

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL – PPGEC**

AMANDA KNOP

**DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO DE SISTEMA CONSTRUTIVO DE
MADEIRA ENGENHEIRADA POR MEIO DE SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS
PARA DIFERENTES CLIMAS BRASILEIROS**

JOINVILLE

2023

AMANDA KNOP

**DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO DE SISTEMA CONSTRUTIVO DE
MADEIRA ENGENHEIRADA POR MEIO DE SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS
PARA DIFERENTES CLIMAS BRASILEIROS**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Ciências Tecnológicas – CCT, da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC.

Orientadora: Profª. Drª. Fernanda Perazzolo Disconzi.

**JOINVILLE
2023**

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

Knop, Amanda
Desempenho termoenergético de sistema construtivo de madeira engenheirada por meio de simulações computacionais para diferentes climas brasileiros / Amanda Knop. -- 2023.
138 p.

Orientadora: Fernanda Perazzolo Disconzi
Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação , Joinville, 2023.

1. Eficiência energética. 2. Desempenho térmico. 3. Madeira engenheirada. 4. Cross laminated timber. 5. Simulação computacional. I. Disconzi, Fernanda Perazzolo . II. Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação . III. Título.

AMANDA KNOP

**DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO DE SISTEMA CONSTRUTIVO DE
MADEIRA ENGENHEIRADA POR MEIO DE SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS
PARA DIFERENTES CLIMAS BRASILEIROS**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Ciências Tecnológicas – CCT, da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC.

Orientadora: Profª. Drª. Fernanda Perazzolo Disconzi.

BANCA EXAMINADORA

Profª. Drª. Fernanda Perazzolo Disconzi
CCT/UDESC (Orientadora e Presidente)

Membros:

Profª. Drª. Renata De Vecchi
LabEEE/UFSC

Profª. Drª. Carmeane Effting
CCT/UDESC

Joinville, 25 de outubro de 2023.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Paulo e Rosane, pelo apoio, incentivo e dedicação comigo durante toda a vida e à minha irmã Brenda por igualmente me apoiar e incentivar, além de compartilhar importantes momentos e conversas.

Aos meus demais familiares, amigos e amigas que estiveram presentes ao longo dessa caminhada, me proporcionando momentos de descontração, apoio e auxílio sempre que precisei. Faço um agradecimento especial à minha amiga Letícia, com quem compartilhei bons e difíceis momentos dessa trajetória e que sempre me confortou e incentivou a seguir e trilhar o melhor caminho.

Agradeço a minha orientadora Fernanda por toda a sua competência, dedicação e contribuição no desenvolvimento desta pesquisa.

Às professoras da banca avaliadora, Carmeane e Renata, por aceitarem o convite de participar da avaliação deste trabalho e contribuir com este estudo e com minha formação.

À UDESC e aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do CCT por todo apoio e ensinamentos fornecidos ao longo do curso.

A todos que de alguma maneira me ajudaram para que este trabalho fosse realizado, meus sinceros agradecimentos.

*“a vida varia
o que valia menos
passa a valer mais
quando desvaria”*
(Paulo Leminski)

RESUMO

Os sistemas construtivos em madeira têm se desenvolvido cada vez mais diante da busca por materiais que reduzam o impacto ambiental sem comprometer a funcionalidade das edificações. O uso de tecnologias de pré-fabricação vem sendo potencializado, havendo grande destaque para o uso global das madeiras engenheiradas no setor da construção civil, sobretudo da Madeira Laminada Cruzada Colada (*Cross Laminated Timber – CLT*). No Brasil, este sistema construtivo ainda é incipiente, o que torna essencial o estudo do desempenho térmico dos elementos nas envoltórias das edificações. O objetivo deste trabalho é analisar o desempenho termoenergético de um sistema construtivo de CLT de *Pinus taeda*, por meio de simulações computacionais para uma tipologia de habitação residencial unifamiliar, localizada em cinco cidades brasileiras com diferentes zonas bioclimáticas (ZB). Para isso, utilizou-se o software *EnergyPlus* e as recomendações da norma brasileira de desempenho de edificações habitacionais. Primeiramente, simularam-se dois casos base, um de CLT e outro de alvenaria convencional, os quais foram comparados a um modelo de referência, conforme recomendações da normativa. Posteriormente, foram analisados outros doze modelos com diferentes painéis de CLT e camadas de material isolante. Os modelos foram simulados sob duas condições, uma com ventilação natural e outra com condicionamento artificial. Foram comparados os valores de temperaturas operativas no interior da edificação, o percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa e as cargas térmicas totais de cada modelo. Os resultados apontaram níveis superiores de desempenho térmico para Curitiba e Brasília, com a associação de material isolante nas paredes e lajes da edificação. O nível de desempenho térmico nas cidades do Rio de Janeiro, Recife e Teresina foi mínimo, e os melhores resultados foram obtidos com as paredes mais leves e cobertura mais pesada com isolamento térmico. Constatou-se que o CLT se apresenta como uma tecnologia construtiva promissora na obtenção de habitações brasileiras energeticamente mais eficientes, porém mais estudos seriam necessários para as envoltórias em climas quentes a fim de conseguir níveis de desempenho térmico mais elevados.

Palavras-chave: Eficiência energética; Desempenho térmico; Madeira engenheirada; *Cross laminated timber*; Simulação computacional.

ABSTRACT

*Timber construction systems have been increasingly developed in response to the search for alternative materials that reduce environmental impact without compromising the buildings functionality. The use of prefabrication technologies has been potentialized, and the global use of engineered wood in the construction sector, especially of Cross Laminated Timber (CLT), has been highlighted. In Brazil, this construction system is still in its infancy, which makes it essential to study the thermal performance of these elements when applied to building envelopes. The aim of this study is to analyze the thermal-energy performance of a *Pinus taeda* CLT construction system using computer simulations for a single-family residential dwelling typology, located in five Brazilian cities with different bioclimatic zones (ZB). The simulations were developed using EnergyPlus software and the thermal performance evaluations of the building were based on the recommendations of the Brazilian standard. Firstly, two base cases were simulated, one with a CLT construction system and the other with conventional masonry, which were both compared to a reference model, configured according to the recommendations of the standard. Subsequently, twelve other models were analyzed in which the composition of the CLT panels and a layer of insulation material were varied. The models were simulated under two conditions, one with natural ventilation and the other with artificial conditioning. The operating temperatures inside the building, the percentage of occupancy hours within an operating temperature range (PHFT) and the total thermal loads (CgTT) of each model were compared. The results showed that in the cities of Curitiba and Brasilia all the CLT models obtained superior levels of thermal performance, especially when the thermal insulation was associated with the walls and slabs of the building. The cities of Rio de Janeiro, Recife and Teresina in general showed the minimum level of thermal performance, and the best results were obtained with lighter walls and a heavier roof with thermal insulation. It was concluded that CLT presents itself as a promising construction technology for obtaining more energy-efficient Brazilian housing, but more studies are necessary for envelopes in hot climates in order to achieve higher levels of thermal performance.*

Keywords: Energy efficiency; Thermal performance; Mass timber; Cross laminated timber; Computer simulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. <i>Loghomes</i> (a); <i>Post&Beam</i> (b); <i>Timber Frame</i> (c); <i>Balloon Frame</i> (d); <i>Plataform Frame</i> (e).....	22
Figura 2. Sistema modular fechado.....	23
Figura 3. União de painéis pequenos e grandes em sistema modular.....	24
Figura 4. Configuração do CLT	28
Figura 5. Etapas de produção do CLT.	30
Figura 6. Ligação <i>finger-joint</i> (a); aplicação do adesivo estrutural (b); posicionamento das lamelas em sentido perpendiculares entre si (c).....	31
Figura 7. Movimentação dos painéis de CLT na montagem de edificações.	32
Figura 8. Exemplo de conexões com parafusos e chapas metálicas.	33
Figura 9. Conexão entre CLT e fundação de concreto.....	34
Figura 10. Perfis de <i>drywall</i> fixados na vedação de CLT para área molhada.	35
Figura 11. Instalação de revestimento cerâmico em elementos de CLT.....	36
Figura 12. Aplicação de revestimento externo com acabamento em madeira.	37
Figura 13. Linha do tempo entre as aprovações de INIs e RTQs.....	41
Figura 14. Procedimentos de avaliação para o desempenho térmico.....	47
Figura 15. Diagrama dos processos da pesquisa.	59
Figura 16. Esquema dos APP(a); perspectiva da edificação(b); planta baixa(c).....	61
Figura 17. Variação anual de TBS e UR das cidades selecionadas.	63
Figura 18. Geometria do modelo de referência.....	66
Figura 19. Geometria para os modelos reais.	67
Figura 20. Classificação das tipologias de paredes para o modelo de CLT.....	69
Figura 21. Configuração dos elementos construtivos para o modelo de CLT.....	70
Figura 22. Classificação das tipologias de paredes para modelo de alvenaria.	73
Figura 23. Configuração dos elementos construtivos para modelo de alvenaria.	73
Figura 24. Modelo equivalente para a simulação do tijolo cerâmico furado.....	74
Figura 25. Temperaturas operativas anuais para as UH de Curitiba.....	89
Figura 26. PHFT para as UH de Curitiba.	90
Figura 27. Cargas térmicas anuais para as UH de Curitiba.	91
Figura 28. Temperaturas operativas anuais para as UH de Brasília.	93
Figura 29. PHFT para as UH de Brasília.	94
Figura 30. Cargas térmicas anuais para as UH de Brasília.....	95

Figura 31. Temperaturas operativas anuais para as UH do RJ.....	97
Figura 32. PHFT para as UH do RJ.	98
Figura 33. Carga térmica anual para as UH do RJ.....	99
Figura 34. Temperaturas operativas anuais para as UH de Recife.....	101
Figura 35. PHFT para as UH de Recife.....	102
Figura 36. Carga térmica anual para as UH de Recife.....	103
Figura 37. Temperaturas operativas anuais para as UH de Teresina.	105
Figura 38. PHFT para as UH de Teresina.....	106
Figura 39. Carga térmica anual para as UH de Teresina.	107
Figura 40. Resultados das estratégias de eficiência energética para Curitiba.	110
Figura 41. Resultados das estratégias de eficiência energética para Brasília.	111
Figura 42. Resultados das estratégias de eficiência energética para o RJ.	113
Figura 43. Resultados das estratégias de eficiência energética para o Recife.	115
Figura 44. Resultados das estratégias de eficiência energética para Teresina.	117
Figura 45. PHiFT e PHsFT de todos os casos simulados.	118

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Configurações comumente utilizada de painéis CLT.....	32
Quadro 2. Parâmetros termofísicos dos elementos construtivos para o modelo de referência.....	66
Quadro 3. Parâmetros termofísicos dos materiais para o modelo de CLT.....	71
Quadro 4. Parâmetros termofísicos dos materiais para o modelo de alvenaria.....	74
Quadro 5. Parâmetros avaliativos para os níveis intermediário e superior.....	81
Quadro 6. Configurações dos elementos de CLT para as diferentes envoltórias.....	84
Quadro 7. Demonstração dos elementos de CLT para as diferentes envoltórias.	84
Quadro 8. Transmitância térmica das envoltórias para as diferentes envoltórias.	86
Quadro 9. Capacidade térmica das envoltórias para as diferentes envoltórias.....	86
Quadro 10. Critérios de avaliação da Tomáx e Tomín para as UH de Curitiba.....	89
Quadro 11. Critérios de avaliação do PHFT e Δ PHFT das UH de Curitiba.....	90
Quadro 12. Critérios de avaliação quanto a RedCgTT das UH para Curitiba.	91
Quadro 13. Classificação do desempenho térmico das UH para Curitiba.....	92
Quadro 14. Critérios de avaliação da Tomáx e Tomín para as UH de Brasília.	93
Quadro 15. Critérios de avaliação do PHFT e Δ PHFT para as UH de Brasília.	94
Quadro 16. Critérios de avaliação quanto à RedCgTT das UH para Brasília.....	96
Quadro 17. Classificação do desempenho térmico das UH de Brasília.	96
Quadro 18. Critério de avaliação da Tomáx para as UH do RJ.....	98
Quadro 19. Critérios de avaliação do PHFT e Δ PHFT para as UH do RJ.....	99
Quadro 20. Critérios de avaliação quanto à RedCgTT das UH para o RJ.	100
Quadro 21. Classificação do desempenho térmico das UH para o RJ.....	100
Quadro 22. Critério de avaliação da Tomáx para as UH do Recife.....	101
Quadro 23. Critérios de avaliação do PHFT e Δ PHFT para as UH de Recife.....	102
Quadro 24. Critérios de avaliação quanto à RedCgTT das UH para Recife.	103
Quadro 25. Classificação do desempenho térmico das UH para Recife.....	104
Quadro 26. Critério de avaliação da Tomáx para as UH de Teresina.	105
Quadro 27. Critérios de avaliação do PHFT e Δ PHFT para as UH de Teresina.	106
Quadro 28. Critérios de avaliação quanto à RedCgTT das UH para Teresina.....	107
Quadro 29. Classificação do desempenho térmico das UH para Teresina.	107
Quadro 30. Resultados para estratégias de eficiência energética em Curitiba.	109
Quadro 31. Resultados para estratégias de eficiência energética em Brasília.....	110

Quadro 32. Resultados para estratégias de eficiência energética no RJ.	112
Quadro 33. Resultados para estratégias de eficiência energética em Recife.	114
Quadro 34. Resultados para estratégias de eficiência energética em Teresina.....	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Intervalos de temperaturas externas de bulbo seco.....	44
Tabela 2. Faixas de temperaturas operativas para a determinação do PHFT _{APP}	45
Tabela 3. Critério de avaliação de desempenho térmico quanto ao PHFT _{UH}	45
Tabela 4. Valores de temperatura operativa para CgTR _{APP} e da CgTA _{APP}	46
Tabela 5. Critério de avaliação de desempenho térmico quanto à CgTT _{UH}	46
Tabela 6. Área útil dos ambientes da edificação.....	61
Tabela 7. Parâmetros estabelecidos para as janelas da edificação.....	62
Tabela 8. Cidades e caracterizações climáticas.....	62
Tabela 9. Padrão de ocupação diário pelas pessoas.....	77
Tabela 10. Período de uso e potência dos equipamentos.....	77
Tabela 11. Sistema de iluminação.....	78
Tabela 12. Taxa metabólica para os usuários.....	78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	Caso base de Alvenaria Convencional
APP	Ambiente de Permanência Prolongada
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and AirConditioning Engineers</i>
CB	Caso Base de CLT
CB3E	Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações
CCA	Composto de sais de cobre, cromo e arsênio
CCB	Composto de cobre, cromo e boro
CLT	<i>Cross Laminated Timber</i>
CgTA	Carga Térmica para Aquecimento
CgTR	Carga Térmica para Resfriamento
CgTT	Carga Térmica Total
CT	Capacidade Térmica
ENCE	Etiqueta Nacional de Conservação de Energia
EPDM	Etilenopropilenodieno-monômero
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FJP	Fundação João Pinheiro
GEE	Gases de Efeito Estufa
HIS	Habitação de Interesse Social
IBÁ	Indústria Brasileira de Árvores
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA	<i>Internacional Energy Agency</i>
INI	Instrução Normativa Inmetro
INI-R	Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
kWh	Kilowatt Hora
LabEEE	Laboratório de Eficiência Energética de Edificações
MUF	Melamina Ureia Formaldeído
NBR	Normas Técnicas Brasileiras

PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem
PHFT	Percentual de Horas de ocupação dentro de uma Faixa de Temperatura operativa
Δ PHFT	Incremento no Percentual de Horas de ocupação dentro de uma Faixa de Temperatura operativa
PHiFT	Percentual de horas inferiores à faixa de temperatura operativa
PHsFT	Percentual de horas superiores à faixa de temperatura operativa
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
RedCgTT	Redução da Carga Térmica Total
RTQ-R	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais
TBS	Temperatura de Bulbo Seco
TBSm	Temperatura anual média de Bulbo Seco
To	Temperatura Operativa
Tomáx	Temperatura Operativa máxima
Δ Tomáx	Valor de tolerância da temperatura operativa mínima
Tomín	Temperatura Operativa mínima
Δ Tomín	Valor de tolerância da temperatura operativa mínima
U	Transmitância térmica
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UNEP	<i>United Nations Environment Programme</i>
UH	Unidade Habitacional
UH,real	Unidade Habitacional do modelo de real
UH,ref	Unidade Habitacional do modelo de referência
UR	Umidade Relativa
VN	Ventilação Natural
WWF	<i>World Wide Found</i>
ZB	Zona Bioclimática

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	18
1.1.1	Objetivo geral.....	18
1.1.2	Objetivos específicos.....	19
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	19
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	21
2.1	PANORAMA SOBRE PROCESSOS CONSTRUTIVOS DE MADEIRA ...	21
2.1.1	Madeira Engenheirada	24
2.1.2	Cross Laminated Timber	27
2.1.2.1	<i>Fabricação.....</i>	30
2.1.2.2	<i>Montagem e conexões</i>	33
2.1.2.3	<i>Acabamentos</i>	35
2.2	AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO EM HABITAÇÕES	38
2.2.1	Procedimento de simulação computacional da NBR 15.575	43
2.3	DESEMPENHO TÉRMICO E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES	47
2.4	CONSIDERAÇÕES SOBRE O REFERENCIAL TEÓRICO	57
3	MÉTODO.....	59
3.1	DEFINIÇÃO DA TIPOLOGIA DA EDIFICAÇÃO	60
3.2	ESCOLHA DAS CIDADES E CLIMAS BRASILEIROS.....	62
3.3	CONFIGURAÇÃO DAS ENVOLTÓRIAS E PARÂMETROS TERMOFÍSICOS DOS MATERIAIS	65
3.3.1	Modelo de referência.....	65
3.3.2	Modelos reais.....	67
3.3.2.1	<i>Caso base de CLT.....</i>	68
3.3.2.2	<i>Caso base de alvenaria.....</i>	72
3.4	CONDIÇÕES DE CONTORNO DA SIMULAÇÃO	75
3.4.1	Algoritmos de convecção.....	75
3.4.2	Padrões de uso e ocupação	77
3.4.3	Contato com o solo	78
3.4.4	Modelagem com e sem o uso da ventilação natural	78

3.5	ANÁLISE E COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	79
3.6	CONFIGURAÇÕES DE DIFERENTES COMBINAÇÕES PARA A ENVOLTÓRIA	83
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	88
4.1	CASOS BASE	88
4.1.1	Curitiba	88
4.1.2	Brasília	92
4.1.3	Rio de Janeiro	97
4.1.4	Recife	101
4.1.5	Teresina	104
4.2	MODELOS CONFIGURADOS PARA ESTRATÉGIAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	108
4.2.1	Curitiba	108
4.2.2	Brasília	110
4.2.3	Rio de Janeiro	112
4.2.4	Recife	114
4.2.5	Teresina	116
4.3	PARÂMETROS INFORMATIVOS DO PROCEDIMENTO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	118
5	CONCLUSÃO	120
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	124
	REFERÊNCIAS	125
	ANEXO A – QUADRO PARA INCREMENTO MÍNIMO DO PHFT_{UH, REAL} E REDUÇÃO MÍNIMA DA CGTT_{UH, REAL} PARA O ATENDIMENTO AO NÍVEL DE DESEMPENHO TÉRMICO INTERMEDIÁRIO	133
	ANEXO B – QUADRO PARA INCREMENTO MÍNIMO DO PHFT_{UH,REAL} E REDUÇÃO MÍNIMA DA CGTT_{UH,REAL} PARA O ATENDIMENTO AO NÍVEL DE DESEMPENHO TÉRMICO SUPERIOR	134
	ANEXO C – ÁBACO E EQUAÇÕES PARA A OBTENÇÃO DO ΔPHFT_{MÍN} QUANDO O PHFT_{UH,REF} FOR INFERIOR A 70 %.....	135

1 INTRODUÇÃO

O consumo de energia global vem aumentando significativamente ao longo dos anos. Dados divulgados pela *International Energy Agency* (IEA, 2022b), apontam que, após a flexibilização das restrições do Covid-19 em 2021, a demanda de energia em edifícios aumentou quase 4% em relação a 2020 (ou 3% em relação a 2019), sendo o maior aumento anual da última década. Em relação a energia elétrica, a representatividade correspondeu a cerca de 35% do uso de energia do edifício em 2021. Em particular, o resfriamento de ambientes registrou o maior aumento na demanda em 2021 em todos os usos finais de edifícios, o que significou um aumento de mais de 6,5% em relação a 2020 (IEA, 2022a).

Ainda de acordo com a IEA, entre as edificações, as residências vêm se destacando devido ao aumento da demanda energética, representando cerca de 21,2% do consumo final global (IEA, 2022a). No Brasil, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2023), por meio do Balanço Energético Nacional 2023, estima que 27% da eletricidade total consumida no país foi para atender edificações residenciais no ano de 2022, ocupando a segunda colocação em comparação aos demais setores. A variação em relação ao ano anterior foi de 2,96% no consumo de eletricidade em residências.

A IBÁ (c2017) comenta que, segundo projeções da ONU, até 2050 o mundo será 70 % urbano, com demanda para 3 bilhões de residências. Mesmo com a existência de significativo déficit habitacional, segundo consultas realizadas pelo estudo da IBÁ (c2017) na World Wide Found (WWF) e United Nations Environment Programme (UNEP), a construção civil é responsável por 47% das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e cerca de 40% do consumo global de energia.

Dados da IEA (2022c) apresentam que, em 2021, a fabricação de aço, cimento e alumínio para construção civil representou 6% da energia global e emissões relacionadas a processos. Desse total, somente a fabricação do aço e cimento representaram juntos 95%, o que é devido, principalmente, às novas construções terem exigido quase 2 Mt de cimento e 0,5 Mt de aço, valores correspondentes ao dobro do que foi exigido no ano 2000 (IEA, 2022c).

Dados como esse demonstram que a construção civil é, atualmente, uma das atividades humanas que mais consomem recursos naturais. O IBÁ (c2017) estima que entre 40 e 75% dos recursos existentes são consumidos por esse setor, sendo que, no Brasil, a construção gera cerca de 25% do total de resíduos da indústria e 60% dos lixos sólidos das cidades.

No que condiz às construções brasileiras, dados de 2018 da Pesquisa Nacional por Amostras de Domicílio Contínua (IBGE, 2019), revelam que a alvenaria/taipa está presente em 95,2% das construções brasileiras, sendo que 88,6% dos domicílios apresentam paredes de alvenaria/taipa com revestimento e outros 6,6% apresentam paredes sem revestimento. Apesar de ser o preferido dos brasileiros, o sistema construtivo é também o que mais gera desperdícios, dos quais alguns já parecem incorporados à alvenaria, como o retrabalho, o entulho e o uso em excesso de materiais.

Como forma de reduzir o consumo de energia das edificações, o documento da IEA intitulado *The Future of Cooling* (IEA, 2018) salienta a importância que a envolvente do edifício – telhado, pavimentos, tetos, paredes exteriores, portas, janelas e fundações – tem um grande impacto na necessidade de arrefecimento e ventilação dos espaços, e a escolha dos materiais é essencial. Sendo assim, ao falar sobre materiais, o estudo comenta sobre a importância da massa térmica para o resfriamento e aquecimento do ambiente, pois ela é capaz de manter a temperatura por mais tempo e criar uma barreira natural entre as temperaturas interna e externa, aumentando o conforto térmico. Coberturas, portas e janelas energeticamente eficientes e a redução do fluxo de ar descontrolado e vazamentos também podem ter um grande impacto na quantidade de calor que entra em um edifício e, portanto, na necessidade de resfriamento mecânico (IEA, 2018).

