.1%	90.4%
647	781	614
MÍN.	MÍN.	MÍN.
92.4%	90.8%	92.0%
461	553	505

ZB4 | CLT 3 cam. + isolante

SUP.	SUP.	SUP.
98.1%	97.8%	97.9%
117	133	132
SUP.	SUP.	SUP.
98.4%	98.1%	98.2%
100	118	116

ZB4 | Alvenaria 19 cm

MÍN.	INT.	INT.
93.2%	92.6%	92.9%
440	471	464
MÍN.	MÍN.	INT.
94.6%	94.4%	94.0%
341	357	387

ZB4 | WF-D (gesso duplo)

INT.	INT.	SUP.
94.2%	93.2%	94.2%
354	405	362
MÍN.	MÍN.	INT.
95.5%	94.9%	95.2%
273	303	304

ZB4 | CLT 5 camadas

SUP.	SUP.	SUP.
97.7%	97.4%	97.5%
142	160	159
SUP.	SUP.	SUP.
98.1%	97.8%	97.8%
117	138	140

ZB4 | Alvenaria 14 cm

MÍN.	MÍN.	MÍN.
90.6%	88.0%	91.2%
589	733	572
MÍN.	MÍN.	MÍN.
93.3%	91.5%	92.5%
412	519	477

ZB4 | WF-D + isolante

MÍN.	MÍN.	MÍN.
90.0%	87.5%	90.9%
612	745	578
MÍN.	MÍN.	MÍN.
92.8%	91.1%	92.2%
432	528	484

ZB4 | CLT 5 cam. + isolante

Fonte: elaborado pela autora (2023).

A Tabela 11 apresenta os resultados das simulações da Etapa 1 para a zona bioclimática 5, representada pela cidade de Niterói (RJ). Todas as UHs em alvenaria apresentaram níveis de desempenho intermediário. O desempenho foi mínimo para todas as UHs em WF-S-iso, WF-D-iso, CLT-3, CLT-3-iso e CLT-5-iso. Quatro UHs nos sistemas de WF-S, WF-D e CLT-5 alcançaram nível intermediário.

Os modelos que apresentaram maiores níveis de desempenho, maiores percentuais de PHFT e menores valores de CgTT, foram: 1) para alvenaria: Alvenaria de 19 cm; 2) para WF: WF-D; 3) para CLT: CLT-5. Dentre esses, o melhor resultado geral foi encontrado no modelo de alvenaria. Dentre os sistemas em madeira, destacou-se o modelo em WF com dupla camada de gesso acartonado. Para este, o maior valor de PHFT foi de 82,1% (1,5% a mais em relação ao modelo de referência da NBR) e o menor valor de CgTT foi de 1185 kWh/ano (303 kWh/ano a menos que o modelo de referência), ambos na UH sul.

Observou-se que para o clima de Niterói (RJ) os modelos em alvenaria demonstraram um desempenho superior às opções em madeira, seja WF ou CLT, com ou sem isolante térmico. Em relação à orientação, a UH sul apresentou valores maiores de PHFT e menores de CgTT em todos os casos. Além disso, os valores de PHFT

variaram entre 69,3% (CLT-5-iso) e 83,8% (Alv-19cm) e os valores de CgTT variaram de 1036 kWh/ano (Alv-19cm) a 2085 kWh/ano (Referência NBR) para esse clima.

Tabela 11 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) para os casos base em alvenaria, WF e CLT para ZB5 (Niterói, RJ)

Ref. NBR e Alvenaria			Wood Frame			Cross Laminated Timber		
MÍN.	MÍN.	MÍN.	INT.	INT.	INT.	MÍN.	MÍN.	MÍN.
74.6%	74.1%	72.5%	79.2%	78.7%	78.5%	71.6%	69.7%	70.8%
2014	2085	2203	1465	1502	1491	1756	1843	1787
MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	INT.	MÍN.	MÍN.	MÍN.
79.6%	80.6%	77.8%	81.7%	82.6%	81.6%	76.4%	76.9%	76.4%
1585	1488	1749	1295	1192	1302	1478	1383	1480
ZB5 Referência NBR15575			ZB5 WF-S (gesso simples)			ZB5 CLT 3 camadas		
INT.	INT.	INT.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.
81.4%	80.9%	80.6%	71.8%	70.6%	71.1%	71.6%	69.7%	70.8%
1203	1230	1241	1849	1902	1882	1802	1889	1845
INT.	INT.	INT.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.
83.0%	83.7%	82.6%	76.7%	77.2%	76.5%	76.4%	76.9%	76.4%
1120	1049	1149	1497	1402	1533	1481	1379	1499
ZB5 Alvenaria 19-14 cm			ZB5 WF-S + isolante			ZB5 CLT 3 cam. + isolante		
INT.	INT.	INT.	INT.	INT.	INT.	INT.	INT.	INT.
81.4%	81.0%	80.6%	78.6%	78.2%	77.9%	76.1%	75.4%	75.0%
1200	1218	1240	1454	1483	1486	1523	1554	1578
INT.	INT.	INT.	MÍN.	MÍN.	INT.	MÍN.	MÍN.	INT.
83.1%	83.8%	82.6%	81.4%	82.1%	81.2%	79.5%	80.5%	79.4%
1112	1036	1144	1281	1185	1294	1317	1211	1332
ZB5 Alvenaria 19 cm			ZB5 WF-D (gesso duplo)			ZB5 CLT 5 camadas		
INT.	INT.	INT.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.
80.3%	79.8%	79.4%	71.9%	70.2%	71.2%	71.5%	69.3%	70.7%
1256	1291	1295	1814	1887	1843	1788	1886	1831
INT.	INT.	INT.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.
82.3%	82.9%	81.6%	76.8%	77.2%	76.7%	76.5%	77.0%	76.4%
1154	1088	1197	1472	1387	1500	1464	1366	1485
ZB5 Alvenaria 14 cm			ZB5 WF-D + isolante			ZB5 CLT 5 cam. + isolante		

Fonte: elaborado pela autora (2023).

A Tabela 12 mostra os resultados das simulações da Etapa 1 para a zona bioclimática 6, representada pela cidade de Campo Grande (MS). Para este clima, todos os modelos apresentaram níveis mínimos de desempenho, com exceção das UHs norte-oeste e norte-leste da Alvenaria 19-14 cm e Alvenaria 19 cm, que obtiveram

desempenho intermediário. Duas UHs de WF-S ficaram com desempenho insuficiente, já que não atingiram o mínimo exigido na temperatura operativa máxima (Modelo referência: 32,5 °C; WF-S: 33,7°C).

Os modelos que apresentaram maiores níveis de desempenho, maiores percentuais de PHFT e menores valores de CgTT, foram: 1) para alvenaria: Alvenaria de 19 cm; 2) para WF: WF-D; 3) para CLT: CLT-5. Dentre esses, o melhor resultado geral foi encontrado no modelo de alvenaria. Dentre os sistemas em madeira, tanto o WF-D quanto CLT-5 obtiveram resultados similares, com leve destaque para o WF com dupla camada de gesso acartonado. Para este, o maior valor de PHFT foi de 72,5% (5,2% a mais em relação ao modelo de referência da NBR) e o menor valor de CgTT foi de 2188 kWh/ano (495 kWh/ano a menos que o modelo de referência), ambos na UH sul.

Observou-se para o clima de Campo Grande (MS) que todos os casos base atendem minimamente à norma, sendo que os modelos em alvenaria demonstraram melhor desempenho em relação às opções em madeira, seja WF ou CLT, com ou sem isolante térmico. Em relação à orientação das UHs, valores maiores de PHFT foram encontrados em seis casos para a UH sul-leste e em quatro casos para a UH nordeste. Valores menores de CgTT foram encontrados em dez dos doze casos para a UH sul-leste. Além disso, os valores de PHFT variaram entre 52,7% (CLT-5-iso) e 76,4% (Alv-19cm) e os valores de CgTT variaram de 1765 kWh/ano (Alv-19cm) a 3094 kWh/ano (CLT-3) para esse clima.

Tabela 12 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) para os casos base em alvenaria, WF e CLT para ZB6 (Campo Grande, MS)

Ref. NBR e Alvenaria			Wood Frame			Cross Laminated Timber		
MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.
65.7%	58.0%	64.6%	70.5%	64.7%	70.1%	68.6%	53.7%	68.2%
3075	3585	3217	2346	2692	2450	2438	3094	2434
MÍN.	MÍN.	MÍN.	INSUF.	INSUF.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.
67.6%	62.6%	67.3%	71.2%	67.4%	72.0%	68.7%	58.2%	70.2%
2683	3014	2814	2151	2391	2248	2286	2699	2193
ZB6 Referência NBR15575			ZB6 WF-S (gesso simples)			ZB6 CLT 3 camadas		

INT.	MÍN.	INT.
76.3%	67.3%	75.5%
1855	2352	1877
MÍN.	MÍN.	MÍN.
76.0%	69.7%	76.3%
1791	2129	1775

ZB6 | Alvenaria 19-14 cm

MÍN.	MÍN.	MÍN.
67.7%	55.7%	67.6%
2546	3078	2550
MÍN.	MÍN.	MÍN.
68.7%	59.6%	69.7%
2292	2654	2275

ZB6 | WF-S + isolante

MÍN.	MÍN.	MÍN.
68.6%	53.7%	68.2%
2384	3049	2410
MÍN.	MÍN.	MÍN.
68.7%	58.2%	70.2%
2208	2620	2154

ZB6 | CLT 3 cam. + isolante

INT.	MÍN.	INT.
76.4%	67.3%	75.8%
1840	2340	1867
MÍN.	MÍN.	MÍN.
76.2%	69.8%	76.4%
1772	2107	1765

ZB6 | Alvenaria 19 cm

MÍN.	MÍN.	MÍN.
71.1%	63.9%	70.7%
2352	2729	2348
MÍN.	MÍN.	MÍN.
71.5%	66.7%	72.5%
2188	2417	2133

ZB6 | WF-D (gesso duplo)

MÍN.	MÍN.	MÍN.
71.7%	59.7%	71.1%
2171	2757	2202
MÍN.	MÍN.	MÍN.
71.4%	63.6%	72.5%
2072	2400	2018

ZB6 | CLT 5 camadas

MÍN.	MÍN.	MÍN.
75.7%	65.9%	75.0%
1894	2420	1915
MÍN.	MÍN.	MÍN.
75.4%	68.3%	75.6%
1821	2193	1811

ZB6 | Alvenaria 14 cm

MÍN.	MÍN.	MÍN.
68.5%	54.5%	68.2%
2434	3071	2459
MÍN.	MÍN.	MÍN.
69.0%	58.8%	70.2%
2227	2648	2200

ZB6 | WF-D + isolante

MÍN.	MÍN.	MÍN.
68.8%	52.7%	68.4%
2343	3042	2367
MÍN.	MÍN.	MÍN.
68.8%	57.5%	70.2%
2171	2610	2122

ZB6 | CLT 5 cam. + isolante

Fonte: elaborado pela autora (2023).

A Tabela 13 apresenta os resultados das simulações da Etapa 1 para a zona bioclimática 7, representada pela cidade de Teresina (PI). Observou-se que os casos em alvenaria obtiveram desempenho superior e intermediário, enquanto os modelos em WF e CLT atingiram níveis intermediários e mínimos de desempenho. Todas as UHs para os casos Alv-19-14cm e Alv-19cm e metade das UHs para Alv-14cm obtiveram desempenho superior.

Os modelos que apresentaram maiores níveis de desempenho, maiores percentuais de PHFT e menores valores de CgTT, foram: 1) para alvenaria: Alvenaria de 19 cm; 2) para WF: WF-D; 3) para CLT: CLT-5. Dentre esses, o melhor resultado geral foi encontrado no modelo de alvenaria. Dentre os sistemas em madeira, tanto o WF-D quanto CLT-5 obtiveram resultados similares, com leve destaque para o CLT de cinco camadas sem isolante. Para este, o maior valor de PHFT foi de 70,5% na UH sul (9,3% a mais em relação ao modelo de referência da NBR) e o menor valor de CgTT foi de 3234 kWh/ano na UH sul-oeste (2135 kWh/ano a menos que o modelo de referência).

Observou-se que para o clima de Teresina (PI) os modelos em alvenaria demonstraram um desempenho superior às opções em madeira, seja WF ou CLT, com ou sem isolante térmico, o que reforçou a hipótese deste trabalho e indicou a necessidade de adequar termicamente esses modelos. Em relação à orientação das UHs, valores maiores de PHFT foram encontrados em sete casos para a UH sul-oeste e em quatro casos para a UH sul. Valores menores de CgTT foram encontrados em onze dos doze casos para a UH sul. Além disso, os valores de PHFT variaram entre 51,1% (Referência NBR) e 77,7% (Alv-19cm) e os valores de CgTT variaram de 2572 kWh/ano (Alv-19cm) a 6517 kWh/ano (Referência NBR) para esse clima.

Tabela 13 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) para os casos base em alvenaria, WF e CLT para ZB7 (Teresina, PI)

Ref. NBR e Alvenaria			Wood Frame			Cross Laminated Timber		
MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	INT.	MÍN.	MÍN.	MÍN.
56.8%	56.6%	51.1%	69.1%	68.3%	67.9%	65.0%	62.1%	62.8%
5998	6301	6517	3936	4149	3925	3977	4316	4033
MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	INT.	MÍN.	MÍN.	MÍN.
59.6%	61.2%	52.8%	69.4%	69.7%	68.5%	65.1%	64.5%	63.3%
5369	5585	6127	3797	3922	3778	3843	4009	3883
ZB7 Referência NBR15575			ZB7 WF-S (gesso simples)			ZB7 CLT 3 camadas		
SUP.	SUP.	SUP.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.
76.7%	75.5%	74.1%	63.5%	61.1%	62.0%	65.0%	62.1%	62.8%
2815	3046	2974	4007	4228	4090	3686	3919	3819
SUP.	SUP.	SUP.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.
77.4%	77.2%	74.6%	64.3%	63.7%	62.3%	65.1%	64.5%	63.3%
2636	2790	2831	3782	3915	3946	3534	3628	3668
ZB7 Alvenaria 19-14 cm			ZB7 WF-S + isolante			ZB7 CLT 3 cam. + isolante		
SUP.	SUP.	SUP.	INT.	MÍN.	INT.	INT.	MÍN.	INT.
77.0%	75.9%	74.4%	69.4%	68.5%	68.2%	69.6%	67.8%	67.0%
2760	2957	2936	3759	3965	3784	3402	3617	3533
SUP.	SUP.	SUP.	MÍN.	MÍN.	INT.	MÍN.	MÍN.	INT.
77.7%	77.5%	74.7%	70.0%	70.4%	68.7%	70.0%	70.5%	68.0%
2572	2716	2810	3579	3689	3634	3234	3270	3349
ZB7 Alvenaria 19 cm			ZB7 WF-D (gesso duplo)			ZB7 CLT 5 camadas		

SUP.	INT.	SUP.
75.3%	74.1%	72.5%
2938	3164	3089
INT.	INT.	SUP.
75.9%	75.7%	73.3%
2764	2925	2925

ZB7 | Alvenaria 14 cm

MÍN.	MÍN.	MÍN.
63.8%	60.9%	61.7%
3875	4126	4007
MÍN.	MÍN.	MÍN.
64.7%	63.9%	62.3%
3632	3780	3843

ZB7 | WF-D + isolante

MÍN.	MÍN.	MÍN.
65.3%	62.2%	62.9%
3603	3828	3746
MÍN.	MÍN.	MÍN.
65.2%	64.8%	63.2%
3467	3541	3612

ZB7 | CLT 5 cam. + isolante

Fonte: elaborado pela autora (2023).

A Tabela 14 apresenta os resultados das simulações da Etapa 1 para a zona bioclimática 8, representada pela cidade de Belém (PA). Observou-se que todas as UHs em alvenaria apresentaram níveis de desempenho superior, enquanto os modelos em WF e CLT atingiram níveis intermediários e mínimos de desempenho. Com exceção da UH norte-oeste, as demais UHs dos modelos WF-S, WF-D e CLT-5 alcançaram nível intermediário de desempenho.

Os modelos que apresentaram maiores níveis de desempenho, maiores percentuais de PHFT e menores valores de CgTT, foram: 1) para alvenaria: Alvenaria de 19 cm; 2) para WF: WF-D; 3) para CLT: CLT-5. Dentre esses, o melhor resultado geral foi encontrado no modelo de alvenaria. Dentre os sistemas em madeira, tanto o WF-D quanto CLT-5 obtiveram resultados similares, com leve destaque para o CLT de cinco camadas sem isolante. Para este, o maior valor de PHFT foi de 80,6% (6,5% a mais em relação ao modelo de referência da NBR) e o menor valor de CgTT foi de 2352 kWh/ano (1623 kWh/ano a menos que o modelo de referência), ambos na UH sul.

Observou-se que para o clima de Belém (PA) os modelos em alvenaria demonstraram um desempenho superior às opções em madeira, seja WF ou CLT, com ou sem isolante térmico. Em relação à orientação das UHs, valores maiores de PHFT foram encontrados em todos para a UH sul. Valores menores de CgTT foram encontrados em oito dos doze casos para a UH sul e em quatro casos para a UH sul-oeste. Além disso, os valores de PHFT variaram entre 65,7% (Referência NBR) e 89,6% (Alv-19cm) e os valores de CgTT variaram de 1391 kWh/ano (Alv-19cm) a 4873 kWh/ano (Referência NBR) para esse clima.

Tabela 14 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) para os casos base em alvenaria, WF e CLT para ZB8 (Belém, PA)

Ref. NBR e Alvenaria			Wood Frame			Cross Laminated Timber		
MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	INT.	INT.	MÍN.	MÍN.	MÍN.
69.3%	73.3%	65.7%	76.9%	78.7%	76.6%	71.4%	73.2%	71.6%
4396	4134	4873	3063	2951	3057	3318	3219	3267
MÍN.	MÍN.	MÍN.	INT.	INT.	INT.	MÍN.	MÍN.	MÍN.
71.6%	74.1%	66.9%	78.0%	78.8%	77.3%	72.7%	73.4%	72.6%
3950	3975	4650	2879	2907	2945	3141	3173	3142
ZB8 Referência NBR15575			ZB8 WF-S (gesso simples)			ZB8 CLT 3 camadas		
SUP.	SUP.	SUP.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.
86.7%	88.6%	85.8%	69.6%	71.3%	70.1%	71.4%	73.2%	71.6%
1714	1550	1806	3430	3297	3417	3126	2977	3130
SUP.	SUP.	SUP.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	INT.	MÍN.	MÍN.
88.4%	89.2%	86.5%	71.4%	71.7%	71.0%	72.7%	73.4%	72.6%
1480	1450	1690	3181	3239	3294	2944	2938	3006
ZB8 Alvenaria 19-14 cm			ZB8 WF-S + isolante			ZB8 CLT 3 cam. + isolante		
SUP.	SUP.	SUP.	MÍN.	INT.	INT.	MÍN.	INT.	INT.
87.0%	88.9%	86.0%	77.7%	79.9%	77.6%	77.9%	80.2%	77.5%
1679	1491	1783	2867	2702	2857	2599	2419	2646
SUP.	SUP.	SUP.	INT.	INT.	INT.	INT.	INT.	INT.
88.8%	89.6%	86.9%	79.0%	80.0%	78.4%	79.0%	80.6%	78.1%
1432	1391	1653	2662	2656	2741	2445	2352	2548
ZB8 Alvenaria 19 cm			ZB8 WF-D (gesso duplo)			ZB8 CLT 5 camadas		
SUP.	SUP.	SUP.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	INT.	MÍN.
85.1%	87.2%	84.0%	70.2%	72.2%	70.4%	72.0%	73.8%	72.1%
1901	1711	2005	3289	3120	3302	3035	2879	3051
SUP.	SUP.	SUP.	INT.	MÍN.	MÍN.	INT.	MÍN.	MÍN.
86.8%	87.6%	84.7%	72.4%	72.7%	71.4%	73.1%	73.9%	72.9%
1661	1629	1889	3015	3058	3174	2866	2855	2939
ZB8 Alvenaria 14 cm			ZB8 WF-D + isolante			ZB8 CLT 5 cam. + isolante		

Fonte: elaborado pela autora (2023).

O Quadro 5 resume os principais resultados da Etapa 1 para as oito zonas bioclimáticas. Para as zonas 1 e 2, que possuem estações frias, os modelos em madeira industrializada com isolante térmico obtiveram desempenho superior aos de alvenaria, ou seja, há vantagem no uso de sistemas em madeira em relação à alvenaria no que concerne ao desempenho térmico para essas duas zonas. Já para as demais zonas (ZBs 3, 4, 5, 6, 7 e 8) os modelos em alvenaria demonstraram um desempenho superior às opções em madeira (tanto WF como CLT, com ou sem

isolante térmico), o que corroborou para a hipótese deste trabalho e mostrou a necessidade de adequar termicamente esses modelos para esses climas. A exceção de uma UH da ZB4 (UH norte-leste, CLT-5), não se obteve nível superior de desempenho com os sistemas de madeira para as ZBs 3 a 8.

Quadro 5 – Resumo dos resultados da Etapa 1: seleção de casos base

Zona	Cidade	Etapa 1: Seleção de casos base
ZB 1	Curitiba (PR)	CLT-5-iso > WF-D-iso > Alvenaria 14 cm
ZB 2	Santa Maria (RS)	CLT-5-iso > WF-D-iso > Alvenaria 14 cm
ZB 3	Campinas (SP)	Alvenaria; 19 cm > CLT-5 > WF-D
ZB 4	Brasília (DF)	Alvenaria 19 cm > CLT-5 > WF-D
ZB 5	Niterói (RJ)	Alvenaria 19 cm > WF-D > CLT-5
ZB 6	Campo Grande (MS)	Alvenaria 19 cm > WF-D > CLT-5
ZB 7	Teresina (PI)	Alvenaria 19 cm > CLT-5 > WF-D
ZB 8	Belém (PA)	Alvenaria 19 cm > CLT-5 > WF-D

Fonte: elaborado pela autora (2023).

O objetivo da Etapa 1 foi fazer um diagnóstico do desempenho térmico dos sistemas em madeira que correspondessem ao padrão construtivo encontrado no Brasil em relação à alvenaria para cada ZB. Nas etapas seguintes, foram utilizados os casos de WF e CLT selecionados na Etapa 1, conforme o Quadro 5, para partir de modelos minimamente adequados para cada clima, antes se acrescentar as estratégias de incremento de inércia térmica.

4.2 Etapa 2 – Incremento de inércia térmica

Na Etapa 2 fez-se o incremento de inércia térmica nos modelos bases de WF e CLT selecionados na Etapa 1 de duas maneiras: 1) incorporação de mantas de PCM, que acrescentam inércia térmica sem alterar de modo considerável a massa da edificação; 2) uso de sistemas híbridos, por meio elementos de concreto em lajes mistas e em torres de sanitários.

4.2.1 Etapa 2.1 Adição de PCM

A Etapa 2.1 foi dividida em duas: 2.1.1) incorporação de PCM nas paredes e forro com vários pontos de fusão para se encontrar o ponto de fusão ideal para o clima simulado;

2.1.2) adição de PCM apenas nas paredes ou apenas no forro para comparar o impacto da quantidade de material e da localização nos resultados.

O ponto de fusão foi testado a partir da TBS_m de cada cidade, com incrementos de 2°C até chegar no ponto de fusão ideal. A escolha dessa variável está diretamente relacionada ao clima, uma vez que o material depende da temperatura do ambiente para que ocorra a mudança de fase. Quanto o ponto de fusão ideal foi encontrado na primeira temperatura simulada (o caso da ZB3), também foi simulado um ponto de fusão inferior à TBS_m . A Tabela 15 relaciona as cidades aos pontos de fusão simulados e assinala, em negrito, os melhores resultados.

Tabela 15 – Pontos de fusão do PCM simulados por zona bioclimática

Zona	Cidade	TBS_m^*	Pontos de fusão do PCM simulados (°C)						
ZB 1	Curitiba (PR)	17.4	19	21	23	25	-	-	-
ZB 2	Santa Maria (RS)	19.0	19	21	23	25	27	-	-
ZB 3	Campinas (SP)	22.0	-	21	23	25	27	-	-
ZB 4	Brasília (DF)	21.1	-	21	23	25	-	-	-
ZB 5	Niterói (RJ)	21.9	-	21	23	25	27	-	-
ZB 6	Campo Grande (MS)	23.4	-	-	23	25	27	-	-
ZB 7	Teresina (PI)	27.7	-	-	-	-	27	29	31
ZB 8	Belém (PA)	27.2	-	-	-	-	27	29	31

* TBS_m Média anual da temperatura externa de bulbo seco.

Em negrito: pontos de fusão mais adequados por clima.

Fonte: elaborado pela autora (2023).

A Tabela 16 exemplifica os dados completos da Etapa 2.1.1 para a cidade de Campinas (SP), (ZB3), contendo os casos base da etapa anterior e os resultados com a adição de PCM nos diferentes pontos de fusão simulados para essa cidade. Notou-se uma mudança significativa nos níveis de desempenho ao se acrescentar o PCM com ponto de fusão de 21°C (PCM21). Ao se testar os demais pontos de fusão observou-se um pico de melhora nos resultados para o PCM23 no WF e para o PCM25 no CLT. Após um certo ponto, o material voltou a se comportar como outro qualquer, sem ocorrer as mudanças de fase e, portanto, sem fazer a troca térmica por calor latente. O funcionamento do sistema voltou a ser similar ao caso base, como

ocorre para o PCM27 em Campinas (SP). Esse padrão se repetiu nas outras cidades e assim foi possível definir o ponto de fusão a ser usado.

Para simplificar a quantidade de informações no texto, apenas os pontos de fusão mais adequados por caso foram apresentados nas tabelas seguintes, acrescidos das simulações da Etapa 2.1.2 (incorporação de PCM apenas nas paredes e de PCM apenas no forro).

Tabela 16 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) pela adição de PCM nas paredes e forro – pontos de fusão de 21, 23, 25 e 27 °C – para ZB3 (Campinas, SP)

	Wood Frame			Cross Laminated Timber		
Caso Base (Etapa 1)	INT.	INT.	INT.	INT.	INT.	INT.
	78.6%	76.4%	80.6%	79.4%	76.4%	81.8%
	1687	1821	1587	1543	1702	1429
	MÍN.	MÍN.	INT.	INT.	INT.	INT.
	81.7%	79.7%	81.9%	83.3%	80.7%	83.3%
	1439	1550	1444	1262	1404	1290
	ZB3 WF-D (gesso duplo)			ZB3 CLT 5 camadas		
Adição de PCM nas paredes e forro. Ponto de fusão 21 °C.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	89.8%	87.9%	90.9%	87.2%	84.3%	89.1%
	785	885	731	942	1083	850
	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	91.8%	89.7%	91.6%	90.3%	87.1%	89.5%
	629	761	663	721	907	792
	ZB3 WF-D PCM21			ZB3 CLT-5 PCM21		
Adição de PCM nas paredes e forro. Ponto de fusão 23 °C.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	97.3%	96.7%	97.9%	96.0%	94.3%	97.0%
	163	198	134	258	345	201
	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	97.8%	96.9%	97.9%	97.0%	95.5%	97.0%
	134	183	132	188	270	195
	ZB3 WF-D PCM23			ZB3 CLT-5 PCM23		
Adição de PCM nas paredes e forro. Ponto de fusão 25 °C.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	96.7%	96.2%	97.5%	97.1%	96.0%	98.1%
	245	260	188	201	249	140
	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	97.6%	96.8%	97.7%	98.1%	96.7%	98.2%
	164	214	164	128	206	127
	ZB3 WF-D PCM25			ZB3 CLT-5 PCM25		

Adição de PCM nas paredes e forro. Ponto de fusão 27 °C.	INT.	INT.	INT.	INT.	INT.	INT.
	81.2%	79.5%	82.2%	81.5%	79.6%	82.6%
	1552	1678	1512	1526	1654	1470
	MÍN.	MÍN.	INT.	MÍN.	MÍN.	INT.
82.6%	81.4%	82.7%	83.3%	82.0%	83.3%	
	1417	1506	1423	1370	1476	1386
	ZB3 WF-D PCM27			ZB3 CLT-5 PCM27		

Fonte: elaborado pela autora (2023).

Na Tabela 17, para a cidade de Curitiba (PR), observou-se que os níveis de desempenho para os casos base já estavam elevados, o que não justificaria o uso de PCM ou de qualquer alternativa para melhorar esses modelos. Com a adição de PCM21 para WF e PCM23 para CLT foi possível atingir 100% de PHFT e zero de carga térmica total. O mesmo ocorreu retirando o PCM do forro, ou seja, instalando-o apenas nas paredes. A diferença foi que as opções nas paredes e forro obtiveram temperaturas operativas máximas menores e temperaturas mínimas maiores em comparação aos modelos com PCM apenas nas paredes. A aplicação de PCM apenas no forro rendeu resultados acima de 99% para PHFT e menores que 6 kWh/ano para o CgTT.

Tabela 17 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) pela adição de PCM com pontos de fusão mais adequados por caso para ZB1 (Curitiba, PR)

Caso Base (Etapa 1)	Wood Frame			Cross Laminated Timber		
	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	97.6%	96.9%	97.5%	98.5%	97.7%	98.3%
	96	119	120	90	124	112
	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	96.9%	96.2%	97.2%	98.2%	97.5%	98.3%
	86	98	104	81	95	93
	ZB1 WF-D + isolante			ZB1 CLT 5 cam. + isolante		
Adição de PCM nas paredes e forro.	<i>Temp. máx. menor e mín. maior</i>			<i>Temp. máx. menor e mín. maior</i>		
	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
	0	0	0	0	0	0
	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
	0	0	0	0	0	0
	ZB1 WF-D-iso PCM21			ZB1 CLT-5-iso PCM23		

Adição de PCM nas paredes.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
	0	0	0	0	0	0
	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
Adição de PCM no forro.	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
	0	0	0	0	0	0
	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
Adição de PCM no forro.	99.9%	99.8%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
	0	3	0	0	0	0
	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	99.5%	99.1%	99.7%	99.9%	99.8%	100.0%
Adição de PCM no forro.	3	5	1	0	0	0
	ZB1 WF-D-iso PCM21 parede			ZB1 CLT-5-iso PCM23 parede		
	ZB1 WF-D-iso PCM23 forro			ZB1 CLT-5-iso PCM23 forro		

Fonte: elaborado pela autora (2023).

De forma similar a Curitiba (PR), os resultados para Santa Maria (RS), (ZB2) já apresentavam níveis superiores de desempenho para os casos base, à exceção da UH norte-oeste, de nível intermediário (Tabela 18). Entretanto, apesar de mantido o nível de desempenho, houve uma melhora significativa nos valores de PHFT e CgTT. Em média, 14,3% a mais de PHFT e 849,3 kWh/ano a menos de CgTT, o que correspondeu a uma redução de 69,5% na carga térmica. Os valores para as simulações apenas nas paredes e apenas no forro ficaram entre os casos base e o PCM em todo o ambiente.

Tabela 18 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) pela adição de PCM com pontos de fusão mais adequados por caso para ZB2 (Santa Maria, RS)

	Wood Frame			Cross Laminated Timber		
	INT.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
Caso Base (Etapa 1)	77.6%	75.6%	79.2%	79.1%	77.0%	80.7%
	1275	1335	1244	1227	1295	1195
	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	76.2%	73.4%	77.6%	78.0%	75.3%	79.3%
Caso Base (Etapa 1)	1189	1268	1191	1126	1190	1129
	ZB2 WF-D + isolante			ZB2 CLT 5 cam. + isolante		

<p>Adição de PCM nas paredes e forro.</p>	<table border="1"> <thead> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>92.2%</td><td>92.2%</td><td>93.4%</td></tr> <tr><td>386</td><td>402</td><td>330</td></tr> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> <tr><td>89.9%</td><td>88.4%</td><td>91.3%</td></tr> <tr><td>375</td><td>420</td><td>337</td></tr> </tbody> </table> <p>ZB2 WF-D-iso PCM25</p>	SUP.	SUP.	SUP.	92.2%	92.2%	93.4%	386	402	330	SUP.	SUP.	SUP.	89.9%	88.4%	91.3%	375	420	337	<table border="1"> <thead> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>93.1%</td><td>92.4%</td><td>94.3%</td></tr> <tr><td>384</td><td>425</td><td>318</td></tr> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> <tr><td>91.1%</td><td>89.3%</td><td>92.5%</td></tr> <tr><td>365</td><td>412</td><td>318</td></tr> </tbody> </table> <p>ZB2 CLT-5-iso PCM25</p>	SUP.	SUP.	SUP.	93.1%	92.4%	94.3%	384	425	318	SUP.	SUP.	SUP.	91.1%	89.3%	92.5%	365	412	318
SUP.	SUP.	SUP.																																				
92.2%	92.2%	93.4%																																				
386	402	330																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
89.9%	88.4%	91.3%																																				
375	420	337																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
93.1%	92.4%	94.3%																																				
384	425	318																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
91.1%	89.3%	92.5%																																				
365	412	318																																				
<p>Adição de PCM nas paredes.</p>	<table border="1"> <thead> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>88.7%</td><td>88.1%</td><td>89.9%</td></tr> <tr><td>599</td><td>607</td><td>553</td></tr> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> <tr><td>87.1%</td><td>85.4%</td><td>88.2%</td></tr> <tr><td>553</td><td>605</td><td>539</td></tr> </tbody> </table> <p>ZB2 WF-D-iso PCM25 parede</p>	SUP.	SUP.	SUP.	88.7%	88.1%	89.9%	599	607	553	SUP.	SUP.	SUP.	87.1%	85.4%	88.2%	553	605	539	<table border="1"> <thead> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>89.9%</td><td>88.2%</td><td>91.7%</td></tr> <tr><td>569</td><td>630</td><td>497</td></tr> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> <tr><td>88.4%</td><td>85.9%</td><td>89.8%</td></tr> <tr><td>526</td><td>602</td><td>492</td></tr> </tbody> </table> <p>ZB2 CLT-5-iso PCM25 parede</p>	SUP.	SUP.	SUP.	89.9%	88.2%	91.7%	569	630	497	SUP.	SUP.	SUP.	88.4%	85.9%	89.8%	526	602	492
SUP.	SUP.	SUP.																																				
88.7%	88.1%	89.9%																																				
599	607	553																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
87.1%	85.4%	88.2%																																				
553	605	539																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
89.9%	88.2%	91.7%																																				
569	630	497																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
88.4%	85.9%	89.8%																																				
526	602	492																																				
<p>Adição de PCM no forro.</p>	<table border="1"> <thead> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>83.2%</td><td>81.3%</td><td>85.0%</td></tr> <tr><td>889</td><td>949</td><td>840</td></tr> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> <tr><td>81.5%</td><td>79.1%</td><td>83.3%</td></tr> <tr><td>847</td><td>921</td><td>812</td></tr> </tbody> </table> <p>ZB2 WF-D-iso PCM25 forro</p>	SUP.	SUP.	SUP.	83.2%	81.3%	85.0%	889	949	840	SUP.	SUP.	SUP.	81.5%	79.1%	83.3%	847	921	812	<table border="1"> <thead> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>83.7%</td><td>82.6%</td><td>86.0%</td></tr> <tr><td>884</td><td>937</td><td>827</td></tr> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> <tr><td>82.4%</td><td>80.2%</td><td>84.5%</td></tr> <tr><td>827</td><td>889</td><td>783</td></tr> </tbody> </table> <p>ZB2 CLT-5-iso PCM25 forro</p>	SUP.	SUP.	SUP.	83.7%	82.6%	86.0%	884	937	827	SUP.	SUP.	SUP.	82.4%	80.2%	84.5%	827	889	783
SUP.	SUP.	SUP.																																				
83.2%	81.3%	85.0%																																				
889	949	840																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
81.5%	79.1%	83.3%																																				
847	921	812																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
83.7%	82.6%	86.0%																																				
884	937	827																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
82.4%	80.2%	84.5%																																				
827	889	783																																				

Fonte: elaborado pela autora (2023).

A Tabela 19 apresenta os dados da Etapa 2.1 para a cidade de Campinas (SP), (ZB3). O nível de desempenho passou de mínimo e intermediário dos casos base para superior em todos os modelos com PCM. O PHFT médio do *wood frame* subiu de 79,8% (WF-D) para 97,4% (WF-D PCM23) e o CgTT médio decresceu de 1588,1 kWh/ano para 157,4 kWh/ano. De igual modo, o PHFT médio do CLT mudou de 80,8% (CLT-5) para 97,4% (CLT-5 PCM25) e o CgTT médio de 1438,3 kWh/ano para 174,9 kWh/ano. O modelo com PCM apenas na parede aproximou-se mais dos resultados do PCM em todo o ambiente do que o modelo com PCM apenas no forro.

Tabela 19 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) pela adição de PCM com pontos de fusão mais adequados por caso para ZB3 (Campinas, SP)

	Wood Frame			Cross Laminated Timber		
Caso Base (Etapa 1)	INT.	INT.	INT.	INT.	INT.	INT.
	78.6%	76.4%	80.6%	79.4%	76.4%	81.8%
	1687	1821	1587	1543	1702	1429
	MÍN.	MÍN.	INT.	INT.	INT.	INT.
	81.7%	79.7%	81.9%	83.3%	80.7%	83.3%
	1439	1550	1444	1262	1404	1290
	ZB3 WF-D (gesso duplo)			ZB3 CLT 5 camadas		
Adição de PCM nas paredes e forro.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	97.3%	96.7%	97.9%	97.1%	96.0%	98.1%
	163	198	134	201	249	140
	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	97.8%	96.9%	97.9%	98.1%	96.7%	98.2%
	134	183	132	128	206	127
	ZB3 WF-D PCM23			ZB3 CLT-5 PCM25		
Adição de PCM nas paredes.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	95.2%	94.3%	96.1%	93.1%	92.7%	94.7%
	326	370	279	497	508	406
	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	96.5%	95.4%	96.3%	95.3%	94.1%	95.6%
	234	301	258	335	409	333
	ZB3 WF-D PCM23 parede			ZB3 CLT-5 PCM25 parede		
Adição de PCM no forro.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	87.8%	85.8%	89.4%	86.1%	83.5%	87.7%
	943	1066	850	1038	1178	952
	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	89.7%	87.9%	89.8%	88.6%	86.8%	88.9%
	790	902	797	860	963	850
	ZB3 WF-D PCM23 forro			ZB3 CLT-5 PCM25 forro		

Fonte: elaborado pela autora (2023)

A Tabela 20 mostra os dados da Etapa 2.1 para a cidade de Brasília (DF), (ZB4). O nível de desempenho passou de mínimo, intermediário e superior dos casos base para superior em todos os modelos com PCM. O PHFT médio do *wood frame* subiu de 93,6% (WF-D) para 100,0% (WF-D PCM23) e o CgTT médio decresceu de 410,0 kWh/ano para 0,0 kWh/ano. De igual modo, o PHFT médio do CLT mudou de 94,5,8% (CLT-5) para 100,0% (CLT-5 PCM25) e o CgTT médio de 333,5 kWh/ano para 0,0

kWh/ano. O modelo com PCM apenas na parede aproximou-se mais dos resultados do PCM em todo o ambiente do que o modelo com PCM apenas no forro, mesmo assim, atingiu níveis de PHFT maiores que 98% e CgTT menores que 122 kWh/ano.

Tabela 20 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) pela adição de PCM com pontos de fusão mais adequados por caso para ZB4 (Brasília, DF)

	Wood Frame			Cross Laminated Timber		
Caso Base (Etapa 1)	MÍN.	INT.	INT.	INT.	INT.	SUP.
	93.2%	92.6%	92.9%	94.2%	93.2%	94.2%
	440	471	464	354	405	362
	MÍN.	MÍN.	INT.	MÍN.	MÍN.	INT.
	94.6%	94.4%	94.0%	95.5%	94.9%	95.2%
	341	357	387	273	303	304
	ZB4 WF-D (gesso duplo)			ZB4 CLT 5 camadas		
Adição de PCM nas paredes e forro.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
	0	0	0	0	0	0
	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
	0	0	0	0	0	0
	ZB4 WF-D PCM23			ZB4 CLT-5 PCM23		
Adição de PCM nas paredes.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	99.9%	99.9%	99.9%	99.9%	99.8%	100.0%
	3	4	3	3	8	1
	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
	0	1	1	0	0	1
	ZB4 WF-D PCM 23 parede			ZB4 CLT-5 PCM23 parede		
Adição de PCM no forro.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	98.8%	98.6%	98.8%	98.5%	97.8%	98.4%
	68	82	71	89	121	96
	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	99.0%	98.7%	98.9%	98.7%	98.1%	98.6%
	61	73	67	76	109	85
	ZB4 WF-D PCM23 forro			ZB4 CLT-5 PCM23 forro		

Fonte: elaborado pela autora (2023).

Os resultados da Etapa 2.1 para a zona bioclimática 5, representada pela cidade de Niterói (RJ) mostraram uma mudança no nível de desempenho com a utilização de PCM (Tabela 21). Enquanto os modelos bases de WF e CLT obtiveram níveis mínimo

e intermediário, a adição de PCM nas paredes e forro e de PCM apenas nas paredes renderam níveis superiores. A aplicação do PCM no forro apresentou tanto níveis superiores como intermediários, a depender da UH. O PHFT médio dos modelos subiu de 79,9% (WF-D) e 77,6% (CLT-5) para 91,5% (WF-D PCM25) e 88,8% (CLT-5 PCM25). O CgTT médio decresceu de 1364,0 kWh/ano (WF-D) e 1419,2 kWh/ano (CLT-5) para 502,6 kWh/ano (WF-D PCM25) e 598,7 kWh/ano (CLT-5 PCM25).

Tabela 21 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) pela adição de PCM com pontos de fusão mais adequados por caso para ZB5 (Niterói, RJ)

	Wood Frame			Cross Laminated Timber		
Caso Base (Etapa 1)	INT.	INT.	INT.	INT.	INT.	INT.
	78.6%	78.2%	77.9%	76.1%	75.4%	75.0%
	1454	1483	1486	1523	1554	1578
	MÍN.	MÍN.	INT.	MÍN.	MÍN.	INT.
	81.4%	82.1%	81.2%	79.5%	80.5%	79.4%
	1281	1185	1294	1317	1211	1332
	ZB5 WF-D (gesso duplo)			ZB5 CLT 5 camadas		
Adição de PCM nas paredes e forro.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	91.3%	91.8%	90.7%	88.9%	88.5%	88.3%
	505	486	525	587	598	611
	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	91.6%	92.3%	91.5%	88.9%	89.3%	88.7%
	512	468	520	608	569	619
	ZB5 WF-D PCM25			ZB5 CLT-5 PCM25		
Adição de PCM nas paredes.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	88.6%	88.6%	87.9%	86.8%	86.4%	86.0%
	677	665	707	724	723	753
	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	89.5%	89.7%	89.1%	87.2%	87.5%	87.0%
	640	608	660	712	672	726
	ZB5 WF-D PCM25 parede			ZB5 CLT-5 PCM25 parede		
Adição de PCM no forro.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	84.8%	84.4%	84.2%	81.7%	81.0%	80.8%
	943	972	964	1066	1103	1105
	INT.	INT.	SUP.	INT.	INT.	INT.
	85.9%	86.5%	85.8%	83.5%	84.1%	83.3%
	892	824	885	980	909	985
	ZB5 WF-D PCM25 forro			ZB5 CLT-5 PCM25 forro		

Fonte: elaborado pela autora (2023).

Para a zona bioclimática 6, Campo Grande (MS), a adição de PCM impactou significativamente os resultados, mudando o nível de desempenho de mínimo para superior (Tabela 22). O PHFT médio do WF-D e do CLT-5 passaram de 69,4% e 68,3% sem PCM para 92,9% e 93,5% com PCM, respectivamente. Houve redução no CgTT médio do WF-D e CLT-5 de 2361,1 kWh/ano e 2269,9 kWh/ano para 463,0 kWh/ano e 415,2 kWh/ano, respectivamente. Diferentemente das zonas bioclimáticas anteriores, observou-se uma discrepância maior nos resultados do ambiente com PCM e do PCM quando aplicado apenas nas paredes ou apenas no forro. Por exemplo, para o WF-D teve-se a diminuição de 5,7% no PHFT médio para o caso de PCM nas paredes e de 13,8% para PCM no forro, em comparação com PCM aplicado nas paredes e no forro. Isso fez com que duas UHs do CLT-5 PCM25 forro obtivessem nível mínimo de desempenho. O mesmo padrão ocorreu para os valores de CgTT.

Tabela 22 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) pela adição de PCM com pontos de fusão mais adequados por caso para ZB6 (Campo Grande, MS)

	Wood Frame			Cross Laminated Timber		
Caso Base (Etapa 1)	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.
	71.1%	63.9%	70.7%	71.7%	59.7%	71.1%
	2352	2729	2348	2171	2757	2202
	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.
	71.5%	66.7%	72.5%	71.4%	63.6%	72.5%
	2188	2417	2133	2072	2400	2018
	ZB6 WF-D (gesso duplo)			ZB6 CLT 5 camadas		
Adição de PCM nas paredes e forro.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	93.6%	90.7%	93.8%	95.0%	90.3%	94.9%
	433	593	411	337	599	333
	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	93.7%	91.7%	94.0%	94.6%	91.1%	95.1%
	420	523	397	357	543	323
	ZB6 WF-D PCM25			ZB6 CLT-5 PCM25		
Adição de PCM nas paredes.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	87.5%	84.6%	87.2%	90.1%	84.3%	89.8%
	877	1026	889	682	996	691
	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	88.6%	86.6%	88.6%	90.1%	86.2%	90.8%
	788	891	793	680	870	637
	ZB6 WF-D PCM25 parede			ZB6 CLT-5 PCM25 parede		

Adição de PCM no forro.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	MÍN.	SUP.
	80.1%	75.3%	80.0%	79.9%	70.2%	79.7%
	1520	1800	1495	1462	1948	1459
	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	MÍN.	SUP.
80.6%	77.2%	81.6%	80.1%	73.5%	81.0%	
1419	1608	1347	1386	1707	1340	
	ZB6 WF-D PCM25 forro			ZB6 CLT-5 PCM25 forro		

Fonte: elaborado pela autora (2023).

A Tabela 23 apresenta os dados da Etapa 2.1 para a cidade de Teresina (PI), (ZB7). O nível de desempenho passou de mínimo e intermediário dos casos base para superior em todos os modelos com PCM. O PHFT médio do *wood frame* subiu de 69,2% (WF-D) para 98,8% (WF-D PCM29) e o CgTT médio decresceu de 3735,0 kWh/ano para 152,6 kWh/ano. De forma similar, o PHFT médio do CLT mudou de 68,8% (CLT-5) para 99,4% (CLT-5 PCM29) e o CgTT médio de 3400,6 kWh/ano para 71,7 kWh/ano. O modelo com PCM apenas na parede aproximou-se mais dos resultados do PCM em todo o ambiente do que o modelo com PCM apenas no forro.

Tabela 23 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) pela adição de PCM com pontos de fusão mais adequados por caso para ZB7 (Teresina, PI)

Caso Base (Etapa 1)	Wood Frame			Cross Laminated Timber		
	INT.	MÍN.	INT.	INT.	MÍN.	INT.
	69.4%	68.5%	68.2%	69.6%	67.8%	67.0%
	3759	3965	3784	3402	3617	3533
	MÍN.	MÍN.	INT.	MÍN.	MÍN.	INT.
70.0%	70.4%	68.7%	70.0%	70.5%	68.0%	
3579	3689	3634	3234	3270	3349	
	ZB7 WF-D (gesso duplo)			ZB7 CLT 5 camadas		
Adição de PCM nas paredes e forro.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	99.0%	99.2%	98.6%	99.4%	99.9%	99.1%
	103	90	147	81	13	120
	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
99.0%	98.8%	98.3%	99.4%	99.8%	99.1%	
108	128	178	71	29	117	
	ZB7 WF-D PCM 27			ZB7 CLT-5 PCM29		

Adição de PCM nas paredes.	<table border="1"> <thead> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>89.1%</td><td>91.9%</td><td>88.3%</td></tr> <tr><td>1435</td><td>1091</td><td>1529</td></tr> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> <tr><td>91.9%</td><td>93.0%</td><td>90.7%</td></tr> <tr><td>1027</td><td>936</td><td>1179</td></tr> </tbody> </table>	SUP.	SUP.	SUP.	89.1%	91.9%	88.3%	1435	1091	1529	SUP.	SUP.	SUP.	91.9%	93.0%	90.7%	1027	936	1179	<table border="1"> <thead> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>93.8%</td><td>95.7%</td><td>92.8%</td></tr> <tr><td>803</td><td>566</td><td>921</td></tr> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> <tr><td>94.3%</td><td>95.7%</td><td>93.6%</td></tr> <tr><td>712</td><td>570</td><td>800</td></tr> </tbody> </table>	SUP.	SUP.	SUP.	93.8%	95.7%	92.8%	803	566	921	SUP.	SUP.	SUP.	94.3%	95.7%	93.6%	712	570	800
	SUP.	SUP.	SUP.																																			
89.1%	91.9%	88.3%																																				
1435	1091	1529																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
91.9%	93.0%	90.7%																																				
1027	936	1179																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
93.8%	95.7%	92.8%																																				
803	566	921																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
94.3%	95.7%	93.6%																																				
712	570	800																																				
	ZB7 WF-D PCM29 parede	ZB7 CLT-5 PCM29 parede																																				
Adição de PCM no forro.	<table border="1"> <thead> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>80.7%</td><td>80.9%</td><td>80.5%</td></tr> <tr><td>2615</td><td>2695</td><td>2588</td></tr> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> <tr><td>81.6%</td><td>82.3%</td><td>81.3%</td></tr> <tr><td>2464</td><td>2466</td><td>2442</td></tr> </tbody> </table>	SUP.	SUP.	SUP.	80.7%	80.9%	80.5%	2615	2695	2588	SUP.	SUP.	SUP.	81.6%	82.3%	81.3%	2464	2466	2442	<table border="1"> <thead> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>81.6%</td><td>81.3%</td><td>80.5%</td></tr> <tr><td>2310</td><td>2426</td><td>2401</td></tr> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> <tr><td>82.2%</td><td>82.6%</td><td>80.9%</td></tr> <tr><td>2188</td><td>2201</td><td>2283</td></tr> </tbody> </table>	SUP.	SUP.	SUP.	81.6%	81.3%	80.5%	2310	2426	2401	SUP.	SUP.	SUP.	82.2%	82.6%	80.9%	2188	2201	2283
	SUP.	SUP.	SUP.																																			
80.7%	80.9%	80.5%																																				
2615	2695	2588																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
81.6%	82.3%	81.3%																																				
2464	2466	2442																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
81.6%	81.3%	80.5%																																				
2310	2426	2401																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
82.2%	82.6%	80.9%																																				
2188	2201	2283																																				
	ZB7 WF-D PCM29 forro	ZB7 CLT-5 PCM29 forro																																				

Fonte: elaborado pela autora (2023).

Os resultados da adição de PCM para a zona bioclimática 8, representada pela cidade de Belém (PA), mostraram uma mudança no nível de desempenho de mínimo e intermediário nos casos base para superior em todos os modelos com PCM (Tabela 24). O PHFT médio dos modelos subiu de 78,8% (WF-D) e 78,9% (CLT-5) para 100,0% (WF-D PCM29) e 100,0% (CLT-5 PCM29). O CgTT médio decresceu de 2747,5 kWh/ano (WF-D) e 2501,8kWh/ano (CLT-5) para 0,0 kWh/ano (WF-D PCM29 / CLT-5 PCM29).

Tabela 24 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) pela adição de PCM com pontos de fusão mais adequados por caso para ZB8 (Belém, PA)

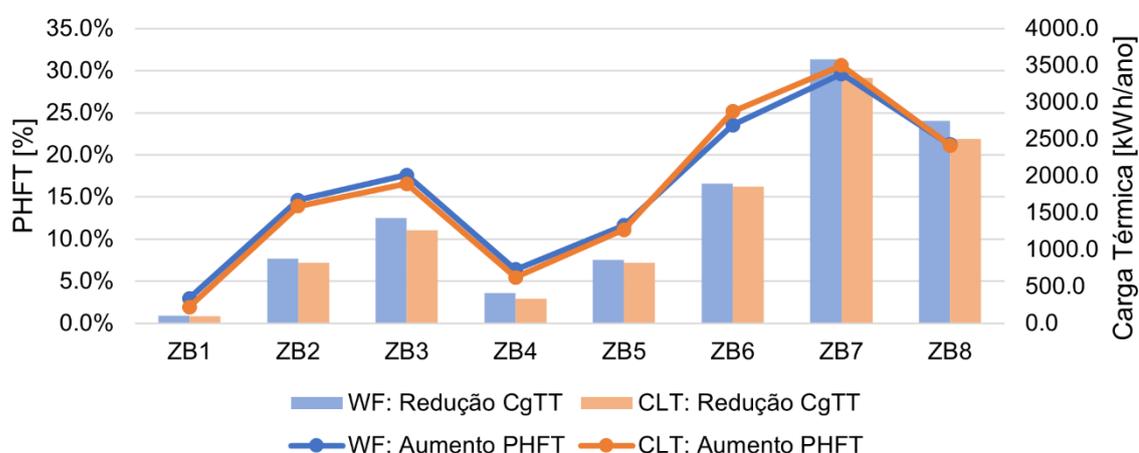
	<i>Wood Frame</i>			<i>Cross Laminated Timber</i>		
	MÍN.	INT.	INT.	MÍN.	INT.	INT.
Caso Base (Etapa 1)	77.7%	79.9%	77.6%	77.9%	80.2%	77.5%
	2867	2702	2857	2599	2419	2646
	INT.	INT.	INT.	INT.	INT.	INT.
	79.0%	80.0%	78.4%	79.0%	80.6%	78.1%
	2662	2656	2741	2445	2352	2548
	ZB8 WF-D (gesso duplo)			ZB8 CLT 5 camadas		

<p>Adição de PCM nas paredes e forro.</p>	<table border="1"> <thead> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>100.0%</td><td>100.0%</td><td>100.0%</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> <tr><td>100.0%</td><td>100.0%</td><td>100.0%</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>	SUP.	SUP.	SUP.	100.0%	100.0%	100.0%	0	0	0	SUP.	SUP.	SUP.	100.0%	100.0%	100.0%	0	0	0	<table border="1"> <thead> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>100.0%</td><td>100.0%</td><td>100.0%</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> <tr><td>100.0%</td><td>100.0%</td><td>100.0%</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>	SUP.	SUP.	SUP.	100.0%	100.0%	100.0%	0	0	0	SUP.	SUP.	SUP.	100.0%	100.0%	100.0%	0	0	0
SUP.	SUP.	SUP.																																				
100.0%	100.0%	100.0%																																				
0	0	0																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
100.0%	100.0%	100.0%																																				
0	0	0																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
100.0%	100.0%	100.0%																																				
0	0	0																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
100.0%	100.0%	100.0%																																				
0	0	0																																				
	ZB8 WF-D PCM29	ZB8 CLT-5 PCM29																																				
<p>Adição de PCM nas paredes.</p>	<table border="1"> <thead> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>96.8%</td><td>99.2%</td><td>96.9%</td></tr> <tr><td>463</td><td>114</td><td>453</td></tr> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> <tr><td>97.9%</td><td>99.0%</td><td>97.3%</td></tr> <tr><td>311</td><td>147</td><td>391</td></tr> </tbody> </table>	SUP.	SUP.	SUP.	96.8%	99.2%	96.9%	463	114	453	SUP.	SUP.	SUP.	97.9%	99.0%	97.3%	311	147	391	<table border="1"> <thead> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>99.4%</td><td>100.0%</td><td>99.5%</td></tr> <tr><td>92</td><td>4</td><td>77</td></tr> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> <tr><td>99.3%</td><td>99.9%</td><td>99.3%</td></tr> <tr><td>93</td><td>15</td><td>97</td></tr> </tbody> </table>	SUP.	SUP.	SUP.	99.4%	100.0%	99.5%	92	4	77	SUP.	SUP.	SUP.	99.3%	99.9%	99.3%	93	15	97
SUP.	SUP.	SUP.																																				
96.8%	99.2%	96.9%																																				
463	114	453																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
97.9%	99.0%	97.3%																																				
311	147	391																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
99.4%	100.0%	99.5%																																				
92	4	77																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
99.3%	99.9%	99.3%																																				
93	15	97																																				
	ZB8 WF-D PCM29 parede	ZB8 CLT-5 PCM29 parede																																				
<p>Adição de PCM no forro.</p>	<table border="1"> <thead> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>89.0%</td><td>89.8%</td><td>88.8%</td></tr> <tr><td>1641</td><td>1550</td><td>1653</td></tr> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> <tr><td>89.7%</td><td>90.5%</td><td>89.5%</td></tr> <tr><td>1504</td><td>1424</td><td>1512</td></tr> </tbody> </table>	SUP.	SUP.	SUP.	89.0%	89.8%	88.8%	1641	1550	1653	SUP.	SUP.	SUP.	89.7%	90.5%	89.5%	1504	1424	1512	<table border="1"> <thead> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>90.0%</td><td>91.1%</td><td>89.7%</td></tr> <tr><td>1403</td><td>1261</td><td>1441</td></tr> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> <tr><td>91.0%</td><td>91.9%</td><td>90.5%</td></tr> <tr><td>1237</td><td>1146</td><td>1295</td></tr> </tbody> </table>	SUP.	SUP.	SUP.	90.0%	91.1%	89.7%	1403	1261	1441	SUP.	SUP.	SUP.	91.0%	91.9%	90.5%	1237	1146	1295
SUP.	SUP.	SUP.																																				
89.0%	89.8%	88.8%																																				
1641	1550	1653																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
89.7%	90.5%	89.5%																																				
1504	1424	1512																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
90.0%	91.1%	89.7%																																				
1403	1261	1441																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
91.0%	91.9%	90.5%																																				
1237	1146	1295																																				
	ZB8 WF-D PCM29 forro	ZB8 CLT-5 PCM29 forro																																				

Fonte: elaborado pela autora (2023).

Para todas as zonas bioclimáticas, observou-se que a adição de PCM nas paredes e forro, com ponto de fusão adequado por clima, foi capaz de atingir o nível superior de desempenho. O aumento no PHFT médio (PHFTcom PCM – PHFTsem PCM) e a redução na carga térmica total média (CgTTsem PCM – CgTTcom PCM) pôde ser visto em maior ou menor em todas as zonas. Pela Figura 34, notou-se que a zona bioclimática que teve maior impacto com o PCM foi a ZB7, seguida da ZB8, ZB6, ZB3, ZB2, ZB5, ZB4 e ZB1. Nas zonas bioclimáticas 1, 4 e 8, os modelos com PCM nas paredes e forro atingiram PHFT de 100,0% e CgTT de 0,0 kWh/ano. Considerando todas as zonas, houve um aumento médio de 15,8% do PHFT e uma redução média de 1433,4 kWh/ano de CgTT com a adição de PCM nas paredes e forro.