A eficiência energética é um dos pilares de qualquer estratégia para garantir um crescimento econômico sustentável e inclusivo. É uma das maneiras mais econômicas de aumentar a segurança do fornecimento de energia, aumentar a competitividade e o bem-estar, além de reduzir os impactos ambientais causados pelo sistema energético (EIA, 2018). Nesse sentido, cabe destacar que as edificações em madeira são as construções que demandam menos consumo energético em todas as fases do seu ciclo de vida e que

componentes pré-fabricados de madeira requerem menos energia na sua fabricação e manutenção, além de emitirem menor quantidade de dióxido de carbono (CO_2) durante sua vida útil (PIZZONI, 2015). Bauer (2008, p. 437) cita que “na condição de material de construção, as madeiras incorporam todo o conjunto de características técnicas, econômicas e estéticas que dificilmente se encontram em outro material”.

A madeira, dentre os materiais empregados na construção civil, além de ser de fonte renovável e de produção natural, é considerada um material de baixa energia incorporada (PASSARELLI, 2013). Quando comparada à produção de cimento, por exemplo, a energia consumida para a produção da madeira é cinco vezes menor, pois enquanto a fabricação do cimento consome 1.750 kWh/m³ para a produção de um metro cúbico, a da madeira consome 350 kWh/m³ (IBÁ, c2017).

Além das vantagens ambientais, a utilização da madeira em processos construtivos apresenta a facilidade da pré-fabricação, sendo capaz de evitar desperdícios de materiais que ocorrem em obras convencionais, reduzir os prazos de execução e, consequentemente, reduzir os custos, garantindo qualidade dos componentes e segurança construtiva. Além disso, é possível reduzir o consumo de água e geração de resíduos no canteiro de obra. No caso de programas de construção em larga escala, que apresentam impactos ambientais proporcionais – como seria o caso de programas de habitações de interesse social (HIS) que visam reduzir ou amenizar o déficit habitacional brasileiro – o uso da madeira, como cita Passarelli (2013), pode e deve ser utilizado como uma forma de compensação ou amenização dos impactos ambientais da construção civil. Além disso, com o tempo de execução sendo reduzido, a oferta de moradias no país poderia ser aumentada num espaço mais curto de tempo, o que diminuiria a demanda existente de mais de 5,8 milhões de domicílios (FJP, 2021).

Dentro do contexto das construções com madeira, destaca-se o uso promissor das madeiras engenheiradas como elementos construtivos para diferentes tipologias de edificações, em especial dos painéis autoportantes de CLT (*Cross Laminated Timber*), os quais consistem na sobreposição de lamelas de madeira coladas perpendiculares umas às outras. Seu grande diferencial está

na padronização das peças, graças ao processo de beneficiamento pelo qual a matéria-prima é submetida. Os gêneros mais utilizados para a sua produção são o *Eucalyptus* e o *Pinus*, provenientes de áreas de reflorestamento, e que, após passarem pelo processamento industrial, adquirem alta resistência, versatilidade e leveza (URBEM, 2022).

Devido à inserção recente dos painéis de CLT no cenário da construção civil, demonstra-se fundamental o estudo do desempenho térmico desses elementos quando aplicados nas envoltórias das edificações. No caso específico do Brasil, tratando-se predominantemente do uso residencial, é essencial que a tecnologia em questão atenda aos pré-requisitos da normativa técnica da NBR 15.575 (ABNT, 2021). O correto emprego dos painéis de madeira engenheirada, quando inseridos de modo mais amplo no contexto do edifício, mostra-se como um modo de garantir o conforto ao usuário e durabilidade da edificação ao longo de sua vida útil.

Com base no exposto, considerando-se a busca por soluções construtivas alternativas e mais sustentáveis, assim como a redução da demanda energética e habitacional no Brasil, esta pesquisa visa analisar o desempenho térmico e eficiência energética de um sistema construtivo de madeira engenheirada de CLT. A análise é realizada por meio de simulações computacionais em uma tipologia de edificação residencial unifamiliar, localizada em diferentes zonas bioclimáticas brasileiras, a fim de comparar o desempenho dessa mesma habitação quando construída com o sistema de alvenaria convencional.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Analizar o desempenho termoenergético de um sistema construtivo de madeira engenheirada de CLT, por meio de simulações computacionais, para diferentes climas brasileiros, aplicado em uma tipologia de edificação residencial unifamiliar.

1.1.2 Objetivos específicos

- a) Escolher um modelo geométrico representativo para uma edificação residencial a ser utilizada para as simulações computacionais;
- b) Realizar simulações para o desempenho térmico da edificação residencial utilizando o sistema construtivo em CLT, para cinco cidades brasileiras com diferentes condições climáticas, por meio do método de simulação da NBR 15.575 (ABNT, 2021);
- c) Analisar e comparar o desempenho térmico da edificação de CLT com o da mesma edificação com sistema construtivo em alvenaria convencional;
- d) Propor estratégias de eficiência energética, alterando parâmetros na configuração da envoltória da edificação de CLT, e avaliar o desempenho térmico das novas envoltórias;
- e) Analisar e comparar os resultados dos níveis de desempenho térmico identificando quais os parâmetros mais influenciam na variação dos índices obtidos.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. No primeiro capítulo, é apresentada uma introdução ao tema da pesquisa, contextualizando a problemática e justificativa para realização do estudo e os objetivos a serem alcançados.

O segundo capítulo aborda a revisão da literatura nacional e internacional, elaborada com a intenção de discutir os principais temas relacionados à pesquisa, identificar estudos similares e verificar os métodos que vêm sendo adotados. Primeiramente, são apresentados conceitos básicos sobre as tipologias construtivas em madeira, aprofundando o conhecimento sobre o campo da tecnologia das madeiras engenheiradas, em especial do CLT. São apresentados ainda um breve histórico e definições sobre métodos nacionais e internacionais desenvolvidos para a avaliação do desempenho térmico e eficiência energética de edificações e, por fim, são apresentados estudos a nível

nacional e internacional que abordam o desempenho térmico e eficiência energética em diferentes tipologias habitacionais, sob diferentes condições climáticas.

O terceiro capítulo trata do método adotado na pesquisa, que foi dividido em cinco etapas principais. Na primeira etapa, é definida a tipologia construtiva da edificação residencial, assim como suas características gerais, para a modelagem e utilização nas simulações computacionais. A segunda etapa consiste em apresentar a seleção das cidades brasileiras, com climas e zoneamentos bioclimáticos distintos, para a inserção de dados climáticos específicos nas simulações. Uma terceira etapa visa apresentar as configurações iniciais dos elementos construtivos a serem inseridos na envoltória da edificação e caracterizar as propriedades termofísicas dos materiais, tanto em CLT quanto em alvenaria convencional. Na sequência, são apresentadas as condições de contorno e parâmetros operacionais da simulação computacional. Como quarta etapa, discorre-se sobre como são feitas as análises dos resultados e comparações do desempenho termoenergético da habitação. Na quinta, e última, etapa, apresentam-se as adaptações realizadas na configuração da envoltória da edificação com sistema construtivo de CLT, a fim de buscar estratégias de melhorias para a eficiência e desempenho termoenergético da habitação.

No quarto capítulo, são apresentados os resultados obtidos no estudo, identificando os níveis de desempenho térmico e eficiência energética alcançados para os diferentes casos simulados. Para melhor visualização e entendimento, os resultados são mostrados através de gráficos, tabelas e histogramas.

O quinto capítulo traz as conclusões da pesquisa com base nos resultados, apontando as limitações do estudo e sugestões para trabalho futuros, principalmente em relação aos tópicos que não foram abordados neste estudo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, inicialmente, são apresentados brevemente os processos construtivos de madeira, dando destaque para as madeiras engenheiradas, sobretudo o CLT. Apresenta-se também sobre métodos utilizados para realizar as avaliações de desempenho termoenergético em edificações, com enfoque na NBR 15.575 (ABNT, 2021) e, na sequência, apresenta-se o estado da arte sobre o desempenho térmico e eficiência energética em diferentes edificações, elencando estudos recentes e relevantes para a evolução e inovação desta pesquisa. O capítulo finaliza com a conclusão sobre o referencial teórico, em que são discutidos os principais pontos apresentados e destaca-se a lacuna de pesquisa que este trabalho aborda.

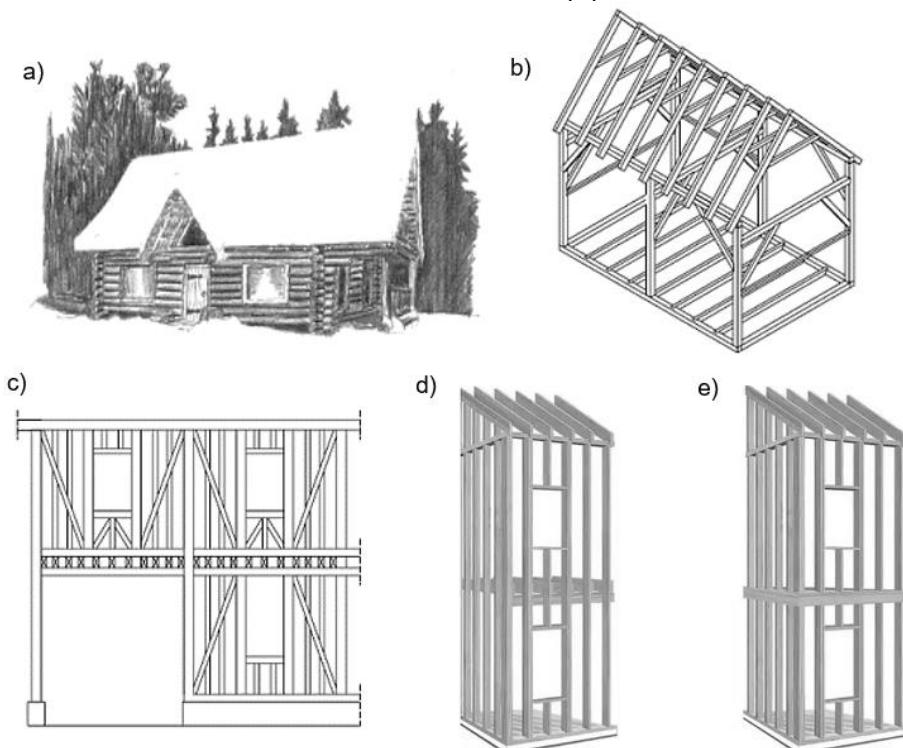
2.1 PANORAMA SOBRE PROCESSOS CONSTRUTIVOS DE MADEIRA

As primeiras construções realizadas pela espécie humana recorreram à natureza como fonte de fornecimento de materiais para as construir e desde então a técnica e arte de trabalhar a madeira têm evoluído bastante (FARIA, 2002). Segundo Costa (2013), as construções em madeira são classificadas em três grandes tipos: casas de troncos (*Loghomes*), casas com estrutura pesada em madeira (*Heavy Timber*) e casas com estrutura leve em madeira (*Light Framing* ou *Wood Frame*).

De maneira resumida, as *Loghomes* apresentam-se como o modelo estrutural mais antigo dos tipos de construção em madeira e sua composição se baseia no empilhamento de troncos dispostos, mais usualmente, na horizontal para conseguir maior estabilidade estrutural. As *Heavy Timber* compreendem um tipo de construção que potencializa as características resistentes da madeira, assentando as peças ao longo da direção paralela às fibras. Elas têm como particularidade a separação física entre a estrutura, a envolvente e os revestimentos, e dividem-se em Sistema Porticado (*Post&Beam*) e Sistema Entramado (*Timber Frame*), cuja principal diferença está na disposição dos montantes estruturais. Já as *Light Framing* consistem em um sistema industrializado e durável, o qual se utiliza da modulação, pré-fabricação e maior

mobilidade de materiais, pois é feita uma definição concreta entre os componentes com funções de estrutura principal, componentes com funções simultaneamente resistentes e de revestimento, e dos componentes com funções exclusivamente de revestimento. Elas são divididas entre Sistema Balão (*Balloon Frame*) e Sistema Plataforma (*Platform Frame*), cuja principal diferença está na continuidade dos montantes da fachada para fazer a separação entre pisos e conceder maior resistência ao fogo (COSTA, 2013). A Figura 1 ilustra cada uma das tipologias citadas, respectivamente.

Figura 1. *Loghomes* (a); *Post&Beam* (b); *Timber Frame* (c); *Balloon Frame* (d); *Platform Frame* (e).



Fonte: Adaptado de Makie (2001); Sánchez *et al.* (1995); ThinkWood (2022).

Mais recentemente foram criados sistemas que, pelo seu grau de desenvolvimento e tecnologias utilizadas, não podem ser englobados nos tipos enunciados anteriormente, tais como as estruturas pré-fabricadas em madeira, que envolvem os sistemas de madeira engenheirada, dentre os quais é possível mencionar o CLT, que é objeto de estudo deste trabalho (COSTA, 2013).

Designam-se estruturas pré-fabricadas aquelas em que o sistema de construção é concebido de forma totalmente integrada e em que as operações a serem realizadas em fábrica e no local estão perfeitamente definidas. Os

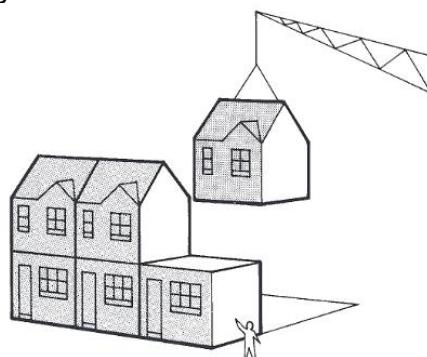
componentes e materiais advêm de um grande índice de pré-fabricação sendo que no local executam-se apenas a montagem e pequenas operações de corte e serragem de elementos (TORRES, 2010).

A construção pré-fabricada em módulos permite conjugar um elevado número de possibilidades estéticas e dimensionar os espaços adequados a cada realidade familiar ou industrial, de forma permanente ou progressiva. Costa (2013) comenta que nas casas modulares a coordenação dimensional modular é uma metodologia que permite que todo o processo de construção seja uniformizado por meio da racionalização das dimensões dos componentes, otimizando o processo de construção, desde a concepção até a execução.

A coordenação modular visa organizar as dimensões da construção por estabelecer um módulo padrão como unidade de medida de referência. A permutabilidade de diferentes sistemas construtivos para a mesma edificação é possível caso estes obedeçam a critérios definidos por um módulo comum proposto. São muitos os sistemas construtivos que têm por base os fundamentos da construção modular (COSTA, 2013, p. 14).

Podem-se classificar os sistemas construtivos modulares em fechados e abertos. No sistema modular fechado, o módulo é semelhante a uma célula (Figura 2), não se desagrega, todos os componentes estão ligados, não existe possibilidade de mudança. Os módulos podem ser combinados empilhados, ligados entre si ou suspensos por uma estrutura metálica que funciona como esqueleto (BRANCO, 2013).

Figura 2. Sistema modular fechado.

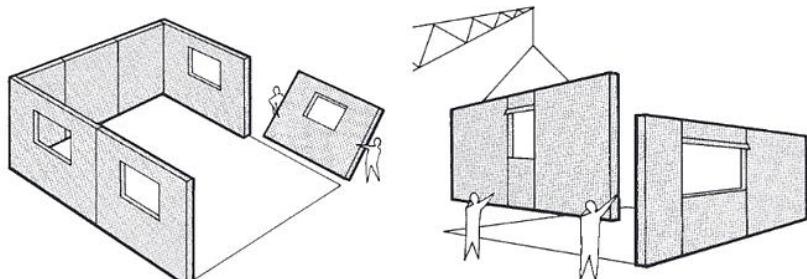


Fonte: Palmer *et al.* (2000).

Já no sistema modular aberto, em que se incluem o sistema de vigas e pilares, elementos como as paredes interiores e exteriores não têm qualquer função estrutural, são os pilares e as vigas que suportam todas as cargas da estrutura. A dissociação entre os elementos estruturais e não estruturais possibilita a criação de espaços de maior dimensão, mais abertos, dando possibilidade à criação de configurações distintas (BRANCO, 2013).

No sistema de painéis, também classificado como sistema aberto, estes são responsáveis pelo suporte de todas as cargas a que o edifício está sujeito. Segundo Costa (2013), os painéis são, por norma, concebidos segundo o Sistema Plataforma, formados por um conjunto de perfis de madeira maciça, igualmente distanciados, enrijecido por placas estruturais (OSB, partículas de madeira cimento ou contraplacado), que conferem estabilidade à estrutura. Eles podem ser classificados em pequenos ou grandes, possuindo geralmente 2,40 metros de altura, com o comprimento variando entre 2,40 e 3,60 metros para os painéis pequenos e um máximo de 9,60 metros para os painéis grandes, os quais necessitam ser erguidos por gruas, conforme demonstra a Figura 3 (PALMER *et al.*, 2000).

Figura 3. União de painéis pequenos e grandes em sistema modular.



Fonte: Palmer *et al.* (2000).

Outros derivados da madeira têm sido usados recentemente na indústria da pré-fabricação, como é o caso das madeiras engenheiradas, cujo termo é utilizado para designar qualquer madeira que passa por um processo industrial e que resulta em um novo elemento.

2.1.1 Madeira Engenheirada

Em crescente ascensão, as madeiras engenheiradas são consideradas uma solução construtiva sustentável, proveniente de matriz regenerativa, sendo desenvolvida com recursos tecnológicos avançados que lhes conferem alta resistência, versatilidade e leveza (URBEM, 2022).

Devido à madeira apresentar-se como um material orgânico, a NBR 7190 (ABNT, 2022) recomenda que seja identificada a necessidade específica de tratamento e preservação de acordo com características da matéria-prima e finalidades de uso. A preservação das madeiras consiste em medidas preventivas e curativas adotadas para controle de agentes biológicos (fungos e insetos xilófagos e perfuradores marinhos), físicos e químicos que afetam as propriedades da madeira, adotadas no desenvolvimento e manutenção dos seus componentes no ambiente construído (ABNT, 2022).

Nesse contexto, Oliveira (2018) cita que a escolha da madeira pode ser adotada como uma medida preventiva dos processos de biodeterioração, uma vez que algumas espécies possuem resistência natural ao ataque de organismos xilófagos, como o caso do eucalipto. Por outro lado, quando se opta por utilizar espécies com baixa resistência natural, como o *pinus*, deve-se recorrer a tratamentos para a preservação da madeira, como a aplicação de produto preservativo sob pressão em autoclave, por exemplo. Além disso, as etapas de secagem da madeira em estufa efetuadas antes e depois do processo de autoclave são de extrema importância para garantir a impregnação do produto e a qualidade na colagem das lamelas (YOSHIDA, 2022).

Conforme Cavalheiro (2014), a utilização de produtos preservativos tem como premissa tornar a madeira tóxica ao agente xilófago que a consome. Os produtos comumente utilizados como preservativos no processo de pressão por autoclave são o CCA (composto de sais de cobre, cromo e arsênio) ou CCB (composto de cobre, cromo e boro). Em ambos os compostos o cobre comporta-se como fungicida, o cromo como fixador, e o arsênio e o boro como inseticidas, gerando alta eficiência ao tratamento. Oliveira (2018) comenta que existem restrições internacionais quanto ao uso do CCA para madeiras utilizadas em construções residenciais, principalmente devido a preocupações relativas à saúde da população quando exposta ao arsênio. No Brasil, porém, ainda que o

CCB seja mais frequentemente utilizado na construção civil, não existem restrições quanto ao uso do CCA (OLIVEIRA, 2018).

Oliveira (2018) ressalta que, ainda que sejam realizados os tratamentos preventivos, podem ocorrer manifestações patológicas ocasionadas por agentes físicos e químicos, sendo necessária, nestes casos, a adoção de acabamentos superficiais nas peças de madeira. Dentre os produtos que podem ser utilizados para os acabamentos na madeira estão as tintas, os vernizes e as lacas, por exemplo, os quais formam uma película protetora sobre o produto, ou então, os *stains*, que consistem em uma resina hidrorrepelente e fungicida, que não formam película, auxiliando na prevenção do desenvolvimento de agentes xilófagos (LEPAGE *et al.*, 1986). Esses últimos são os mais recomendados para a aplicação nos elementos de madeiras engenheiradas.

Posterior ao processo de tratamento, é realizada a seleção visual e mecânica das tábuas de madeira, conforme sua qualidade, sendo então emendadas no comprimento desejável. Na linha de colagem, as lamelas são agrupadas e recebem a aplicação de um adesivo estrutural, sendo prensadas em classes de resistência específicas (AMATA, 2020). Os principais adesivos estruturais utilizados são a Melamina Ureia Formaldeído (MUF) ou o poliuretano monocomponente, ambos sendo resistentes à radiação solar, umidade e hidrólise (OLIVEIRA, 2018). Quando devidamente comprimidas, as peças de madeira engenheirada são usinadas, embaladas, sequenciadas e enviadas conforme o plano de montagem da obra. Os rebaixamentos para a instalação de componentes hidráulicos e elétricos e recortes para encaixes já são previstos na etapa industrial e chegam prontos no canteiro de obras (AMATA, 2020).

Por se tratar de um processo construtivo pré-fabricado e altamente industrializado, ao projetar com madeira engenheirada é importante que sejam consideradas as características das peças e sua melhor adequação ao projeto, visando sempre o máximo desempenho da tecnologia na edificação. Isso possibilita a construção em larga escala, com prazos reduzidos e sem desperdícios de recursos, além de alta eficiência na composição formal, uma vez que são aceitas as criações de pequenos a grandes vãos (URBEM, 2022).

No atual cenário das madeiras engenheiradas existem diversos produtos, sendo eles: madeira laminada colada cruzada (*Cross Laminated Timber - CLT*),

madeira microlaminada (*Laminated Venner Lumber* - LVL), madeira laminada colada sob alta pressão e temperatura (*Parallel Strand Lumber* - PSL), madeira laminada colada (*Glued Laminated Timber* - GLT), madeira laminada serrada (*Laminated Strand Lumber* - LSL), madeira serrada orientada (*Oriented Strand Lumber* - OSL), madeira laminada pregada (*Nail-Laminated Timber* - NLT), madeira laminada cavilhada (*Dowel Laminated Timber* - DLT) e painel de tiras de madeira orientadas (*Oriented Strand Board* - OSB), que superam os inconvenientes que as madeiras maciças oferecem, como a anisotropia, a fraca durabilidade biológica, a baixa estabilidade global e a baixa resistência ao fogo (MORADPOUR *et al.*, 2018). Esses sistemas construtivos em madeira têm sido amplamente utilizados como material de construção estrutural, seja como substituto ou em conjunto com o concreto e o aço (KUZMAN *et al.*, 2018).

Devido à sua alta rigidez estrutural, estabilidade, durabilidade, leveza e maior alcance de placas com grandes dimensões, tem se destacado nacional e internacionalmente o uso do *Cross Laminated Timer* (CLT), o qual é descrito na sequência e tem o enfoque desta pesquisa.

2.1.2 Cross Laminated Timber

Os painéis de CLT consistem na sobreposição de camadas de lâminas de madeira maciça coladas em sentidos opostos e alternados, conforme demonstra a Figura 4, entremeados por adesivo estrutural. São compostos por camadas ímpares (geralmente 3, 5 ou 7) e as dimensões dos painéis podem variar de acordo com cada projeto, localidade e fabricante, mas costumam ter comprimento de até 18 m e largura entre 2,95 m e 4,80 m (OLIVEIRA, 2018). As espessuras das lamelas costumam variar entre 19 mm e 40 mm e são prensadas por meio de equipamentos hidráulicos de alta tecnologia, sendo que a espessura dos painéis costuma variar de 57 mm até 250 mm (URBEM, 2022).

Figura 4. Configuração do CLT.



Fonte: Crosslam (2020).

O CLT surgiu na Áustria no início da década de 1990, apresentando-se como um produto inovador e que foi se tornando popular na Europa para o uso residencial e não residencial (OLIVEIRA, 2018). Nos anos 2000, esse sistema cresceu significativamente com o movimento de construções sustentáveis, como uma alternativa ao concreto e à alvenaria, chegando a alcançar um aumento na produção de 860% entre 1998 e 2008 (PASSARELLI, 2013). Apesar do seu uso já estar consolidado em toda a Europa, a Áustria segue sendo o país de destaque para a tecnologia, pois, conforme afirma Passarelli (2013), concentra 63% da produção de CLT do continente.

No Brasil, o uso do CLT ainda é incipiente, destacando-se no uso residencial unifamiliar. Segundo Oliveira (2018), a produção nacional iniciou em 2012 e há uma predominância de construções no estado de São Paulo, visto que a primeira fábrica de CLT a ser implantada localiza-se em Suzano/SP. Como exemplo de edificação brasileira em CLT, pode-se citar a fábrica da Dengo Chocolates, uma edificação de quatro pavimentos, sendo a primeira edificação de maior porte construída com esse sistema construtivo, inaugurada em São Paulo em 2020 (AMATA, 2020).

Silva *et al.* (2012) comentam que o CLT é considerado como um material dimensionalmente estável, pois o cruzamento das lamelas restringe os movimentos higroscópicos da madeira quando sujeita a variações do teor de água (menos de 1% na direção das fibras e 2% na direção perpendicular às fibras). Para tal, os painéis devem ser produzidos com um controle rigoroso do teor de água das tábuas que constituem o elemento, aproximadamente 12%, saindo da fábrica com um teor de água entre 10 e 14% (SILVA *et al.*, 2012).

De maneira generalizada, o CLT é capaz de oferecer propriedades mecânicas e físicas uniformes e pode ser utilizado não apenas como painéis autoportantes (paredes, pisos e telhados) e paredes de cisalhamento¹, mas também como divisórias e componentes estruturais lineares em edifícios. O comportamento dos edifícios de CLT em altura quando sujeitos a ações sísmicas já foi investigado de alguns estudos experimentais (VASSALO; FOLLESA; FRAGIACOMO, 2018; LINDT *et al.*, 2019; SUN *et al.*, 2019) os quais têm provado que este tipo de edifício possui uma performance bastante satisfatória, apesar de muito dependente do tipo de ligações utilizadas.

Além das potencialidades estruturais evidentes, a introdução do CLT para a construção tem sido motivada por questões ambientais, graças à capacidade da madeira de armazenar dióxido de carbono, questões econômicas, em função da sua simplicidade e rapidez de construção, e questões sociológicas, devido à previsão do aumento da densidade populacional nos meios urbanos. É válido também salientar que o nível de desempenho e a simplicidade associados a este material demonstram capacidade de vir a proporcionar grande flexibilidade aos projetistas que visem explorar sistemas estruturais inovadores (SILVA *et al.*, 2012).

Em geral, o CLT apresenta ainda um satisfatório desempenho acústico e térmico e um bom comportamento face à ação do fogo (COSTA, 2013). Cho *et al.* (2019a) destacam que o CLT apresenta condutividade térmica menor que outros materiais de construção e que possui alto valor de resistência térmica, o que demonstra potencial para ser um bom isolante térmico. De acordo com Franco (2020), o valor da resistência térmica do CLT pode ser entre seis e sete vezes maior do que a do concreto de mesma espessura. Ao falar-se sobre a massa térmica dos materiais utilizados, por ser um painel de madeira maciça, o CLT também pode oferecer alta capacidade térmica, atuando como um elemento de armazenamento de calor (CAMBIASO & PIETRASANTA, 2014). Essa propriedade, conforme aponta Müller (2020), pode ser capaz de reduzir o uso de energia de aquecimento e resfriamento, alterando o horário de pico de cargas e diminuindo o consumo geral de energia do edifício.

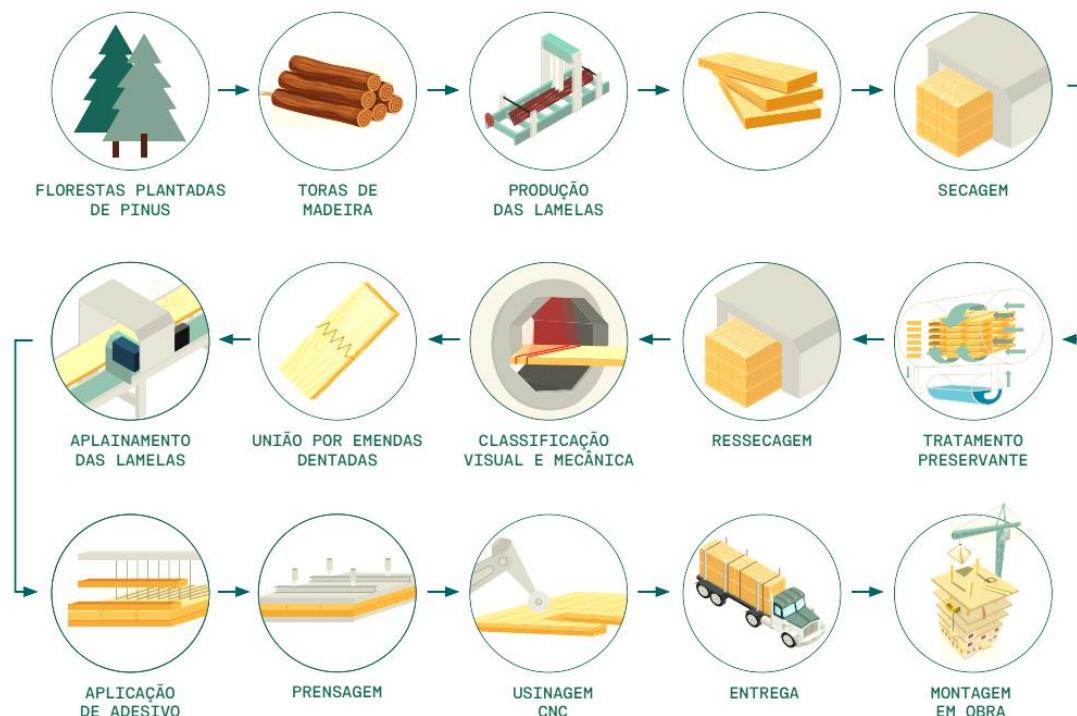
¹ Parede de cisalhamento é um elemento estrutural utilizado para resistir às forças paralelas ao plano da parede.

O CLT apresenta vasta bibliografia referenciada e manuais técnicos internacionais, além de materiais de fabricantes especializados. As principais referências normativas internacionais são a europeia EN 16351:2014 e a americana ANSI/APA PGR 320:2019. No Brasil, os painéis de CLT devem atender aos pré-requisitos estabelecidos pela normativa técnica da NBR 7190 (ABNT, 2022) – Projetos de Estruturas de Madeira.

2.1.2.1 *Fabricação*

Os painéis de CLT são pré-fabricados já com aberturas para portas, janelas e dutos cortados com alta precisão por equipamentos roteadores em CNC. A sequência de etapas da produção do CLT é apresentada na Figura 5.

Figura 5. Etapas de produção do CLT.



Fonte: URBEM (2022).

Para formar os elementos construtivos de CLT, a emenda das lamelas é realizada por meio de ligações denominadas *finger-joints* (Figura 6a), que consistem em juntas dentadas em formato triangular, as quais maximizam a superfície de aplicação do adesivo estrutural para aderência das peças entre si.

A posição da ligação das lamelas pode ser tanto na superfície das peças, quanto na sua lateral. Após emendadas e ao atingirem o comprimento necessário, as lamelas são aplinadas a fim de que se garanta a planicidade superficial e uniformidade dimensional (OLIVEIRA, 2018).

Na sequência, as lamelas aplinadas são colocadas em uma prensa a vácuo, dispostas lado a lado e orientadas numa mesma direção até que se obtenha o comprimento do painel desejado. Aplica-se então, de forma automatizada, o adesivo estrutural (Figura 6b) para realizar a união das peças. Terminada a primeira camada, o mesmo procedimento é realizado para uma próxima, que estará orientada perpendicularmente à anterior, e assim sucessivamente até que se obtenha a espessura do painel que foi planejado inicialmente em projeto (Figura 6c).

Figura 6. Ligação *finger-joint* (a); aplicação do adesivo estrutural (b); posicionamento das lamelas em sentido perpendicular entre si (c).



Fonte: Oliveira (2018).

Em resumo, o tamanho dos painéis dependerá do tamanho do equipamento da prensa a vácuo, podendo também haver restrições quanto ao tamanho devido ao transporte das peças (OLIVEIRA, 2018). Nacionalmente, os painéis costumam atingir dimensões máximas de 12 m de comprimento por 3 m de largura, sendo que a espessura dos painéis irá variar de acordo com a espessura das lamelas e configuração das camadas, podendo possuir de 57 mm até 250 mm (CROSSLAM, 2020). Em geral, porém, Oliveira (2018) salienta que as configurações mais comumente utilizadas consistem em espessuras de 80 mm, 95 mm e 105 mm para elementos de vedação vertical, e 120 mm para elementos de configuração de lajes. O Quadro 1 apresenta as quantidades,

espessuras das camadas e posicionamento das lamelas para cada uma dessas configurações citadas.

Quadro 1. Configurações comumente utilizada de painéis CLT.

Elemento construtivo	Espessura total [mm]	Nº de camadas	Espessura e ordem das lamelas [mm]			
			Face externa		Face interna	
Paredes	80	3	20	40	20	
	95	5	19	19	19	19
	105	3	35	35	35	
Lajes	120	3	40	40	40	

Fonte: Adaptado de Oliveira (2018).

A finalização da fabricação dos painéis consiste na sua limpeza ainda em fábrica e, quando necessário, lixação para alisar e uniformizar a superfície das peças que ficarão expostas após a montagem. Depois de prontos, os painéis são transportados para o canteiro de obras e montados com auxílio de guindastes e pela equipe de construção, conforme é demonstrado na Figura 7.

Figura 7. Movimentação dos painéis de CLT na montagem de edificações.



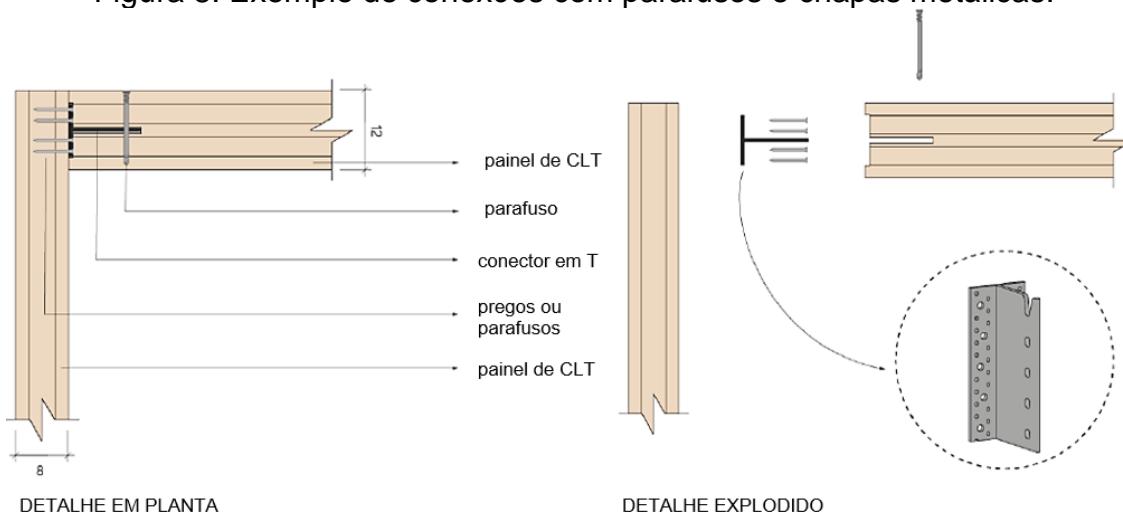
Fonte: Crosslam (2020); Oliveira (2018).

Para proceder com a montagem do edifício, é necessário que exista um rigoroso projeto que apresente as dimensões e compatibilizações de todos os painéis e demais elementos da edificação, o qual é comumente denominado de plano de montagem.

2.1.2.2 Montagem e conexões

Após a movimentação e posicionamento dos elementos construtivos nos locais determinados pelo plano de montagem, estes são fixados entre si, ou nos demais sistemas do edifício, como lajes de concreto, vigas metálicas, dentre outros, por meio de parafusos autoperfurantes ou conectores metálicos, podendo estes ser de inox, alumínio ou aço galvanizado. A Figura 8 exemplifica e detalha uma das tipologias possíveis de fixação com parafusos e conectores. Nas juntas formadas por dois elementos de CLT, estando eles paralelos ou perpendiculares entre si, é aplicada uma camada de selante de silicone resistente às intempéries (OLIVEIRA, 2018).

Figura 8. Exemplo de conexões com parafusos e chapas metálicas.



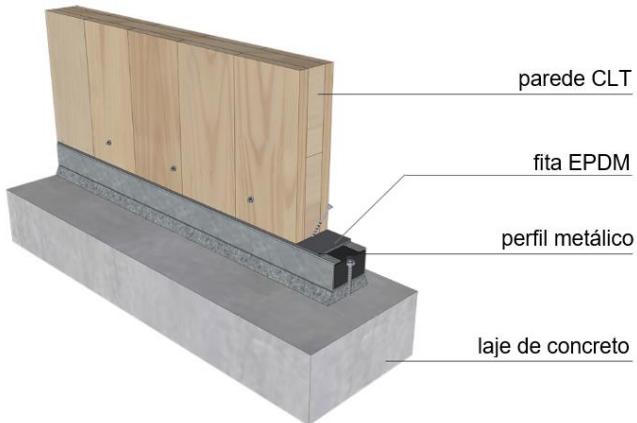
Fonte: Adaptado de Oliveira (2018).

Devido à umidade ser um dos fatores que mais influencia na deterioração da madeira, é de extrema importância que todos os elementos de CLT utilizados se mantenham fora do contato com possíveis fontes de umidade. Tais fontes podem ser diversas, desde um box de um banheiro até uma laje de piso de concreto, a qual permite a ascensão da umidade do solo, por exemplo.

Nos casos de conexões entre o CLT e fundações de concreto, Oliveira (2018) comenta que o isolamento pode ser realizado de diversas formas, sendo bastante comum a utilização de um perfil metálico entre o CLT e a fundação (Figura 9). Sobre o perfil, costuma-se colocar ainda um material emborrachado, a exemplo de fitas de EPDM (etilenopropilenodieno-monômero), de modo a

evitar a ascensão da umidade para o elemento de madeira, o qual é conectado ao perfil por meio de chapas metálicas e parafusos (OLIVEIRA, 2018). A autora enfatiza que essa é apenas uma das soluções que podem ser adotadas dentre outras vastas que existem no mercado.

Figura 9. Conexão entre CLT e fundação de concreto.



Fonte: Adaptado de Crosslam (2020).

A Crosslam (2020) comenta que a atratividade dos painéis de CLT como um sistema de construção se deve ao fato da alta velocidade de montagem que o sistema proporciona, resultando em economias consideráveis em mão-de-obra e mínima perturbação nos arredores locais. Torres (2010) expõe que uma moradia com área de 150 m², por exemplo, com o planejamento correto e a mão-de-obra especializada, consegue ser montada em menos de doze horas. Este tempo, porém, dependerá, principalmente, da quantidade de painéis, das condições de içamento e posicionamento dos mesmos e do número de funcionários que executem a montagem, além de suas habilidades técnicas (OLIVEIRA, 2018). Além disso, parte da atenção dada ao CLT se deve também ao uso potencial em edifícios altos, a partir de oito a doze andares (CROSSSLAM, 2020).

As instalações elétricas podem ser realizadas de maneira aparente, com os conduítes expostos, ou de forma oculta, com eletrodutos embutidos nos elementos de CLT, sejam eles com ou sem função estrutural. As instalações hidráulicas, porém, não costumam ser alojadas no interior das vedações em CLT, devido a possibilidade de vazamentos e comprometimento dos painéis de madeira. A construção de áreas molhadas costuma ser realizada por meio de

shafts, similar à uma parede hidráulica, dispostos na frente dos painéis (Figura 10). Esses *shafts* são estruturados com perfil metálicos de *drywall* e placas de gesso acartonado resistentes à umidade, as quais, posteriormente, podem receber materiais cerâmicos ou pintura como acabamento.

Figura 10. Perfis de *drywall* fixados na vedação de CLT para área molhada.



Fonte: Oliveira (2018).

Cabe ressaltar que é necessária a aplicação de produto impermeabilizante na superfície do elemento de CLT, no qual serão instalados os perfis metálicos, para evitar o contato com a umidade no caso de eventuais vazamentos (OLIVEIRA, 2018). Outra solução bastante pertinente é a associação de membrana hidrófuga para proteger as superfícies da madeira. A membrana costuma ser de fibras de polietileno de alta densidade e ajuda a evitar a infiltração de água que pode levar à corrosão, apodrecimento, deformação e rachaduras nas paredes e suas estruturas. Apesar de ser uma barreira contra a água, a membrana hidrófuga também é projetada para permitir a passagem de vapor, isso significa que ela permite que a umidade gerada no interior de uma estrutura seja liberada para o ambiente externo, ajudando a evitar o acúmulo de umidade e a formação de condensação, assim também prevenindo o surgimento de fungos como o mofo e o bolor (THOMAZ, 2023).

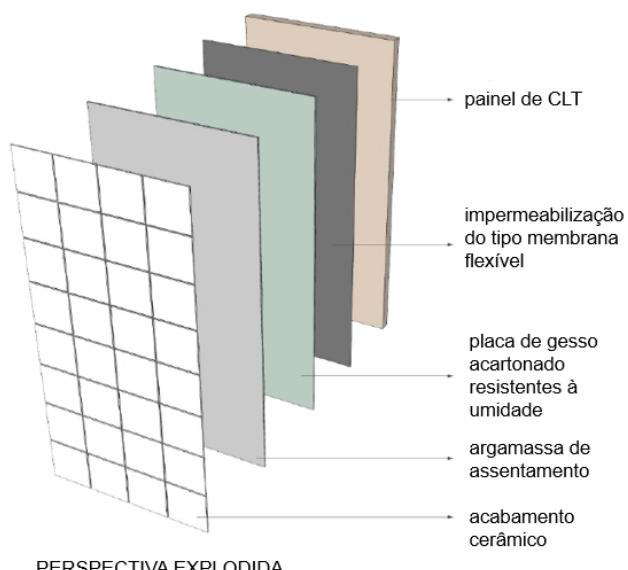
2.1.2.3 Acabamentos

Os elementos construtivos de CLT podem ou não agregar diferentes revestimentos para seu acabamento após sua instalação em obra, podendo ser do tipo aderido ou não-aderido. O primeiro tipo compreende os revestimentos que aderem na superfície da madeira, como vernizes, texturas e tintas, já o segundo abrange os que necessitam do auxílio de sistemas de fixação, a exemplo de fachadas ventiladas ou placas de gesso acartonado fixadas no CLT (OLIVEIRA, 2018).

No caso de elementos construtivos internos, costuma ser realizada a proteção superficial dos elementos com produtos não formadores de película, a exemplo do *stain*, mantendo-se assim o aspecto natural da madeira. Quando deseja-se uniformizar o acabamento interno e esconder as imperfeições da madeira, a exemplo das mossas no pinus, as áreas secas podem receber o acabamento de chapas de gesso acartonado, as quais podem ser pintadas posteriormente (CROSSLAM, 2020).

Quando desejar-se que as vedações recebam revestimentos cerâmicos na sua superfície, recomenda-se a aplicação de chapas de gesso acartonado em frente ao CLT, a fim que elas recebam as deformações do elemento estrutural e não as transmitam para o revestimento, evitando fissuras no material de acabamento (Figura 11). Em casos de áreas molhadas, recomenda-se que a chapa de gesso seja resistente à umidade (OLIVEIRA, 2018).

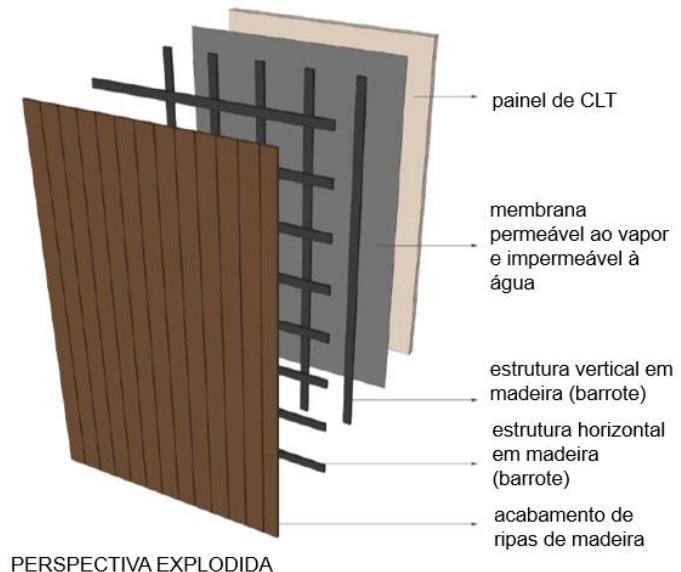
Figura 11. Instalação de revestimento cerâmico em elementos de CLT.



Fonte: Adaptado de Oliveira (2018).

Para os elementos que estarão em contato o exterior, recomenda-se utilizar revestimentos com finalidades de proteger a madeira dos agentes físicos e químicos, como a água e radiação solar. Silva (2014, p. 102) salienta que “o material utilizado como acabamento exterior é tão importante quanto o material utilizado para a estrutura, já que este vai funcionar como ‘pele’ para proteger o ‘esqueleto’ do edifício”. No Brasil, de acordo com Oliveira (2018), a grande maioria das edificações de CLT utiliza-se de fachadas ventiladas para preservar as vedações externas, sendo empregados perfis metálicos ou de madeira com fechamentos de chapas cimentícias, ripas de madeira, telhas metálicas, dentre outras opções disponíveis no mercado. A Figura 12 exemplifica a aplicação de revestimento não-adherido em madeira para fachada externa.

Figura 12. Aplicação de revestimento externo com acabamento em madeira.



Fonte: Adaptado de Oliveira (2018).