Figura 34 – Aumento do PHFT e redução da CgTT com a aplicação de PCM



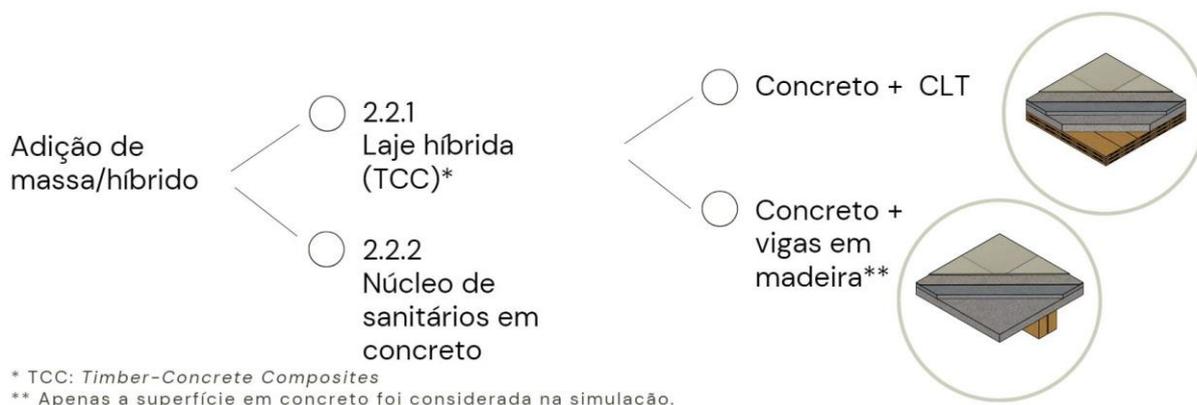
Fonte: elaborado pela autora (2023).

Adicionando PCM apenas nas paredes, em relação ao modelo com PCM nas paredes e forro, diminuiu o PHFT e aumentou o CgTT, mas manteve o nível superior de desempenho. Escolher instalar PCM apenas nas paredes pode ser uma estratégia para diminuir a quantidade de material, o tempo de obra e os custos. A discrepância nos resultados foi maior na aplicação apenas no forro, mesmo assim, com exceção da ZB5 e ZB6 os níveis superiores de desempenho foram mantidos. Na prática, a escolha da melhor alternativa deve ser feita levando-se em conta diversos aspectos como custo e quantidade de material em relação ao aumento dos níveis de conforto internos e da eficiência energética.

4.2.2 Etapa 2.2: Adição de massa térmica (sistemas híbridos com concreto)

Na Etapa 2.2 foram analisados os sistemas híbridos, a saber: as lajes mistas com concreto e o núcleo de sanitários em concreto maciço (Figura 35). Na opção da laje mista de concreto e CLT, o CLT, ou seja, a madeira fica em contato com o ambiente interno. Já na opção da laje de concreto com vigas em madeira, o concreto fica em contato com ambiente. Essa escolha se deu para se observar o impacto do posicionamento da massa térmica no ambiente.

Figura 35 – Etapa 2.2: adição de massa térmica / sistemas híbridos



Fonte: elaborado pela autora (2023).

Para a zona bioclimática 1 (Curitiba, PR), a Etapa 2.2 apresentou melhora em relação aos casos base para os modelos com laje em concreto e laje em concreto+CLT. Já a opção do núcleo de sanitários em concreto obteve resultados próximos dos casos base com ligeira redução do PHFT e aumento do CgTT. Mesmo assim, todas as UHs mantiveram o nível superior de desempenho.

Tabela 25 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) com o uso de sistemas híbridos para ZB1 (Curitiba, PR)

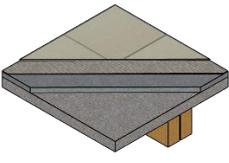
	Wood Frame			Cross Laminated Timber		
	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
Caso Base (Etapa 1)	97.6%	96.9%	97.5%	98.5%	97.7%	98.3%
	96	119	120	90	124	112
Caso Base (Etapa 1)	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	96.9%	96.2%	97.2%	98.2%	97.5%	98.3%
	86	98	104	81	95	93
	ZB1 WF-D + isolante			ZB1 CLT 5 cam. + isolante		
 Laje híbrida: Concreto	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	99.4%	99.2%	99.4%	99.5%	99.3%	99.4%
	27	35	31	33	40	39
	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	99.1%	98.7%	99.3%	99.4%	99.1%	99.5%
	24	34	28	25	37	31
	ZB1 WF-D-iso Conc. Laje			ZB1 CLT-5-iso Conc. Laje		

 <p>Laje híbrida: Concreto + CLT</p>	<table border="1"> <thead> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>99.1%</td><td>98.8%</td><td>99.0%</td></tr> <tr><td>52</td><td>68</td><td>64</td></tr> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> <tr><td>99.0%</td><td>98.7%</td><td>99.0%</td></tr> <tr><td>48</td><td>50</td><td>51</td></tr> </tbody> </table> <p>ZB1 WF-D-iso Conc. Laje + CLT</p>	SUP.	SUP.	SUP.	99.1%	98.8%	99.0%	52	68	64	SUP.	SUP.	SUP.	99.0%	98.7%	99.0%	48	50	51	<table border="1"> <thead> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>99.0%</td><td>98.6%</td><td>98.8%</td></tr> <tr><td>65</td><td>87</td><td>77</td></tr> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> <tr><td>99.1%</td><td>98.9%</td><td>99.1%</td></tr> <tr><td>53</td><td>59</td><td>57</td></tr> </tbody> </table> <p>ZB1 CLT-5-iso Conc. Laje + CLT</p>	SUP.	SUP.	SUP.	99.0%	98.6%	98.8%	65	87	77	SUP.	SUP.	SUP.	99.1%	98.9%	99.1%	53	59	57
	SUP.	SUP.	SUP.																																			
99.1%	98.8%	99.0%																																				
52	68	64																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
99.0%	98.7%	99.0%																																				
48	50	51																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
99.0%	98.6%	98.8%																																				
65	87	77																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
99.1%	98.9%	99.1%																																				
53	59	57																																				
<p>Núcleo de sanitários em concreto maciço</p>	<table border="1"> <thead> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>96.3%</td><td>96.9%</td><td>96.4%</td></tr> <tr><td>92</td><td>88</td><td>102</td></tr> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> <tr><td>94.4%</td><td>95.3%</td><td>95.0%</td></tr> <tr><td>111</td><td>93</td><td>109</td></tr> </tbody> </table> <p>ZB1 WF-D-iso Conc. Sanit.</p>	SUP.	SUP.	SUP.	96.3%	96.9%	96.4%	92	88	102	SUP.	SUP.	SUP.	94.4%	95.3%	95.0%	111	93	109	<table border="1"> <thead> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>97.7%</td><td>97.9%</td><td>97.7%</td></tr> <tr><td>73</td><td>77</td><td>88</td></tr> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> <tr><td>96.1%</td><td>96.9%</td><td>96.6%</td></tr> <tr><td>85</td><td>72</td><td>80</td></tr> </tbody> </table> <p>ZB1 CLT-5-iso Conc. Sanit.</p>	SUP.	SUP.	SUP.	97.7%	97.9%	97.7%	73	77	88	SUP.	SUP.	SUP.	96.1%	96.9%	96.6%	85	72	80
	SUP.	SUP.	SUP.																																			
96.3%	96.9%	96.4%																																				
92	88	102																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
94.4%	95.3%	95.0%																																				
111	93	109																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
97.7%	97.9%	97.7%																																				
73	77	88																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
96.1%	96.9%	96.6%																																				
85	72	80																																				

Fonte: elaborado pela autora (2023).

O mesmo padrão dos resultados para a ZB1 foi observado na zona bioclimática 2, na cidade de Santa Maria (RS), (Tabela 26). Houve um aumento médio no PHFT de 2,7% e redução média de 135,9 kWh/ano no CgTT para o caso de laje em concreto. Notou-se que as diferenças são pequenas para se justificar a utilização dessas estratégias para este clima.

Tabela 26 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) com o uso de sistemas híbridos para ZB2 (Santa Maria, RS)

<p>Caso Base (Etapa 1)</p>	<p>Wood Frame</p> <table border="1"> <thead> <tr><th>INT.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>77.6%</td><td>75.6%</td><td>79.2%</td></tr> <tr><td>1275</td><td>1335</td><td>1244</td></tr> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> <tr><td>76.2%</td><td>73.4%</td><td>77.6%</td></tr> <tr><td>1189</td><td>1268</td><td>1191</td></tr> </tbody> </table> <p>ZB2 WF-D + isolante</p>	INT.	SUP.	SUP.	77.6%	75.6%	79.2%	1275	1335	1244	SUP.	SUP.	SUP.	76.2%	73.4%	77.6%	1189	1268	1191	<p>Cross Laminated Timber</p> <table border="1"> <thead> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>79.1%</td><td>77.0%</td><td>80.7%</td></tr> <tr><td>1227</td><td>1295</td><td>1195</td></tr> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> <tr><td>78.0%</td><td>75.3%</td><td>79.3%</td></tr> <tr><td>1126</td><td>1190</td><td>1129</td></tr> </tbody> </table> <p>ZB2 CLT 5 cam. + isolante</p>	SUP.	SUP.	SUP.	79.1%	77.0%	80.7%	1227	1295	1195	SUP.	SUP.	SUP.	78.0%	75.3%	79.3%	1126	1190	1129
	INT.	SUP.	SUP.																																			
77.6%	75.6%	79.2%																																				
1275	1335	1244																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
76.2%	73.4%	77.6%																																				
1189	1268	1191																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
79.1%	77.0%	80.7%																																				
1227	1295	1195																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
78.0%	75.3%	79.3%																																				
1126	1190	1129																																				
 <p>Laje híbrida: Concreto</p>	<table border="1"> <thead> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>80.7%</td><td>78.8%</td><td>82.4%</td></tr> <tr><td>1116</td><td>1185</td><td>1077</td></tr> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> <tr><td>79.0%</td><td>76.8%</td><td>80.5%</td></tr> <tr><td>1035</td><td>1113</td><td>1036</td></tr> </tbody> </table> <p>ZB2 WF-D-iso Conc. Laje</p>	SUP.	SUP.	SUP.	80.7%	78.8%	82.4%	1116	1185	1077	SUP.	SUP.	SUP.	79.0%	76.8%	80.5%	1035	1113	1036	<table border="1"> <thead> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>81.3%</td><td>79.7%</td><td>83.0%</td></tr> <tr><td>1107</td><td>1175</td><td>1068</td></tr> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> <tr><td>80.0%</td><td>77.9%</td><td>81.3%</td></tr> <tr><td>1010</td><td>1087</td><td>1024</td></tr> </tbody> </table> <p>ZB2 CLT-5-iso Conc. Laje</p>	SUP.	SUP.	SUP.	81.3%	79.7%	83.0%	1107	1175	1068	SUP.	SUP.	SUP.	80.0%	77.9%	81.3%	1010	1087	1024
SUP.	SUP.	SUP.																																				
80.7%	78.8%	82.4%																																				
1116	1185	1077																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
79.0%	76.8%	80.5%																																				
1035	1113	1036																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
81.3%	79.7%	83.0%																																				
1107	1175	1068																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
80.0%	77.9%	81.3%																																				
1010	1087	1024																																				

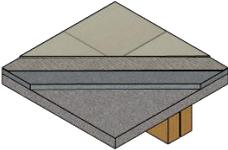
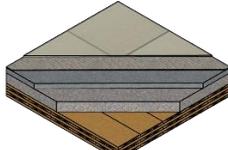
 <p>Laje híbrida: Concreto + CLT</p>	<table border="1"> <thead> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>80.5%</td><td>78.9%</td><td>82.1%</td></tr> <tr><td>1151</td><td>1215</td><td>1123</td></tr> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> <tr><td>79.1%</td><td>77.0%</td><td>80.5%</td></tr> <tr><td>1073</td><td>1120</td><td>1064</td></tr> </tbody> </table> <p>ZB2 WF-D-iso Conc. Laje + CLT</p>	SUP.	SUP.	SUP.	80.5%	78.9%	82.1%	1151	1215	1123	SUP.	SUP.	SUP.	79.1%	77.0%	80.5%	1073	1120	1064	<table border="1"> <thead> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>81.0%</td><td>79.5%</td><td>82.6%</td></tr> <tr><td>1151</td><td>1209</td><td>1119</td></tr> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> <tr><td>79.9%</td><td>78.1%</td><td>81.2%</td></tr> <tr><td>1055</td><td>1098</td><td>1051</td></tr> </tbody> </table> <p>ZB2 CLT-5-iso Conc. Laje + CLT</p>	SUP.	SUP.	SUP.	81.0%	79.5%	82.6%	1151	1209	1119	SUP.	SUP.	SUP.	79.9%	78.1%	81.2%	1055	1098	1051
	SUP.	SUP.	SUP.																																			
80.5%	78.9%	82.1%																																				
1151	1215	1123																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
79.1%	77.0%	80.5%																																				
1073	1120	1064																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
81.0%	79.5%	82.6%																																				
1151	1209	1119																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
79.9%	78.1%	81.2%																																				
1055	1098	1051																																				
<p>Núcleo de sanitários em concreto maciço</p>	<table border="1"> <thead> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>75.9%</td><td>75.1%</td><td>77.6%</td></tr> <tr><td>1267</td><td>1304</td><td>1228</td></tr> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> <tr><td>73.3%</td><td>71.7%</td><td>74.8%</td></tr> <tr><td>1218</td><td>1279</td><td>1211</td></tr> </tbody> </table> <p>ZB2 WF-D-iso Conc. Sanit.</p>	SUP.	SUP.	SUP.	75.9%	75.1%	77.6%	1267	1304	1228	SUP.	SUP.	SUP.	73.3%	71.7%	74.8%	1218	1279	1211	<table border="1"> <thead> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>77.5%</td><td>76.5%</td><td>79.2%</td></tr> <tr><td>1215</td><td>1248</td><td>1173</td></tr> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> <tr><td>74.9%</td><td>73.9%</td><td>76.5%</td></tr> <tr><td>1158</td><td>1185</td><td>1141</td></tr> </tbody> </table> <p>ZB2 CLT-5-iso Conc. Sanit.</p>	SUP.	SUP.	SUP.	77.5%	76.5%	79.2%	1215	1248	1173	SUP.	SUP.	SUP.	74.9%	73.9%	76.5%	1158	1185	1141
	SUP.	SUP.	SUP.																																			
75.9%	75.1%	77.6%																																				
1267	1304	1228																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
73.3%	71.7%	74.8%																																				
1218	1279	1211																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
77.5%	76.5%	79.2%																																				
1215	1248	1173																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
74.9%	73.9%	76.5%																																				
1158	1185	1141																																				

Fonte: elaborado pela autora (2023).

A Tabela 27 mostra os dados da Etapa 2.2 para a cidade de Campinas (SP), (ZB3). Observou-se todos os modelos de sistemas híbridos apresentaram uma melhora nos resultados. Nos casos de lajes mistas, as UHs que tinham nível mínimo de desempenho passaram a ter nível intermediário. Para o núcleo de sanitários em concreto os níveis de desempenho permaneceram os mesmos dos casos base. Nenhum caso atingiu nível superior de desempenho e as mudanças foram pequenas, com aumento médio do PHFT de 2,8% e redução média do CgTT de 228,5 kWh/ano.

Tabela 27 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) com o uso de sistemas híbridos para ZB3 (Campinas, SP)

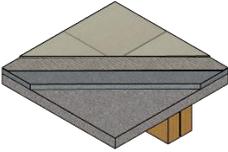
Caso Base (Etapa 1)	<p>Wood Frame</p> <table border="1"> <thead> <tr><th>INT.</th><th>INT.</th><th>INT.</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>78.6%</td><td>76.4%</td><td>80.6%</td></tr> <tr><td>1687</td><td>1821</td><td>1587</td></tr> <tr><th>MÍN.</th><th>MÍN.</th><th>INT.</th></tr> <tr><td>81.7%</td><td>79.7%</td><td>81.9%</td></tr> <tr><td>1439</td><td>1550</td><td>1444</td></tr> </tbody> </table> <p>ZB3 WF-D (gesso duplo)</p>	INT.	INT.	INT.	78.6%	76.4%	80.6%	1687	1821	1587	MÍN.	MÍN.	INT.	81.7%	79.7%	81.9%	1439	1550	1444	<p>Cross Laminated Timber</p> <table border="1"> <thead> <tr><th>INT.</th><th>INT.</th><th>INT.</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>79.4%</td><td>76.4%</td><td>81.8%</td></tr> <tr><td>1543</td><td>1702</td><td>1429</td></tr> <tr><th>INT.</th><th>INT.</th><th>INT.</th></tr> <tr><td>83.3%</td><td>80.7%</td><td>83.3%</td></tr> <tr><td>1262</td><td>1404</td><td>1290</td></tr> </tbody> </table> <p>ZB3 CLT 5 camadas</p>	INT.	INT.	INT.	79.4%	76.4%	81.8%	1543	1702	1429	INT.	INT.	INT.	83.3%	80.7%	83.3%	1262	1404	1290
	INT.	INT.	INT.																																			
78.6%	76.4%	80.6%																																				
1687	1821	1587																																				
MÍN.	MÍN.	INT.																																				
81.7%	79.7%	81.9%																																				
1439	1550	1444																																				
INT.	INT.	INT.																																				
79.4%	76.4%	81.8%																																				
1543	1702	1429																																				
INT.	INT.	INT.																																				
83.3%	80.7%	83.3%																																				
1262	1404	1290																																				

 <p>Laje híbrida: Concreto</p>	<table border="1"> <thead> <tr><th>INT.</th><th>INT.</th><th>INT.</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>82.6%</td><td>80.2%</td><td>84.5%</td></tr> <tr><td>1360</td><td>1509</td><td>1263</td></tr> <tr><th>INT.</th><th>INT.</th><th>INT.</th></tr> <tr><td>85.4%</td><td>83.2%</td><td>85.3%</td></tr> <tr><td>1138</td><td>1286</td><td>1167</td></tr> </tbody> </table> <p>ZB3 WF-D Conc. Laje</p>	INT.	INT.	INT.	82.6%	80.2%	84.5%	1360	1509	1263	INT.	INT.	INT.	85.4%	83.2%	85.3%	1138	1286	1167	<table border="1"> <thead> <tr><th>INT.</th><th>INT.</th><th>INT.</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>81.8%</td><td>78.2%</td><td>84.1%</td></tr> <tr><td>1360</td><td>1547</td><td>1244</td></tr> <tr><th>INT.</th><th>INT.</th><th>INT.</th></tr> <tr><td>85.5%</td><td>82.2%</td><td>85.0%</td></tr> <tr><td>1093</td><td>1295</td><td>1154</td></tr> </tbody> </table> <p>ZB3 CLT-5 Conc. Laje</p>	INT.	INT.	INT.	81.8%	78.2%	84.1%	1360	1547	1244	INT.	INT.	INT.	85.5%	82.2%	85.0%	1093	1295	1154
INT.	INT.	INT.																																				
82.6%	80.2%	84.5%																																				
1360	1509	1263																																				
INT.	INT.	INT.																																				
85.4%	83.2%	85.3%																																				
1138	1286	1167																																				
INT.	INT.	INT.																																				
81.8%	78.2%	84.1%																																				
1360	1547	1244																																				
INT.	INT.	INT.																																				
85.5%	82.2%	85.0%																																				
1093	1295	1154																																				
 <p>Laje híbrida: Concreto + CLT</p>	<table border="1"> <thead> <tr><th>INT.</th><th>INT.</th><th>INT.</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>81.3%</td><td>79.3%</td><td>83.0%</td></tr> <tr><td>1476</td><td>1605</td><td>1388</td></tr> <tr><th>INT.</th><th>INT.</th><th>INT.</th></tr> <tr><td>84.0%</td><td>82.4%</td><td>84.1%</td></tr> <tr><td>1264</td><td>1357</td><td>1268</td></tr> </tbody> </table> <p>ZB3 WF-D Conc. Laje + CLT</p>	INT.	INT.	INT.	81.3%	79.3%	83.0%	1476	1605	1388	INT.	INT.	INT.	84.0%	82.4%	84.1%	1264	1357	1268	<table border="1"> <thead> <tr><th>INT.</th><th>INT.</th><th>INT.</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>80.5%</td><td>77.2%</td><td>82.8%</td></tr> <tr><td>1466</td><td>1636</td><td>1352</td></tr> <tr><th>INT.</th><th>INT.</th><th>INT.</th></tr> <tr><td>84.5%</td><td>81.8%</td><td>84.2%</td></tr> <tr><td>1186</td><td>1339</td><td>1226</td></tr> </tbody> </table> <p>ZB3 CLT-5 Conc. Laje + CLT</p>	INT.	INT.	INT.	80.5%	77.2%	82.8%	1466	1636	1352	INT.	INT.	INT.	84.5%	81.8%	84.2%	1186	1339	1226
INT.	INT.	INT.																																				
81.3%	79.3%	83.0%																																				
1476	1605	1388																																				
INT.	INT.	INT.																																				
84.0%	82.4%	84.1%																																				
1264	1357	1268																																				
INT.	INT.	INT.																																				
80.5%	77.2%	82.8%																																				
1466	1636	1352																																				
INT.	INT.	INT.																																				
84.5%	81.8%	84.2%																																				
1186	1339	1226																																				
<p>Núcleo de sanitários em concreto maciço</p>	<table border="1"> <thead> <tr><th>INT.</th><th>INT.</th><th>INT.</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>79.9%</td><td>77.9%</td><td>81.8%</td></tr> <tr><td>1582</td><td>1697</td><td>1483</td></tr> <tr><th>MÍN.</th><th>MÍN.</th><th>INT.</th></tr> <tr><td>82.8%</td><td>80.8%</td><td>83.1%</td></tr> <tr><td>1341</td><td>1461</td><td>1347</td></tr> </tbody> </table> <p>ZB3 WF-D Conc. Sanit.</p>	INT.	INT.	INT.	79.9%	77.9%	81.8%	1582	1697	1483	MÍN.	MÍN.	INT.	82.8%	80.8%	83.1%	1341	1461	1347	<table border="1"> <thead> <tr><th>INT.</th><th>INT.</th><th>INT.</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>80.7%</td><td>77.5%</td><td>83.0%</td></tr> <tr><td>1452</td><td>1615</td><td>1343</td></tr> <tr><th>INT.</th><th>INT.</th><th>INT.</th></tr> <tr><td>84.2%</td><td>81.5%</td><td>84.3%</td></tr> <tr><td>1198</td><td>1346</td><td>1213</td></tr> </tbody> </table> <p>ZB3 CLT-5 Conc. Sanit.</p>	INT.	INT.	INT.	80.7%	77.5%	83.0%	1452	1615	1343	INT.	INT.	INT.	84.2%	81.5%	84.3%	1198	1346	1213
INT.	INT.	INT.																																				
79.9%	77.9%	81.8%																																				
1582	1697	1483																																				
MÍN.	MÍN.	INT.																																				
82.8%	80.8%	83.1%																																				
1341	1461	1347																																				
INT.	INT.	INT.																																				
80.7%	77.5%	83.0%																																				
1452	1615	1343																																				
INT.	INT.	INT.																																				
84.2%	81.5%	84.3%																																				
1198	1346	1213																																				

Fonte: elaborado pela autora (2023).

O uso de sistemas híbridos para a zona bioclimática 4 (Brasília, DF) foi o que mais alterou os níveis de desempenho em relação aos casos base, conforme a Tabela 28. Para o melhor caso, laje híbrida de concreto, todas as UHs obtiveram nível superior de desempenho. Apesar dessa mudança visível os valores de PHFT e CgTT alteraram em média apenas 2,5% e 160,3 kWh/ano, respectivamente. Diferenças menores que, por exemplo, da ZB3, em que não houve alteração no nível de desempenho.

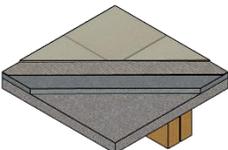
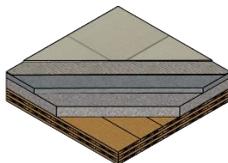
Tabela 28 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) com o uso de sistemas híbridos para ZB4 (Brasília, DF)

	Wood Frame			Cross Laminated Timber		
Caso Base (Etapa 1)	MÍN.	INT.	INT.	INT.	INT.	SUP.
	93.2%	92.6%	92.9%	94.2%	93.2%	94.2%
	440	471	464	354	405	362
	MÍN.	MÍN.	INT.	MÍN.	MÍN.	INT.
	94.6%	94.4%	94.0%	95.5%	94.9%	95.2%
	341	357	387	273	303	304
	ZB4 WF-D (gesso duplo)			ZB4 CLT 5 camadas		
 Laje híbrida: Concreto	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	96.4%	95.8%	96.4%	96.4%	95.5%	96.4%
	221	257	226	216	264	224
	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	97.3%	96.8%	96.9%	97.3%	96.5%	96.9%
	167	200	200	161	208	195
	ZB4 WF-D Conc. Laje			ZB4 CLT-5 Conc. Laje		
 Laje híbrida: Concreto + CLT	INT.	INT.	SUP.	INT.	INT.	SUP.
	94.8%	93.9%	94.7%	94.8%	93.6%	94.9%
	322	369	337	311	371	319
	MÍN.	INT.	INT.	MÍN.	INT.	SUP.
	95.7%	95.4%	95.5%	96.0%	95.3%	95.6%
	264	282	282	242	279	273
	ZB4 WF-D Conc. Laje + CLT			ZB4 CLT-5 Conc. Laje + CLT		
Núcleo de sanitários em concreto maciço	INT.	INT.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	94.3%	93.9%	94.4%	95.4%	94.6%	95.4%
	358	383	364	280	320	288
	MÍN.	INT.	INT.	INT.	INT.	SUP.
	95.6%	95.3%	95.0%	96.4%	95.9%	96.0%
	278	299	319	218	247	248
	ZB4 WF-D Conc. Sanit.			ZB4 CLT-5 Conc. Sanit.		

Fonte: elaborado pela autora (2023).

Os resultados da Etapa 2.2 para a zona bioclimática 5 seguem um padrão similar ao da ZB3, com alterações ainda menores (Tabela 29). O aumento médio no PHFT para o caso de laje em concreto foi de 0,9% e redução média de CGTT de 101,9 kWh/ano.

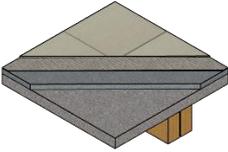
Tabela 29 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) com o uso de sistemas híbridos para ZB5 (Niterói, RJ)

	Wood Frame			Cross Laminated Timber		
Caso Base (Etapa 1)	INT.	INT.	INT.	INT.	INT.	INT.
	78.6%	78.2%	77.9%	76.1%	75.4%	75.0%
	1454	1483	1486	1523	1554	1578
	MÍN.	MÍN.	INT.	MÍN.	MÍN.	INT.
	81.4%	82.1%	81.2%	79.5%	80.5%	79.4%
	1281	1185	1294	1317	1211	1332
	ZB5 WF-D (gesso duplo)			ZB5 CLT 5 camadas		
 Laje híbrida: Concreto	INT.	INT.	INT.	INT.	INT.	INT.
	79.9%	79.2%	79.1%	77.4%	76.5%	76.3%
	1298	1344	1339	1410	1452	1464
	INT.	INT.	INT.	INT.	MÍN.	INT.
	82.2%	82.7%	81.7%	80.5%	80.9%	80.1%
	1171	1106	1205	1236	1178	1274
	ZB5 WF-D Conc. Laje			ZB5 CLT-5 Conc. Laje		
 Laje híbrida: Concreto + CLT	INT.	INT.	INT.	INT.	INT.	INT.
	79.6%	79.0%	78.6%	76.8%	75.9%	75.7%
	1344	1377	1384	1459	1505	1516
	INT.	INT.	INT.	MÍN.	MÍN.	INT.
	81.9%	82.7%	81.8%	80.1%	80.8%	79.7%
	1211	1121	1217	1278	1186	1304
	ZB5 WF-D Conc. Laje + CLT			ZB5 CLT-5 Conc. Laje + CLT		
Núcleo de sanitários em concreto maciço	INT.	INT.	INT.	INT.	INT.	INT.
	79.5%	79.1%	78.9%	77.4%	76.5%	76.6%
	1389	1413	1407	1441	1479	1481
	INT.	INT.	INT.	MÍN.	MÍN.	INT.
	82.2%	82.9%	82.1%	80.6%	81.1%	80.4%
	1220	1134	1227	1257	1176	1272
	ZB5 WF-D Conc. Sanit.			ZB5 CLT-5 Conc. Sanit.		

Fonte: elaborado pela autora (2023).

Observou-se para a zona bioclimática 6 (Campo Grande, MS) que os sistemas híbridos não tiveram impacto no nível de desempenho das UHs, permanecendo mínimo em todos os casos (Tabela 30). O aumento médio no PHFT para o modelo de laje em concreto foi de 2,0% e redução média de CGTT de 212,3 kWh/ano.