Para além da escolha do material de acabamento do exterior e interior, Silva (2014) comenta ser importante conhecer possibilidades existentes para a associação de material isolante no edifício, quando este for necessário. O uso do isolante contribui para aumentar a capacidade térmica do sistema construtivo e, quando utilizado, costuma ser inserido anteriormente à camada de CLT, do exterior para o interior, a fim de auxiliar também na proteção do painel de madeira (URBEM, 2022).

2.2 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO EM HABITAÇÕES

A questão da eficiência energética faz parte dos problemas impostos pela necessidade do consumo consciente e desenvolvimento sustentável. Nesse sentido, ao longo dos anos, muitos países têm enfrentado dificuldades para suprir a demanda crescente de energia, cabendo aos poderes públicos identificarem o comportamento dos consumidores, de modo a criar mecanismos para a otimização de seu uso (MAZZAFERRO, 2015).

A eficiência energética passou a ser uma preocupação mundial a partir da década de 1970, em decorrência da primeira crise do petróleo. Diante disso, os países industrializados organizaram-se e levantaram fundos para realizar investimentos em projetos de eficiência energética e fontes renováveis de energia, cujo objetivo era diminuir a dependência em relação ao petróleo e seus derivados (SOUZA, GUERRA e KRUGER, 2011). Desde então, muitos países possuem normas e regulamentos próprios relacionados à eficiência energética em edificações, sendo que, dentre as mais respeitadas e utilizadas no mundo, destacam-se as normas norte-americanas e as europeias (MAZZAFERRO, 2015).

Em 1975, a *American Society of Heating, Refrigerating and AirConditioning Engineers* (ASHRAE) implantou a sua primeira norma de eficiência energética para projetos e construções de novas edificações, a ASHRAE Standard 90, a qual passou por diversas revisões e desdobramentos ao longo dos anos. Tratando especificamente sobre eficiência energética em habitações, é a ASHRAE Standard 90.2 (*Energy-Efficient Design of New Low-Rise Residential Buildings*) que estabelece os requisitos mínimos de desempenho energético de todo o edifício para construções residenciais energeticamente eficientes. Ela fornece os requisitos mínimos de projeto, construção e verificação para novos edifícios residenciais e seus sistemas e novas partes de edifícios residenciais existentes e seus sistemas que utilizam formas de energia renováveis e não renováveis (ASHRAE, 2018).

Outras normas norte-americanas importantes são a ASHRAE Standard 169 (*Climatic Data for Building Design Standards*), que dispõe sobre dados

climáticos para normas de projeto de edificações, e a ASHRAE Standard 55 (*Thermal Environmental Conditions For Human Occupancy*), a qual especifica as condições para ambientes térmicos aceitáveis e destina-se ao uso no projeto, operação e comissionamento de edifícios e outros espaços.

Na Europa, é a série de documentos da EN ISO 52000 (ISO, 2017) que estabelece os requisitos mínimos de eficiência energética para edifícios, incluindo os residenciais. Tal normativa estabelece uma estrutura sistemática, abrangente e modular para avaliar o desempenho energético de edifícios novos e existentes, sendo aplicável à avaliação do consumo global de energia de um edifício, através de medição ou cálculo, e ao cálculo do desempenho energético em termos de energia primária ou outras métricas relacionadas com a energia.

No Brasil, igualmente ao cenário internacional, a eficiência energética se tornou um tema relevante de política pública com os impactos internacionais da crise do petróleo na década de 1970 e da dívida externa na década de 1980. Neste período, foram criados alguns programas de eficiência energética como o PBE (Programa Brasileiro de Etiquetagem), o PROCEL (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica) e o CONPET (Programa Nacional de Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural) (ASSUNÇÃO *et al.*, 2018).

Mais adiante, durante os anos de 1999 a 2002, o Brasil enfrentou uma forte crise energética devido ao crescente aumento no consumo de energia e à falta de investimentos no setor. Diante desse cenário, em 2001, foi criada a Lei nº 10.295/2001, conhecida como Lei da Eficiência Energética (LEE), que estabelece a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, responsável pela regulamentação de níveis mínimos de eficiência energética para equipamentos e pela promoção da eficiência energética nas edificações construídas no país. Ao longo dos anos, essas ações promoveram um aumento da eficiência energética, assim como maior consciência da importância de hábitos adequados no uso de energia e seus efeitos foram observados progressivamente (BRASIL, 2020).

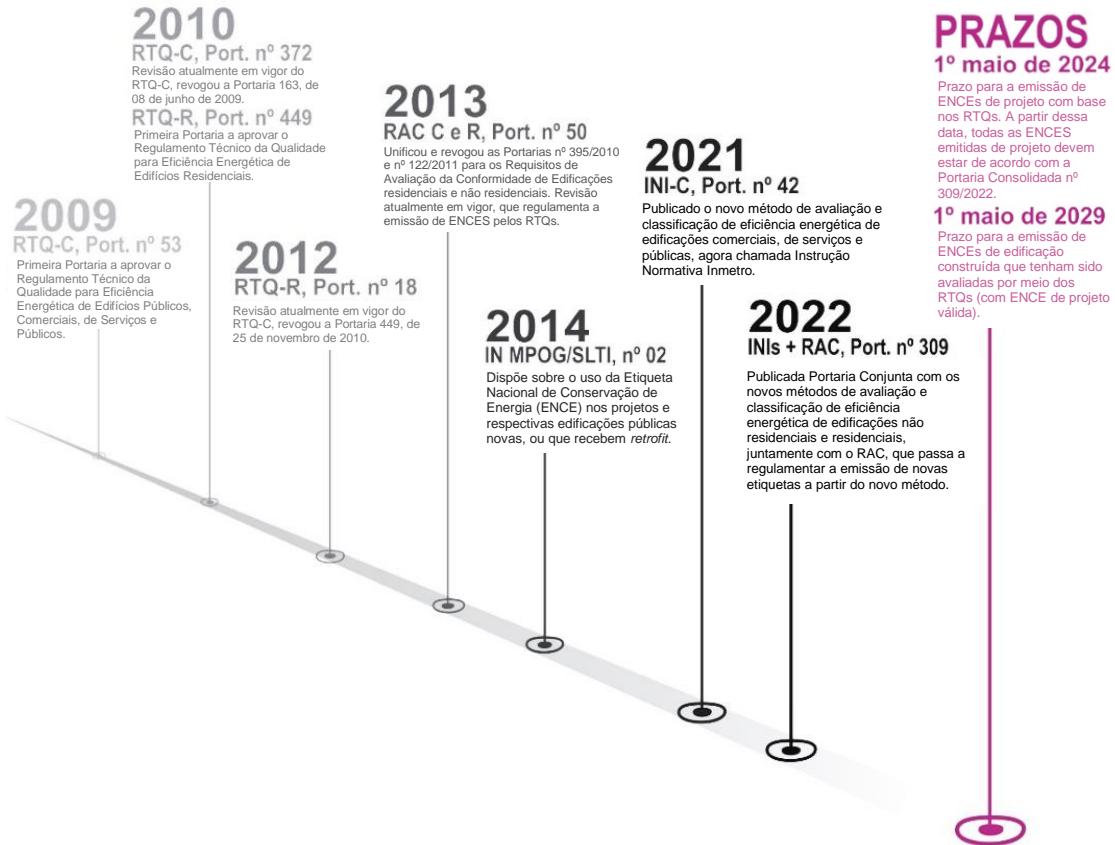
No ano de 2003, foi criado o Programa Nacional de Eficiência Energética em Edificações – o Procel Edifica – um subprograma do PROCEL, que tem por objetivo incentivar a conservação e o uso eficiente dos recursos naturais (água,

luz, ventilação etc.) nas edificações, contribuindo com a expansão, de forma energeticamente eficiente, do setor habitacional do país, reduzindo os custos operacionais na construção e utilização dos imóveis, assim como os desperdícios e os impactos sobre o meio ambiente (PBE, c2020b).

Em 2012, uma iniciativa da parceria entre o Procel Edifica e o Inmetro aprovou o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais – RTQ-R, o qual estabelece métodos e requisitos técnicos para a classificação da eficiência energética, compreendendo edificações residenciais unifamiliares e multifamiliares, unidades habitacionais autônomas e áreas de uso comum de edificações multifamiliares, variando-se a classificando geral do nível A “mais eficiente” a E “menos eficiente” (BRASIL, 2012). Porém, embora a metodologia do RTQ-R inclua a promoção do uso de estratégias bioclimáticas em projetos, existem algumas limitações em seu uso atual, o que fez com que, desde 2014, o Procel Edifica junto com o Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (CB3E) desenvolvessem ações para a melhoria do indicador de desempenho, tornar o método mais preciso e a incluir a avaliação de edificações de energia quase zero e edificações de energia positiva, estimulando a geração local de energia renovável nas edificações (INMETRO, c2020).

Neste contexto, o Ministério da Economia e o Inmetro publicaram, em 2022, a Portaria Consolidada nº 309 (BRASIL, 2022), a qual aprova as Instruções Normativas e os Requisitos de Avaliação da Conformidade para a Eficiência Energética das Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas e Residenciais. Esta Portaria entrou em vigor em 03 de outubro de 2022, sendo que os prazos e as disposições transitórias entre as INIs (Instruções Normativas Inmetro) e os RTQs estão ilustradas na linha do tempo da Figura 13.

Figura 13. Linha do tempo entre as aprovações de INIs e RTQs.



Fonte: Adaptado de PBE Edifica (c2020a).

Cabe ressaltar que a INI-R (Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais) especifica os critérios e os métodos para classificação de edificações residenciais quanto à sua eficiência energética, visando a etiquetagem de edificações por meio de uma ENCE (Etiqueta Nacional de Conservação da Energia), variando as classificações de eficiência energética em níveis de A à E, como no método do RTQ-R. A nova proposta de avaliação e classificação baseia-se no consumo de energia primária e compara a edificação em sua condição real com a mesma edificação adotando-se características de referência, que equivalem à classificação C, no caso das edificações residenciais. Essas propostas associam os métodos de avaliação de desempenho térmico de edificações aos métodos descritos na norma técnica de desempenho, cuja versão mais recente foi aprovada em 2021, a NBR 15.575 (ABNT, 2021).

Na década de 1970, diante do surgimento de novas soluções construtivas para suprir demandas habitacionais existentes, começaram a ocorrer variados

problemas patológicos que comprometeram a segurança e estabilidade de edificações, principalmente devido ao desconhecimento sobre o desempenho de determinados materiais (SANTOS FILHO, 2015). Apesar das discussões sobre o desempenho de edificações terem avançado nas décadas seguintes, os primeiros estudos sobre o que viria a ser a norma de desempenho datam do ano 2000, a partir de uma iniciativa da Caixa Econômica Federal (CEF) e da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP). O tema gerou discussões na sociedade brasileira com a participação de vários segmentos da indústria da construção civil (ALVES, 2021).

A primeira publicação da NBR 15.575 aconteceu em 2008 e estabelecia normativas de desempenho apenas para edificações habitacionais de até cinco pavimentos. Após vários julgamentos sobre correções e aperfeiçoamentos, a normativa foi novamente publicada em julho de 2013, sendo aplicável nesse momento a todas as tipologias de edificações habitacionais (ALVES, 2021).

Com o objetivo de atender aos requisitos dos usuários para os ambientes habitacionais, a norma define o desempenho como o “comportamento em uso de uma edificação e de seus sistemas” (ABNT, 2021). Dessa forma, dentre os requisitos de habitabilidade citados pela norma, é estabelecido o desempenho térmico, que visa garantir ao usuário condições térmicas adequadas para o desenvolvimento das suas atividades na habitação. Tal desempenho dependerá de seus componentes (paredes e coberturas), das áreas envidraçadas e de ventilação, das cargas térmicas internas (pessoas, iluminação e equipamentos), da maneira como se operam as aberturas e do clima da cidade (ABNT, 2021).

Considerando limitações identificadas no método de 2013 (SORGATO *et al.*, 2012), o Laboratório de Eficiência Energética de Edificações (LabEEE) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), iniciou em 2018 a elaboração de uma proposta para a revisão da análise de desempenho térmico da NBR 15.575, a qual foi publicada em março de 2021 e vigora atualmente. Algumas das principais atualizações do procedimento de simulação computacional são (LABEEE, c2023): I) adoção de simulações anuais; II) consideração da edificação na fase de uso e operação; III) avaliação da edificação em duas condições de uso: com ventilação natural e sem ventilação natural; IV) modelagem de janelas operáveis, com trocas de ar obtidas a partir da velocidade

e direção do vento fornecidas pelo arquivo climático; V) consideração do cálculo da carga térmica, de forma a avaliar o desempenho térmico da edificação frente ao uso de sistemas de ar condicionado; VI) análise considerando a comparação entre um modelo do edifício projetado (real) e um modelo de referência; VII) estabelecimento de novos indicadores para a avaliação do desempenho térmico: percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa (PHFT), temperatura operativa anual máxima e mínima da UH (Tomáx e Tomín), e carga térmica total (CgTT).

De acordo a NBR 15.575 (ABNT, 2021), o desempenho térmico das unidades habitacionais (UH) é caracterizado por meio da delimitação de três níveis de desempenho: mínimo (M), intermediário (I) e superior (S), sendo de caráter obrigatório o atendimento aos requisitos e critérios estabelecidos para o nível de desempenho mínimo, e facultativo o atendimento aos níveis de desempenho intermediário e superior. A avaliação de desempenho térmico deve ser realizada para os ambientes de permanência prolongada (APP) da unidade habitacional, ou seja, aqueles ambientes de ocupação contínua por um ou mais indivíduos. Além disso, o desempenho térmico da UH pode ser analisado por meio de dois procedimentos: o procedimento simplificado ou procedimento de simulação computacional.

O procedimento simplificado avalia o desempenho térmico da UH por meio da comparação de características geométricas dos APP e de propriedades térmicas dos sistemas construtivos em relação aos valores de referência destes parâmetros, como transmitância térmica (U) e capacidade térmica (CT). Esse procedimento permite a análise de desempenho térmico para a obtenção do nível mínimo, de caráter obrigatório. O atendimento aos níveis intermediário e superior é facultativo e deve ser avaliado por meio do procedimento de simulação computacional, o qual é alvo de estudo desta pesquisa e será abordado com maior aprofundamento a seguir.

2.2.1 Procedimento de simulação computacional da NBR 15.575

O procedimento de simulação computacional representa a maneira mais abrangente e representativa de análise do desempenho térmico disponível na

NBR 15.575 (ABNT, 2021), permitindo avaliações para a obtenção de todos os níveis de desempenho. Ele avalia o desempenho térmico da UH por meio do desenvolvimento de modelos computacionais em um programa compatível com características específicas descritas pela normativa brasileira e pela ASHRAE 140, e avalia o desempenho térmico anual da envoltória da edificação em relação a esta envoltória com características de referência.

Neste procedimento, portanto, devem ser elaborados dois modelos para fins de avaliação e comparação: o modelo real e o modelo de referência. O modelo real conserva as características geométricas da UH, as propriedades térmicas e as composições dos elementos transparentes, paredes e cobertura; enquanto o modelo de referência representa a edificação avaliada, mas com características de referência, conforme o item 11.4.7.2 da Parte 1 da NBR 15.575 (ABNT, 2021).

A avaliação dos critérios de desempenho térmico da norma é determinada com base em intervalos de temperaturas externas de bulbo seco (TBS_m) do arquivo climático utilizado, conforme apresentado na Tabela 1, considerando-se o arredondamento de uma casa decimal (ABNT, 2021).

Tabela 1. Intervalos de temperaturas externas de bulbo seco.

Intervalos de temperaturas externas	Média anual da temperatura externa de bulbo seco (TBS _m)
Intervalo 1	TBS _m < 25,0 °C
Intervalo 2	25 °C ≤ TBS _m < 27,0 °C
Intervalo 3	TBS _m ≥ 27,0 °C

Fonte: Adaptado de ABNT (2021).

Quando avaliado o desempenho térmico para o atendimento do nível mínimo, os modelos real e de referência devem ser simulados considerando somente o uso da ventilação natural nos APP. Neste caso, serão avaliados os parâmetros de PHFT, Tomáx e Tomín para determinar o desempenho térmico da UH. Para a obtenção dos níveis intermediário e superior, os modelos real e de referência devem ser simulados em duas condições de utilização dos APP: com o uso da ventilação natural (simulação 1) e sem o uso da ventilação natural (simulação 2).

A partir da simulação 1 serão determinados: o percentual de horas de ocupação dos APP dentro de uma faixa de temperatura operativa (PHFT_{APP}), variando essa faixa conforme o clima local (Tabela 2), e a temperatura operativa anual máxima e mínima de cada APP, considerando apenas os seus períodos de ocupação. A partir dos valores de PHFT_{APP} , $\text{Tomáx}_{\text{APP}}$ e $\text{Tomín}_{\text{APP}}$ para cada APP, serão determinados o PHFT_{UH} , Tomáx_{UH} e Tomín_{UH} da UH geral.

Tabela 2. Faixas de temperaturas operativas para a determinação do PHFT_{APP} .

Intervalos de temperaturas externas	Faixa de temperatura operativa a ser considerada
Intervalo 1	$18,0 \text{ }^{\circ}\text{C} < \text{T}_{\text{OAPP}} < 26,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Intervalo 2	$\text{T}_{\text{OAPP}} < 28,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Intervalo 3	$\text{T}_{\text{OAPP}} < 30,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Fonte: Adaptado de ABNT (2021).

Para todos os níveis de desempenho, em todas as zonas bioclimáticas, a Tomáx_{UH} do modelo real deve ser menor ou igual à obtida para o modelo de referência, após somado um valor de tolerância ($\Delta\text{Tomáx}$). Para as UH unifamiliares deve-se considerar $\Delta\text{Tomáx}$ igual a 2 $^{\circ}\text{C}$. A Tomín_{UH} deverá ser analisada apenas nas zonas bioclimáticas 1, 2, 3 ou 4, e a do modelo real deverá ser igual ou superior à Tomín_{UH} do modelo de referência, após reduzido um valor de tolerância ($\Delta\text{Tomín}$), que deve ser de 1 $^{\circ}\text{C}$ para todas as UH avaliadas.

Para o atendimento ao critério de PHFT_{UH} no nível mínimo (M), o modelo real deve apresentar $\text{PHFT}_{\text{UH,real}}$ que seja superior a 90% do obtido para o modelo de referência ($\text{PHFT}_{\text{UH,ref}}$). O atendimento ao critério de PHFT_{UH} , nos níveis intermediário (I) e superior (S), é realizado por meio de um incremento do $\text{PHFT}_{\text{UH,real}}$ (ΔPHFT) em relação ao $\text{PHFT}_{\text{UH,ref}}$, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3. Critério de avaliação de desempenho térmico quanto ao PHFT_{UH} .

Nível de desempenho	Critério
Mínimo (M)	$\text{PHFT}_{\text{UH, real}} > 0,9 \cdot \text{PHFT}_{\text{UH, ref}}$
Intermediário (I)	$\Delta\text{PHFT} \geq \Delta\text{PHFT}_{\text{min}}$
Superior (S)	$\Delta\text{PHFT} \geq \Delta\text{PHFT}_{\text{mín}}$

^a ΔPHFT é o incremento do $\text{PHFT}_{\text{UH, real}}$ em relação ao $\text{PHFT}_{\text{UH, ref}}$.

^b $\Delta\text{PHFT}_{\text{min}}$ é o incremento mínimo do $\text{PHFT}_{\text{UH, real}}$ em relação ao $\text{PHFT}_{\text{UH, ref}}$, com valor obtido pelo Anexo A, para o nível intermediário, e pelo Anexo B, para o nível superior.

Fonte: Adaptado de ABNT (2021).

A partir da simulação 2 serão determinados o somatório anual dos valores horários da Carga Térmica de Refrigeração ($CgTR_{APP}$) e da Carga Térmica de Aquecimento ($CgTA_{APP}$). A consideração da carga térmica para aquecimento somente será necessária quando avaliadas edificações localizadas em climas que se enquadrem no Intervalo 1 estabelecido pela normativa (ABNT, 2021). A Tabela 4 apresenta as faixas de temperatura operativa para cada intervalo em que se deve considerar a carga térmica nos APP do modelo com o uso de ventilação natural.

Tabela 4. Valores de temperatura operativa para $CgTR_{APP}$ e da $CgTA_{APP}$.

Intervalos de temperaturas externas	Faixa de temperatura operativa para o cálculo da $CgTR_{APP}$	Faixa de temperatura operativa para o cálculo da $CgTA_{APP}$
Intervalo 1	$T_{OAPP} \geq 26,0^{\circ}C$	$T_{OAPP} \leq 18,0^{\circ}C$
Intervalo 2	$T_{OAPP} \geq 28,0^{\circ}C$	Não considera
Intervalo 3	$T_{OAPP} \geq 30,0^{\circ}C$	Não considera

Fonte: Adaptado de ABNT (2021).

A partir dos valores de $CgTR_{APP}$ e $CgTA_{APP}$ para cada APP será determinado o somatório anual dos valores horários da Carga Térmica Total da UH ($CgTT_{UH}$). Para atender os níveis intermediário e superior de desempenho térmico a UH deverá apresentar valores mínimos para uma redução da carga térmica total ($RedCgTT_{min}$), conforme valores especificados pela normativa. A $RedCgTT_{min}$ representa o percentual mínimo de redução da carga térmica total da UH real ($CgTT_{UH,real}$) em relação à carga térmica total da UH de referência ($CgTT_{UH,ref}$). A Tabela 5 apresenta os critérios avaliativos para esse quesito, cujos valores das reduções constam no Anexo A e Anexo B deste trabalho.

Tabela 5. Critério de avaliação de desempenho térmico quanto à $CgTT_{UH}$.

Nível de desempenho	Critério
Mínimo (M)	Não considera
Intermediário (I)	$RedCgTT^a \geq RedCgTT_{min}^b$
Superior (S)	$RedCgTT \geq RedCgTT_{min}$

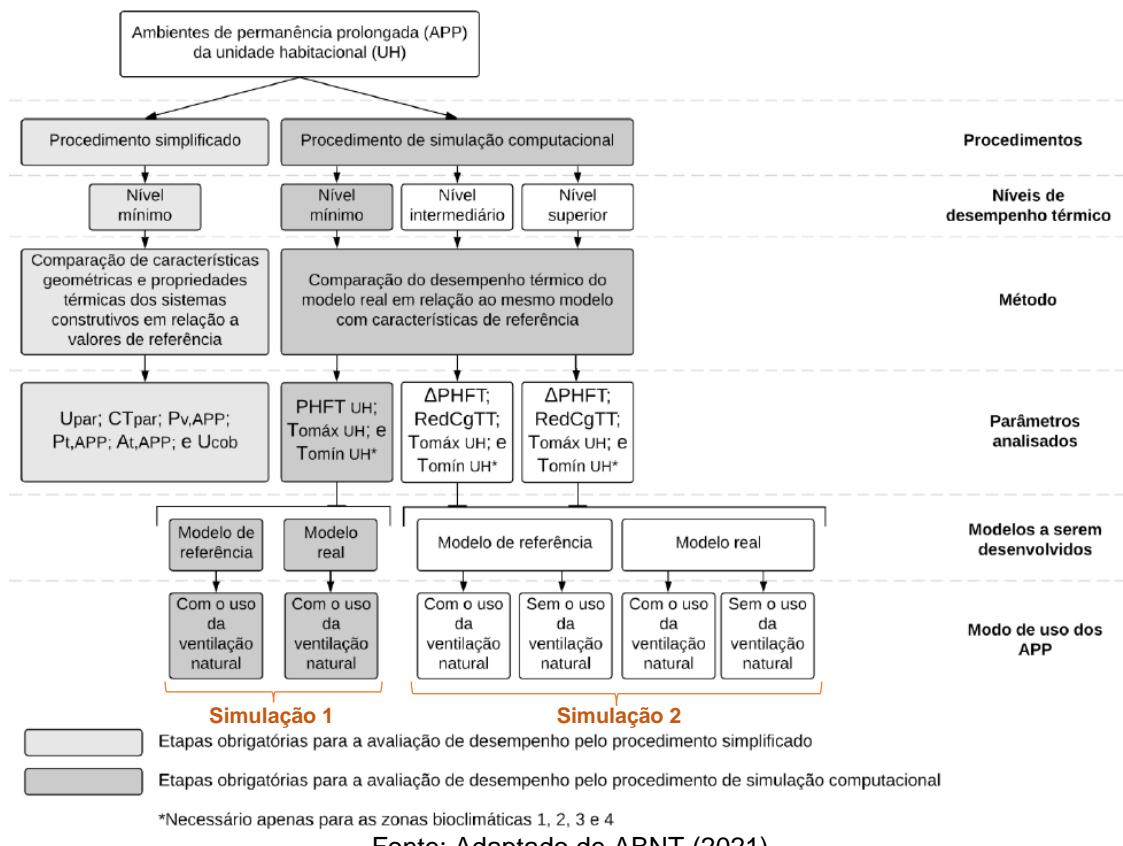
^a $RedCgTT$ é a redução da carga térmica total do modelo real ($CgTT_{UH,real}$) em relação à referência ($CgTT_{UH,ref}$).

^b $RedCgTT_{min}$ é a redução mínima da $CgTT_{UH,real}$ em relação à referência ($CgTT_{UH,ref}$), com valor obtido por meio do Anexo A, para o nível intermediário, e do Anexo B, para o nível superior.

Fonte: Adaptado de ABNT (2021).

Para simplificar o entendimento, na Figura 14 é possível verificar resumidamente os indicadores de desempenho térmico e modelos de simulação necessários para a avaliação dos níveis mínimo, intermediário e superior da mais recente NBR 15.575 (ABNT, 2021).

Figura 14. Procedimentos de avaliação para o desempenho térmico.



Fonte: Adaptado de ABNT (2021).

De maneira geral, a especificação de um desempenho térmico adequado colabora com as condições de habitabilidade e sustentabilidade das edificações. A avaliação do desempenho térmico de uma edificação abrange a resposta global do projeto arquitetônico proposto em relação às trocas térmicas entre o ambiente construído e o ambiente externo, para que se ofereça o conforto térmico adequado à região em que ela será instalada.

2.3 DESEMPENHOS TÉRMICO E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES

Quando o assunto é eficiência energética voltada para edificações residenciais é fundamental a busca por soluções que proporcionem maior conforto aos usuários, reduzam o consumo de energia elétrica e, consequentemente, apresentem o menor impacto ambiental. Nesse sentido, a construção em madeira tem ganhado cada vez mais atenção em todo o mundo por ser um material renovável e apresentar baixo impacto ambiental.

Diferentes estudos já buscaram apresentar as potencialidades de uso das madeiras nas construções, principalmente do CLT, relatando acerca de seu desempenho estrutural (OLIVEIRA, 2018; SILVA, 2014; COSTA, 2013; MEZEIRO, 2018), da sua resistência ao fogo (VAIRO; SILVA e ICIMOTO, 2023; WEISNER *et al.*, 2022) e aos abalos sísmicos (BANDHARI *et al.*, 2023; IZZI *et al.* 2018), assim como análises de durabilidade e preservação dos painéis (OLIVEIRA; OLIVEIRA e BRAZOLIN, 2018; McCLUNG *et al.*, 2014) e, ainda, sobre avaliações do ciclo de vida e sustentabilidade quanto ao uso do CLT nas construções (DUAN *et al.*, 2022; YOUNIS e DODOO, 2022; D'AMICO; POMPONI e HART, 2021).

No que tangencia as discussões sobre desempenho termoenergético, Liu *et al.* (2016) citam que é amplamente aceito que o uso da madeira pode ser capaz de reduzir a energia incorporada e de operação de um edifício. Dentro deste contexto, Chen (2012) analisou e comparou o consumo de energia de um mesmo edifício corporativo, de cinco andares, localizado no Canadá, construído em concreto armado e CLT. A energia incorporada foi calculada com base na quantidade total de material necessário para cada um dos sistemas construtivos, e os impactos ambientais foram avaliados comparando o consumo total de energia ao longo da vida útil do edifício. Os resultados demonstraram que o edifício em CLT apresentou menor consumo de energia não renovável em termos de aquisição de materiais, fabricação e transporte, além de uma diminuição de 10% no consumo da energia operacional. Dessa forma, os autores concluíram que existe potencial na utilização do CLT como material de construção, a fim de projetar edifícios passivos e de baixo consumo energético.

Liu *et al.* (2016) e Guo *et al.* (2017) focaram estudos no consumo de energia e emissão de carbono, para aquecimento e resfriamento, durante a fase de operação de edifícios residenciais. Os autores examinaram os efeitos

energéticos do uso do CLT e fizeram comparações entre um edifício de sete pavimentos construído em concreto armado e outro idêntico em CLT, para diferentes cidades e climas da China. Como resultados, os edifícios construídos em madeira resultaram em uma economia de energia ponderada de quase 30%, o que correspondeu a reduções de carbono de aproximadamente 25%, em comparação com os edifícios de concreto na fase de operação, embora esses valores possam variar em diferentes zonas climáticas.

A fim de analisar o desempenho e conforto térmico do CLT no interior das construções, Khavari *et al.* (2016) simularam um modelo de edifício residencial de dez andares construído em CLT e o compararam a um mesmo modelo de edifício de referência em estrutura leve metálica, ambos localizados na cidade norte americana de Sacramento, Califórnia. Uma análise de sensibilidade foi realizada para estudar o impacto de diferentes climas, tipos de edifícios e condições de carga interna no desempenho do consumo de energia do edifício. Os autores concluíram que o CLT geralmente oferece uma melhoria significativa na eficiência energética para aquecimento do edifício, devido a apresentar-se como um envelope pesado e hermético. Para o resfriamento, porém, apesar de existir grande potencial de melhoria, os edifícios de CLT necessitariam de um planejamento para o pré-resfriamento com inserção de *setpoints* variáveis no sistema de resfriamento, conforme padrões de uso.

Nesse mesmo contexto, Setter *et al.* (2019) analisaram numericamente o desempenho energético anual e o desempenho higrotérmico de uma tipologia de residência unifamiliar, localizada em diferentes climas dos Estados Unidos. Para as simulações e análises foram utilizados os softwares *BEOpt*, *EnergyPlus* e *WUFI*, tendo como foco principal a análise do potencial do CLT em armazenar energia térmica usando o pré-resfriamento sem aumentar sua umidade relativa (UR). Foram realizadas comparações entre uma casa típica de madeira e a mesma tipologia implementada com painéis de CLT, com o intuito de determinar sua viabilidade e durabilidade no mercado residencial. Foram levados em consideração a massa térmica, a redução da infiltração e o uso de *setpoints* variáveis do *termostato* para introduzir estratégias de pré-resfriamento com o intuito de reduzir o custo de energia elétrica, além de serem examinadas as mudanças de temperatura e umidade. Os resultados preliminares mostraram

que o uso de CLT em residências unifamiliares resulta em economia anual de custos de energia em todos os climas considerados no estudo, com maior economia em climas frios. Independentemente disso, porém, nenhuma dessas economias seria suficiente para compensar o aumento de 20 % no custo de construção de uma edificação de CLT. Os resultados higrotérmicos do estudo mostraram que as residências de CLT têm o potencial de se beneficiar de controles inteligentes e pré-resfriamento, porém a UR dos painéis depende muito do estado de conservação da membrana impermeável associada e do clima local. Em climas secos e sem chuvas fortes, o CLT seca rapidamente abaixo de 70 % de UR, mesmo que a membrana tenha sido violada ou se o painel tiver sido exposto à água. Para os climas mais úmidos e chuvosos, a membrana desenvolve um papel mais importante, pois a exposição à chuva satura o painel e pode elevar seus níveis de UR para 100 %. De modo geral, os autores apontam que estes são resultados promissores que mostram que o armazenamento de energia térmica no CLT não se traduz na degradação do seu desempenho.

Albatici *et al.* (2017) investigaram e compararam as condições de conforto térmico de dois edifícios de madeira de cinco andares construídos em Trento, na Itália, com finalidades de habitação social. Os dois edifícios são idênticos, exceto por seu sistema estrutural, pois um deles está construído em sistema leve de madeira (TF - *Timber Frame*) e o outro em CLT. No presente trabalho, foi realizada a análise do conforto térmico em dois apartamentos. Foi usada uma abordagem tradicional, medindo os parâmetros ambientais higrométricos térmicos, de acordo com as normas europeias ISO 7730:2006 e ISO 10551:2002, juntamente com a distribuição de um questionário específico aos ocupantes, relacionado ao conforto térmico percebido e à satisfação com o ambiente interno. Além disso, foram feitas perguntas relacionadas ao comportamento do usuário, ao gerenciamento do sistema de aquecimento e resfriamento e à abertura de portas e janelas. Por fim, um modelo de simulação dinâmica dos apartamentos foi desenvolvido por meio da modelagem da geometria, da estrutura, do envelope e dos sistemas mecânicos com o uso do software *DesignBuilder*. Apesar do fato de ambos os edifícios terem se mostrado confortáveis, algumas diferenças foram identificadas na comparação das

condições internas dos dois apartamentos. Durante o período de inverno, observou-se que, quando a temperatura externa cai, o valor da temperatura interna diminui mais rapidamente no apartamento TF do que no apartamento CLT, sendo em média 1,2 °C contra 0,6 °C. Assim, o edifício que esfria mais rapidamente é o de menor massa, o que dificilmente pode reduzir a perda de calor do apartamento. Durante o período do verão, notou-se que os valores máximos da temperatura interna foram semelhantes nas duas semanas do experimento, enquanto os mínimos foram bastante diferentes, devido ao valor do atraso térmico ser de 20 horas no edifício CLT e de 9 horas no edifício TF, significando que esse sistema estrutural é menos capaz de armazenar calor em comparação com o de CLT. Sobre a experiência subjetiva dos usuários, os ocupantes dos edifícios relataram um estado de conforto geral, com sensação percebida de leve calor em ambas as estações, porém não manifestando um desejo por temperaturas mais baixas. Isso significa que, segundo os autores, tanto o sistema de construção TF quanto o CLT podem proporcionar conforto térmico interno adequado com pouca diferença em relação à tendência de temperatura no inverno e no verão. Os autores comentam ainda que as diferentes propriedades térmicas dos sistemas de madeira, embora influenciem a tendência interna das quantidades térmicas, não parecem afetar as condições de conforto interno e a satisfação dos usuários finais em relação ao ambiente térmico nas cidades e climas analisados.

Novamente na Itália, Nocera, Gagliano e Detommaso (2018) estudaram o comportamento térmico de um edifício de CLT, por meio de simulações termoenergéticas, adotando abordagens de regime permanente e de regime dinâmico (ou transiente) para as cidades de Catania e Bolzano, que são caracterizadas por diferentes climas mediterrâneos. Catania apresenta verões quentes e secos e invernos moderadamente frescos e úmidos, já Bolzano é caracterizada por inverno frios e verões amenos. As simulações foram realizadas no software *Aermec MC11300* para regime permanente, e anualmente por meio do software *DesignBuilder*, para regime transiente, tanto em condições de flutuação livre de temperaturas quanto com sistema de ar-condicionado, sendo investigado também o efeito da ventilação natural no comportamento térmico específico para o edifício de CLT. Os resultados das

simulações demonstraram que as duas abordagens forneceram quase as mesmas necessidades de energia no inverno, porém uma diferença significativa foi revelada no verão. Apesar de os valores-limite exigidos pela regulamentação italiana sobre a transmitância térmica periódica terem sido amplamente verificados, as paredes não foram capazes de atenuar e retardar consideravelmente o pico da onda de calor externa. A análise em condições de funcionamento livre mostrou que o edifício sofre significativamente durante a semana representativa mais quente do período de verão, não garantindo o conforto e o bem-estar térmico dos ocupantes quando o sistema de ar-condicionado para resfriamento do espaço é desligado. Embora as estratégias de resfriamento passivo de ventilação natural tenham sido implementadas, a redução das temperaturas internas não foi suficiente para garantir condições adequadas de conforto térmico. Em termos globais, os autores afirmam que, em regiões onde a demanda de aquecimento não é um problema crítico, seria aconselhável adotar um isolamento moderado nas envoltórias dos edifícios.

Cho *et al.* (2019a) concentraram seu estudo no consumo de energia para aquecimento e resfriamento de edifícios residenciais de CLT de quatro andares, propostos pela ASHRAE 90.1, utilizando primeiramente quatro tipos de isolamento (lã de vidro, lã de rocha, EPS e um híbrido composto por lã de vidro e EPS). Para fins de comparação foram simulados um edifício de CLT e um edifício em estrutura metálica leve, ambos localizados em Seul, na Coréia do Sul. Posteriormente, para aprofundar as análises de eficiência energética, cinco pacotes para redução no consumo energético [incluindo economia de energia (luzes de led e sensores de acendimento), aquecimento e resfriamento (isolamento do telhado, persianas internas e vidros triplos *low-e*), e tecnologias de energia renovável (paineis fotovoltaicos)] foram aplicados a dois edifícios de CLT selecionados – um associado ao isolamento de lã de rocha, que apresentou a maior economia total de energia, e outro com isolamento híbrido, que foi economicamente vantajoso. Como resultados, o isolamento de lã de rocha apresentou os melhores resultados para a economia total de energia do edifício e todos os pacotes, exceto o pacote 4 (adição de isolamento no teto, persianas internas e janelas com vidros triplos *low-e*), aumentaram o consumo de energia para o aquecimento. Já para o resfriamento, todos os pacotes apresentaram

redução no consumo de energia, sem exceções. Dentre as cinco opções, o pacote 3 (adição de luzes LED, isolamento do telhado e persiana interna) foi considerado a solução mais eficiente. Para pesquisas futuras, os autores sugerem que diferentes análises devem ser concentradas sobre o consumo de energia de edifícios residenciais de CLT, a fim de aprofundar conhecimento na área.

Em outro estudo, Cho *et al.* (2019b) analisaram as propriedades higrotérmicas de uma parede composta por cinco camadas de CLT, associada a diferentes tipologias de materiais isolantes (EPS, lã de vidro e opção híbrida), variando sua posição no exterior ou interior da parede. Utilizando as condições climáticas de Seul, na Coréia do Sul, foram medidos o teor de umidade e o risco de crescimento de mofo pelo programa WUFI e a carga energética da parede pelo *DesingBuilder*. As análises demonstraram que o teor de água presente é menor nas paredes de CLT com a presença do isolamento externo, sendo que o isolamento híbrido associado apresentou os menores valores. Em todas as camadas de CLT o risco de crescimento de mofo verificado foi baixo e concluiu-se que a parede utilizando o sistema de isolamento externo apresenta melhor capacidade de secagem a longo prazo. Comparando o consumo de energia, a parede associada ao isolamento externo demonstrou-se mais eficiente energeticamente do que a com isolamento interno. Além disso, as paredes com isolamento de lã de vidro apresentaram-se eficazes na redução do consumo de energia e as paredes com isolamento EPS apresentaram o consumo máximo de energia independentemente do sistema de isolamento. Frente a esses resultados, os autores sugerem que estudos adicionais seriam necessários para avaliar o desempenho higrotérmico das paredes de CLT sob diversas outras condições climáticas.

Neste mesmo contexto, Chang *et al.* (2021) avaliaram o desempenho higrotérmico de paredes de CLT considerando a construção modular em condições climáticas futuras. Primeiramente foram fabricadas paredes de CLT para então realizar-se a produção e montagem, *in loco*, de um protótipo de edificação de acordo com o processo construtivo de CLT. O comportamento higrotérmico das paredes foi simulado por meio do programa WUFI e os resultados previstos foram verificados em relação às medidas que foram obtidas

no experimento do protótipo real. Por fim, os autores avaliaram o desempenho higrotérmico das paredes de CLT quando associadas a quatro diferentes tipos de isolamento (XPS, EPS, lã de rocha e placa de fibra de madeira), considerando o clima futuro em oito cidades dos EUA. Os resultados da análise do teor total de água demonstraram que nenhum problema de umidade ocorreu a longo prazo sob quaisquer condições variáveis, porém as projeções futuras para o clima aumentariam o teor de umidade do isolamento. Isso não só causaria problemas de umidade no material isolante, como também degradaria o seu desempenho, o que acarretaria variações nas temperaturas internas e, consequentemente, maior consumo de energia do edifício em busca de equilíbrio. O risco de crescimento de mofo foi avaliado com base na umidade relativa crítica em função da temperatura e, com base no desempenho higrotérmico, a parede de CLT com isolamento XPS demonstrou-se mais segura contra problemas de umidade, em todas as oito cidades. No entanto, o risco de crescimento de mofo em todos os tipos de isolamento e todas as regiões foi maior de acordo com o aumento da temperatura média anual frente às mudanças climáticas futuras.

No Brasil, França e Bogo (2019) avaliaram o desempenho termoenergético de uma construção real pré-fabricada em CLT, designada como Casa Habitech, com dimensões de 20 x 10 m, construída em Blumenau, Santa Catarina. A análise do monitoramento térmico dividiu-se em três etapas: a) realização de medições internas de temperatura e umidade relativa do ar, a partir do uso de instrumentação específica; b) análise do desempenho térmico segundo a NBR 15.575:2013 com base no Procedimento 1A Simplificado e 1B de Simulação, utilizando o programa EnergyPlus e arquivo local próprio de dados climáticos para este fim; c) análise comparativa do desempenho térmico de diferentes sistemas construtivos tradicionais de coberturas, paredes externas e janelas, segundo a NBR 15.575:2013. Após a pesquisa, os autores concluíram que o sistema construtivo utilizado na Casa Habitech é superior aos utilizados tradicionalmente na cidade de Blumenau, apesar de também necessitar de equipamentos de ar-condicionado para garantir o conforto térmico de seus usuários no verão. Ressaltou-se que no inverno a casa por si mesma consegue manter uma temperatura agradável aos seus usuários, fazendo com que a utilização de aquecedores seja muito pequena ou inexistente. Em contrapartida,

os outros sistemas construtivos mais utilizados na cidade, que consistem em alvenarias convencionais ou blocos de concreto nas paredes e lajes pré-moldadas com telha de fibrocimento ou cerâmica nas coberturas, apresentaram déficit de qualidade térmica nas edificações, pois além de necessitarem de equipamentos de ar-condicionado para diminuir a temperatura interna no verão, precisaram de equipamentos para aquecer-la nos períodos de inverno. Sendo assim, os autores enfatizam a superioridade em aspectos de conforto térmico dos sistemas construtivos que utilizam a madeira em sua composição, como é o caso da Casa Habitech e suas variações, assim como do *WoodFrame*, e também destacam a associação do uso de material isolante nas paredes e, principalmente, nas coberturas, a fim de obter desempenho térmico mais satisfatório.

De grande contribuição a esta pesquisa, o estudo de Nunes *et al.* (2020) concentrou-se sobre o desempenho termoenergético de uma tipologia de painéis de CLT, de cerne de eucalipto, para uso em habitações de baixa renda em diferentes climas brasileiros, através do método de simulação do RTQ-R. As simulações foram realizadas no *EnergyPlus* e foram consideradas quatro condições para a análise da habitação, sendo elas: a) individual térrea; b) andar térreo em edifício de vários pavimentos; c) andar intermediário de edifício de vários pavimentos; d) último andar de edifício de vários pavimentos. Além disso, foram escolhidas três cidades com climas distintos, sendo elas: Curitiba (ZB 1 – com temperaturas baixas durante o ano); São Paulo (ZB 3 – com clima moderado); e Belém (ZB 8 – altas temperaturas e precipitações ao longo do ano). A avaliação do nível de eficiência energética resultou de diferentes combinações para a composição das paredes da edificação, variando-se o número de camadas dos painéis de CLT (3 ou 5 camadas), a existência, ou não, de uma camada isolante de lâ de vidro, assim como de sua espessura (3 ou 10 cm), e a absorção solar das paredes e cobertura. Para o piso considerou-se laje de concreto armado com revestimento cerâmico; para a cobertura, telha cerâmica, estrutura de madeira, sótão não ventilado, lâ de vidro com 10 cm de espessura e forro de PVC; e para as esquadrias, alumínio e vidro simples incolor de 3 mm, sem elementos de sombreamento. Além das combinações citadas, para fins de comparação, realizou-se também a simulação para uma configuração de parede

de alvenaria convencional. Os resultados, baseados em 72 simulações paramétricas, comprovaram que painéis de CLT apresentam potencial significativo para melhoria termoenergética em diversos tipos de habitação, sob diversas condições climáticas. Em geral, as combinações mostraram que em Curitiba (ZB 1) é importante associar painéis CLT de cinco camadas com isolamento térmico de 10 cm; em São Paulo (ZB 3), a envoltória deve ser provida de baixa absorção solar e painéis CLT de cinco camadas sem isolamento térmico; e em Belém (ZB 8), além da baixa absorção solar na envoltória, os painéis CLT deveriam ser compostos de apenas três camadas e sem isolamento térmico. Concluiu-se que o sistema construtivo de CLT associado se apresenta como uma tecnologia promissora para obter habitações brasileiras energeticamente mais eficientes, sendo necessários mais estudos de comportamento térmico e mecânico para sua consolidação no país.

Em um último estudo, Buligon (2021) objetivou avaliar o comportamento higrotérmico e energético de diferentes sistemas de vedação vertical externa em madeira do tipo serrada (pinus, eucalipto e cumaru) e painel OSB, para a cidade riograndense de Santa Maria, na ZB 2. A avaliação foi realizada por meio de simulação computacional com os programas *EnergyPlus* e *WUFI Pro*. Foram definidos 9 sistemas de vedação para cada tipo de madeira analisada, que foram avaliados quanto ao comportamento térmico, principalmente a partir do modelo de conforto adaptativo, e quanto ao comportamento higrotérmico, analisando a integração dos fluxos de umidade, teor de umidade total, risco de condensação de vapor e risco de crescimento de fungos filamentosos. Os resultados mostraram que, para todos os tipos de madeira, o sistema composto por dois painéis de madeira e lã mineral como camada intermediária foi apontado como mais vantajoso, sendo o mais simples entre os de maior percentual de horas de conforto anual. Além disso, os sistemas em pinus apresentaram a maior quantidade de painéis com bons índices de conforto, como também os maiores índices em relação aos sistemas em eucalipto e cumaru. Apesar dos sistemas de pinus e cumaru não demonstrarem risco de condensação de vapor, eles apresentaram condições higroscópicas favoráveis ao crescimento de fungos. As taxas calculadas para esse crescimento, porém, foram aceitáveis sendo os sistemas em cumaru os que apresentaram os menores valores e os em eucalipto

os maiores. De modo geral, os sistemas em madeira apresentaram comportamento satisfatório quanto às avaliações de conforto térmico e comportamento higrotérmico, destacando-se assim a aplicabilidade da madeira como painel de vedação vertical externo mesmo em condições climáticas desfavoráveis.