Tabela 30 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) com o uso de sistemas híbridos para ZB6 (Campo Grande, MS)

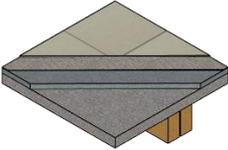
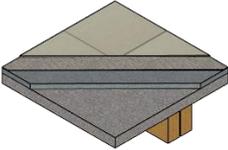
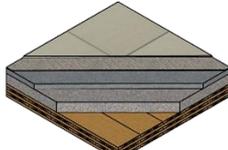
	Wood Frame			Cross Laminated Timber		
	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.
Caso Base (Etapa 1)	71.1%	63.9%	70.7%	71.7%	59.7%	71.1%
	2352	2729	2348	2171	2757	2202
	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.
	71.5%	66.7%	72.5%	71.4%	63.6%	72.5%
	2188	2417	2133	2072	2400	2018
	ZB6 WF-D (gesso duplo)			ZB6 CLT 5 camadas		
	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.
Laje híbrida: Concreto	74.6%	65.8%	74.0%	73.4%	60.8%	73.0%
	1996	2459	2011	2003	2623	2024
	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.
	74.7%	68.6%	75.0%	73.1%	63.8%	73.8%
	1883	2204	1881	1911	2347	1898
	ZB6 WF-D Conc. Laje			ZB6 CLT-5 Conc. Laje		
	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.
Laje híbrida: Concreto + CLT	74.0%	65.9%	73.4%	73.0%	60.4%	72.4%
	2067	2489	2081	2058	2662	2081
	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.
	74.1%	69.1%	74.6%	72.4%	64.1%	73.2%
	1963	2204	1925	1981	2345	1944
	ZB6 WF-D Conc. Laje + CLT			ZB6 CLT-5 Conc. Laje + CLT		
	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.
Núcleo de sanitários em concreto maciço	72.2%	65.0%	71.8%	72.6%	61.1%	72.2%
	2241	2624	2233	2097	2670	2112
	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.	MÍN.
	72.4%	67.7%	73.4%	72.5%	64.5%	73.5%
	2103	2329	2050	1996	2346	1947
	ZB6 WF-D Conc. Sanit.			ZB6 CLT-5 Conc. Sanit.		

Fonte: elaborado pela autora (2023).

Já para a zona bioclimática 7, representada pela cidade de Teresina (PI), houve uma diferença considerável para os resultados do modelo de núcleo de sanitários em concreto com o *wood frame* (Tabela 31). Enquanto a redução média de CgTT para a versão em CLT (CLT-5 Conc. Sanit.) foi de 140,6 kWh/ano, o WF-D Conc. Sanit. reduziu 1795,4 kWh/ano em relação ao caso base (WF-D) e aumentou o PHFT médio em 6,5%, fazendo com que os níveis de desempenho mudassem de mínimo e

intermediário para superior. Considerando apenas os casos de laje em concreto (WF-D Conc. Laje e CLT-5 Conc. Laje), o aumento médio no PHFT foi de 2,8% e a redução média de CGTT de 385,3 kWh/ano.

Tabela 31 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) com o uso de sistemas híbridos para ZB7 (Teresina, PI)

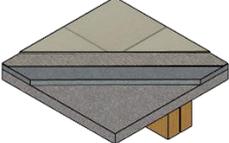
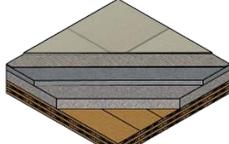
		Wood Frame			Cross Laminated Timber		
		INT.	MÍN.	INT.	INT.	MÍN.	INT.
Caso Base (Etapa 1)		69.4%	68.5%	68.2%	69.6%	67.8%	67.0%
		3759	3965	3784	3402	3617	3533
		MÍN.	MÍN.	INT.	MÍN.	MÍN.	INT.
		70.0%	70.4%	68.7%	70.0%	70.5%	68.0%
		3579	3689	3634	3234	3270	3349
		ZB7 WF-D (gesso duplo)			ZB7 CLT 5 camadas		
Laje híbrida: Concreto		INT.	INT.	SUP.	INT.	INT.	INT.
		73.6%	72.9%	71.9%	71.4%	69.3%	68.6%
		3177	3354	3245	3177	3413	3336
		INT.	INT.	INT.	INT.	MÍN.	INT.
		74.5%	74.5%	72.1%	72.2%	71.6%	68.9%
		2971	3115	3138	2948	3117	3198
		ZB7 WF-D Conc. Laje			ZB7 CLT-5 Conc. Laje		
Laje híbrida: Concreto + CLT		INT.	INT.	INT.	INT.	INT.	INT.
		73.6%	72.9%	71.8%	71.5%	69.7%	68.5%
		3213	3404	3275	3183	3407	3341
		INT.	INT.	INT.	MÍN.	MÍN.	INT.
		73.5%	74.0%	71.9%	71.2%	71.6%	68.7%
		3137	3208	3174	3085	3147	3225
		ZB7 WF-D Conc. Laje + CLT			ZB7 CLT-5 Conc. Laje + CLT		
Núcleo de sanitários em concreto maciço		SUP.	SUP.	SUP.	INT.	INT.	INT.
		74.6%	74.1%	74.0%	71.3%	69.5%	69.1%
		2051	2155	2054	3252	3497	3377
		SUP.	SUP.	SUP.	INT.	MÍN.	INT.
		77.5%	78.4%	75.9%	71.9%	72.0%	70.1%
		1762	1769	1846	3068	3184	3182
		ZB7 WF-D Conc. Sanit.			ZB7 CLT-5 Conc. Sanit.		

Fonte: elaborado pela autora (2023).

Por fim, os sistemas híbridos na zona bioclimática 8 (Belém, PA) resultaram nas maiores diferenças de valores de PHFT e CgTT para o caso de lajes em concreto

(WF-D Conc. Laje e CLT-5 Conc. Laje) (Tabela 32). O aumento médio no PHFT foi de 3,4% e a redução média de CGTT de 427,2,3 kWh/ano.

Tabela 32 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) com o uso de sistemas híbridos para ZB8 (Belém, PA)

		Wood Frame			Cross Laminated Timber		
Caso Base (Etapa 1)		MÍN.	INT.	INT.	MÍN.	INT.	INT.
		77.7%	79.9%	77.6%	77.9%	80.2%	77.5%
		2867	2702	2857	2599	2419	2646
		INT.	INT.	INT.	INT.	INT.	INT.
		79.0%	80.0%	78.4%	79.0%	80.6%	78.1%
		2662	2656	2741	2445	2352	2548
		ZB8 WF-D (gesso duplo)			ZB8 CLT 5 camadas		
	Laje híbrida: Concreto	INT.	INT.	SUP.	INT.	INT.	SUP.
		82.3%	84.3%	81.9%	80.2%	82.3%	79.7%
		2264	2099	2301	2349	2171	2393
		SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
		84.1%	84.5%	82.4%	82.2%	82.4%	80.2%
		2017	2051	2199	2077	2137	2312
		ZB8 WF-D Conc. Laje			ZB8 CLT-5 Conc. Laje		
	Laje híbrida: Concreto + CLT	INT.	INT.	SUP.	INT.	INT.	INT.
		81.6%	83.3%	81.2%	79.8%	81.7%	79.2%
		2391	2258	2402	2418	2266	2465
		INT.	INT.	INT.	INT.	INT.	INT.
		82.2%	83.2%	81.5%	80.5%	81.5%	79.6%
		2273	2246	2329	2291	2256	2386
		ZB8 WF-D Conc. Laje + CLT			ZB8 CLT-5 Conc. Laje + CLT		
Núcleo de sanitários em concreto maciço		INT.	INT.	INT.	INT.	INT.	SUP.
		79.7%	81.5%	79.6%	80.3%	82.0%	79.9%
		2632	2513	2630	2372	2238	2414
		INT.	INT.	INT.	INT.	SUP.	SUP.
		81.0%	81.7%	80.1%	81.3%	82.5%	80.7%
		2437	2456	2536	2213	2165	2296
		ZB8 WF-D Conc. Sanit.			ZB8 CLT-5 Conc. Sanit.		

Fonte: elaborado pela autora (2023).

Notou-se que as diferenças nos resultados dos modelos híbridos em relação aos casos base foram pequenas para se justificar a utilização dessas estratégias. Em relação ao nível de desempenho, não houve mudança para as ZB1 e ZB6, já para as ZBs 2, 3, 5, 7 e 8 houve mudança em um nível (de mínimo para intermediário e/ou de

intermediário para superior) e para a ZB4 houve mudança em dois níveis (de mínimo para superior). Destacou-se que não foi possível atingir o nível superior de desempenho nas ZBs 3, 5 e 6; algumas UHs das ZBs 7 e 8 também não atingiram esse nível. O aumento médio geral no PHFT foi de 2,4% e a redução média geral no CgTT foi de 215,1 kWh/ano, em contraste com os resultados gerais da adição de PCM de 15,8% e 1433,4 kWh/ano, respectivamente.

O sistema híbrido que atingiu os melhores resultados para todos os casos, exceto para o *wood frame* na ZB7, foi a laje em concreto com vigas em madeira. Notou-se que o posicionamento da massa térmica em contato com o ambiente interno influenciou positivamente os resultados, uma vez que o outro modelo, de concreto com CLT possuía mais massa, mas a madeira, por ser um isolante térmico e estar em contato com o ambiente interno, ao invés do concreto, apresentou resultados próximos, porém inferiores. Simular os cenários auxilia em tomadas de decisões como essa, em que pode haver uma redução significativa de material, mantendo níveis de conforto e eficiência energética.

Como observado, os sistemas híbridos não provocaram mudanças significativas nos resultados. Já a adição de PCM melhorou o nível de desempenho, aumentou o conforto e a eficiência energética. Por isso, na etapa 3, adicionou-se PCM nos modelos simples de WF e CLT para investigar a possibilidade de reduzir a quantidade de material, mantendo o nível superior de desempenho

4.3 Etapa 3 – Modelos Econômicos

Na Etapa 3, aplicaram-se as estratégias que apresentaram os melhores resultados nas etapas anteriores aos modelos simples, ou econômicos por usarem menos material, de *wood frame* e CLT (WF-S e CLT-3) para investigar se haveria alteração no nível de desempenho. Para todas as zonas bioclimáticas, o PCM foi aplicado nas paredes e teto, respeitando o ponto de fusão adequado para cada clima. As Tabelas 33 a 40, que apresentaram os resultados da Etapa 3, mostraram primeiramente os casos base selecionados na Etapa 1. Na segunda linha, lembraram os resultados do PCM selecionado na Etapa 2.1 e por fim, na terceira linha, mostraram os resultados desses PCMs aplicados aos modelos econômicos.

Os resultados da Etapa 3 para Curitiba (PR), (ZB1) mantiveram os níveis de desempenho superior mesmo alterando-se a composição dos sistemas construtivos de camada dupla de gesso acartonado para camada simples no *wood frame*, de cinco para três camadas no CLT e sem o isolante térmico em ambos (Tabela 33). O impacto foi maior nas UHs com fachada sul tanto no WF como no CLT. As UHs do modelo em CLT (CLT-3 PCM23), à exceção da UH norte-leste apresentaram valores de PHFT menores que o caso base da Etapa 1. Houve redução de CgTT em todas as UHs para ambos os sistemas em relação à Etapa 1.

Tabela 33 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) pela adição de PCM nos modelos de WF-S e CLT-3 para ZB1 (Curitiba, PR)

	Wood Frame			Cross Laminated Timber		
Caso Base (Etapa 1)	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	97.6%	96.9%	97.5%	98.5%	97.7%	98.3%
	96	119	120	90	124	112
	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	96.9%	96.2%	97.2%	98.2%	97.5%	98.3%
	86	98	104	81	95	93
	ZB1 WF-D + isolante			ZB1 CLT 5 cam. + isolante		
Caso Base + PCM (Etapa 2.1)	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
	0	0	0	0	0	0
	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
	0	0	0	0	0	0
	ZB1 WF-D-iso PCM21			ZB1 CLT-5-iso PCM23		
Adição de PCM nos modelos econômicos	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	99.6%	99.5%	99.7%	98.2%	97.6%	99.0%
	7	9	6	4	8	3
	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	98.0%	97.4%	98.4%	95.8%	92.9%	97.3%
	33	40	28	34	50	25
	ZB1 WF-S PCM21			ZB1 CLT-3 PCM23		

Fonte: elaborado pela autora (2023).

A Tabela 34 mostra que os modelos econômicos apresentaram resultados intermediários entre os da Etapa 1 e da Etapa 2.1, mesmo assim mantendo os níveis

de desempenho superior das UHs. O PHFT médio das etapas foi, respectivamente, de 77,4%, 91,7% e 83,0%.

Tabela 34 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) pela adição de PCM nos modelos de WF-S e CLT-3 para ZB2 (Santa Maria, RS)

	Wood Frame			Cross Laminated Timber		
Caso Base (Etapa 1)	INT.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	77.6%	75.6%	79.2%	79.1%	77.0%	80.7%
	1275	1335	1244	1227	1295	1195
	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	76.2%	73.4%	77.6%	78.0%	75.3%	79.3%
	1189	1268	1191	1126	1190	1129
	ZB2 WF-D + isolante			ZB2 CLT 5 cam. + isolante		
Caso Base + PCM (Etapa 2.1)	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	92.2%	92.2%	93.4%	93.1%	92.4%	94.3%
	386	402	330	384	425	318
	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	89.9%	88.4%	91.3%	91.1%	89.3%	92.5%
	375	420	337	365	412	318
	ZB2 WF-D-iso PCM25			ZB2 CLT-5-iso PCM25		
Adição de PCM nos modelos econômicos	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	82.8%	82.8%	85.0%	85.6%	85.1%	87.9%
	498	506	421	426	444	347
	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	80.0%	78.1%	82.0%	82.6%	80.0%	84.6%
	572	669	499	492	590	428
	ZB2 WF-S PCM25			ZB2 CLT-3 PCM25		

Fonte: elaborado pela autora (2023).

Os modelos econômicos com a adição PCM para a zona bioclimática 3, representada pela cidade de Campinas (SP), obtiveram resultados superiores tanto em relação ao PHFT quanto ao CgTT, mantendo o nível de desempenho (Tabela 35).

Tabela 35 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) pela adição de PCM nos modelos de WF-S e CLT-3 para ZB3 (Campinas, SP)

	Wood Frame			Cross Laminated Timber		
Caso Base (Etapa 1)	INT.	INT.	INT.	INT.	INT.	INT.
	78.6%	76.4%	80.6%	79.4%	76.4%	81.8%
	1687	1821	1587	1543	1702	1429
	MÍN.	MÍN.	INT.	INT.	INT.	INT.
	81.7%	79.7%	81.9%	83.3%	80.7%	83.3%
	1439	1550	1444	1262	1404	1290
	ZB3 WF-D (gesso duplo)			ZB3 CLT 5 camadas		
Caso Base + PCM (Etapa 2.1)	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	97.3%	96.7%	97.9%	97.1%	96.0%	98.1%
	163	198	134	201	249	140
	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	97.8%	96.9%	97.9%	98.1%	96.7%	98.2%
	134	183	132	128	206	127
	ZB3 WF-D PCM23			ZB3 CLT-5 PCM25		
Adição de PCM nos modelos econômicos	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	97.7%	97.1%	98.2%	97.8%	97.1%	98.4%
	136	166	118	158	178	116
	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	97.9%	97.3%	98.1%	98.4%	97.5%	98.5%
	123	158	115	112	159	104
	ZB3 WF-S PCM23			ZB3 CLT-3 PCM25		

Fonte: elaborado pela autora (2023).

Para a cidade de Brasília (DF), (ZB4) os modelos econômicos com PCM mantiveram o nível superior, o PHFT em 100,0% e a CgTT em 0,0 kWh/ano, conforme Tabela 36. Além disso, a Tomáx foi menor e a Tomín maior que os casos da Etapa 2.1.

Tabela 36 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) pela adição de PCM nos modelos de WF-S e CLT-3 para ZB4 (Brasília, DF)

	Wood Frame			Cross Laminated Timber		
Caso Base (Etapa 1)	MÍN.	INT.	INT.	INT.	INT.	SUP.
	93.2%	92.6%	92.9%	94.2%	93.2%	94.2%
	440	471	464	354	405	362
	MÍN.	MÍN.	INT.	MÍN.	MÍN.	INT.
	94.6%	94.4%	94.0%	95.5%	94.9%	95.2%
	341	357	387	273	303	304
	ZB4 WF-D (gesso duplo)			ZB4 CLT 5 camadas		

Caso Base + PCM (Etapa 2.1)	<table border="1"> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> <tr><td>100.0%</td><td>100.0%</td><td>100.0%</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> <tr><td>100.0%</td><td>100.0%</td><td>100.0%</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> </table>	SUP.	SUP.	SUP.	100.0%	100.0%	100.0%	0	0	0	SUP.	SUP.	SUP.	100.0%	100.0%	100.0%	0	0	0	<table border="1"> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> <tr><td>100.0%</td><td>100.0%</td><td>100.0%</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> <tr><td>100.0%</td><td>100.0%</td><td>100.0%</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> </table>	SUP.	SUP.	SUP.	100.0%	100.0%	100.0%	0	0	0	SUP.	SUP.	SUP.	100.0%	100.0%	100.0%	0	0	0
	SUP.	SUP.	SUP.																																			
100.0%	100.0%	100.0%																																				
0	0	0																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
100.0%	100.0%	100.0%																																				
0	0	0																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
100.0%	100.0%	100.0%																																				
0	0	0																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
100.0%	100.0%	100.0%																																				
0	0	0																																				
	ZB4 WF-D PCM23	ZB4 CLT-5 PCM23																																				
Adição de PCM nos modelos econômicos	<i>Temp. máx. menor e mín. maior</i> <table border="1"> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> <tr><td>100.0%</td><td>100.0%</td><td>100.0%</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> <tr><td>100.0%</td><td>100.0%</td><td>100.0%</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> </table>	SUP.	SUP.	SUP.	100.0%	100.0%	100.0%	0	0	0	SUP.	SUP.	SUP.	100.0%	100.0%	100.0%	0	0	0	<i>Temp. máx. menor</i> <table border="1"> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> <tr><td>100.0%</td><td>100.0%</td><td>100.0%</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> <tr><td>100.0%</td><td>100.0%</td><td>100.0%</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> </table>	SUP.	SUP.	SUP.	100.0%	100.0%	100.0%	0	0	0	SUP.	SUP.	SUP.	100.0%	100.0%	100.0%	0	0	0
	SUP.	SUP.	SUP.																																			
100.0%	100.0%	100.0%																																				
0	0	0																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
100.0%	100.0%	100.0%																																				
0	0	0																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
100.0%	100.0%	100.0%																																				
0	0	0																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
100.0%	100.0%	100.0%																																				
0	0	0																																				
	ZB4 WF-S PCM23	ZB4 CLT-3 PCM23																																				

Fonte: elaborado pela autora (2023).

Semelhantemente às ZB3 e ZB4, os resultados para a zona bioclimática 5 (Niterói, RJ) dos modelos econômicos com PCM foram superiores aos resultados da Etapa 2.1, correspondente aos casos base com PCM (Tabela 37). O mesmo ocorreu para a ZB6 (Tabela 38), ZB7 (Tabela 39) e ZB8 (Tabela 40).

Tabela 37 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) pela adição de PCM nos modelos de WF-S e CLT-3 para ZB5 (Niterói, RJ)

Caso Base (Etapa 1)	<p>Wood Frame</p> <table border="1"> <tr><th>INT.</th><th>INT.</th><th>INT.</th></tr> <tr><td>78.6%</td><td>78.2%</td><td>77.9%</td></tr> <tr><td>1454</td><td>1483</td><td>1486</td></tr> <tr><th>MÍN.</th><th>MÍN.</th><th>INT.</th></tr> <tr><td>81.4%</td><td>82.1%</td><td>81.2%</td></tr> <tr><td>1281</td><td>1185</td><td>1294</td></tr> </table>	INT.	INT.	INT.	78.6%	78.2%	77.9%	1454	1483	1486	MÍN.	MÍN.	INT.	81.4%	82.1%	81.2%	1281	1185	1294	<p>Cross Laminated Timber</p> <table border="1"> <tr><th>INT.</th><th>INT.</th><th>INT.</th></tr> <tr><td>76.1%</td><td>75.4%</td><td>75.0%</td></tr> <tr><td>1523</td><td>1554</td><td>1578</td></tr> <tr><th>MÍN.</th><th>MÍN.</th><th>INT.</th></tr> <tr><td>79.5%</td><td>80.5%</td><td>79.4%</td></tr> <tr><td>1317</td><td>1211</td><td>1332</td></tr> </table>	INT.	INT.	INT.	76.1%	75.4%	75.0%	1523	1554	1578	MÍN.	MÍN.	INT.	79.5%	80.5%	79.4%	1317	1211	1332
	INT.	INT.	INT.																																			
78.6%	78.2%	77.9%																																				
1454	1483	1486																																				
MÍN.	MÍN.	INT.																																				
81.4%	82.1%	81.2%																																				
1281	1185	1294																																				
INT.	INT.	INT.																																				
76.1%	75.4%	75.0%																																				
1523	1554	1578																																				
MÍN.	MÍN.	INT.																																				
79.5%	80.5%	79.4%																																				
1317	1211	1332																																				
	ZB5 WF-D (gesso duplo)	ZB5 CLT 5 camadas																																				
Caso Base + PCM (Etapa 2.1)	<table border="1"> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> <tr><td>91.3%</td><td>91.8%</td><td>90.7%</td></tr> <tr><td>505</td><td>486</td><td>525</td></tr> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> <tr><td>91.6%</td><td>92.3%</td><td>91.5%</td></tr> <tr><td>512</td><td>468</td><td>520</td></tr> </table>	SUP.	SUP.	SUP.	91.3%	91.8%	90.7%	505	486	525	SUP.	SUP.	SUP.	91.6%	92.3%	91.5%	512	468	520	<table border="1"> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> <tr><td>88.9%</td><td>88.5%</td><td>88.3%</td></tr> <tr><td>587</td><td>598</td><td>611</td></tr> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> <tr><td>88.9%</td><td>89.3%</td><td>88.7%</td></tr> <tr><td>608</td><td>569</td><td>619</td></tr> </table>	SUP.	SUP.	SUP.	88.9%	88.5%	88.3%	587	598	611	SUP.	SUP.	SUP.	88.9%	89.3%	88.7%	608	569	619
	SUP.	SUP.	SUP.																																			
91.3%	91.8%	90.7%																																				
505	486	525																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
91.6%	92.3%	91.5%																																				
512	468	520																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
88.9%	88.5%	88.3%																																				
587	598	611																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
88.9%	89.3%	88.7%																																				
608	569	619																																				
	ZB5 WF-D PCM25	ZB5 CLT-5 PCM25																																				

Adição de PCM nos modelos econômicos	<table border="1"> <thead> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>92.5%</td><td>92.9%</td><td>91.9%</td></tr> <tr><td>439</td><td>431</td><td>469</td></tr> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> <tr><td>92.7%</td><td>93.4%</td><td>92.4%</td></tr> <tr><td>456</td><td>409</td><td>474</td></tr> </tbody> </table>	SUP.	SUP.	SUP.	92.5%	92.9%	91.9%	439	431	469	SUP.	SUP.	SUP.	92.7%	93.4%	92.4%	456	409	474	<table border="1"> <thead> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>90.9%</td><td>90.9%</td><td>90.3%</td></tr> <tr><td>507</td><td>505</td><td>526</td></tr> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> <tr><td>91.1%</td><td>91.5%</td><td>90.8%</td></tr> <tr><td>522</td><td>492</td><td>534</td></tr> </tbody> </table>	SUP.	SUP.	SUP.	90.9%	90.9%	90.3%	507	505	526	SUP.	SUP.	SUP.	91.1%	91.5%	90.8%	522	492	534
	SUP.	SUP.	SUP.																																			
92.5%	92.9%	91.9%																																				
439	431	469																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
92.7%	93.4%	92.4%																																				
456	409	474																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
90.9%	90.9%	90.3%																																				
507	505	526																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
91.1%	91.5%	90.8%																																				
522	492	534																																				
	ZB5 WF-S PCM25	ZB5 CLT-3 PCM25																																				

Fonte: elaborado pela autora (2023).

Tabela 38 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) pela adição de PCM nos modelos de WF-S e CLT-3 para ZB6 (Campo Grande, MS)

Caso Base (Etapa 1)	<p>Wood Frame</p> <table border="1"> <thead> <tr><th>MÍN.</th><th>MÍN.</th><th>MÍN.</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>71.1%</td><td>63.9%</td><td>70.7%</td></tr> <tr><td>2352</td><td>2729</td><td>2348</td></tr> <tr><th>MÍN.</th><th>MÍN.</th><th>MÍN.</th></tr> <tr><td>71.5%</td><td>66.7%</td><td>72.5%</td></tr> <tr><td>2188</td><td>2417</td><td>2133</td></tr> </tbody> </table>	MÍN.	MÍN.	MÍN.	71.1%	63.9%	70.7%	2352	2729	2348	MÍN.	MÍN.	MÍN.	71.5%	66.7%	72.5%	2188	2417	2133	<p>Cross Laminated Timber</p> <table border="1"> <thead> <tr><th>MÍN.</th><th>MÍN.</th><th>MÍN.</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>71.7%</td><td>59.7%</td><td>71.1%</td></tr> <tr><td>2171</td><td>2757</td><td>2202</td></tr> <tr><th>MÍN.</th><th>MÍN.</th><th>MÍN.</th></tr> <tr><td>71.4%</td><td>63.6%</td><td>72.5%</td></tr> <tr><td>2072</td><td>2400</td><td>2018</td></tr> </tbody> </table>	MÍN.	MÍN.	MÍN.	71.7%	59.7%	71.1%	2171	2757	2202	MÍN.	MÍN.	MÍN.	71.4%	63.6%	72.5%	2072	2400	2018
	MÍN.	MÍN.	MÍN.																																			
71.1%	63.9%	70.7%																																				
2352	2729	2348																																				
MÍN.	MÍN.	MÍN.																																				
71.5%	66.7%	72.5%																																				
2188	2417	2133																																				
MÍN.	MÍN.	MÍN.																																				
71.7%	59.7%	71.1%																																				
2171	2757	2202																																				
MÍN.	MÍN.	MÍN.																																				
71.4%	63.6%	72.5%																																				
2072	2400	2018																																				
	ZB6 WF-D (gesso duplo)	ZB6 CLT 5 camadas																																				
Caso Base + PCM (Etapa 2.1)	<table border="1"> <thead> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>93.6%</td><td>90.7%</td><td>93.8%</td></tr> <tr><td>433</td><td>593</td><td>411</td></tr> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> <tr><td>93.7%</td><td>91.7%</td><td>94.0%</td></tr> <tr><td>420</td><td>523</td><td>397</td></tr> </tbody> </table>	SUP.	SUP.	SUP.	93.6%	90.7%	93.8%	433	593	411	SUP.	SUP.	SUP.	93.7%	91.7%	94.0%	420	523	397	<table border="1"> <thead> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>95.0%</td><td>90.3%</td><td>94.9%</td></tr> <tr><td>337</td><td>599</td><td>333</td></tr> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> <tr><td>94.6%</td><td>91.1%</td><td>95.1%</td></tr> <tr><td>357</td><td>543</td><td>323</td></tr> </tbody> </table>	SUP.	SUP.	SUP.	95.0%	90.3%	94.9%	337	599	333	SUP.	SUP.	SUP.	94.6%	91.1%	95.1%	357	543	323
	SUP.	SUP.	SUP.																																			
93.6%	90.7%	93.8%																																				
433	593	411																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
93.7%	91.7%	94.0%																																				
420	523	397																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
95.0%	90.3%	94.9%																																				
337	599	333																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
94.6%	91.1%	95.1%																																				
357	543	323																																				
	ZB6 WF-D PCM25	ZB6 CLT-5 PCM25																																				
Adição de PCM nos modelos econômicos	<table border="1"> <thead> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>95.6%</td><td>92.9%</td><td>95.5%</td></tr> <tr><td>291</td><td>445</td><td>291</td></tr> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> <tr><td>95.4%</td><td>93.6%</td><td>95.7%</td></tr> <tr><td>300</td><td>399</td><td>277</td></tr> </tbody> </table>	SUP.	SUP.	SUP.	95.6%	92.9%	95.5%	291	445	291	SUP.	SUP.	SUP.	95.4%	93.6%	95.7%	300	399	277	<table border="1"> <thead> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>95.3%</td><td>92.1%</td><td>95.3%</td></tr> <tr><td>311</td><td>490</td><td>308</td></tr> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> <tr><td>95.2%</td><td>92.8%</td><td>95.4%</td></tr> <tr><td>315</td><td>440</td><td>294</td></tr> </tbody> </table>	SUP.	SUP.	SUP.	95.3%	92.1%	95.3%	311	490	308	SUP.	SUP.	SUP.	95.2%	92.8%	95.4%	315	440	294
	SUP.	SUP.	SUP.																																			
95.6%	92.9%	95.5%																																				
291	445	291																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
95.4%	93.6%	95.7%																																				
300	399	277																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
95.3%	92.1%	95.3%																																				
311	490	308																																				
SUP.	SUP.	SUP.																																				
95.2%	92.8%	95.4%																																				
315	440	294																																				
	ZB6 WF-S PCM25	ZB6 CLT-3 PCM25																																				

Fonte: elaborado pela autora (2023).

Tabela 39 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) pela adição de PCM nos modelos de WF-S e CLT-3 para ZB7 (Teresina, PI)

	Wood Frame			Cross Laminated Timber		
	INT.	MÍN.	INT.	INT.	MÍN.	INT.
Caso Base (Etapa 1)	69.4%	68.5%	68.2%	69.6%	67.8%	67.0%
	3759	3965	3784	3402	3617	3533
	MÍN.	MÍN.	INT.	MÍN.	MÍN.	INT.
	70.0%	70.4%	68.7%	70.0%	70.5%	68.0%
	3579	3689	3634	3234	3270	3349
	ZB7 WF-D (gesso duplo)			ZB7 CLT 5 camadas		
Caso Base + PCM (Etapa 2.1)	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	99.0%	99.2%	98.6%	99.4%	99.9%	99.1%
	103	90	147	81	13	120
	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	99.0%	98.8%	98.3%	99.4%	99.8%	99.1%
	108	128	178	71	29	117
	ZB7 WF-D PCM 27			ZB7 CLT-5 PCM29		
Adição de PCM nos modelos econômicos	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	99.8%	100.0%	99.7%	99.8%	100.0%	99.6%
	25	5	35	30	5	53
	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.	SUP.
	99.9%	100.0%	99.9%	99.8%	99.9%	99.7%
	18	6	16	31	16	33
	ZB7 WF-S PCM29			ZB7 CLT-3 PCM29		

Fonte: elaborado pela autora (2023).

Tabela 40 – Resultados de nível de desempenho, de PHFT (%) e de Carga Térmica (kWh/ano) pela adição de PCM nos modelos de WF-S e CLT-3 para ZB8 (Belém, PA)

	Wood Frame			Cross Laminated Timber		
	MÍN.	INT.	INT.	MÍN.	INT.	INT.
Caso Base (Etapa 1)	77.7%	79.9%	77.6%	77.9%	80.2%	77.5%
	2867	2702	2857	2599	2419	2646
	INT.	INT.	INT.	INT.	INT.	INT.
	79.0%	80.0%	78.4%	79.0%	80.6%	78.1%
	2662	2656	2741	2445	2352	2548
	ZB8 WF-D (gesso duplo)			ZB8 CLT 5 camadas		

Caso Base + PCM (Etapa 2.1)	<table border="1"> <thead> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>100.0%</td><td>100.0%</td><td>100.0%</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>	SUP.	SUP.	SUP.	100.0%	100.0%	100.0%	0	0	0	<table border="1"> <thead> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>100.0%</td><td>100.0%</td><td>100.0%</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>	SUP.	SUP.	SUP.	100.0%	100.0%	100.0%	0	0	0
	SUP.	SUP.	SUP.																	
100.0%	100.0%	100.0%																		
0	0	0																		
SUP.	SUP.	SUP.																		
100.0%	100.0%	100.0%																		
0	0	0																		
	ZB8 WF-D PCM29	ZB8 CLT-5 PCM29																		
Adição de PCM nos modelos econômicos	<i>Temp. máx. menor e mín. maior</i> <table border="1"> <thead> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>100.0%</td><td>100.0%</td><td>100.0%</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>	SUP.	SUP.	SUP.	100.0%	100.0%	100.0%	0	0	0	<i>Temp. máx. menor e mín. maior</i> <table border="1"> <thead> <tr><th>SUP.</th><th>SUP.</th><th>SUP.</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>100.0%</td><td>100.0%</td><td>100.0%</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>	SUP.	SUP.	SUP.	100.0%	100.0%	100.0%	0	0	0
	SUP.	SUP.	SUP.																	
100.0%	100.0%	100.0%																		
0	0	0																		
SUP.	SUP.	SUP.																		
100.0%	100.0%	100.0%																		
0	0	0																		
	ZB8 WF-S PCM29	ZB8 CLT-3 PCM29																		

Fonte: elaborado pela autora (2023).

Para todas as zonas bioclimáticas, os modelos econômicos com PCM obtiveram o nível superior de desempenho, inclusive nas zonas 1 e 2, em que os casos base tinham isolante térmico.

Nas ZB1 e ZB2 a Etapa 3 apresentou valores reduzidos de PHFT e aumentados de CgTT em relação à Etapa 2.1. Ao contrário, nas demais zonas (ZBs 3, 4, 5, 6, 7 e 8) os resultados foram melhores nos modelos econômicos tanto no que se refere a PHFT quanto a CgTT. Esses dados sugeriram que o PCM reduziu a necessidade de outros materiais na composição das camadas dos sistemas construtivos e reafirmaram o potencial de aplicação de PCM nas construções em madeira industrializada no Brasil, principalmente nas zonas 3 a 8.

4.4 Resultados Gerais

Até aqui, todas as comparações foram feitas por meio da seleção de um caso por sistema construtivo por etapa e, conseqüentemente, pela exclusão dos demais. Entretanto, para se ter um panorama de todos os casos base (Etapa 1) em relação aos casos com resultados superiores para cada etapa subsequente, decidiu-se agrupar os resultados por variável nos gráficos abaixo.

Para se chegar a um valor por caso, foi necessário fazer uma média do PHFT e da CgTT das seis unidades habitacionais, além de selecionar o valor máximo e mínimo da temperatura operativa entre as seis UHs para definir a Tomáx e a Tomín por caso. A NBR 15575 orienta que o nível de desempenho seja calculado por unidade habitacional como havia sido feito até o momento, entretanto, julgou-se importante analisar dessa forma também.

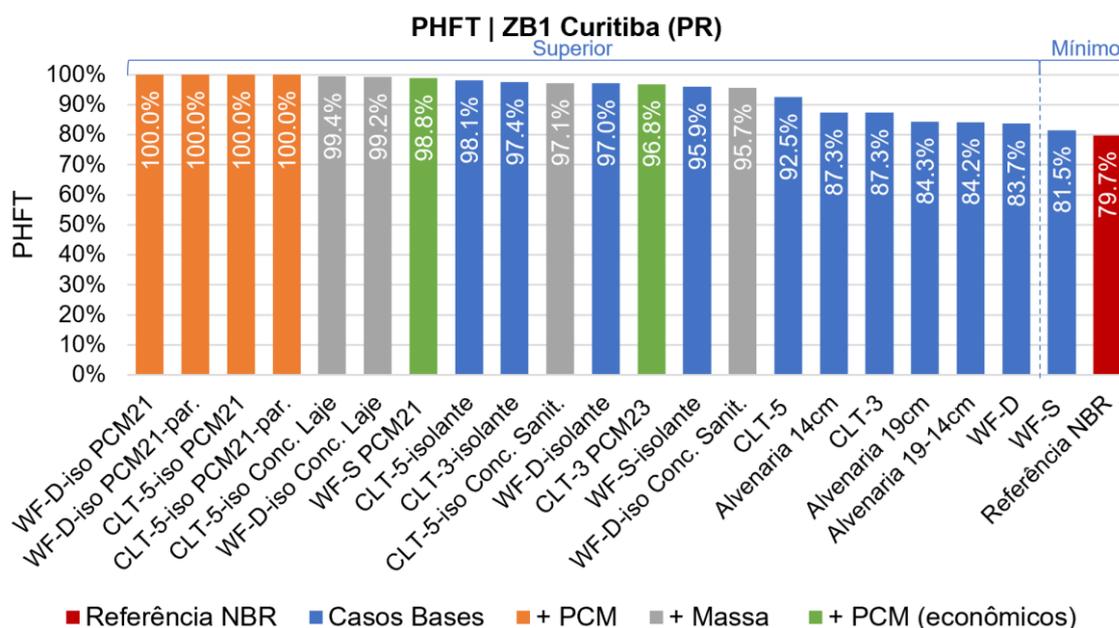
Os gráficos que se seguem possuem uma legenda de cores para diferenciar os casos por etapas. A cor azul refere-se aos casos base da Etapa 1; a cor laranja, a adição de PCM da Etapa 2.1; a cor cinza, a adição de massa térmica por meio dos sistemas híbridos da Etapa 2.2; a cor verde, a adição de PCM nos modelos econômicos da Etapa 3; a cor vermelha, o modelo de referência da norma.

4.4.1 PHFT – Percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa

O PHFT foi calculado com base em um intervalo de temperatura operativa definido a partir da TBS_m de cada cidade. Para as zonas bioclimáticas 1 a 6 foram definidos os intervalos entre 18 °C e 26 °C e para as zonas 7 e 8, valores menores que 30 °C. As Figuras 36 a 43 apresentam os resultados do PHFT em ordem decrescente para as oito zonas.

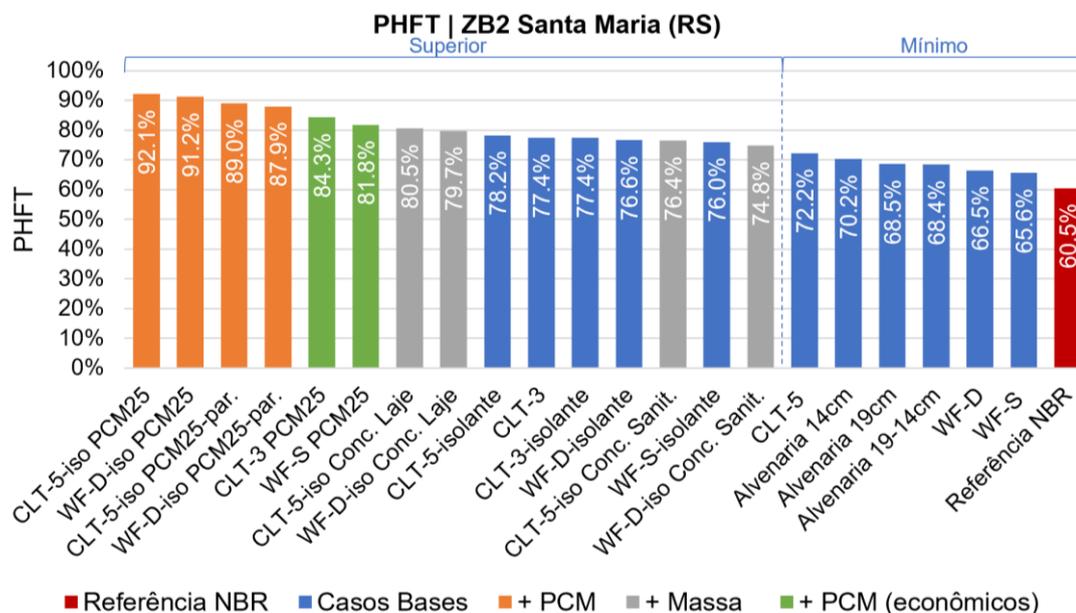
Para todas as zonas, notou-se uma predominância dos modelos com PCM (cores laranja e verde) apresentando valores mais elevados de PHFT que os demais. Entretanto, observou-se uma distinção de padrões entre as zonas 1 e 2 e as demais, 3 a 8. Para o primeiro grupo (ZBs 1 e 2), em primeiro lugar ficaram os casos de WF eCLT com PCM e isolante. Para a ZB1, logo em seguida vieram os sistemas híbridos de laje de concreto, já para a ZB2, os modelos econômicos com PCM. Para esse grupo, os casos em alvenaria e em WF sem isolante apresentaram os menores valores de PHFT (Figuras 36 e 37).

Figura 36 – Percentual de horas de ocupação dentro da faixa de temperatura operativa e nível de desempenho para a zona bioclimática 1 (Curitiba, PR)



Fonte: elaborado pela autora (2023).

Figura 37 – Percentual de horas de ocupação dentro da faixa de temperatura operativa e nível de desempenho para a zona bioclimática 2 (Santa Maria, RS)



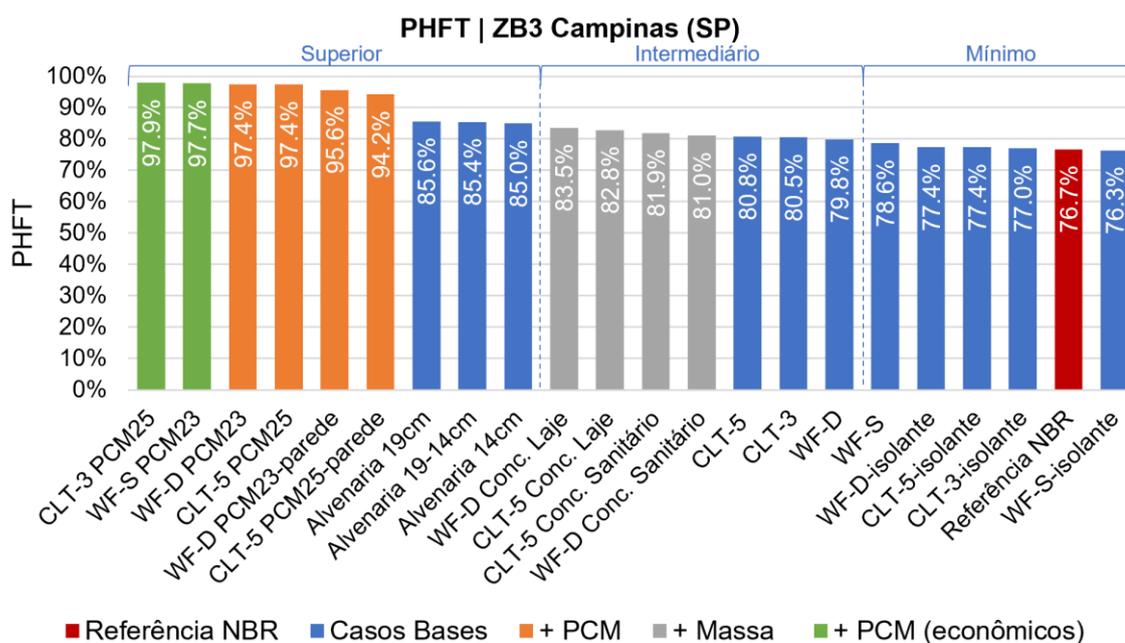
Fonte: elaborado pela autora (2023).

Para o segundo grupo (ZBs 3 a 8), (Figuras 38 a 43), os modelos WF e CLT econômicos com PCM apresentaram os maiores valores de PHFT, seguidos dos demais modelos em madeira com PCM e depois, dos casos em alvenaria. Os menores

valores de PHFT para esse grupo foram constatados nos modelos com isolante térmico; o contrário do padrão observado no primeiro grupo. Os casos com sistemas híbridos obtiveram valores intermediários de PHFT em relação aos demais.

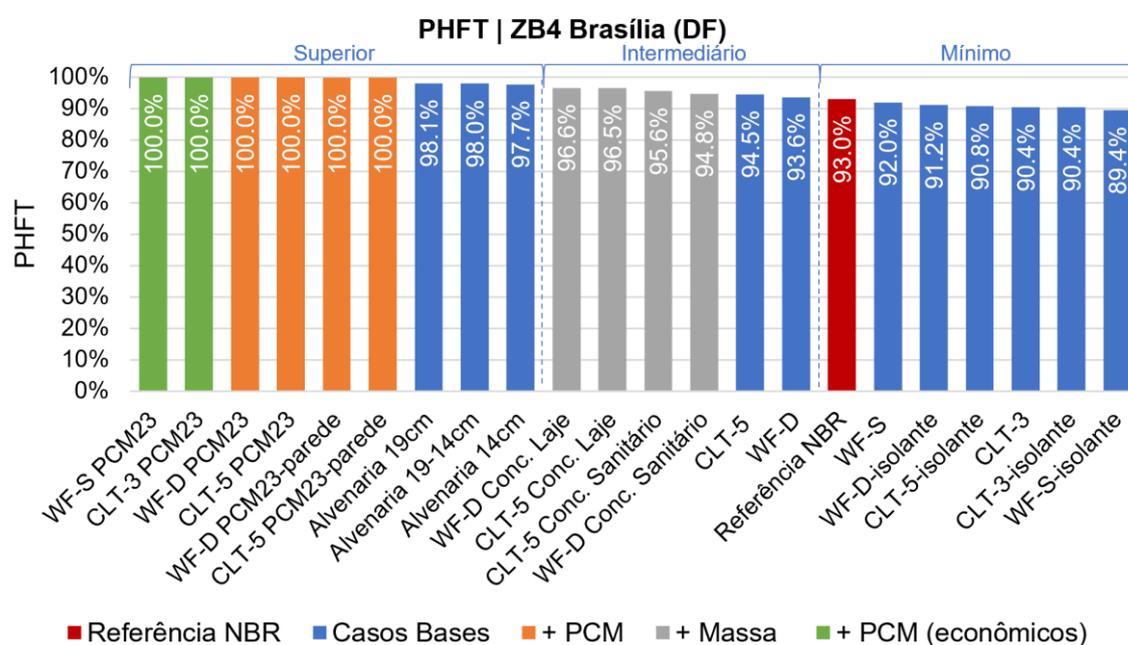
No que diz respeito ao nível de desempenho, calculado a partir dos parâmetros de PHFT, CgTT, Tomáx e Tomín, pôde-se perceber uma subdivisão nesse grupo. Apresentaram níveis de desempenho superior nas ZBs 3 e 4 todos os modelos com PCM e em alvenaria. Nas ZBs 5 e 6, apenas os modelos com PCM obtiveram nível superior. Já nas ZBs 7 e 8, todos os modelos com PCM, em alvenaria e um dos modelos híbridos alcançaram o nível superior.

Figura 38 – Percentual de horas de ocupação dentro da faixa de temperatura operativa e nível de desempenho para a zona bioclimática 3 (Campinas, SP)



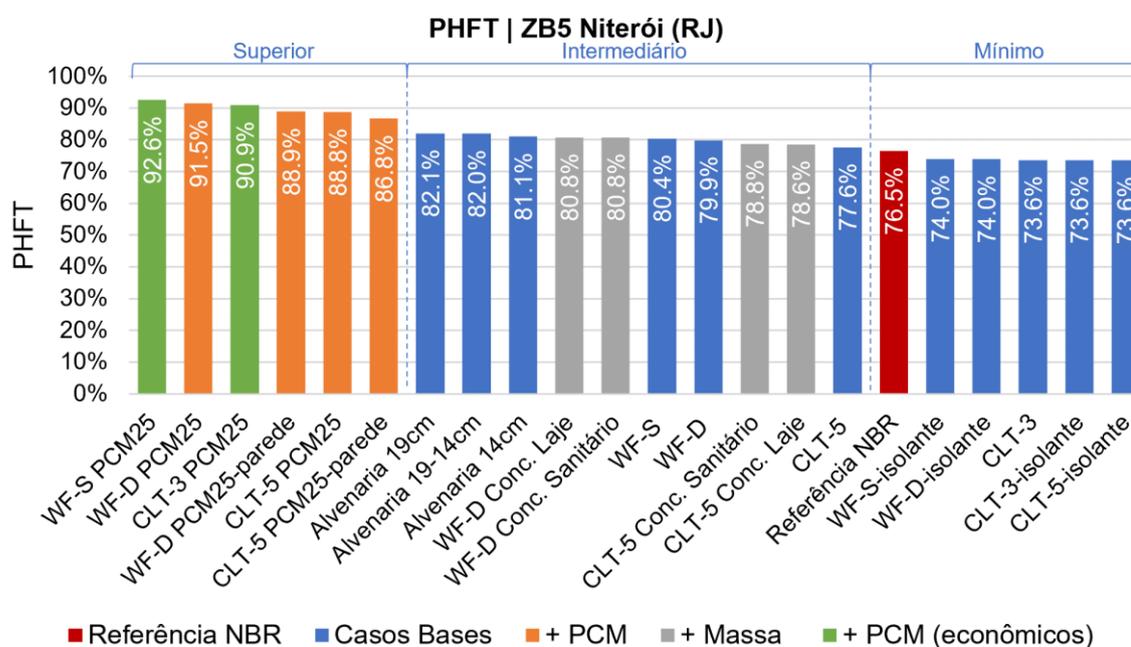
Fonte: elaborado pela autora (2023).

Figura 39 – Percentual de horas de ocupação dentro da faixa de temperatura operativa e nível de desempenho para a zona bioclimática 4 (Brasília, DF)



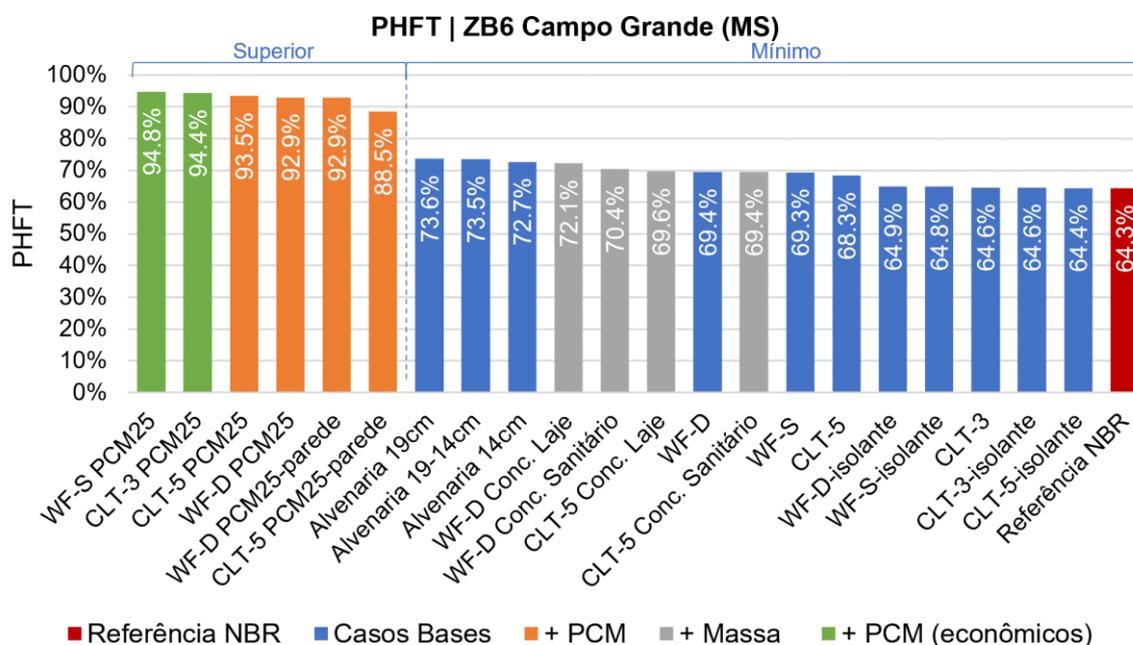
Fonte: elaborado pela autora (2023).

Figura 40 – Percentual de horas de ocupação dentro da faixa de temperatura operativa e nível de desempenho para a zona bioclimática 5 (Niterói, RJ)



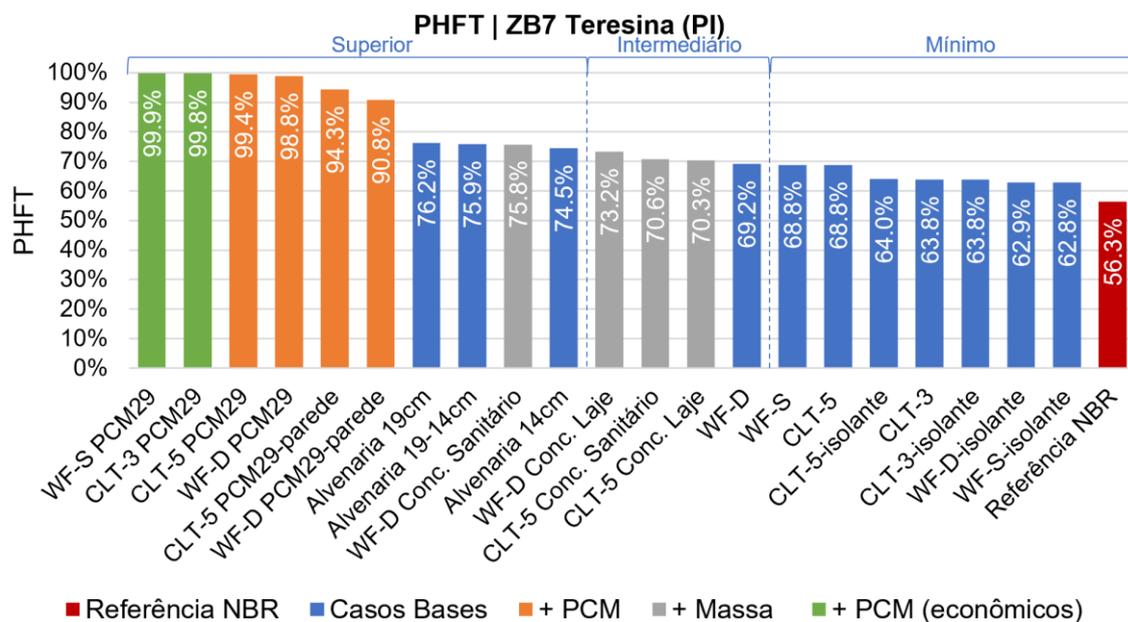
Fonte: elaborado pela autora (2023).

Figura 41 – Percentual de horas de ocupação dentro da faixa de temperatura operativa e nível de desempenho para a zona bioclimática 6 (Campo Grande, MS)



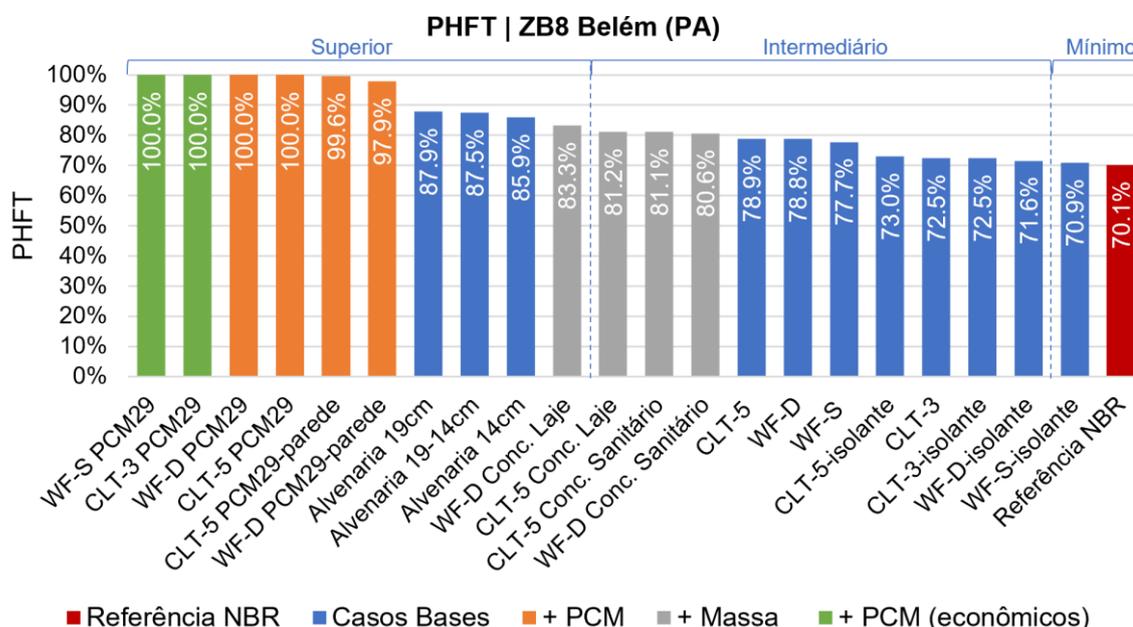
Fonte: elaborado pela autora (2023).

Figura 42 – Percentual de horas de ocupação dentro da faixa de temperatura operativa e nível de desempenho para a zona bioclimática 7 (Teresina, PI)



Fonte: elaborado pela autora (2023).

Figura 43 – Percentual de horas de ocupação dentro da faixa de temperatura operativa e nível de desempenho para a zona bioclimática 8 (Belém, PA)



Fonte: elaborado pela autora (2023).

Os gráficos de PHFT mostraram a diferença entre as ZBs 1 e 2, que se beneficiaram dos casos com PCM e dos modelos em madeira com isolamento térmico em detrimento da alvenaria, e as ZBs 3 a 8, que obtiveram resultados mais satisfatórios com PCM, seguido dos modelos em alvenaria. Ambos os cenários ratificam o potencial de aplicação do PCM na construção civil no Brasil.

4.4.2 CgTT – Carga térmica total

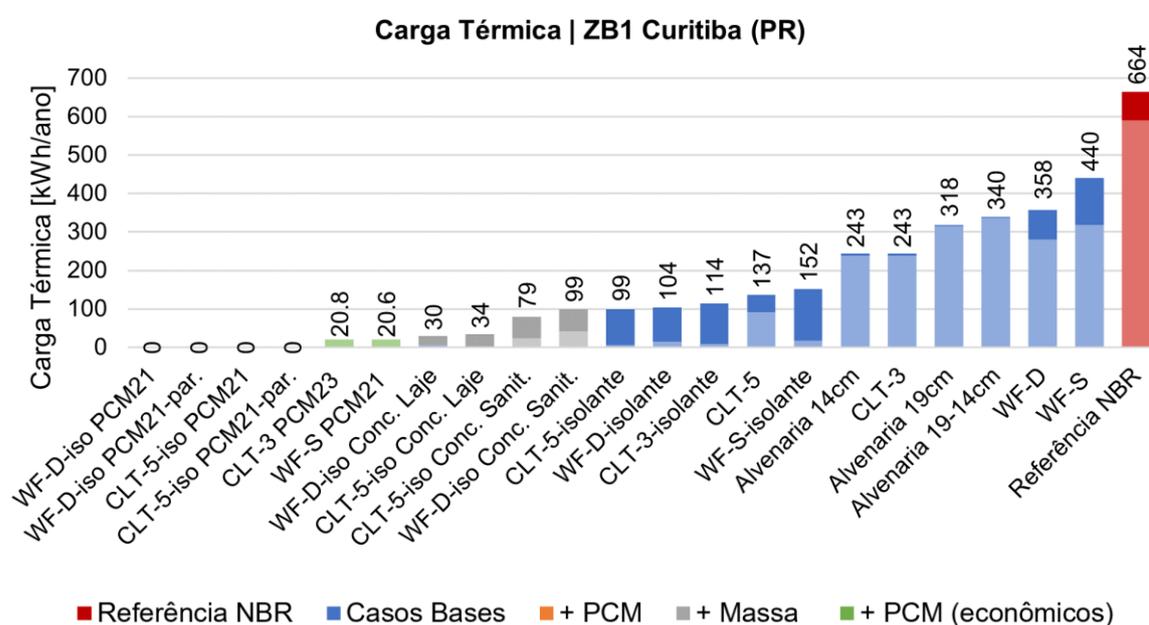
A carga térmica total foi calculada pela somatória das cargas de aquecimento e refrigeração por UH e feita uma média das UHs para se obter um valor por caso. As Figuras 44 a 51 mostraram as cargas térmicas por zona bioclimática. As ZBs 1 e 2, além da carga térmica de refrigeração, apresentaram valores de carga térmica para aquecimento. Esses foram representados por cores claras e a carga de refrigeração por cores escuras. Os números em cada coluna referem-se às cargas térmicas totais.