2.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE O REFERENCIAL TEÓRICO

Ao longo dos anos os sistemas construtivos em madeira têm se desenvolvido cada vez mais diante da procura por materiais alternativos que reduzam o impacto ambiental sem comprometer a funcionalidade das edificações. A utilização de tecnologias de pré-fabricação vem sendo potencializada e, neste sentido, destaca-se o uso global das madeiras engenheiradas no setor da construção civil, dando ênfase ao uso do CLT devido à sua alta rigidez estrutural, estabilidade, durabilidade, leveza e maior alcance de placas com grandes dimensões.

Vários estudos já se dedicaram a avaliar o desempenho termoenergético envolvendo sistemas construtivos em madeira e painéis de CLT, conforme demonstrado anteriormente, porém é possível identificar que ainda são poucos os estudos relativos a essa área, visto que existem inúmeras possibilidades para as combinações de elementos construtivos e uma grande diversidade de climas para serem avaliados.

Em virtude do sistema construtivo das madeiras engenheiradas ainda ser relativamente novo no Brasil, os estudos que considerem diversas regiões e que demonstrem o potencial para o uso da madeira nas envoltórias, a fim de construir habitações em madeira com melhores desempenhos termoenergéticos, é fundamental, tendo em vista a lacuna de estudos que associem o CLT tanto nos elementos de vedação vertical, quanto nos elementos horizontais. Além disso, devido à recente atualização da NBR 15.575 (ABNT, 2021), se veem escassos os estudos de desempenho térmico de edificações com sistemas construtivos de madeira que utilizem essa normativa como método de pesquisa.

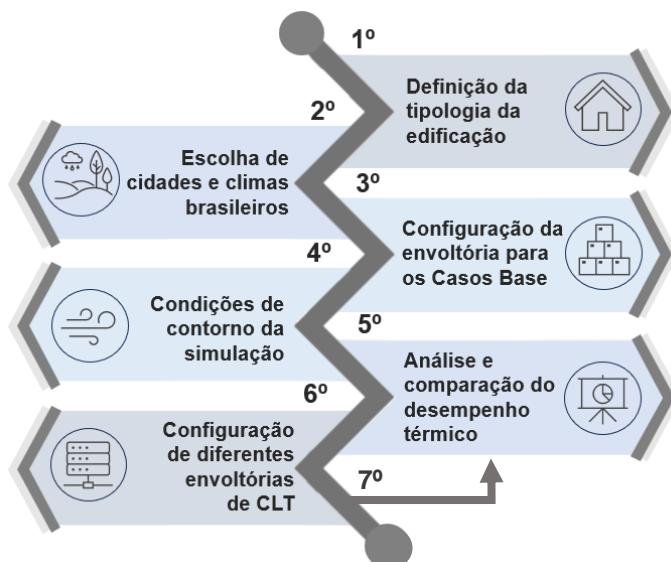
Sendo assim, esse estudo visa analisar o desempenho termoenergético de um sistema construtivo de CLT, de acordo com a NBR 15.575 (ABNT, 2021),

através de simulações computacionais para diferentes climas brasileiros, aplicadas em edificações residenciais térreas, tendo como destaque a aplicação do CLT tanto nas paredes, quanto na laje das construções, associando ou não material isolante aos elementos de vedação.

3 MÉTODO

Neste capítulo, é apresentado o método adotado nesta pesquisa para alcançar o objetivo de analisar o desempenho termoenergético de um sistema construtivo de madeira engenheirada de CLT. A Figura 15 apresenta um diagrama que elenca as etapas do estudo para simplificar o entendimento dos processos elaborados.

Figura 15. Diagrama dos processos da pesquisa.



Fonte: A autora (2023).

Este estudo investiga o desempenho termoenergético do CLT quando aplicado na envoltória de uma tipologia de edificação residencial térrea unifamiliar, baseada no modelo representativo de HIS elencado por Triana, Lambert e Sassi (2015), por meio do método de simulação computacional descrito na Parte 1 da NBR 15.575 (ABNT, 2021). Em particular, a pesquisa é baseada em elementos construtivos de CLT fabricados em madeira de *Pinus taeda*, espécie mais plantada no Brasil atualmente (EMPRABA, 2020) e ser comumente utilizada pelos fabricantes nacionais de CLT.

Os painéis de CLT são associados aos elementos construtivos de paredes e lajes da edificação, podendo ou não ser associados a elementos isolantes térmicos. O estudo engloba cinco cidades brasileiras e diferentes condições climáticas para realizar as simulações de maneira mais abrangente.

Primeiramente, com base no referencial teórico, são definidas as configurações de elementos construtivos para os modelos reais, os quais são nomeados como Casos Base (CB), de CLT e alvenaria convencional (AC). Numa próxima etapa, são caracterizadas as propriedades termofísicas desses materiais e as condições de contorno para a realização das simulações no software *EnergyPlus*. Após serem feitas as simulações, os resultados são analisados e comparados para definir os níveis de desempenho térmico de cada tipologia estipulados pela normativa. Em uma última etapa da pesquisa, a fim de testar diferentes configurações e verificar qual parâmetro influencia mais na variação do nível de desempenho térmico da edificação, são definidas diferentes combinações para a envoltória de CLT e realizadas novas simulações, bem como análises comparativas.

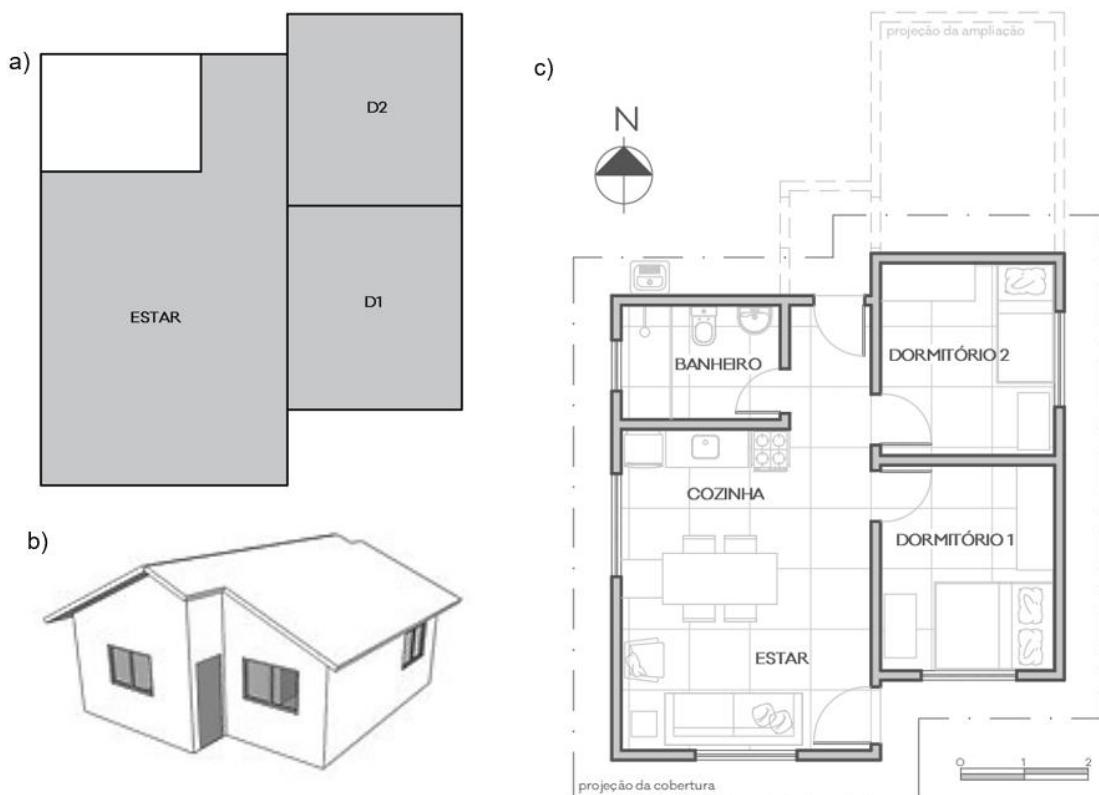
3.1 DEFINIÇÃO DA TIPOLOGIA DA EDIFICAÇÃO

A tipologia utilizada neste trabalho é uma edificação residencial unifamiliar de dois dormitórios, um banheiro e uma sala com cozinha conjugada, conforme o projeto representativo de habitações sociais levantado por Triana, Lamberts e Sassi (2015), para a faixa de renda 1 (até R\$ 1.600,00 de renda familiar).

A orientação solar não foi alterada, permanecendo a mesma do projeto levantado, fazendo com que a fachada principal esteja voltada para o sul, correspondendo aos ambientes da sala e dormitório 1, ambas contendo aberturas. Na Figura 16 podem ser visualizadas a perspectiva da habitação, sua planta baixa e um esquema da planta considerando apenas os APP e na Tabela 6 são apresentadas as áreas úteis de cada ambiente e do total da edificação.

Os parâmetros gerais definidos para o modelo incluem as características geométricas levantadas por Triana, Lamberts e Sassi (2015) e as definições presentes no método de simulação computacional para a avaliação de desempenho térmico de edificações residenciais da NBR 15.575 (ABNT, 2021).

Figura 16. Esquema dos APP(a); perspectiva da edificação(b); planta baixa(c).



Fonte: Adaptado de Triana, Lamberts e Sassi (2015).

Tabela 6. Área útil dos ambientes da edificação.

Ambiente	Área útil (m ²)
Estar (cozinha, sala e circulação)	20,04
Dormitório 1	8,07
Dormitório 2	7,54
Banheiro	4,09
Área útil total UH	39,74

Fonte: Adaptado de Triana, Lamberts e Sassi (2015).

As características da edificação modelada incluem: pé-direito de 2,50 m, beiral com 0,50 m, esquadrias em metal e vidro simples transparente 3 mm, sem venezianas. As portas internas e externas são de madeira com dimensões de 0,80 m de largura e 2,10 m de altura, sendo uma folha de giro. As janelas da sala de estar, cozinha e dormitórios da residência são de duas folhas com deslizamento horizontal e peitoril de 1,10 m. No banheiro, a janela é do tipo pivotante, com eixo horizontal superior, possuindo peitoril de 1,60 m. Outras características das janelas são descritas na Tabela 7.

Tabela 7. Parâmetros estabelecidos para as janelas da edificação.

Ambiente	Área de abertura (m ²)	Orientação	Fator de ventilação	Fator de iluminação
Estar e Cozinha	2,02	Sul	0,45	0,80
	1,62	Oeste	0,45	0,65
Dormitório 1	1,51	Sul	0,45	0,80
Dormitório 2	1,51	Leste	0,45	0,80
Banheiro	0,48	Oeste	0,90	0,65

Fonte: Adaptado de Triana, Lamberts e Sassi (2015).

Esta mesma tipologia de edificação foi utilizada para as simulações computacionais incorporando materiais e técnicas construtivas para o modelo de referência, para o modelo real de alvenaria e para as diferentes combinações do modelo real de madeira engenheirada de CLT, podendo haver associação ou não de materiais isolantes tanto nas paredes, como na cobertura dos modelos.

3.2 ESCOLHA DAS CIDADES E CLIMAS BRASILEIROS

O Brasil é um país com grande diversidade de climas, sendo dividido em oito zonas bioclimáticas, onde ZB 1 é a zona mais fria e ZB 8 é a mais quente (ABNT, 2005). A fim de avaliar o comportamento térmico das edificações de CLT em locais com diferentes condições climáticas, segundo a NBR 15.220 (ABNT, 2005) e abranger os três intervalos de temperaturas externas definidos pela NBR 15.575 (ABNT, 2021), este trabalho analisou as cidades de: Brasília, Curitiba, Recife, Rio de Janeiro e Teresina. Na Tabela 8 são apresentados as cidades, as ZB, os Intervalos, a tipologia climática conforme classificações de Köppen-Geiger, e a média anual da Temperatura de Bulbo Seco (TBS) de cada uma delas.

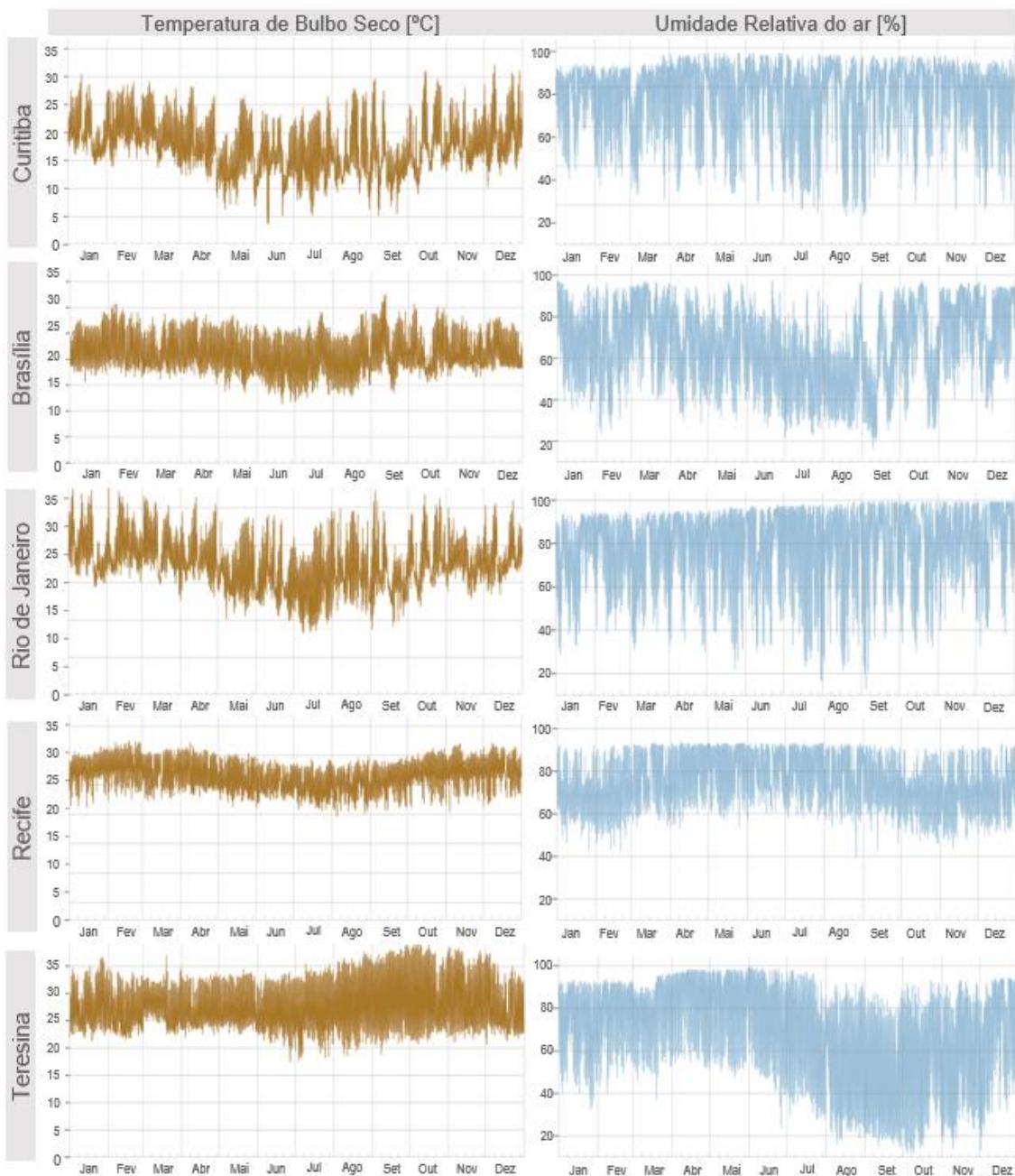
Tabela 8. Cidades e caracterizações climáticas.

Cidade	ZB	Intervalo	Köppen-Geiger	TBS [°C]
Curitiba	ZB 1	Intervalo 1	Cfb – Temperado Oceânico	17,38
Brasília	ZB 4	Intervalo 1	Aw – Tropical de Savana	21,08
Rio de Janeiro	ZB 8	Intervalo 1	Am – Tropical de Monção	23,15
Recife	ZB 8	Intervalo 2	Am - Tropical de Monção	25,75
Teresina	ZB 7	Intervalo 3	Aw - Tropical de Savana	27,69

Fonte: Adaptado de ABNT (2005); ABNT (2021), Sentelhas (2014).

A Figura 17 apresenta graficamente as variações anuais da TBS e Umidade Relativa (UR) do ar de cada clima e cidade. Os valores apresentados foram extraídos dos arquivos climáticos INMET 2018, sugeridos pela Parte 1-1 da NBR 15.575 (ABNT, 2021), os quais foram obtidos a cada hora para cada dia do ano e apresentam.

Figura 17. Variação anual de TBS e UR das cidades selecionadas.



Fonte: A autora (2023).

A cidade de Curitiba localiza-se na ZB 1 e possui clima temperado oceânico, o qual é caracterizado por apresentar as estações bem definidas ao longo do ano. Curitiba apresenta faixas de temperaturas baixas no inverno, podendo atingir 3,8°C, e temperaturas altas no verão, com faixa de 31°C. A média anual da TBS é de 17,38°C e a UR atinge média anual de 80,05%. Por apresentar média anual de TBS abaixo de 25°C, Curitiba enquadra-se no Intervalo 1 de temperaturas externas determinado pela NBR 15.575 (ABNT, 2021).

Brasília apresenta clima do tipo tropical de savana, caracterizado por possuir o inverno seco, e se enquadra na ZB 4. As temperaturas mais baixas atingem 11,2°C no mês de junho, e as temperaturas mais altas apresentam faixa de 32,5°C. A média anual da TBS é de 21,08°C, com UR anual média de 63,5%, também se encaixando no Intervalo 1.

As cidades do Rio de Janeiro e Recife são caracterizadas pelo clima de monção tropical, com alto índice de chuvas durante o verão, e estão dentro da ZB 8. O Rio de Janeiro pode atingir temperaturas na faixa de 11,5°C durante o inverno, enquanto Recife registra 18,6°C. Para o verão, as temperaturas atingem extremos de quase 37°C e 32°C, respectivamente. Apesar de apresentarem classificações gerais comuns para o clima, o enquadramento nos intervalos de temperatura externa da NBR 15.575 (ABNT, 2021) difere. Por apresentar TBS média anual de 23,15°C, a cidade do Rio de Janeiro se mantém no Intervalo 1, já a cidade de Recife, por apresentar média anual de TBS igual a 25,75°C se enquadra no Intervalo 2. As UR médias anuais correspondem a 78,8% e 77,6%, respectivamente.

Por fim, Teresina apresenta clima do tipo tropical de savana, estando inserida na ZB 7. As temperaturas mínimas e máximas variam anualmente entre 17,5°C e 39,8°C, respectivamente, sendo que a média anual da TBS é estabelecida em 27,69°C e a UR é de 64,5%. Por apresentar a média de TBS anual superior a 27°C, seu clima se enquadra no Intervalo 3 da NBR 15.575 (ABNT, 2021).

3.3 CONFIGURAÇÃO DAS ENVOLTÓRIAS E PARÂMETROS TERMOFÍSICOS DOS MATERIAIS

As configurações das envoltórias das edificações a serem simuladas, assim como a definição dos parâmetros termofísicos de cada material, foram definidos para três modelos iniciais que foram simulados para a obtenção e comparação do desempenho térmico das habitações: o modelo de referência e dois casos base para o modelo real, um incorporando o sistema construtivo de CLT (CB) e outro a alvenaria convencional (AC). Todos eles apresentam as mesmas características de volume interno, áreas de superfícies expostas ao exterior, norte geográfico, área de piso total dos ambientes e a mesma condição de contato com o solo. Apresentam, ainda, a mesma divisão interna de ambientes e o ático entre a laje e a cobertura, sendo este modelado como um ambiente, conforme orientações da NBR 15.575 (ABNT, 2021). Para a determinação das propriedades térmicas dos materiais construtivos foram consultadas as normativas NBR 15.220 (ABNT, 2005), NBR 15.575 (ABNT, 2021) e catálogos de fornecedores. A seguir são apresentados com mais detalhes cada um dos modelos e suas configurações.

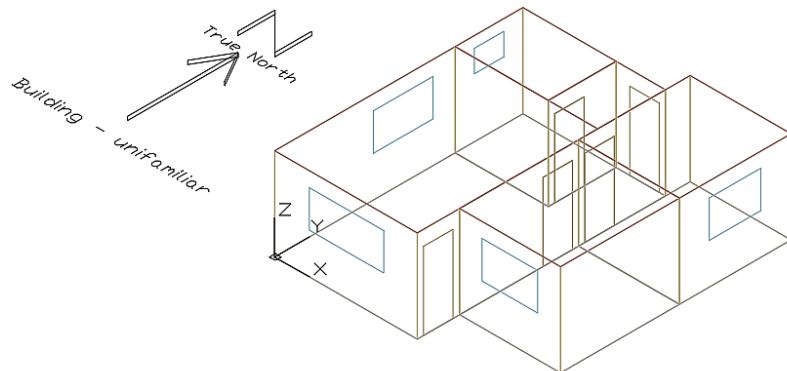
3.3.1 Modelo de referência

O modelo de referência representa a edificação com características de referência. De acordo com a NBR 15.575 (ABNT, 2021), este modelo mantém a volumetria do modelo real, alterando os percentuais de elementos transparentes e de aberturas para ventilação, bem como as propriedades térmicas dos sistemas construtivos. Nesse modelo também não são considerados elementos de sombreamento da edificação, como o beiral.

Para as simulações realizadas neste estudo, utilizou-se o arquivo exemplo compactado de simulação disponibilizado pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE) da UFSC, o qual apresenta a configuração e modelagem de uma edificação de referência com as mesmas características geométricas da edificação residencial unifamiliar levantada no estudo de Triana, Lamberts e Sassi (2015), a qual pode ser verificada na Figura 18. Os elementos

construtivos e os valores para suas propriedades termofísicas inseridos nas simulações são descritos no Quadro 2.

Figura 18. Geometria do modelo de referência.



Fonte: Adaptado de LabEEE (c2023).

Quadro 2. Parâmetros termofísicos dos elementos construtivos para o modelo de referência.

Elemento Construtivo	Espessura [m]	Condutividade térmica [W/m.K]	Densidade [kg/m ³]	Calor específico [J/kg.K]	Absortância Solar
Paredes Externas	0,10	1,75	2200	1000	0,58
Paredes Internas	0,10	1,75	2200	1000	0,50
Telha cerâmica	0,006	1,05	2000	920	0,65
Madeira para portas	0,03	0,15	600	1340	0,50
Lajes	0,10	1,75	2200	1000	0,50

Fonte: Adaptado de ABNT (2021) e LabEEE (c2023).