Constatou-se que, para todas as zonas bioclimáticas, os menores valores de CgTT foram encontrados nos modelos de WF e CLT com PCM. A partir da zona bioclimática

3 (ZBs 3 a 8), primeiro vieram os modelos econômicos com PCM (Etapa 3) e em seguida os casos base acrescidos de PCM, da Etapa 2.1.

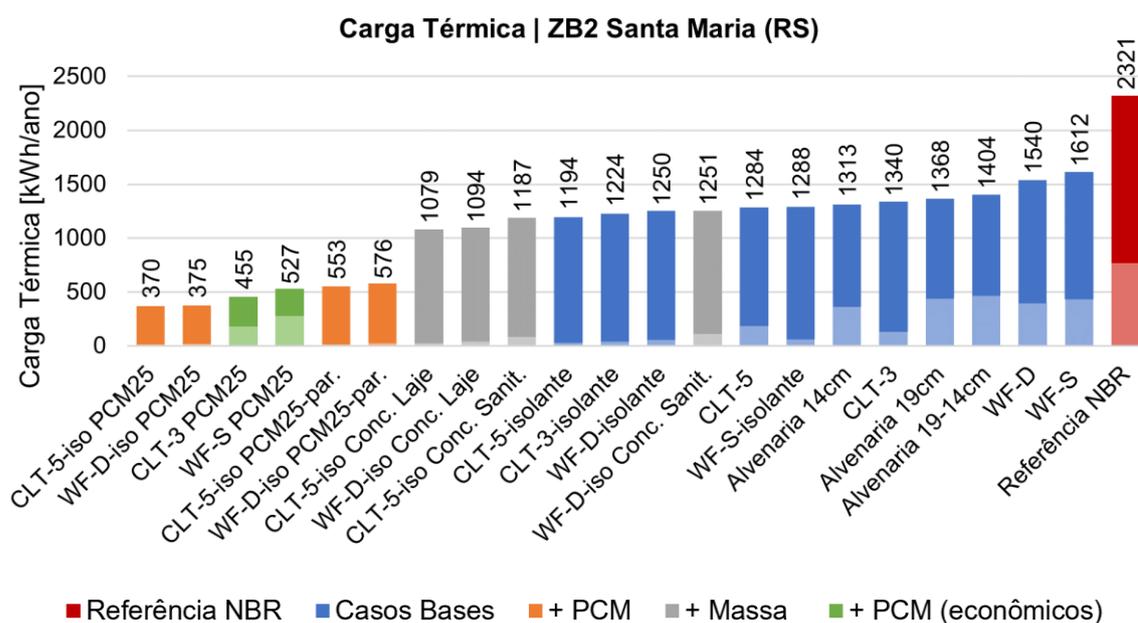
Nas ZBs 1 e 2, após os modelos com PCM, vieram os casos com sistemas híbridos. As opções em alvenaria e WF sem isolante ficaram por último, com os maiores valores de carga térmica (Figuras 44 e 45). Por outro lado, nas ZBs 3 a 8, os casos em alvenaria apresentaram valores menores que os modelos híbridos (Figuras 46 a 51).

Figura 44 – Carga térmica total para a zona bioclimática 1 (Curitiba, PR)



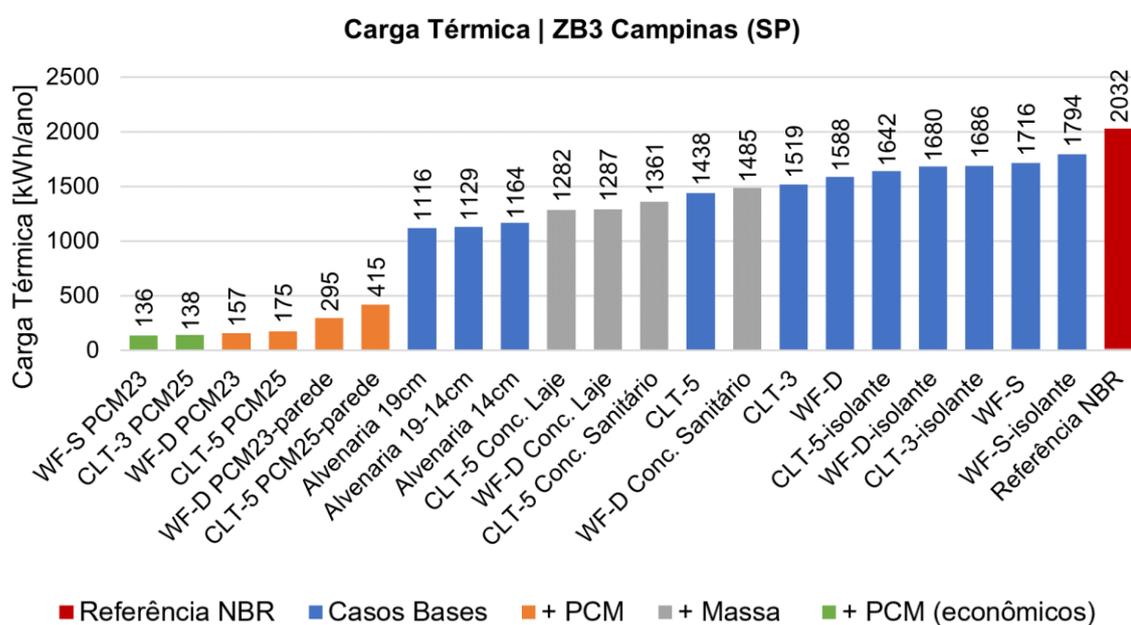
Fonte: elaborado pela autora (2023).

Figura 45 – Carga térmica total para a zona bioclimática 2 (Santa Maria, RS)



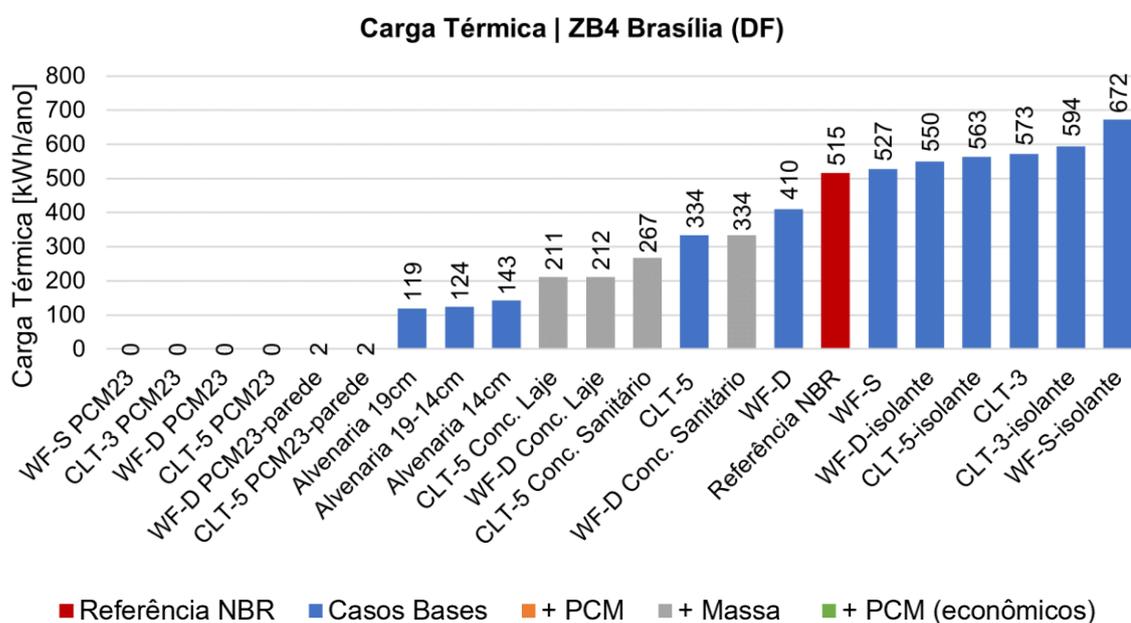
Fonte: elaborado pela autora (2023).

Figura 46 – Carga térmica total para a zona bioclimática 3 Campinas, SP)



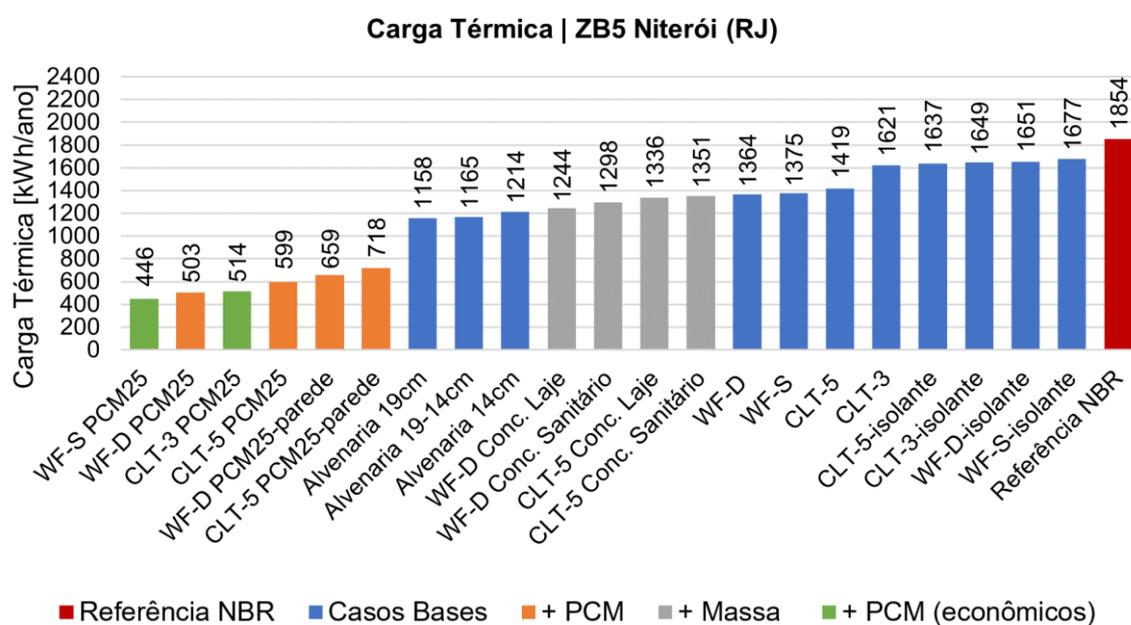
Fonte: elaborado pela autora (2023).

Figura 47 – Carga térmica total para a zona bioclimática 4 (Brasília, DF)



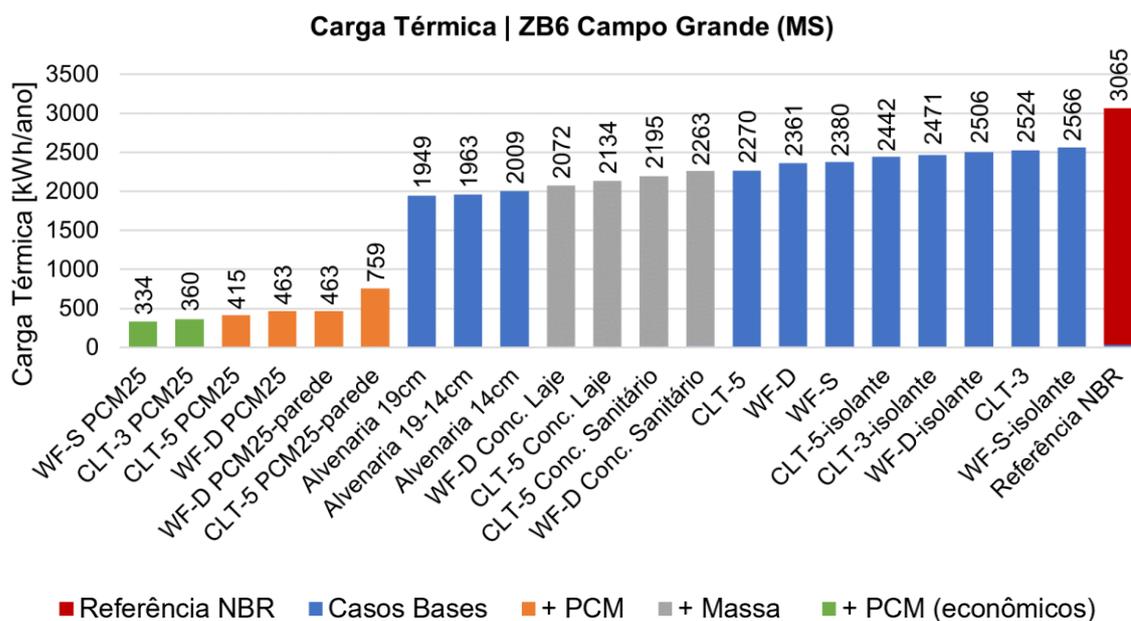
Fonte: elaborado pela autora (2023).

Figura 48 – Carga térmica total para a zona bioclimática 5 (Niterói, RJ)



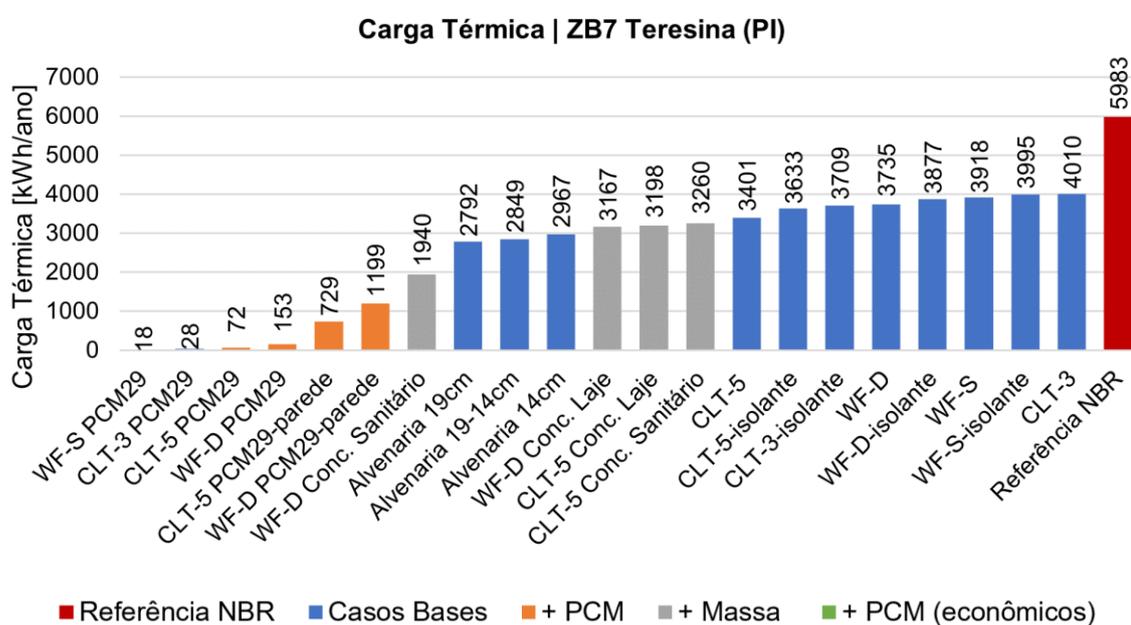
Fonte: elaborado pela autora (2023).

Figura 49 – Carga térmica total para a zona bioclimática 6 (Campo Grande, MS)



Fonte: elaborado pela autora (2023).

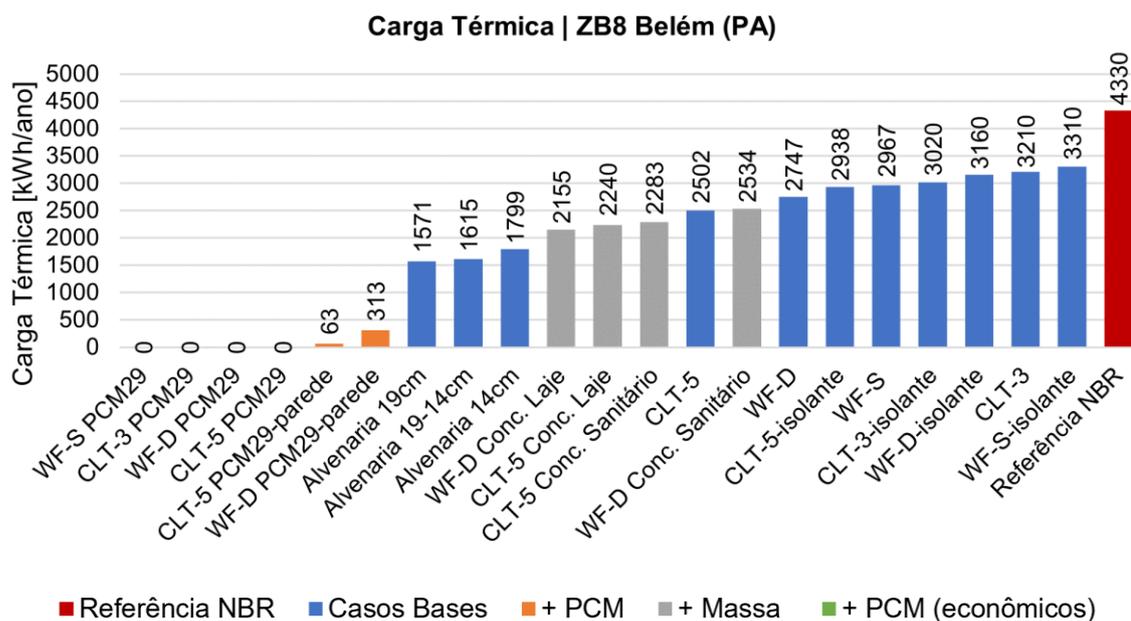
Figura 50 – Carga térmica total para a zona bioclimática 7 (Teresina, PI)



Fonte: elaborado pela autora (2023).

Os gráficos de CgTT (Figuras 44 a 51) reforçaram o desempenho elevado dos modelos com PCM e apresentaram a mesma diferenciação do desempenho da alvenaria nas ZBs 1 e 2 e ZBs 3 a 8, apontadas na análise do PHFT.

Figura 51 – Carga térmica total para a zona bioclimática 8 (Belém, PA)



Fonte: elaborado pela autora (2023).

4.4.3 Tomáx e Tomín – Temperaturas máximas e mínimas

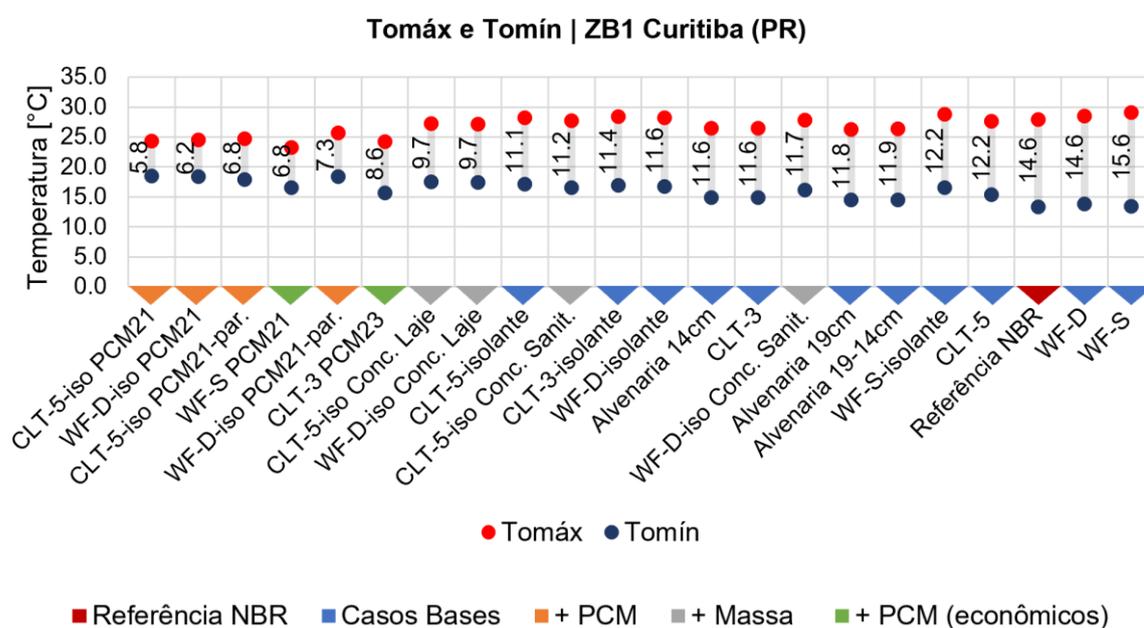
Os gráficos de temperaturas operativas máximas e mínimas (Figuras 52 a 59) mostram as maiores e menores temperaturas operativas registradas dentro dos ambientes das UHs durante o ano nas simulações. As cores das etapas foram colocadas na parte de baixo dos gráficos e foi destacado o valor do delta de temperatura. Os casos foram posicionados em ordem crescente de variação de temperatura.

O padrão de distribuição dos casos se aproximou dos resultados apresentados anteriormente de PHFT e CgTT. Observou-se uma prevalência dos modelos em PCM com diferenças de temperatura menores que os demais casos, com exceção do WF-S PCM25 da ZB2 (Figura 53). A maior diferença entre Tomáx e Tomín, de 23,4 °C, foi observada na ZB2 para o WF-S e a menor diferença, de 4,0 °C, na ZB8 para o CLT-3 PCM29.

Ademais, percebeu-se que em todas as zonas bioclimáticas o delta de temperatura do WF-S (*wood frame* com camada simples de gesso acartonado sem isolante térmico) foi maior do que a referência da norma, ocupando a última posição em todos

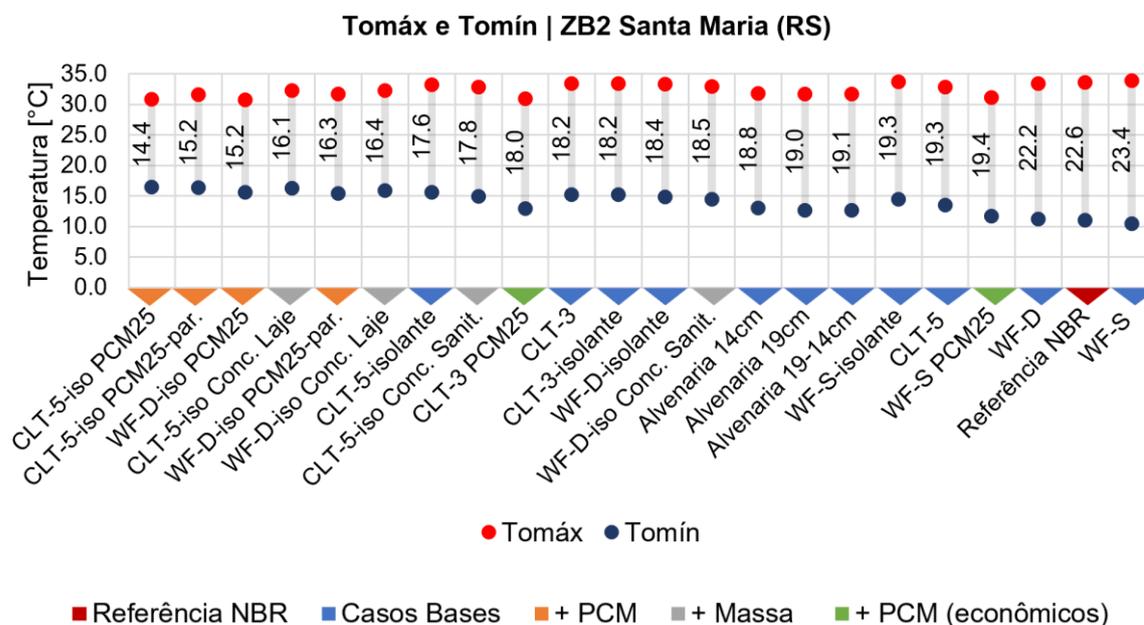
os gráficos. Entretanto, esse mesmo sistema construtivo, quando acrescido de PCM sofre uma redução nessa variação e passa ocupar posições melhores nos gráficos.

Figura 52 – Temperaturas operativas máximas e mínimas para a zona bioclimática 1 (Curitiba, PR)



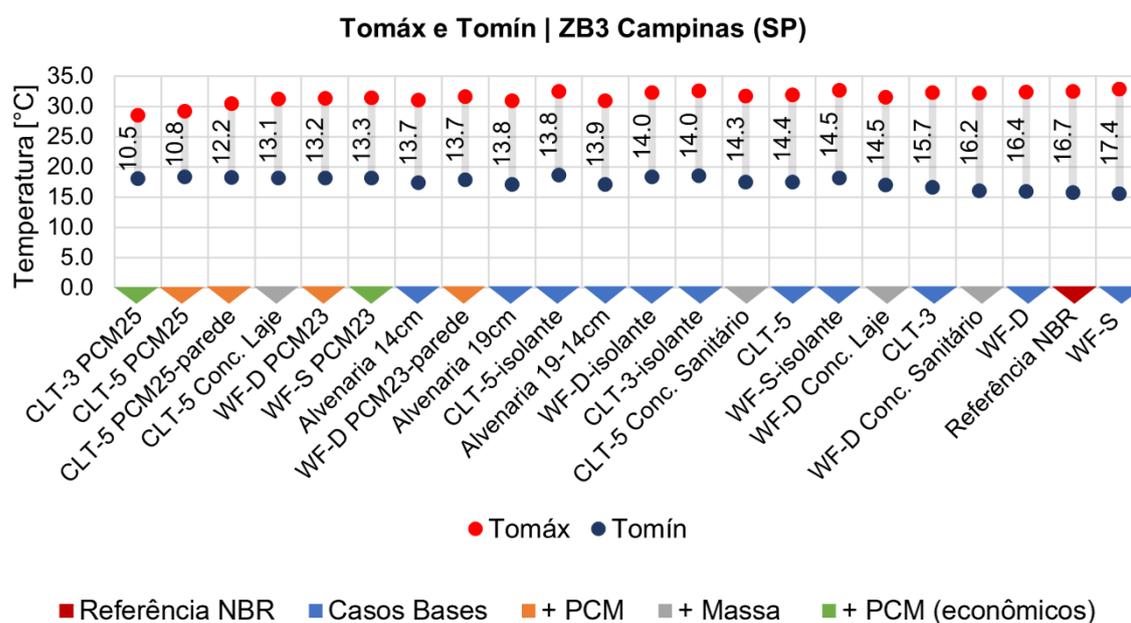
Fonte: elaborado pela autora (2023).

Figura 53 – Temperaturas operativas máximas e mínimas para zona bioclimática 2 (Santa Maria, RS)



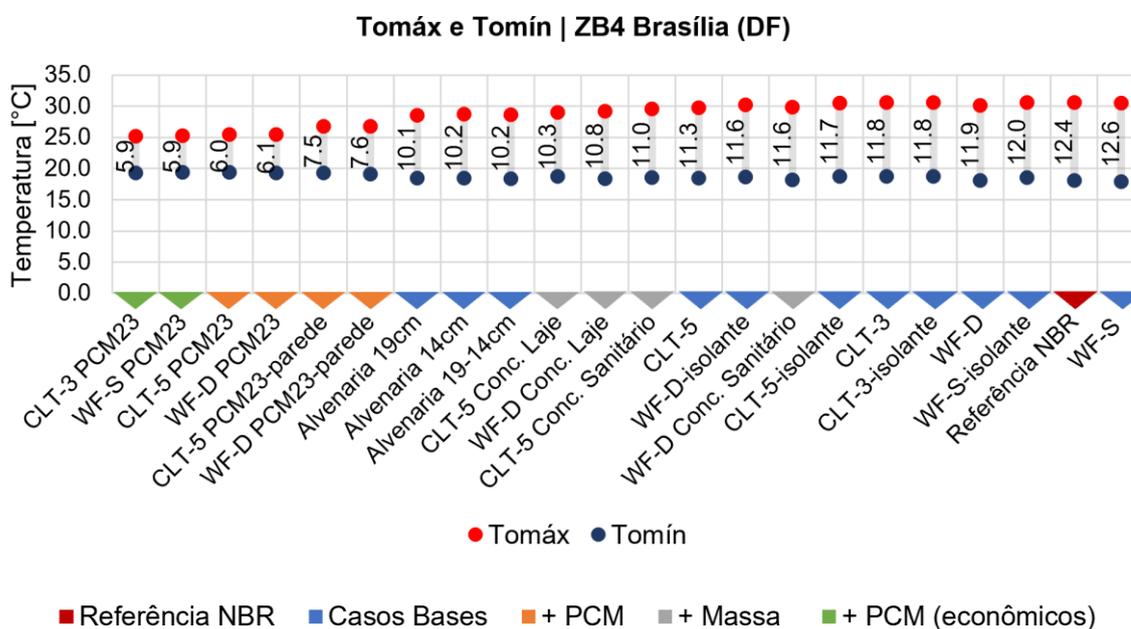
Fonte: elaborado pela autora (2023).