Além desses elementos, conforme sugere a NBR 15.575 (ABNT, 2021), foi adotada uma câmara de ar entre a laje e a cobertura com resistência térmica de 0,21 (m².K)/W e, exclusivamente para as cidades de Recife e Rio de Janeiro, por estarem localizadas na ZB 8, considerou-se o uso de isolamento sobre a laje, com resistência térmica igual a 0,67 (m².K)/W e absorção solar de 0,70. A emissividade térmica de todos os materiais opacos foi considerada como 0,90 e dos elementos transparentes como 0,84.

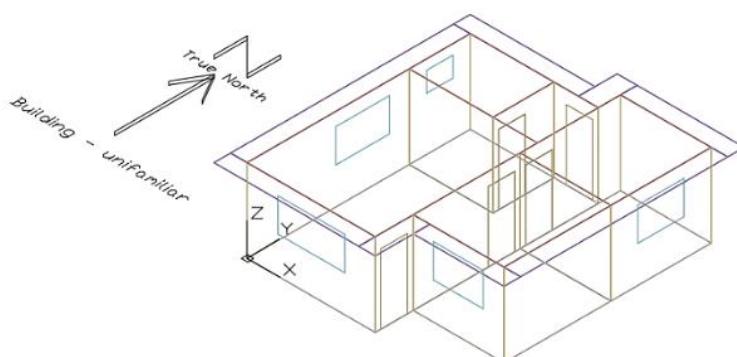
Cabe destacar que para a ventilação natural das aberturas (portas e janelas), seguindo a NBR 15.575 (ABNT, 2021), as portas permaneceram sempre fechadas. A janela do banheiro manteve-se sempre aberta, ou seja, com

ventilação constante, e as demais janelas dos APP tiveram seus critérios de ventilação definidos conforme as variações no padrão de uso. Vale ressaltar ainda que, mesmo com as janelas e portas fechadas, ocorre a infiltração por frestas, que foi simulada de acordo com os padrões definidos na normativa.

3.3.2 Modelos reais

Para o modelo real, as dimensões dos ambientes da edificação mantiveram-se as mesmas, assim como as áreas de aberturas para portas e janelas. Neste modelo, porém, adicionou-se o beiral de 0,50 m, conforme pode ser observado na Figura 19, e alterou-se a composição dos materiais das paredes e laje da cobertura, a fim de analisar os sistemas construtivos desejados. Inicialmente, foram desenvolvidos dois casos base para serem simulados como modelos reais: um em CLT e outro em alvenaria, a fim de comparar os desempenhos térmicos das envoltórias, visto que a alvenaria convencional, como mencionado anteriormente, é o sistema construtivo mais utilizado no Brasil atualmente.

Figura 19. Geometria para os modelos reais.



Fonte: A autora (2023).

Da mesma maneira considerada no modelo de referência, adotou-se uma câmara de ar entre a laje e a cobertura, com resistência térmica de 0,21 ($m^2.K/W$), exclusivamente para as cidades de Recife e Rio de Janeiro, por estarem localizadas na ZB 8, considerou-se o uso de isolamento sobre a laje, com resistência térmica igual a 0,67 ($m^2.K/W$) e absorção solar de 0,70, o qual foi considerado como material de lá de rocha de 30 mm de espessura.

3.3.2.1 Caso base de CLT

As configurações adotadas para as paredes deste modelo real foram baseadas nas principais composições utilizadas nas construções brasileiras já realizadas com CLT, as quais foram levantadas por Oliveira (2018) em seu estudo sobre esse sistema construtivo, e por propostas associadas a catálogos de orientações construtivas para o sistema de CLT (URBEM, 2022; CROSSLAM, 2020).

Por se tratar de um modelo de HIS, e pensando-se numa possibilidade real de adoção do sistema construtivo e custos para esta tipologia de edificação, optou-se por associar inicialmente a configuração mais esbelta de painel, dentre as opções citadas como as mais utilizadas nacionalmente por Oliveira (2018). Sendo assim, para os fechamentos verticais, o painel escolhido foi o de espessura total de 80 mm, composto por três camadas, sendo duas camadas externas de 20 mm e uma interna de 40 mm. Para a configuração da laje superior, optou-se pelo painel de 120 mm de espessura, composto de três camadas de CLT de 40 mm cada uma.

Conforme já mencionado, a matéria prima considerada para a configuração dos painéis foi o *Pinus taeda*, seguindo as especificações técnicas e propriedades termofísicas fornecidas pela fabricante brasileira Crosslam (2020). Sendo assim, atribuiu-se condutividade térmica de 0,13 W/m.K, densidade de 550 kg/m³ e calor específico de 2100 J/kg.K.

Essa madeira é seca em estufa com 12% \pm 2% de umidade e o seu tratamento preservativo é realizado em autoclave com CCB. O adesivo estrutural é feito à base de poliuretano monocomponente, livre de formaldeídos, com teor de sólidos de 100%, certificado para uso estrutural e à prova d'água (CROSSLAM, 2020).

A configuração da fachada exterior envolve a criação de um sistema de fachada ventilada, a fim de proteger o CLT das intempéries. Devido ao desejo de maior associação com a sustentabilidade, optou-se pelo uso do sistema de fachada ventilada com montantes e revestimento externo de madeira. Além disso, associa-se também uma membrana hidrófuga anterior ao painel de CLT para proteger as superfícies da madeira, funcionando esta como uma barreira

contra água e prevenindo o surgimento de fungos como o mofo e o bolor nos elementos.

As paredes internas das áreas secas da edificação consistem em manter o painel CLT em seu aspecto natural, mantendo o acabamento apenas com a camada impermeabilizante, sem a aplicação de revestimentos. Já as paredes internas das áreas molhadas (cozinha e banheiro) apresentam acabamentos com revestimento cerâmico, envolvendo o uso de sistema *drywall* para a sua aplicação, com a finalidade de proteger a madeira e facilitar a passagem das tubulações hidráulicas. A membrana hidrófuga é associada junto ao CLT nesses casos, também com a finalidade de proteger os painéis da umidade e possíveis contatos com vazamentos hidráulicos.

Para o piso da edificação, com o intuito de simular o mesmo tipo de contato com o solo para todos os casos (e devido a evitar-se o contato direto do CLT com a umidade do solo), optou-se por manter a laje de concreto, porém associando-a agora com a aplicação de revestimento cerâmico, conforme a configuração presente no levantamento do modelo representativo de Triana, Lamberts e Sassi (2015).

As classificações e configurações dos elementos construtivos descritos, assim como os valores dos parâmetros termofísicos inseridos para as simulações deste modelo real podem ser verificados na Figura 20, Figura 21 e no Quadro 3, respectivamente.

Figura 20. Classificação das tipologias de paredes para o modelo de CLT.

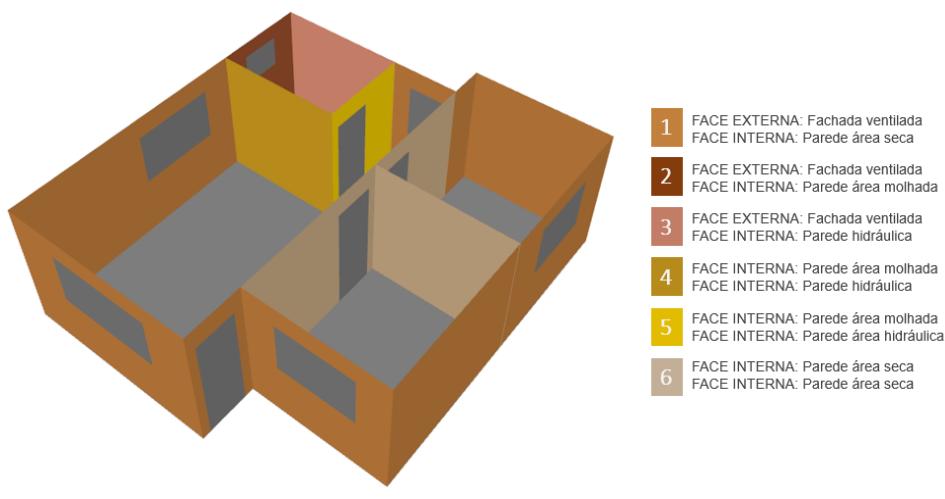
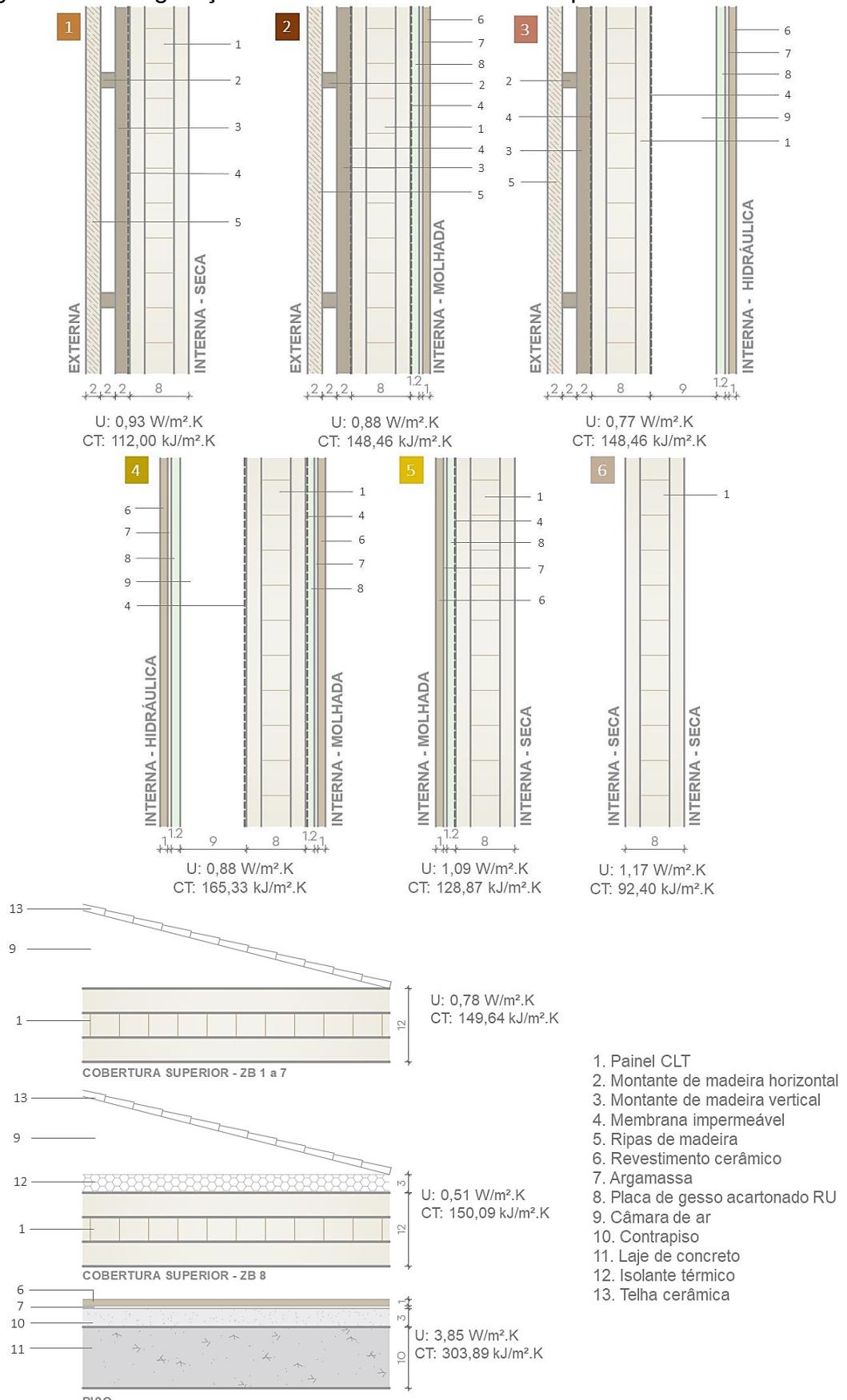


Figura 21. Configuração dos elementos construtivos para o modelo de CLT.



Fonte: A autora (2023).

Quadro 3. Parâmetros termofísicos dos materiais para o modelo de CLT.

Material	Espessura [m]	Condutividade térmica [W/m.K]	Densidade [kg/m ³]	Calor específico [J/kg.K]	Absortância Solar
Argamassa de assentamento	0,005	1,15	1950	1000	0,60
CLT 3 camadas (paredes)	0,08	0,13	550	2100	0,50
CLT 3 camadas (laje)	0,12	0,13	550	2100	0,50
Chapa de gesso acartonado	0,012	0,35	750	840	0,50
Concreto (piso)	0,10	1,75	2200	1000	0,58
Contrapiso (argamassa)	0,03	1,15	1950	1000	0,60
Lã de rocha	0,003	0,045	20	750	0,30
Madeira para portas	0,03	0,15	600	1340	0,50
Madeira para revestimento externo	0,02	0,15	600	1340	0,50
Membrana impermeável de polietileno	0,002	0,16	950	1850	0,70
Revestimento cerâmico	0,01	1,00	1700	920	0,30
Telha cerâmica	0,006	1,05	2000	920	0,65

Fonte: Adaptado de Crosslam (s.d.); ABNT (2005).

Cabe ressaltar que a capacidade térmica (CT) dos materiais construtivos foi calculada multiplicando os parâmetros de espessura, densidade, calor específico e, na sequência, para saber a capacidade térmica total dos elementos de paredes e coberturas os valores dos materiais foram somados. As CT das camadas de ar, por apresentarem baixa densidade e baixo calor específico, foram consideradas nulas.

Com fins de simplificação para a construção das paredes externas, a camada dos montantes de madeira da fachada foi simulada como uma câmara de ar com fluxo de ar na direção horizontal, correspondendo a uma resistência térmica de 0,16 (m².K)/W, conforme indicado na NBR 15.220 (ABNT, 2005). Dessa mesma maneira, a camada que corresponde aos perfis metálicos do sistema *drywall* foi simulada como uma câmara de ar vertical, com resistência térmica igual a 0,17 (m².K)/W, também segundo a NBR 15.220 (ABNT, 2005).

3.3.2.2 Caso base de alvenaria

As configurações para os elementos construtivos adotadas para o modelo real de alvenaria baseiam-se no modelo representativo descrito por Triana, Lamberts e Sassi (2015), porém com algumas variações para que se realizassem as simulações de maneira similar entre todos os casos.

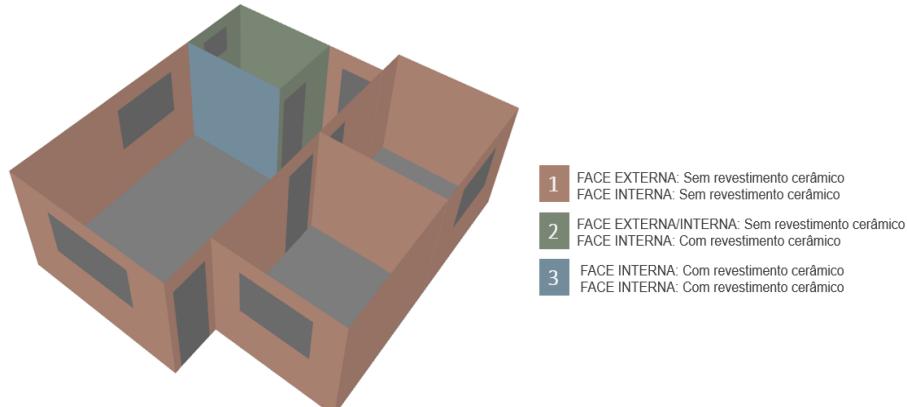
Todas as paredes desta tipologia de edificação são compostas por blocos de tijolos cerâmicos furados de 9 x 14 x 19 cm (largura, altura, comprimento), com camada de reboco tanto interna, quanto externamente. Nas áreas molhadas, como banheiro e cozinha, é associado revestimento cerâmico em todas as paredes.

Diferindo do modelo de Triana, Lamberts e Sassi (2015) e a fim de simular parâmetros semelhantes quanto aos elementos construtivos, este modelo associou, igualmente ao modelo de referência, uma laje superior de concreto. Para o acabamento inferior dessa laje, considerou-se a associação de uma camada de reboco. Igualmente ao que já foi mencionado anteriormente, para os casos exclusivos das cidades inseridas na ZB 8, foi associado uma camada de material isolante, considerada como lã de rocha com espessura de 30mm.

Com a finalidade de simular o mesmo tipo de contato com o solo, para o piso desta edificação, igualmente que no modelo anterior, optou-se por associar uma laje de concreto com a aplicação de revestimento cerâmico sobre ela.

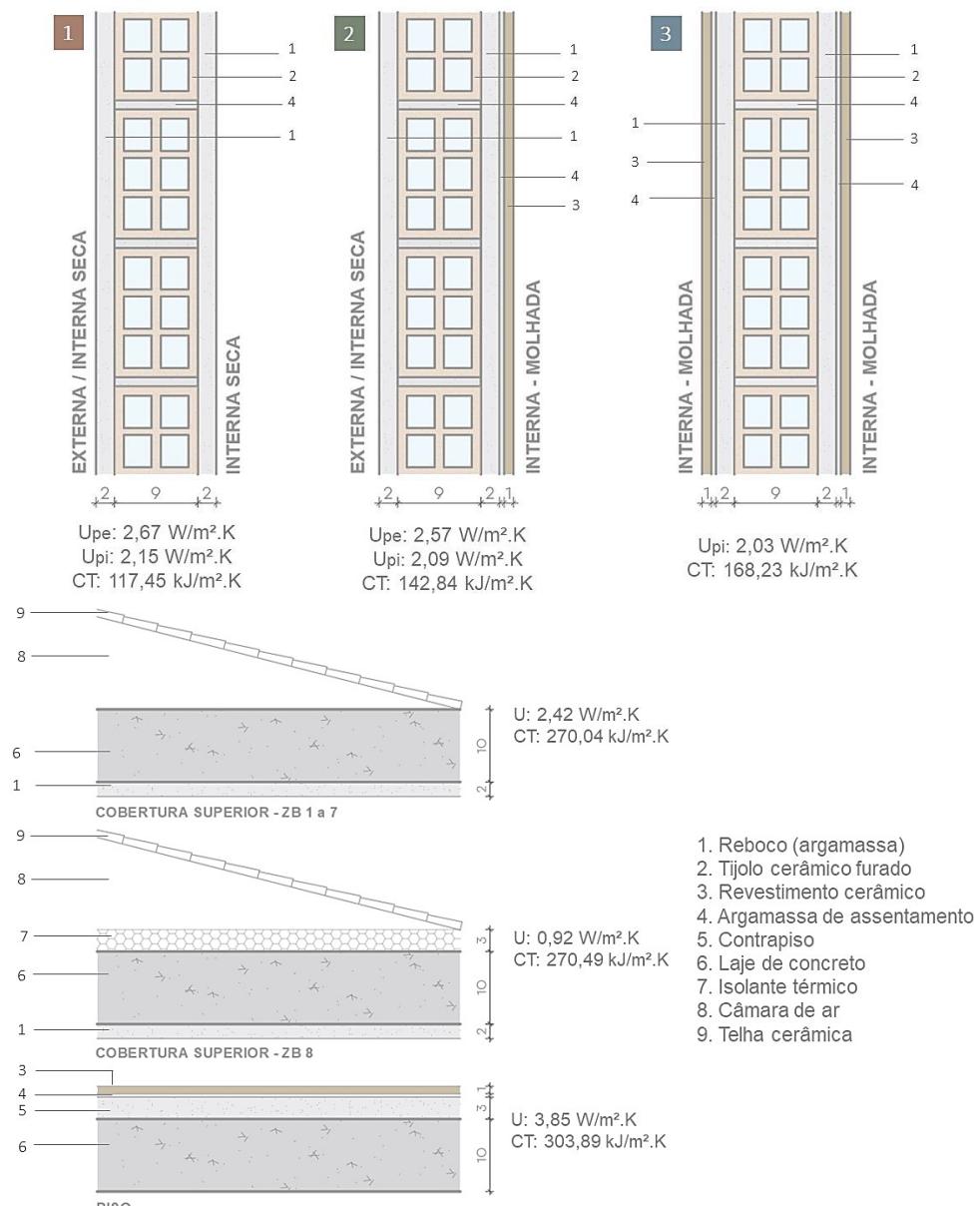
As classificações e configurações dos elementos construtivos descritos, assim como os valores dos parâmetros termofísicos inseridos para as simulações deste modelo real podem ser verificados na Figura 22 e Figura 23, respectivamente. As siglas Upe e Upi significam, respectivamente, a transmitância térmica para as tipologias das paredes externas e internas.

Figura 22. Classificação das tipologias de paredes para modelo de alvenaria.



Fonte: A autora (2023).

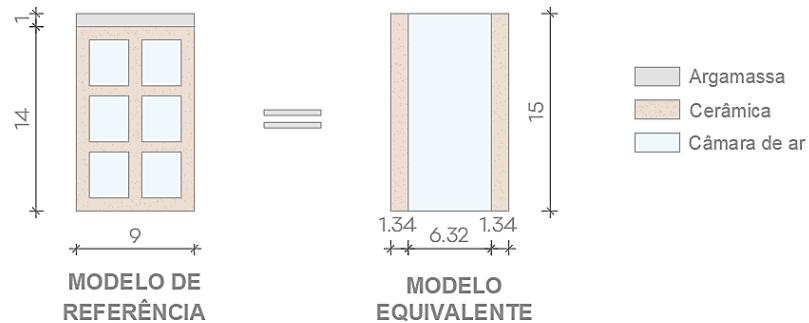
Figura 23. Configuração dos elementos construtivos para modelo de alvenaria.



Fonte: A autora (2023).

Cabe ressaltar que, para simplificar a configuração do tijolo furado no programa de simulação, optou-se por utilizar uma equivalência das espessuras das camadas de cerâmica e de ar do material, sem alterar os parâmetros térmicos. O modelo equivalente (Figura 24) corresponde ao tijolo com face de 9 x 14 cm, sem revestimento, apresentado no estudo de Weber *et al.* (2017, p. 43).

Figura 24. Modelo equivalente para a simulação do tijolo cerâmico furado.



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

Para a câmara de ar de 6,32 cm de espessura, com direção de fluxo horizontal, foi atribuída uma resistência térmica de 0,17 ($\text{m}^2.\text{K}/\text{W}$), conforme indicado na NBR 15.220 (ABNT, 2005). O Quadro 4 a seguir apresenta os demais parâmetros termofísicos associados aos elementos construtivos para o modelo de alvenaria.

Quadro 4. Parâmetros termofísicos dos materiais para o modelo de alvenaria.

Material	Espessura [m]	Conduvidade térmica [W/m.K]	Densidade [kg/m ³]	Calor específico [J/kg.K]	Absortância Solar
Argamassa de assentamento	0,005	1,15	1950	1000	0,60
Concreto (lajes)	0,10	1,75	2200	1000	0,58
Contrapiso (argamassa)	0,03	1,15	1950	1000	0,60
Lã de rocha	0,03	0,045	20	750	0,30
Telha cerâmica	0,006	1,05	2000	920	0,65
Madeira para portas	0,03	0,15	600	1340	0,50
Reboco (argamassa)	0,02	1,15	1950	1000	0,60
Revestimento cerâmico	0,01	1,00	1700	920	0,30
Tijolo cerâmico	0,0134	0,90	1600	920	0,70

Fonte: Adaptado de ABNT (2005); Weber *et al.* (2017).