Figura 54 – Temperaturas operativas máximas e mínimas para a zona bioclimática 3 (Campinas, SP)



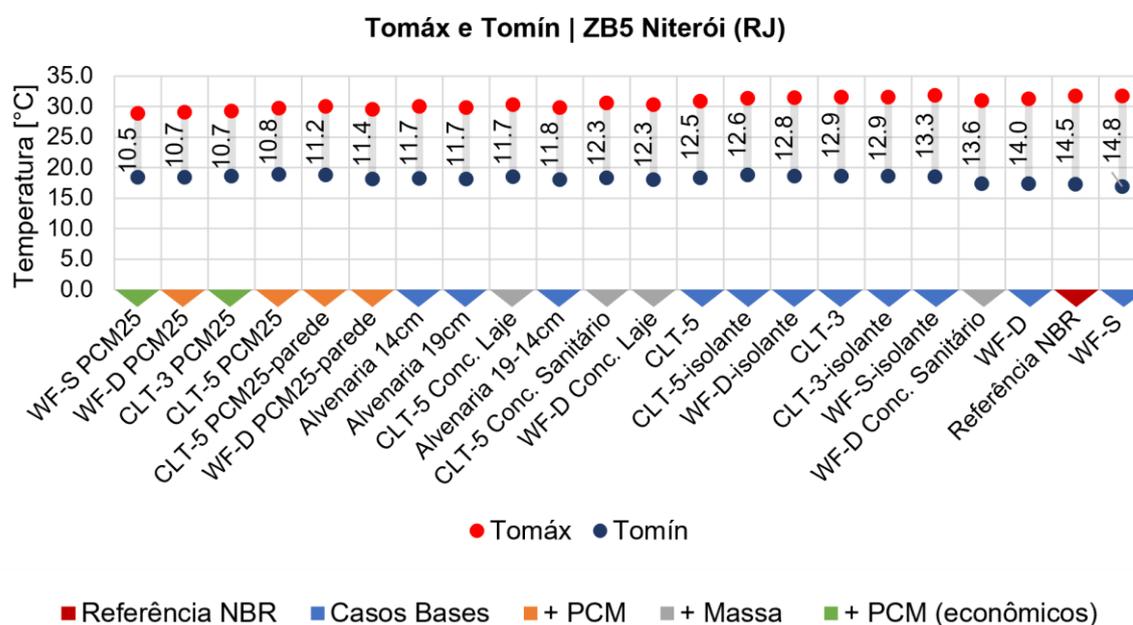
Fonte: elaborado pela autora (2023).

Figura 55 – Temperaturas operativas máximas e mínimas para a zona bioclimática 4 (Brasília, DF)



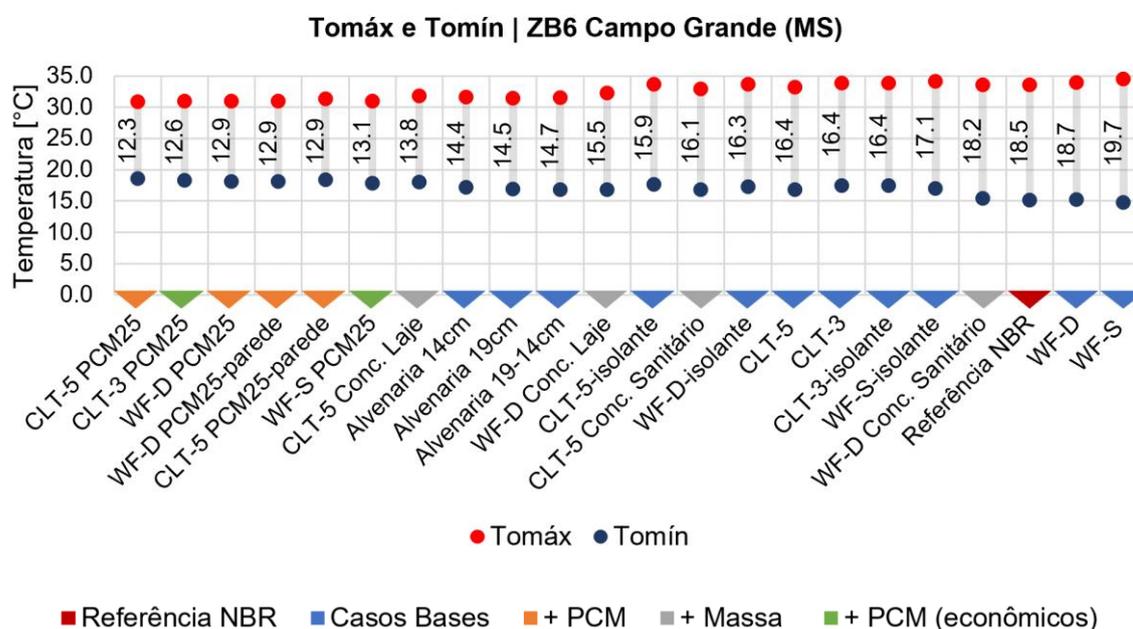
Fonte: elaborado pela autora (2023).

Figura 56 – Temperaturas operativas máximas e mínimas para a zona bioclimática 5 (Niterói, RJ)



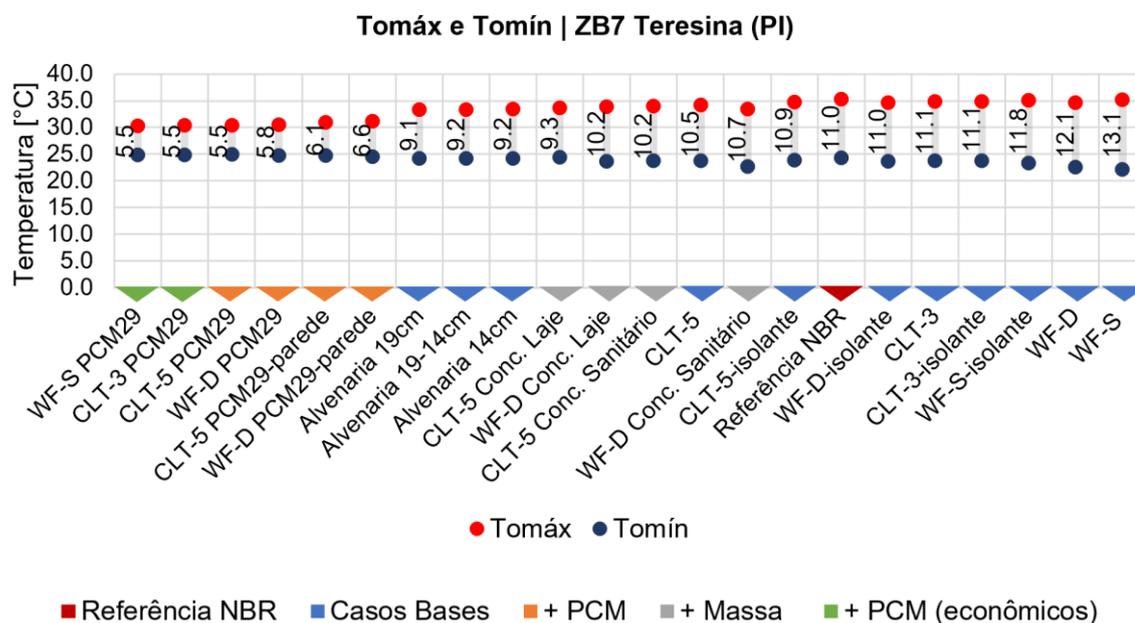
Fonte: elaborado pela autora (2023).

Figura 57 – Temperaturas operativas máximas e mínimas para a zona bioclimática 6 (Campo Grande, MS)



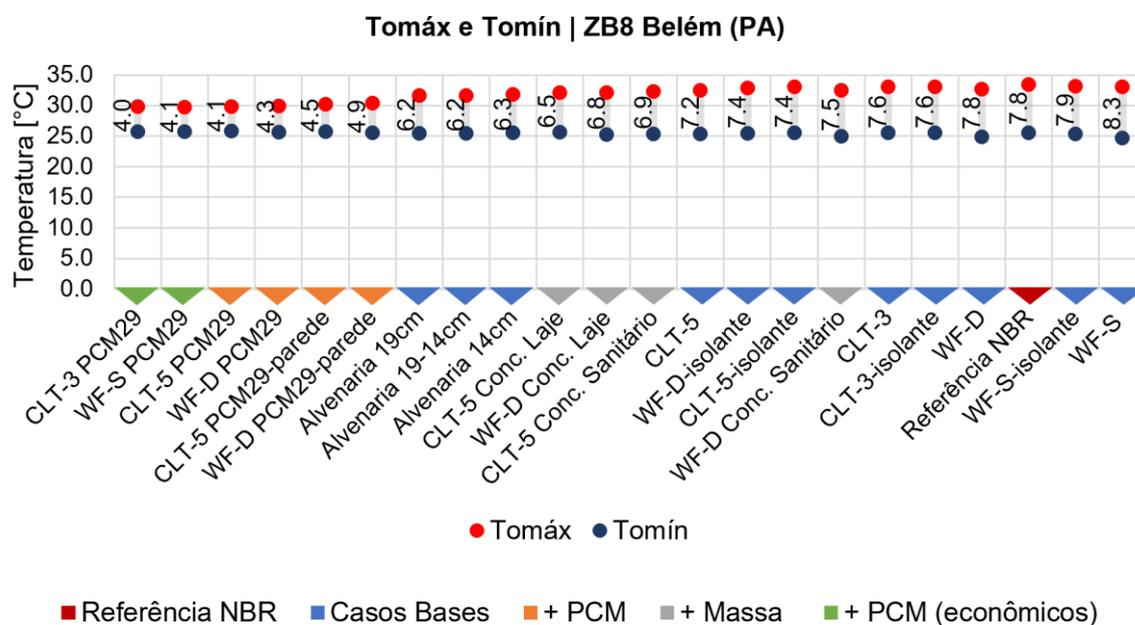
Fonte: elaborado pela autora (2023).

Figura 58 – Temperaturas operativas máximas e mínimas para a zona bioclimática 7 (Teresina, PI)



Fonte: elaborado pela autora (2023).

Figura 59 – Temperaturas operativas máximas e mínimas para a zona bioclimática 8 (Belém, PA)



Fonte: elaborado pela autora (2023).

5 CONCLUSÕES

A escolha do sistema construtivo tem impactos diretos na sustentabilidade da edificação, no conforto térmico dos ambientes e na eficiência energética. O uso de sistemas construtivos em madeira industrializada vem sendo incentivado em vários países por ser um material natural, renovável e, devido aos avanços tecnológicos dos últimos anos, possível de ser industrializado, superando as desvantagens da madeira maciça e possibilitando uma obra limpa, rápida e com maior controle de qualidade. Entretanto, viu-se que o desempenho térmico desses sistemas precisa ser adaptado para responder melhor aos contextos climáticos do Brasil.

Neste estudo foi investigado o desempenho térmico do pavimento tipo de uma edificação residencial multifamiliar para oito cidades, representando as zonas bioclimáticas brasileiras. Compararam-se os sistemas construtivos em *wood frame* (WF) e *cross laminated timber* (CLT) em relação à alvenaria convencional de tijolo cerâmico, por meio do procedimento de simulação da NBR 15575 atualizado em 2021.

Constatou-se que, para seis das oito zonas, o desempenho térmico da alvenaria foi superior ao dos sistemas em madeira para todas os casos base analisados, com e sem isolamento térmico. Apenas nas zonas bioclimáticas 1 e 2, que possuem estações frias, os sistemas em WF e CLT com isolante térmico apresentaram resultados superiores aos da alvenaria. Ou seja, demonstrou-se a necessidade de adequar termicamente os sistemas em madeira para as zonas 3 a 8.

A partir dos resultados dessa primeira etapa e com base na fundamentação teórica, foram trabalhadas estratégias para aumentar a inércia térmica dos sistemas em madeira. Sendo assim, na Etapa 2.1 foram adicionadas mantas de PCM nas paredes e forros, simulando versões com diferentes pontos de fusão do material, bem como opções com PCM apenas nas paredes e apenas no forro. Na Etapa 2.2, foram trabalhados sistemas híbridos de madeira e concreto, a saber: laje mista de CLT e concreto armado, laje de concreto armado com vigas de madeira e núcleo de sanitários em concreto maciço.

A adição de PCM com ponto de fusão adequado por clima foi capaz de atingir nível superior de desempenho para todas as zonas bioclimáticas e melhorar ainda mais os índices de desempenho dos casos que já haviam atingido nível superior na Etapa 1 (casos base). Os pontos de fusão ideais encontrados para essa tipologia e sistemas construtivos foram de 21 °C para WF e 23 °C para CLT na ZB1, 25 °C em ambos na ZB2, 23 °C para WF e 25 °C para CLT na ZB3, 23 °C em ambos na ZB4, 25°C nas ZBs 5 e 6 e 29 °C nas ZBs 7 e 8. Considerando todas as cidades analisadas na aplicação de PCM nas paredes e forro, houve um aumento médio de 15,8% no percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa (PHFT) e uma redução média de 1433,4 kWh/ano na carga térmica total (CgTT).

Percebeu-se que adicionar PCM apenas nas paredes ou apenas nos forros, diminuiu o PHFT e aumentou o CgTT, mas em muitos casos isso foi capaz de manter o nível superior de desempenho, em especial para os casos em que o PCM foi aplicado apenas nas paredes. Simulações de cenários como esses podem ser usados para otimizar a quantidade de PCM utilizado, reduzindo custos e quantidade de material, sem impactar significativamente os índices de conforto e eficiência energética.

Já para os sistemas híbridos (Etapa 2.2), as melhoras nos índices de desempenho foram pouco significativas para se justificar a utilização dessas estratégias. O aumento médio geral no PHFT foi de apenas 2,4% e a redução média geral no CgTT foi de 215,1 kWh/ano. Um fato importante observado nessa etapa foi que o posicionamento da massa térmica no ambiente influencia os resultados, uma vez que esses foram melhores para a laje de concreto armado do que para a laje mista de concreto armado e CLT.

Dados os resultados promissores do PCM, a Etapa 3 teve por objetivo avaliar as melhores estratégias das etapas anteriores aplicando-as aos modelos mais simples ou econômicos de WF e CLT. Surpreendentemente, os modelos econômicos apresentaram resultados ainda mais satisfatórios que os da Etapa 2.1 para as zonas bioclimáticas 3 a 8, mantendo o nível de desempenho superior em todas as zonas.

Ao se analisar os parâmetros de desempenho segundo a NBR 15575 (nível de desempenho, PHFT, CgTT, Tomáx e Tomín), observaram-se dois padrões distintos para as zonas bioclimáticas: grupo 1, composto pelas ZBs 1 e 2 e grupo 2, composto pelas ZBs 3, 4, 5, 6, 7 e 8. No grupo 1, os melhores resultados foram encontrados nos modelos de *wood frame* com camada dupla de gesso acartonado, isolante e PCM e de *cross laminated timber* de cinco camadas com isolante e PCM, sendo que essas mesmas versões sem PCM também apresentaram níveis de desempenho superior e resultados superiores aos das opções em alvenaria.

Já para o segundo grupo, referente às zonas bioclimáticas 3 a 8, os modelos econômicos com PCM apresentaram os melhores resultados, superiores aos de alvenaria. Portanto, recomenda-se o uso de *wood frame* com camada simples de gesso acartonado, sem isolante e com PCM e de CLT de três camadas, também sem isolante e com PCM. Os modelos de WF e CLT com isolante e sem PCM não são recomendados para essas zonas.

O potencial de aplicação de PCM para adequação térmica de construções em madeira industrializada no Brasil mostrou-se evidente nesta pesquisa, inclusive reduzindo a necessidade de outros materiais na composição das camadas de WF e CLT, como mostrado na Etapa 3. Com a adição de PCM foi possível atingir o nível de desempenho superior da NBR 15575 em todas as zonas bioclimáticas, com resultados superiores ao da alvenaria, como apontado na hipótese desta tese. Por conseguinte, sugere-se que o PCM seja um material produzido e comercializado no país para o setor da construção civil.

Com esse trabalho, evidenciou-se ainda a relevância das ferramentas de simulação para o estudo de cenários diferentes para se definir as combinações mais apropriadas de materiais e estratégias para cada clima. É importante salientar que os resultados podem variar a depender da tipologia e do padrão de ocupação, bem como da variação de outros aspectos que aqui foram mantidos constantes. Para cada novo projeto, a simulação termoenergética é recomendada, pois é capaz de simular as condições mais aproximadas da realidade.

Ressalta-se que os estudos realizados aqui consideraram unicamente questões térmicas de conforto e eficiência energética. Não foram feitas análises de custos e de ciclo de vida dos materiais, nem mesmo estudos relacionados a outras áreas como acústica, segurança, proteção e combate a incêndio, entre outras. O estudo também se limitou à análise do pavimento tipo de uma tipologia residencial multifamiliar. Destaca-se que o material utilizado para o PCM ainda não é fabricado no Brasil, entretanto partiu-se de propriedades térmicas de materiais reais já utilizados na indústria norte-americana para realizar as simulações.

Para pesquisas futuras, sugere-se focar as análises nos sistemas em madeira industrializada com PCM e ampliar esse estudo para outras tipologias. Além disso, pode-se explorar os benefícios da ventilação noturna para o funcionamento do PCM, conforme indicado na fundamentação teórica, uma vez que este estudo se limitou a seguir o padrão de ventilação definido pela NBR 15575. O detalhamento do posicionamento do PCM nas camadas do sistema construtivo, bem como as diferentes apresentações do material (material do PCM, tipo de encapsulamento, material de encapsulamento etc.) são outros fatores a serem analisados, uma vez que alteram o desempenho térmico do ambiente. Também se recomenda que as simulações sejam feitas para as zonas bioclimáticas ainda não contempladas pelas cidades selecionadas neste estudo, de acordo com o novo zoneamento bioclimático brasileiro que entrará em vigor em breve. Ademais, à medida em que forem produzidos PCM para a indústria da construção no Brasil, é conveniente realizar pesquisas experimentais com a aplicação desse material em protótipos e/ou edificações construídas.

Essa pesquisa contribuiu para ampliar o conhecimento acerca do comportamento térmico das edificações em madeira industrializada no Brasil, ratificando a contribuição da incorporação de PCM nas edificações para o aumento dos índices de conforto térmico e eficiência energética e exemplificando o fato de que isolantes térmicos não devem ser utilizados de maneira indiscriminada para todos os climas no país. Faz-se necessário, a partir desse ponto, estender o diálogo com a indústria, com o consumidor final e com o governo no sentido de criar políticas públicas que incentivem o uso de sistemas industrializados em madeira combinados com PCM.

REFERÊNCIAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações Parte 3 - Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 15575: Edificações habitacionais — Desempenho**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 15575-1: Edificações Habitacionais — Desempenho. Parte 1 : Requisitos gerais**. Rio de Janeiro: ABNT, 2021. a.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 15575-4: Edificações habitacionais — Desempenho. Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas — SVVIE**. Rio de Janeiro: ABNT, 2021. b.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 15575-5: Edificações habitacionais - Desempenho. Parte 5: Requisitos para sistemas de coberturas**. Rio de Janeiro: ABNT, 2021. c.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7190-7: Projeto de estruturas de madeira. Parte 7: Métodos de ensaio para caracterização de madeira lamelada colada cruzada estrutural**. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 16936: Edificações em light wood frame**. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

AKEIBER, Hussein; NEJAT, Payam; MAJID, Muhd Zaimi Abd; WAHID, Mazlan A.; JOMEHZADEH, Fatemeh; ZEYNALI FAMILI, Iman; CALAUTIT, John Kaiser; HUGHES, Ben Richard; ZAKI, Sheikh Ahmad. A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford (Inglaterra), v. 60, p. 1470–1497, 2016. DOI: 10.1016/j.rser.2016.03.036.

AL-ABSI, Zeyad Amin Abdo Saeed; ISA, Mohd Hafizal Mohd; ISMAIL, Mazran. Application of Phase change materials (PCMs) in building walls: A review. **Lecture Notes in Civil Engineering**, Dordrecht (Holanda), v. 19, p. 73–82, 2019. DOI: 10.1007/978-981-13-2511-3_9.

AL-JETHELAH, M.; EBADI, S.; VENKATESHWAR, K.; TASNIM, S. H.; MAHMUD, S.; DUTTA, A. Charging nanoparticle enhanced bio-based PCM in open cell metallic foams: An experimental investigation. **Applied Thermal Engineering**, Amsterdã, v. 148, n. November 2018, p. 1029–1042, 2019. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.11.121. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.11.121>.

ALOMAIR, Muath; ALOMAIR, Yazeed; TASNIM, Syeda; MAHMUD, Shohel; ABDULLAH, Hussein. Analyses of Bio-Based Nano-PCM filled Concentric Cylindrical Energy Storage System in Vertical Orientation. **Journal of Energy Storage**, Amsterdã, v. 20, n. February, p. 380–394, 2018. DOI: 10.1016/j.est.2018.10.004. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.est.2018.10.004>.

AMORIN, Silvia; VIEIRA, Roberta. Estudo comparativo da eficiência energética de uma habitação popular em alvenaria e em madeira no município de Ribeirão das Neves - MG. *In: XVI ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO 2016*, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: ANTAC, 2016. p. 439–454.

ARAUJO, Victor A. De et al. Classification of wooden housing building systems. **BioResources**, Raleigh, v. 11, n. 3, p. 7889–7901, 2016. DOI: 10.15376/biores.11.3.DeAraujo.

ARCHDAILY. **Fazenda Catuçaba / studio mk27**. 2021. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/791282/fazenda-catucaba-studio-mk27-marcio-kogan-plus-lair-reis>.

ARUMUGAM, Pappu; RAMALINGAM, Velraj; VELLAICHAMY, Pandiyarajan. Effective PCM, insulation, natural and/or night ventilation techniques to enhance the thermal performance of buildings located in various climates – A review. **Energy and Buildings**, Amsterdã (holanda), v. 258, p. 1–25, 2022. DOI: 10.1016/J.ENBUILD.2022.111840.

ASHRAE, American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers. **ASHRAE Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy** Atlanta, Estados Unidos, 2013.

BAHRANI, Babak; SAUNDERS, Christina; SHABANIAN, Milad; BRAXTAN, Nicole; ROCKWELL, Scott; ZHOU, Aixi. High-Rise Residential Building using Cross-Laminated Timber (CLT)- Charlotte 9th Street Tower- United States Case Study. *In: 12TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON PERFORMANCE-BASED CODES AND FIRE SAFETY DESIGN METHODS 2018*, Honolulu, Hawaii, USA. **Anais [...]**. Honolulu, Hawaii, USA: Society of Fire Protection Engineers (SFPE), 2018. p. 17.

BALEN, Elisa; PANSERA, Rafael Douglas; ZANARDO, Rosane Lemos de Pinho. Wood frame – Busca por sustentabilidade. *In: 50 SICS - SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE CONSTRUÇÕES SUSTENTÁVEIS 2016*, Passo Fundo (RS). **Anais [...]**. Passo Fundo (RS): IMED, 2016. p. 6.

BIANCO, Lorenza; KOMERSKA, Anna; CASCONI, Ylenia; SERRA, Valentina; ZINZI, Michele; CARNIELO, Emiliano; KSIONEK, Dariusz. Thermal and optical characterisation of dynamic shading systems with PCMs through laboratory experimental measurements. **Energy and Buildings**, Amsterdã, v. 163, p. 92–110, 2018. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.12.015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.12.015>.

BORTONE, H.; NUNES, G. H.; GIGLIO, T. G. F. Desempenho termoenergético de edificações multifamiliares em wood frame. *In: ENCAC / ELACAC 2019*, **Anais [...]**. : ANTAC, 2019. p. 1815–1824.

BORTONE, Heitor; ZARA, Rafaela; GIGLIO, Thalita; YOKOTA, Alessandra. Thermo-energetic performance of wood frame panels in brazilian low-income housing. *In: ZEMCH 2018 INTERNATIONAL CONFERENCE PROCEEDINGS 2018*, Melbourne (Austrália). **Anais [...]**. Melbourne (Austrália): ZEMCH Network, 2018. p. 161–178.

BOUSSABA, Lisa; FOUFA, Amina; MAKHLOUF, Said; LEFEBVRE, Gilles; ROYON, Laurent. Elaboration and properties of a composite bio-based PCM for an application in building envelopes. **Construction and Building Materials**, Amsterdã, v. 185, p. 156–165, 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.07.098. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.098>.

BOUSSABA, Lisa; MAKHLOUF, Said; FOUFA, Amina; LEFEBVRE, Gilles; ROYON, Laurent. Vegetable fat: A low-cost bio-based phase change material for thermal energy storage in buildings. **Journal of Building Engineering**, Amsterdã, v. 21, n. May 2018, p. 222–229, 2019. DOI: 10.1016/j.jobbe.2018.10.022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.10.022>.

BRANDALISE, M. P.; ALMEIDA, F. S.; ORDENES, M. Materiais de mudança de fase implantados em vedações como sistema passivo para habitações. *In*: ENTAC - XVIII ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO 2020, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2020. DOI: <https://doi.org/10.46421/entac.v18i.746>.

BRITO, Adriana. **Contribuição da inércia térmica de ambientes na eficiência energética de edifícios de escritórios na cidade de São Paulo**. 2015. Tese de Doutorado - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. DOI: <https://doi.org/10.11606/T.3.2016.tde-13062016-102613>.

BRITO, Adriana Camargo De; AKUTSU, Maria; SALLES, Elisa Morande; CASTRO, Guilherme Molnar. Características térmicas de materiais de mudança de fase adequados para edificações brasileiras. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 1, p. 125–145, 2017. DOI: 10.1590/s1678-86212017000100128.

CAMARGO, Thelma de Ávila. **Desempenho térmico de habitações de interesse social com a tecnologia Woodframe na Zona Bioclimática 2: o caso do Residencial Haragano (Pelotas, RS)**. 2015. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2015.

CASTRO, Alessandra L.; SILVA, Fernanda B.; ARDUIN, Rachel H.; OLIVEIRA, Luciana A.; BECERE, Osmar H. Análise da viabilidade técnica da adaptação de dados internacionais de inventário de ciclo de vida para o contexto brasileiro: um estudo de caso do concreto para paredes moldadas no local. *In*: 570 CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO CBC2015 2015, Bonito MS. **Anais [...]**. Bonito MS

CELLAT, Kemal; BEYHAN, Beyza; KONUKLU, Yeliz; DÜNDAR, Cengiz; KARAHAN, Okan; GÜNGÖR, Caner; PAKSOY, Halime. 2 Years of Monitoring Results From Passive Solar Energy Storage in Test Cabins With Phase Change Materials. **Solar Energy**, Amsterdã, v. 200, n. December 2018, p. 29–36, 2020. DOI: 10.1016/j.solener.2019.01.045. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.01.045>.

CHACON, Isabela Marquim Nogueira. **Estudo sobre o panorama da arquitetura brasileira em madeira: à luz da tectônica e da empatia**. 2020. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.

CHVATAL, Karin Maria Soares; CORVACHO, Helena. The impact of increasing the building envelope insulation upon the risk of overheating in summer and an increased energy consumption. **Journal of Building Performance Simulation**, Reino Unido, v. 2, n. 4, p.

267–282, 2009. DOI: 10.1080/19401490903095865.

CROSSLAM. **Conhecendo sobre o cross laminated timber (CLT)**. [s.d.]. DOI: 10.1016/B978-1-78242-454-3.00008-1. Disponível em: <https://www.crosslam.com.br/site/PDFs/Conhecendo sobre o CLT.pdf>.

CROSSLAM. **Apresentação sobre o CLT**. Suzano, SP: Crosslam, [s.d.]. Disponível em: https://www.crosslam.com.br/site/PDFs/CLT_Presentation-Portuguese.pdf.

CROSSLAM. **Detalhes CLT**. [s.d.]. Disponível em: <http://www.crosslam.com.br/site/detalhes-clt/>. Acesso em: 18 ago. 2022c.

CROSSLAM. **CLT | Crosslam Brasil**. 2022. Disponível em: <https://www.crosslam.com.br/site/clt/>. Acesso em: 13 jul. 2022.

DANGEL, Ulrich. **Turning point in timber construction: A new economy**. Basel: Birkhauser Verlag AG, 2016.

DELCROIX, Benoit; KUMMERT, Michaël; DAOUD, Ahmed; BOUCHARD, Jonathan. Influence of experimental conditions on measured thermal properties used to model phase change materials. **Building Simulation**, China, v. 8, n. 6, p. 637–650, 2015. DOI: 10.1007/s12273-015-0241-8.

DEWSBURY, M. **Improving Thermal Efficiency in Lightweight Construction: mass timber as thermal mass**. Melbourne (Austrália): Forest & Wood Products Australia, 2016. v. 61

DEWSBURY, Mark; NOLAN, Gregory. **Thermal performance for timber-framed residential construction** *Wood Solutions Technical Design Guides 24*. Australia. Disponível em: www.woodsolutions.com.au.

EBADI, Soroush; HUMAIRA TASNIM, Syeda; ABBAS ALIABADI, Amir; MAHMUD, Shohel. Geometry and nanoparticle loading effects on the bio-based nano-PCM filled cylindrical thermal energy storage system. **Applied Thermal Engineering**, Amsterdã, v. 141, n. June, p. 724–740, 2018. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.05.091. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.05.091>.

ELETROBRAS. **Pesquisa de Posse e Hábitos de Uso de Equipamentos Elétricos na Classe Residencial 2019**. 2019. Disponível em: <https://q.eletronbras.com/pt/Paginas/PPH-2019.aspx>. Acesso em: 23 jan. 2023.

ELLER, Cibele; RIDA, Mohamad; BOUDIER, Katharina; OTONI, Caio; CELANI, Gabriela; LABAKI, Lucila; HOFFMANN, Sabine. Climate-based analysis for the potential use of coconut oil as phase change material in buildings. **Sustainability MDPI**, Basel, v. 13, n. 19, 2021. DOI: 10.3390/su131910731.

ENERGYPLUS. **EnergyPlus**. 2022. Disponível em: <https://energyplus.net/>. Acesso em: 28 set. 2022.

FABIANI, Claudia; PISELLO, Anna Laura; BARBANERA, Marco; CABEZA, Luisa F.;

COTANA, Franco. Assessing the potentiality of animal fat based-bio phase change materials (PCM) for building applications: An innovative multipurpose thermal investigation. **Energies**, Basel, v. 12, n. 6, p. 1–18, 2019. DOI: 10.3390/en12061111.

FALLAHI, Ali; GULDENTOPS, Gert; TAO, Mingjiang; GRANADOS-FOCIL, Sergio; VAN DESSEL, Steven. Review on solid-solid phase change materials for thermal energy storage: Molecular structure and thermal properties. **Applied Thermal Engineering**, Inglaterra, v. 127, p. 1427–1441, 2017. DOI: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2017.08.161.

FARAJ, Khaireldin; FARAJ, Jalal; HACHEM, Farouk; BAZZI, Hassan; KHALED, Mahmoud; CASTELAIN, Cathy. Analysis of underfloor electrical heating system integrated with coconut oil-PCM plates. **Applied Thermal Engineering**, Inglaterra, v. 158, n. May, p. 113778, 2019. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.113778. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113778>.

FERREIRA, Victor Vinicius de Oliveira. **Caracterização de espécies florestais da caatinga para a construção civil**. 2018. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal (RN), 2018.

FILIPPINI, Lorenzo O.; SARTORI, Gabriela; DANILEVICZ, Ângela de M. F.; TORRES, Maurício C. A. Análise do impacto de materiais de mudança de fase no conforto térmico de escola pública através de simulação computacional. *In*: ENTAC - XVIII ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO 2020, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2020. DOI: <https://doi.org/10.46421/entac.v18i.890>.

FLÜWO. **Holzhybridhochhaus auf Spinelli Mannheim - Das nachhaltige Wohnquartier**. 2022. Disponível em: https://www.baunetz--architekten-de.translate.google/florian-krieger-architektur-und-staedtebau/5576438/projekt/7696792?_x_tr_sl=de&_x_tr_tl=en&_x_tr_hl=en&_x_tr_pto=wapp. Acesso em: 28 set. 2022.

FRANÇA, Marina Engel; BOGO, Amilcar José. Avaliação de conforto ambiental comparativa em edificações construídas em madeira laminada colada cruzada (Painéis CLT) e em sistemas construtivos tradicionais. **Labor & Engenharia**, Campinas (SP), v. 13, p. 1–17, 2019. DOI: 10.20396/labore.v13i0.8654332.

GARCIA, Sheila; BERNARDES, Marina; MARTINS, Salles Marcele; ROMANINI, Anicoli; FOLLE, Daiane. Sistema Construtivo Wood Frame. *In*: VIII MOSTRA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA IMED 2014, Passo Fundo (RS). **Anais [...]**. Passo Fundo (RS): IMED, 2014. p. 1–7.

GHADIM, Hamidreza Benisi; SHAHBAZ, Kaveh; AL-SHANNAQ, Refat; FARID, Mohammed M. Binary mixtures of fatty alcohols and fatty acid esters as novel solid-liquid phase change materials. **International Journal of Energy Research**, Hoboken, v. 43, n. 14, p. 8536–8547, 2019. DOI: 10.1002/er.4852.

GIL, Antonio Carlos. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 4. ed. ed. São Paulo.

Global Advanced Phase Change Materials (PCM) Industry. 2022. Disponível em: https://www.reportlinker.com/p03283195/Global-Advanced-Phase-Change-Materials-PCM-Industry.html?utm_source=GNW. Acesso em: 17 ago. 2022.

GREEN, Michael. **THE CASE FOR Tall Wood BUILDINGS: How Mass Timber Offers a Safe, Economical, and Environmental Friendly Alternative for Tall Building Structures.** Vancouver (Canada): mgb ARCHITECTURE + DESIGN, Equilibrium Consulting, LMDG Ltd, and BTY Group, 2012. Disponível em: <http://cwc.ca/wp-content/uploads/publications-Tall-Wood.pdf>.

GROAT, Linda; WANG, David. **Architectural Research Methods.** New York (EUA): John Wiley & Sons, Inc., 2002.

GRUPO POLAR. **O 1° PCM do Brasil é nosso!** 2022. Disponível em: <https://grupopolar.com.br/o-1-pcm-do-brasil-e-nosso/>. Acesso em: 9 nov. 2022.

HILDEBRANDT, Jakob; HAGEMANN, Nina; THRÄN, Daniela. The contribution of wood-based construction materials for leveraging a low carbon building sector in europe. **Sustainable Cities and Society**, Holanda, v. 34, p. 405–418, 2017. DOI: 10.1016/J.SCS.2017.06.013.

HOLZBAU-OFFENSIVE. **Skaio - Deutschlands erstes Holz-Hybrid-Hochhaus.** 2022. Disponível em: <https://www.holzbauoffensivebw.de/de/frontend/product/detail?productId=4>. Acesso em: 28 set. 2022.

HU, Wen; YU, Xun. Thermal and mechanical properties of bio-based PCMs encapsulated with nanofibrous structure. **Renewable Energy**, Amsterdã, v. 62, p. 454–458, 2014. DOI: 10.1016/j.renene.2013.07.047. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2013.07.047>.

ICIMOTO, Felipe Hideyoshi; VAIRO, Maurizio; BELIZÁRIO, Ana Carolina; REYDAMS, Patrick. Case study of a mass timber building in Brazil. *In: WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING, WCTE 2021 2021*, Santiago (Chile). **Anais [...]**. Santiago (Chile) p. 2861–2866.

ILGIN, Hüseyin Emre; KARJALAINEN, Markku. Tallest Timber Buildings: Main Architectural and Structural Design Considerations. *In: Wood Industry - Past, Present and Future Outlook*. Londres: IntechOpen, 2022. p. 1–14. DOI: 10.5772/INTECHOPEN.105072.

INMETRO, Instituto Nacional de Metrologia Normalização e Qualidade Industrial. **INI-R: Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais.** Rio de Janeiro: INMETRO, 2021.

JEONG, Su Gwang; CHUNG, Okyoung; YU, Seulgi; KIM, Sugwan; KIM, Sumin. Improvement of the thermal properties of Bio-based PCM using exfoliated graphite nanoplatelets. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, Amsterdã, v. 117, p. 87–92, 2013. DOI: 10.1016/j.solmat.2013.05.038. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2013.05.038>.

JEONG, Su Gwang; LEE, Jeong Hun; SEO, Jungki; KIM, Sumin. Thermal performance evaluation of Bio-based shape stabilized PCM with boron nitride for energy saving. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Amsterdã, v. 71, p. 245–250, 2014. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.12.017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.12.017>.

JESKA, Simone; PASCHA, Khaled Saleh. **Emergent Timber Technologies: materials structures, engineering, projects**. Basel: Birkhäuser Basel, 2015.

KANG, Yujin; JEONG, Su Gwang; WI, Seunghwan; KIM, Sumin. Energy efficient Bio-based PCM with silica fume composites to apply in concrete for energy saving in buildings. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, Amsterdã, v. 143, p. 430–434, 2015. DOI: 10.1016/j.solmat.2015.07.026. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2015.07.026>.

KNOP, Amanda; DISCONZI, Fernanda Perazzolo. Desempenho termoenergético de habitação em CLT por meio de simulações computacionais para diferentes climas brasileiros. *In*: ENCAC - XVII ENCONTRO NACIONAL E XIII ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO 2023, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: ANTAC, 2023.

LABEEE, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. **NBR 15575-2021 - Desempenho térmico**. 2021. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/NBR15575-2020>. Acesso em: 29 ago. 2022.

LABEEE, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. **Zoneamento Bioclimático do Brasil - UFSCar**. 2022. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/downloads/software/zabbr>. Acesso em: 8 set. 2022.

LACERDA, Juliana Ferreira Santos Bastos; GOMES, Jefferson de Oliveira. Uma visão mais sustentável dos sistemas construtivos no Brasil: análise do estado da arte. **Revista E-Tech: Tecnologias para Competitividade Industrial - ISSN - 1983-1838**, Florianópolis (SC), v. 7, n. 2, p. 167–186, 2014. DOI: 10.18624/e-tech.v7i2.469.

LEITNER, Drielle Sanchez. **Avaliação de desempenho em edificação de interesse social em light wood frame: estudo de caso na região metropolitana de Curitiba com avaliação pré-ocupação do desempenho térmico, acústico, lumínico e qualidade do ar**. 2019. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

LIU, Zhengxuan; YU, Zhun (Jerry); YANG, Tingting; QIN, Di; LI, Shuisheng; ZHANG, Guoqiang; HAGHIGHAT, Fariborz; JOYBARI, Mahmood Mastani. A review on macro-encapsulated phase change material for building envelope applications. **Building and Environment**, Reino Unido, 2018. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.08.030.

LUDWIG, Grit. The role of law in transformative environmental policies-A case study of “Timber in buildings construction in Germany”. **Sustainability**, Basel, v. 11, n. 3, p. 1–14, 2019. DOI: 10.3390/su11030842.

MAIDEL, Bruna; TAVARES, Sérgio F. Consumo Operacional para Edificações Em CLT: Estudo Comparativo com Alvenarias Convencionais por meio de BIM. *In*: XVIII ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO 2020, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2020.

MARCONI, Maria; LAKATOS, Eva. **Fundamentos de metodologia científica**. São Paulo: Editora Atlas S.A., 2003.

MARTINS, Karine Hilgenberg; SACHT, Helenice Maria. Análise do desempenho térmico e

energético de painéis CLT nacionais para o clima de Foz do Iguaçu-PR. *In: XIX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO 2022*, Canela. **Anais** [...]. Canela: ANTAC, 2022. p. 1–18. DOI: 10.46421/entac.v19i1.2193.

MATHIS, Damien; BLANCHET, Pierre; LAGIÈRE, Philippe; LANDRY, Véronic. Performance of wood-based panels integrated with a bio-based phase change material: A full-scale experiment in a cold climate with timber-frame huts. **Energies**, Basel, v. 11, n. 11, p. 1–15, 2018. DOI: 10.3390/en11113093.

MEDEIROS, Larissa Mendes; DURANTE, Luciane Cleonice; CALLEJAS, Ivan Júlio Apolonio. Contribuição para a avaliação de ciclo de vida na quantificação de impactos ambientais de sistemas construtivos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 2, p. 365–385, 2018. DOI: 10.1590/s1678-86212018000200259.

MELLO, Roberto Lecomte De. **Projetar em madeira: uma nova abordagem**. 2007. Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília, Brasília, 2007. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/3133>. Acesso em: 8 jul. 2022.

MEMON, Shazim Ali. Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford (Inglaterra), v. 31, p. 870–906, 2014. DOI: 10.1016/j.rser.2013.12.042.

MENOUFI, Karim; CASTELL, Albert; FARID, Mohammed M.; BOER, Dieter; CABEZA, Luisa F. Life Cycle Assessment of experimental cubicles including PCM manufactured from natural resources (esters): A theoretical study. **Renewable Energy**, Holanda, v. 51, p. 398–403, 2013. DOI: 10.1016/J.RENENE.2012.10.010.

MOLINA, Julio Cesar; JUNIOR, Carlito Calil. Sistema construtivo em wood frame para casas de madeira. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, Londrina (PR), v. 31, n. 2, p. 143–156, 2010. DOI: 10.5433/1679-0375.2010v31n2p143.

MORGADO, Luís; GUEDES, Manuel Correia; FERREIRA, João Gomes; CRUZ, Helena. Classificação de sistemas de construção em madeira para habitação. *In: IV CONGRESSO NACIONAL DA CONSTRUÇÃO 2012*, Coimbra, Portugal. **Anais** [...]. Coimbra, Portugal: Universidade de Coimbra, 2012. p. 1–12. Disponível em: https://www.academia.edu/7287840/CLASSIFICAÇÃO_DE_SISTEMAS_DE_CONSTRUÇÃO_EM_MADEIRA_PARA_HABITAÇÃO. Acesso em: 8 jul. 2022.

MURARI, A. R.; BALDAN, V. J. S.; STAMATO, G. C.; PABLOS, J. M.; SICHIERI, E. P. Sistema construtivo light wood frame como alternativa para a redução dos resíduos da construção civil. *In: XVII ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO 2018*, Foz do Iguaçu. **Anais** [...]. Foz do Iguaçu: ANTAC, 2018. p. 1318–1325. DOI: 2178-8960.

NAZARI, Meysam; JEBRANE, Mohamed; TERZIEV, Nasko. Bio-based phase change materials incorporated in lignocellulose matrix for energy storage in buildings-a review. **Energies**, Basel (Suíça), v. 13, n. 12, 2020. DOI: 10.3390/en13123065.

NUNES, Gustavo. Análise Do Desempenho Termoenergético De Edificações Residenciais Em Cross-Laminated Timber (CLT) No Clima De Mato Grosso. *In: XVIII ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO*

2020, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2020.

NUNES, Gustavo; DE MELO MOURA, Jorge Daniel; GÜTHS, Saulo; ATEM, Camila; GIGLIO, Thalita. Thermo-energetic performance of wooden dwellings: Benefits of cross-laminated timber in Brazilian climates. **Journal of Building Engineering**, Holanda, v. 32, 2020. DOI: 10.1016/J.JOBE.2020.101468.

NUNES, Gustavo Henrique; GIGLIO, Thalita Gorban Ferreira. Influência das mudanças climáticas no desempenho térmico de uma habitação com diferentes sistemas construtivos: análise do clima de São Paulo. **Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, João Pessoa (PB), v. 1, n. 48, p. 46, 2020. DOI: 10.18265/1517-03062015v1n48p46-61.

NUNES, Gustavo; SANCHES, Guilherme; GIGLIO, Thalita. Eficiência Energética de Edificações Multifamiliares em Cross-Laminated Timber (CLT): Análises para os Climas de Brasília e Santa Maria. *In: XVIII ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO 2020*, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2020.

OLIVEIRA, Geovanna Maria Andrade De; SILVA, Leonete Cristina De A. F. M. Desempenho térmico e eficiência energética de habitação residencial em wood frame no semiárido do RN. *In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA 2019*, Palmas. **Anais [...]**. Palmas: CONTECC, 2019.

OLIVEIRA, Roberta Bastos De; GONZALES, Tomaz Silva; MARQUES, Michele Tereza. Uso de PCM para edificações em região de clima quente: uma revisão sistemática. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas (SP), v. 12, p. e021001, 2021.

OLIVEIRA, Gabriela Lotufo. **Cross Laminated Timber (CLT) no Brasil: processo construtivo e desempenho. Recomendações para o processo do projeto arquitetônico**. 2018. Dissertação de Mestrado - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16132/tde-09012019-144057/>.

OLIVEIRA, Matheus Menezes; LUCARELLI, Caio de Carvalho; CARLO, Joyce Correna. Uso de materiais de mudança de fase em sistemas construtivos: revisão integrativa de literatura. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 22, n. 3, p. 67–111, 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/cv8gbxwWX4Ww8jB5rCSJ6P/?format=pdf&lang=pt>.

PHASE CHANGE SOLUTIONS. **BioPCM Q23 Technical Data**. 2020a. Disponível em: <https://phasechange.com/wp-content/uploads/2018/01/BioPCM-1.0-Data-Sheet-Q23.pdf>. Acesso em: 18 nov. 2022.

PHASE CHANGE SOLUTIONS. **BioPCM Q25 Technical Data**. 2020b. Disponível em: <https://phasechange.com/wp-content/uploads/2018/01/BioPCM-1.0-Data-Sheet-Q25.pdf>. Acesso em: 18 nov. 2022.

PHASE CHANGE SOLUTIONS. **BioPCM Q27 Technical Data**. 2020c. Disponível em: <https://phasechange.com/wp-content/uploads/2018/01/BioPCM-1.0-Data-Sheet-Q27.pdf>. Acesso em: 18 nov. 2022.

PHASE CHANGE SOLUTIONS. **BioPCM Q29 Technical Data**. 2020d. Disponível em:

<https://phasechange.com/wp-content/uploads/2018/01/BioPCM-1.0-Data-Sheet-Q29.pdf>. Acesso em: 18 nov. 2022.

PHASE CHANGE SOLUTIONS. **ENRG-Blanket-3-PieceStacked**. 2022. Disponível em: <https://phasechange.com/biopcm/enrg-blanket-3-piecestacked/>. Acesso em: 5 set. 2022.

PONS, Vinicius; STANESCU, George. Materiais com mudança de fase: análise de desempenho energético para o Brasil. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas (SP), v. 8, n. 2, p. 127, 2017. DOI: 10.20396/parc.v8i2.8650228.

PULGROSSI, Lizzie Monique; NEVES, Letícia de Oliveira. Avaliação de Desempenho Térmico da Envoltória de Residência Unifamiliar. *In: XV ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO 2019*, João Pessoa, Brasil. **Anais [...]**. João Pessoa, Brasil: ANTAC, 2019.

REARDON, Chris; MCGEE, Caitilin; MILNE, Geoff; MARLOW, Andy. **Thermal Mass**. 2020. Disponível em: <https://www.yourhome.gov.au/passive-design/thermal-mass>. Acesso em: 9 set. 2022.

RORIZ, Maurício; CHVATAL, Karin Maria S.; CAVALCANTI, Fernando Sá. Sistemas construtivos de baixa resistência térmica podem proporcionar mais conforto. *In: X ENCONTRO NACIONAL E VI ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO 2009*, Natal (RN). **Anais [...]**. Natal (RN): ANTAC, 2009. p. 8.

SAM, Mona Nazari; CAGGIANO, Antonio; MANKEL, Christoph; KOENDERS, Eddie. A comparative study on the thermal energy storage performance of bio-based and paraffin-based PCMs using DSC procedures. **Materials**, Basel, v. 13, n. 7, 2020. DOI: 10.3390/ma13071705.

SANTAMOURIS, M.; VASILAKOPOULOU, K. Present and Future Energy Consumption of Buildings: Challenges and Opportunities towards Decarbonisation. **e-Prime**, Ostrava (República Checa), p. 100002, 2021. DOI: 10.1016/J.PRIME.2021.100002.

SHIGUE, Erich Zaguo. **Difusão da Construção em Madeira no Brasil: Agentes, Ações e Produtos**. 2018. Dissertação de Mestrado - Universidade de São Paulo, São Carlos, São Carlos (SP), 2018.

SILVA, Ana Filipa; LERER, Maria M.; REIS, Lair; DA GRAÇA, Guilherme Carrilho. Integrating renewable energy systems with contemporary architecture in a zero energy house in southeastern Brazil. *In: 14TH CONFERENCE OF INTERNATIONAL BUILDING PERFORMANCE SIMULATION ASSOCIATION BS2015 2015*, Hyderabad (India). **Anais [...]**. Hyderabad (India): IBPSA, 2015. p. 2483–2490.

SINAT, Sistema Nacional de Avaliações Técnicas. **Diretrizes para Avaliação Técnica de Produtos DIRETRIZ SINAT Nº 005 – Revisão 03: Sistemas construtivos estruturados em peças de madeira maciça serrada, com fechamentos em chapas (Sistemas leves “Light Wood Frame”)**. Brasília: Ministério do Desenvolvimento Regional - Secretaria Nacional da Habitação - Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat (PBQP-H), 2020. a.

SINAT, Sistema Nacional de Avaliações Técnicas. **DATec Nº 020-D: Sistema estruturado**

em peças leves de madeira maciça serrada – Tecverde (tipo light wood framing). São Paulo (SP): IFBQ, 2020. b.

SLEE, Ben; HYDE, Richard. **Using Thermal Mass in Timber-framed Buildings: Effective use of thermal mass for increased comfort and energy efficiency** *Wood Solutions Technical Design Guides 23*. Australia. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/281348414_Using_Thermal_Mass_in_Timber-framed_Buildings_Effective_use_of_thermal_mass_for_increased_comfort_and_energy_efficiency.

SOTSEK, Nicolle Christine; LEITNER, Drielle Sanchez; MACENO, Marcell Mariano Corrêa; MARQUES, Marcos Augusto Mendes; SANTOS, Adriana de Paula Lacerda. Application of MEPLWF: method performance evaluation of the Light Wood Frame construction system. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n. 3, p. 197–211, 2021. DOI: 10.1590/s1678-86212021000300546.

SOTSEK, Nicolle Christine; SANTOS, Adriana de Paula Lacerda. Panorama do sistema construtivo light wood frame no Brasil Brazilian light wood frame system overview. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 3, p. 309–326, 2018. DOI: 10.1590/s1678-86212018000300283. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212018000300283>. Acesso em: 31 mar. 2022.

SOTSEK RAMOS, Nicolle Christine. **Método de avaliação de desempenho técnico-construtivo (MADTEC) do sistema light wood frame (LWF) aplicado em habitações de interesse social no Brasil**. 2019. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Paraná, Curitiba (PR), 2019.

SOUAYFANE, Farah; FARDOUN, Farouk; BIWOLE, Pascal Henry. Phase change materials (PCM) for cooling applications in buildings: A review. **Energy and Buildings**, Amsterdã, 2016. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.04.006.

SOUSA, Diego Aristófanos Dias De. **Materiais de mudança de fase (PCM) no condicionamento passivo de habitações no Semiárido Brasileiro**. 2020. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa (PB), 2020.

STANESCU, George; PONS, Vinícius; SCHMID, Aloísio Leoni. Barreiras térmicas com mudança de fase para redução do consumo de energia no ambiente construído. *In*: ENCAC - XIII ENCONTRO NACIONAL E IX ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO 2015, Campinas. **Anais [...]**. Campinas: ANTAC, 2015.

TABARES-VELASCO, Paulo Cesar; CHRISTENSEN, Craig; BIANCHI, Marcus. Verification and validation of EnergyPlus phase change material model for opaque wall assemblies. **Building and Environment**, Reino Unido, v. 54, p. 186–196, 2012. DOI: 10.1016/j.buildenv.2012.02.019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.02.019>.

TABARES-VELASCO, Paulo Cesar; CHRISTENSEN, Craig; BIANCHI, Marcus; BOOTEN, Chuck. **Verification and Validation of EnergyPlus Conduction Finite Difference and Phase Change Material Models for Opaque Wall Assemblies** NREL - National Renewable Energy Laboratory. Golden (CL). DOI: 10.1016/j.buildenv.2012.02.019.

TECVERDE. **Nossas Obras – Tecverde**. 2022a. Disponível em: <https://www.tecverde.com.br/nossas-obras/>. Acesso em: 12 jul. 2022.

TECVERDE. **Sistema Construtivo – Tecverde**. 2022b. Disponível em: <https://www.tecverde.com.br/sistema-construtivo/>. Acesso em: 12 jul. 2022.

THINKWOOD. **Wood Performance & Durability | Think Wood**. 2022. Disponível em: <https://www.thinkwood.com/wood-design-and-performance>. Acesso em: 16 ago. 2022.

TRIANA, María Andrea. **Abordagem Integrada No Ciclo De Vida De Habitação De Interesse Social Considerando Mudanças Climáticas**. 2016. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis (SC), 2016.

TULONEN, Lassi; KARJALAINEN, Markku; ILGIN, Hüseyin Emre. Tall Wooden Residential Buildings in Finland: What Are the Key Factors for Design and Implementation? **Engineered Wood Products for Construction**, Londres, 2021. DOI: 10.5772/INTECHOPEN.98781. Disponível em: [undefined/state.item.id](https://www.intechopen.com/doi/10.5772/INTECHOPEN.98781). Acesso em: 13 jul. 2022.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **EnergyPlus version 22.1.0 Documentation. Engineering Reference**. Chicago.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **2021 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector**. Nairobi. Disponível em: <http://globalabc.org/>.

URBEM. **Nossa fábrica**. 2023. Disponível em: <https://urbembr.com/>. Acesso em: 25 ago. 2023.

VALDENEBRO, Esaiy; DIETRICH, Udo; INO, Akemi. Thermal comfort analysis of a representative multi-story social housing unit with wood as an alternative construction material in Brazil. *In*: SBE 19 - EMERGING CONCEPTS FOR SUSTAINABLE BUILT ENVIRONMENT IOP CONF. SERIES: EARTH AND ENVIRONMENTAL SCIENCE 297 2019, Helsinki (Finlândia). **Anais [...]**. Helsinki (Finlândia): IOP Publishing, 2019. DOI: 10.1088/1755-1315/297/1/012019.

VENKATESHWAR, Kumar; EBADI, Soroush; SIMHA, Hari; MAHMUD, Shohel. Influence of pore density and porosity on the melting process of bio-based nano-phase change materials inside open-cell metal foam. **Journal of Thermal Science and Engineering Applications**, Raleigh, v. 11, n. 4, p. 1–12, 2019. DOI: 10.1115/1.4043662.

VIEIRA, Julia Cordeiro; OLIVEIRA, Raquel Diniz. Uso de PCMs para melhoria do desempenho térmico de edificações residenciais no clima temperado úmido: uma revisão sistemática. *In*: ENCAC - XVI ENCONTRO NACIONAL E XII ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO 2021, Palmas. **Anais [...]**. Palmas: ANTAC, 2021. p. 1173–1182. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/357167301_Uso_de_PCMS_para_melhoria_do_desempenho_termico_de_edificacoes_residenciais_no_clima_temperado_umido_uma_revisao_sistemica.

VIEIRA, Julia Cordeiro; OLIVEIRA, Raquel Diniz; ABREU, Ana; RÓŻYCKI, Marcin; NIEMIEC, Tomasz. Thermal Performance Evaluation of a PCM Incorporate into a wood

frame construction under Brazilian Subtropical Climate. *In*: CEES 2023 | 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONSTRUCTION, ENERGY, ENVIRONMENT & SUSTAINABILITY 2023, Funchal. **Anais** [...]. Funchal: Itecons, 2023. p. 0–8.

VIK, Tor A.; MADESSA, Habtamu B.; ASLAKSRUD, Petter; FOLKEDAL, Eirik; ØVREVIK, Ottar S. Thermal Performance of an Office Cubicle Integrated with a Bio-based PCM: Experimental Analyses. **Energy Procedia**, Reino Unido, v. 111, n. 1876, p. 609–618, 2017. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.223. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.223>.

WALSH, Angélica; CÓSTOLA, Daniel; LABAKI, Lucila. **Proposta de zoneamento climático brasileiro para edificações residenciais**. 1 ed. ed. São Paulo.

WEBER, Fernando da Silva; MELO, Ana Paula; MARINOSKI, Deivis Luis; GUTHS, Saulo; LAMBERTS, Roberto. **Desenvolvimento de um modelo equivalente de avaliação de propriedades térmicas para a elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos brasileiros para o uso no programa EnergyPlus**. 2017. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

WILLEY, Scott. **Thermal Performance in Timber-framed Buildings Wood Solutions Technical Design Guides 22**. Austrália.

YU, Seulgi; JEONG, Su Gwang; CHUNG, Okyoung; KIM, Sumin. Bio-based PCM/carbon nanomaterials composites with enhanced thermal conductivity. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, Amsterdã, v. 120, n. PART B, p. 549–554, 2014. DOI: 10.1016/j.solmat.2013.09.037. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2013.09.037>.

ZANOTO, Camila; ROTTER, Lucas Cardoso Simão; CAMPOS, Heloisa Fuganti. Análise comparativa de desempenho entre os sistemas construtivos em concreto armado, alvenaria estrutural e Light Wood Frame. **Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, João Pessoa, n. 57, p. 76, 2021. DOI: 10.18265/1517-0306A2021ID5824.

ZARA, R. B.; SANTOS, V. C.; GIGLIO, T. G. F. Análise do Nível de Eficiência Energética de uma Habitação em Wood Frame pelos Métodos Prescritivo e Simulação do RTQ-R. *In*: XVII ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA NO AMBIENTE CONSTRUÍDO 2018, Foz do Igauçu. **Anais** [...]. Foz do Igauçu: ANTAC, 2018. p. 457–466.

ZARA, Rafaela Benan. **Influência dos parâmetros termofísicos no desempenho termoenergético de edificações residenciais com sistemas construtivos leves**. 2019. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2019.