Cabe citar ainda emissividade térmica de todos os materiais opacos foi considerada como 0,90 e dos elementos transparentes como 0,84.

3.4 CONDIÇÕES DE CONTORNO DA SIMULAÇÃO

De acordo com a Parte 1 da NBR 15.575 (ABNT, 2021), o programa de simulação computacional deve ser capaz de estimar as variações da temperatura operativa, das cargas térmicas de refrigeração e de aquecimento e do uso da ventilação natural na UH, definidos separadamente em 8.760 horas ao longo do ano, considerando as variações horárias de ocupação, de potência de iluminação e de equipamentos. Para atender essas premissas, o programa escolhido para desenvolver as simulações dessa pesquisa foi o *EnergyPlus*, na sua mais recente versão 23.1.0.

O *EnergyPlus* é um programa computacional de simulação energética de edificações, que permite modelar o consumo de energia para aquecimento, resfriamento, ventilação e iluminação da edificação (DOE, 2018). Com base nos princípios fundamentais de equilíbrio térmico, envolvendo os processos de condução, convecção e de radiação os quais ocorrem nas superfícies internas e externas, o *EnergyPlus* conduz um processo integrado e simultâneo das condições das zonas térmicas. Além disso, permite que o usuário detalhe as características da geometria da edificação, dos elementos de construção, e dos componentes dos sistemas existentes; e determine os padrões de uso de cada zona térmica e sistema (WEBER *et al.*, 2017).

A modelagem da edificação foi desenvolvida no próprio *EnergyPlus* e os arquivos climáticos utilizados possuem extensão do tipo EPW (*EnergyPlus Weather Data*) e foram obtidos no diretório sugerido na Parte 1-1 da NBR 15.575 (ABNT, 2021).

3.4.1 Algoritmos de convecção

Por ser de fundamental importância a modelagem criteriosa dos fenômenos de transferência de calor, optou-se por atribuir o algoritmo convectivo DOE-2 para o exterior da edificação e o TARP para o seu interior. Ambos os

algoritmos são utilizados como padrão pelo *EnergyPlus* e foram designados a partir dos objetos “*SurfaceConvectionAlgorithm:Outside*” e “*SurfaceConvectionAlgorithm:Inside*”, respectivamente.

Os valores desses coeficientes são calculados automaticamente pelo *EnergyPlus*, com base em equações desenvolvidas por outros autores. No caso do modelo DOE-2, para as superfícies caracterizadas como mais suaves, o algoritmo é definido conforme a Equação 1.

$$h_{c,glass} = \sqrt{h_n^2 + [aV_z^b]^2} \quad (1)$$

onde a é uma constante, em $W/(m^2.K(m/s))$ ^b, encontrada na tabela 3.9 do DOE (2022); b é uma constante, adimensional; h_n é o coeficiente de transferência de calor convectivo natural, em $W/(m^2.K)$, e é calculado utilizando outras equações presentes em DOE (2022, p. 99); $h_{c,glass}$ é o coeficiente de transferência de calor convectivo para superfícies macias (vidro), em $W/(m^2.K)$ e V_z é a velocidade do vento local, em m/s.

Já nas superfícies mais rugosas o algoritmo é definido pela Equação 2.

$$h_c = h_n + R_f(h_{c,glass} - h_n) \quad (2)$$

onde R_f é multiplicador de rugosidade da superfície, adimensional e encontrado na tabela 3.7 do DOE (2022).

O algoritmo interno TARP é adotado para convecção natural. Ele correlaciona o coeficiente de transferência de calor por convecção com a orientação da superfície e da diferença entre as temperaturas do ar da superfície e da zona, conforme equações estabelecidas por Walton (1983). Para paredes verticais, tem-se a correlação de:

$$h = 1,31|\Delta T|^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

Enquanto para paredes horizontais ou inclinadas, tem-se duas situações. Primeiro, quando há retardamento do fluxo de ar em relação à parede:

$$h = \frac{1,810 |\Delta T|^{\frac{1}{3}}}{1,382 + |\cos \theta|} \quad (4)$$

E, segundo, quando o movimento do fluxo de ar é intensificado:

$$h = \frac{9,482 |\Delta T|^{\frac{1}{3}}}{7,238 - |\cos \theta|} \quad (5)$$

onde ΔT = Temperatura da superfície - Temperatura do ar; e θ é o ângulo de inclinação da superfície.

3.4.2 Padrões de uso e ocupação

O calor gerado nos ambientes devido aos equipamentos, à presença de pessoas e ao sistema de iluminação foi considerado constante, e esses parâmetros foram estabelecidos conforme os valores indicados na NBR 15.575 (ABNT, 2021), para a avaliação do desempenho térmico de residências. A Tabela 9, Tabela 10, Tabela 11 e Tabela 12 apresentam os valores que foram utilizados. O valor total (100 %) de ocupantes da sala é determinado em função do número de dormitórios. Sob recomendações da NBR 15.575 (ABNT, 2021), para cada dormitório foi considerado dois ocupantes na sala, totalizando quatro ocupantes na residência.

Tabela 9. Padrão de ocupação diário pelas pessoas.

Ambiente	Horário	Porcentagem de ocupação [%]
Sala	14:00-17:59	50
	18:00- 21:59	100
Dormitórios	22:00-7:59	100

Fonte: Adaptado de ABNT (2021).

Tabela 10. Período de uso e potência dos equipamentos.

Ambiente	Período de uso	Potência [W]
Sala	14:00-21:59	120

Fonte: Adaptado de ABNT (2021).

Tabela 11. Sistema de iluminação.

Ambiente	DPI- Densidade de Potência Instalada [W/m ²]
Sala	5,0
Dormitórios	5,0

Fonte: Adaptado de ABNT (2021).

Tabela 12. Taxa metabólica para os usuários.

Ambiente	Período de uso	Atividade realizada	Calor produzido [W/m ²]	Calor produzido para área de pele = 1,80m ² [W]
Sala	14:00-21:59	Sentado ou assistindo TV	60	108
Dormitório	00:00-07:59 22:00-23:59	Dormindo ou descansando	45	80

Fonte: Adaptado de ABNT (2021).

3.4.3 Contato com o solo

Por ser uma edificação térrea, o contato com o solo foi modelado e considerado o mesmo para o modelo de referência e modelos reais. Optou-se por utilizar a forma de modelagem do *Ground Domain:Slab*, em que as temperaturas do solo são calculadas de maneira iterativa, através do método do *Finite Difference*, conforme exemplo do manual de uso do objeto *Ground Domain* desenvolvido pelo LabEEE da UFSC (ELI *et al.*, 2019).

As principais propriedades térmicas inseridas para o solo foram consideradas constantes. Os valores inseridos foram condutividade térmica de 1 W/m.K; densidade de 1.250 kg/m³; e calor específico de 1.200 J/kg.K.

3.4.4 Modelagem com e sem o uso da ventilação natural

Seguindo as recomendações da NBR 15.575 (ABNT, 2021), os modelos reais e o modelo de referência foram simulados sob duas condições de utilização dos APP: uma com o uso da ventilação natural (VN), para a determinação do PHFT_{UH} e das temperaturas operativas anuais máxima (Tomáx_{UH}) e mínima ($\text{Tomínu}_{\text{UH}}$), necessários para as avaliações de todos os níveis de desempenho térmico; e outra sem o uso da ventilação natural, para o cálculo das cargas

térmicas anuais de refrigeração ($CgTR_{UH}$) e de aquecimento ($CgTA_{UH}$), necessárias para as avaliações dos níveis de desempenho térmico intermediário e superior (ABNT, 2021).

Para o modelo VN, foi permitida a abertura das janelas apenas quando o APP estiver ocupado, e de acordo com dois critérios de temperatura: quando a temperatura de bulbo seco interno for igual ou superior a 19 °C e quando a temperatura de bulbo seco interno for superior à temperatura de bulbo seco externa. As portas internas serão consideradas abertas e as portas externas fechadas, com possibilidade de infiltração por frestas.

Os modelos simulados sem uso da ventilação natural mantiveram todas as portas e janelas fechadas durante todo o ano e foram utilizados os mesmos coeficientes de infiltração do modelo VN.

3.5 ANÁLISE E COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A análise dos resultados e determinação do nível de desempenho térmico das edificações utilizou os indicadores presentes na NBR 15.575 (ABNT, 2021), apresentados anteriormente no 2.2.1, sendo eles: temperaturas operativas máxima e mínima entre uma faixa estabelecida pela norma (Tomáx e Tomín), percentual de fração de horas ocupadas dentro dessas mesmas faixas de temperaturas operativas (PHFT), e carga térmica anual de refrigeração e de aquecimento ($CgTR$ e $CgTA$), que somadas equivalem a $CgTT$ da UH.

Para a avaliação do primeiro indicador, inicialmente foi necessário verificar a TBS média anual de cada cidade e enquadrá-la em um dos três intervalos estabelecidos pela normativa, conforme apresentado anteriormente na Tabela 1, sendo eles: Intervalo 1 ($TBS < 25^{\circ}C$), Intervalo 2 ($25^{\circ}C \leq TBS < 27^{\circ}C$) ou Intervalo 3 ($TBS \geq 27^{\circ}C$). Posteriormente, para atendimento a todos os níveis de desempenho, em todas as zonas bioclimáticas, precisou-se analisar se a Tomáx do modelo real era menor ou igual à obtida para o modelo de referência, após somado um valor de tolerância ($\Delta Tomáx$) de 2 °C para o caso das UH unifamiliares. Já a Tomín, a qual foi analisada apenas nas ZB de 1 a 4, deveria

ser maior ou igual à do modelo de referência, após reduzido um valor de tolerância ($\Delta T_{\text{Tomín}}$) de 1 °C para todas as UH.

A obtenção do PHFT envolveu inicialmente a avaliação individual de cada APP da UH, durante o seu respectivo período de ocupação, de acordo com as faixas de temperaturas operativas (T_{OAPP}) para cada intervalo, apresentadas anteriormente na Tabela 2. Na sequência, o PHFT de cada APP foi obtido a partir da Equação 6, a qual consta na NBR 15.575 (ABNT, 2021):

$$PHFT_{\text{APP}} = \frac{Nh_{\text{FT}}}{Nh_{\text{Ocup}}} \cdot 100 \quad (6)$$

onde $PHFT_{\text{APP}}$ é o percentual de horas de ocupação do APP dentro da faixa de temperatura operativa, expresso em porcentagem (%); Nh_{FT} é o número de horas em que o APP se encontrou ocupado e com temperaturas operativas dentro da faixa de temperatura operativa, estabelecida na Tabela 2, ao longo do ano; e Nh_{Ocup} é o número de horas em que o APP foi ocupado ao longo do ano, equivalente a 2.920 h para salas e 3.650 h para dormitórios.

Posteriormente, para obter-se o PHFT total da UH real e da de referência, foram somados os $PHFT_{\text{APP}}$ de cada uma delas e o valor total foi dividido pelo número total de APP de cada UH correspondente. Para o atendimento ao critério de $PHFT_{\text{UH}}$ no nível mínimo, o modelo real precisou apresentar, ao longo de um ano e durante os períodos de ocupação dos APP, um $PHFT_{\text{UH,real}}$ que fosse superior a 90% do obtido para o modelo de referência ($PHFT_{\text{UH,ref}}$). Para os níveis intermediário e superior, foi realizada a avaliação por meio do valor de um incremento do $PHFT_{\text{UH,real}}$ ($\Delta PHFT$) em relação ao $PHFT_{\text{UH,ref}}$, conforme valores específicos apresentados nos Anexos A e B, extraídos na NBR 15.575 (ABNT, 2021). Os $\Delta PHFT$ foram obtidos por meio da Equação 7:

$$\Delta PHFT = PHFT_{\text{UH,real}} - PHFT_{\text{UH,ref}} \quad (7)$$

Para o último indicador, considerou-se inicialmente a avaliação da carga térmica total da UH ($CgTT_{\text{UH}}$) no modelo de simulação sem o uso da VN, nos períodos em que os APP do modelo com o uso de VN estiveram ocupados e

com temperaturas operativas dentro dos limites determinados pelos intervalos da normativa. Para os modelos localizados em cidades do Intervalo 1 e nas ZB 1, 2, 3 e 4, considerou-se a $CgTT_{UH}$ como o somatório da $CgTR_{UH}$ e da $CgTA_{UH}$. Já para os modelos das cidades dos Intervalos 2 e 3 e demais zonas bioclimáticas, a $CgTT_{UH}$ correspondeu ao mesmo valor da $CgTR_{UH}$.

Na sequência foi verificado o valor da redução da carga térmica total ($RedCgTT$) do modelo real ($RedCgTT_{UH,real}$) em relação à referência ($RedCgTT_{UH,ref}$), conforme Equação 8, a qual deveria ser maior ou igual a uma redução mínima ($RedCgTT_{mín}$) estabelecida e calculada por meio dos quadros apresentados nos Anexos A e B, extraídos da NBR 15.575 (ABNT, 2021).

$$RedCgTT = \left[1 - \frac{(CgTT_{UH,real})}{(CgTT_{UH,ref})} \right] \cdot 100 \quad (8)$$

onde $RedCgTT$ é a redução da carga térmica total da UH no modelo real em relação ao modelo de referência, expressa em porcentagem (%); $CgTT_{UH,real}$ é a carga térmica total da UH no modelo real, expressa em quilowatts-hora por ano (kWh/ano); e $CgTT_{UH,ref}$ é a carga térmica total da UH no modelo de referência, expressa em quilowatts-hora por ano (kWh/ano).

O Quadro 5 sintetiza os parâmetros de avaliação e os valores da $RedCgTT$ mínima calculados para efetuar a comparação do desempenho térmico dos modelos reais com as referências para os níveis intermediário e superior.

Quadro 5. Parâmetros avaliativos para os níveis intermediário e superior.

Critério de avaliação		Tipologia de habitação unifamiliar	
		Nível intermediário	Nível Superior
$PHFT_{UH,ref}$ [%]	$CgTT_{UH,ref} / A_{p,UH}$ [kWh/(ano.m ²)]	$\Delta PHFT_{mín}$ [%]	
$PHFT_{UH,ref} < 70\%$	Todos os valores	$\Delta PHFT_{mín} = 45 - 0.58 \cdot PHFT_{UH,ref}$	
$PHFT_{UH,ref} \geq 70\%$	Todos os valores	0	
$PHFT_{UH,ref}$ [%]	$CgTT_{UH,ref} / A_{p,UH}$ [kWh/(ano.m ²)]	$RedCgTT_{mín}$ [%]	
$PHFT_{UH,ref} < 70\%$	Todos os valores	0	-
$PHFT_{UH,ref} \geq 70\%$	$CgTT_{UH,ref} / A_{p,UH} < 100$	17	-
	$CgTT_{UH,ref} / A_{p,UH} \geq 100$	27	-
Todos os valores	$CgTT_{UH,ref} / A_{p,UH} < 100$	-	35
	$CgTT_{UH,ref} / A_{p,UH} \geq 100$	-	55

Fonte: Adaptado de ABNT (2021).

Por fim, para obter resultados complementares sobre o desempenho térmico das edificações, foram analisados os parâmetros informativos do procedimento de simulação computacional, sendo eles o percentual de horas de ocupação com temperaturas superiores à faixa de temperatura operativa (PHsFT) e o percentual de horas de ocupação com temperaturas inferiores à faixa de temperatura operativa (PHiFT).

O PHsFT_{APP} foi determinado conforme demonstra a Equação 9:

$$PHsFT_{APP} = \frac{Nh_{sFT}}{Nh_{Ocup}} \cdot 100 \quad (9)$$

onde PHsFT_{APP} é o percentual de horas de ocupação do APP com temperaturas superiores à faixa de temperatura operativa da Tabela 2; Nh_{sFT} é o número de horas em que o APP se encontrou ocupado e com temperaturas superiores à faixa de temperatura operativa, estabelecida na Tabela 2, ao longo do ano; Nh_{Ocup} é o número de horas em que o APP foi ocupado ao longo do ano, equivalente a 2.920 h para salas e a 3.650 h para dormitórios.

O PHiFT_{APP} foi calculado apenas para os climas do Intervalo 1 e foi determinado de acordo com a Equação 10:

$$PHiFT_{APP} = \frac{Nh_{iFT}}{Nh_{Ocup}} \cdot 100 \quad (10)$$

onde PHiFT_{APP} é o percentual de horas de ocupação do APP com temperaturas inferiores à faixa de temperatura operativa da Tabela 2; Nh_{iFT} é o número de horas em que o APP se encontrou ocupado e com temperaturas inferiores à faixa de temperatura operativa, estabelecida na Tabela 2, ao longo do ano; Nh_{Ocup} é o número de horas em que o APP foi ocupado ao longo do ano, equivalente a 2.920 h para salas e a 3.650 h para dormitórios.

O PHsFT_{UH} e o PHiFT_{UH} da unidade habitacional foram obtidos por meio da média aritmética dos valores de PHsFT_{APP} e PHiFT_{APP} de todos os APP da UH, respectivamente.

3.6 CONFIGURAÇÕES DE DIFERENTES COMBINAÇÕES PARA A ENVOLTÓRIA

Com o intuito de testar diferentes configurações do sistema construtivo de CLT e verificar qual parâmetro pode influenciar mais na variação do nível de desempenho térmico da edificação, foram definidas diferentes combinações de materiais para a envoltória e realizadas novas simulações. Para isso, os modelos mantiveram as características geométricas do modelo real de edificação do Caso Base de CLT (CB), apresentado anteriormente no item 3.3.2.1, e as mesmas condições de contorno para a realização das simulações computacionais.

Foram configuradas doze novas combinações para a envoltória, alterando e alternando-se os elementos das paredes externas e lajes, associando-se ou não material isolante térmico. Primeiramente, para os casos chamadas de C1 e C2 alterou-se apenas a espessura dos painéis CLT para 95 mm e 105 mm, respectivamente, com base nas opções de espessuras mais usuais citadas por Oliveira (2018) em seu estudo. Na sequência, para o Caso 3 (C3), optou-se por manter as paredes de CLT conforme o caso base, com 80 mm, e alterar apenas a espessura da laje da cobertura para 200 mm, com base em propostas associadas a catálogos de orientações construtivas para o sistema de CLT (URBEM, 2022; CROSSLAM, 2020). Nos casos 4 e 5 alternaram-se as configurações das paredes de CLT de 95 mm e 105 mm, respectivamente, com a laje da cobertura de 200 mm.

Devido a cobertura das edificações ser um grande potencializador dos ganhos de calor em uma edificação, optou-se por simular alguns casos inserindo material isolante neste elemento construtivo. O C6, portanto, mantém as paredes de CLT de 80 mm e associa o material isolante, considerado como lã de rocha de 30 mm e resistência térmica de 0,67 ($m^2.K$)/W, à laje de cobertura de espessura 120 mm para as ZB de 1 a 7, excluindo-se as simulações na ZB 8 para este caso, pois a normativa já condiciona o uso obrigatório do isolante à esta zona, o que o igualaria às simulações do caso base. Na sequência, os casos C7 e C8 também mantêm os painéis de CLT com 80 mm de espessura, porém diferenciam a espessura da laje da cobertura entre 120 mm e 200 mm,

respectivamente, associando o dobro de espessura para o material isolante, que conta com resistência térmica de 1,33 (m².K)/W nestes casos.

Os casos C9, C10, C11 e C12 associam 30 mm de material isolante nas paredes externas de CLT de 80 mm e alternam as espessuras das lajes em 120 mm e 200 mm, assim como do isolamento na cobertura em 30 mm e 60 mm.

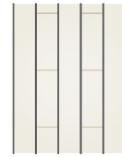
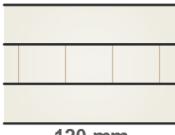
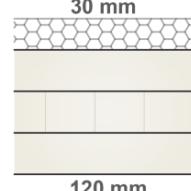
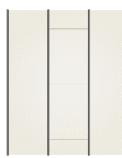
As classificações e configurações dos elementos construtivos descritos, as suas transmitâncias térmicas e suas capacidades térmicas podem ser verificados no Quadro 6, Quadro 7, Quadro 8 e Quadro 9, respectivamente. Vale salientar que todas as paredes internas mantiveram os painéis de CLT 80 mm em configurações, conforme o CB.

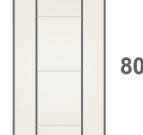
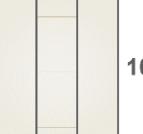
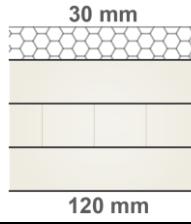
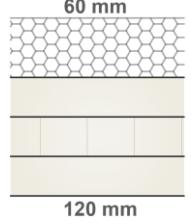
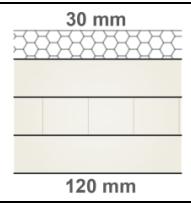
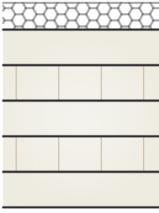
Quadro 6. Configurações dos elementos de CLT para as diferentes envoltórias.

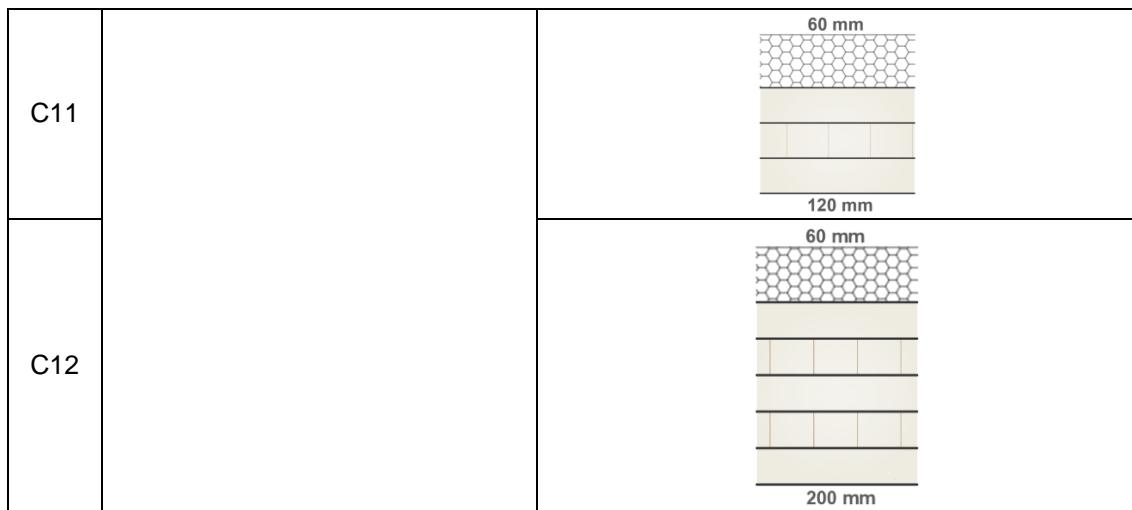
Caso	Espessura da parede externa de CLT [mm]	Espessura do isolante térmico nas paredes externas [mm]	Espessura da laje CLT [mm]	Espessura do isolante térmico na cobertura [mm]	
				ZB 1 a 7	ZB 8
C1	95	-	120	-	30
C2	105	-	120	-	30
C3	80	-	200	-	30
C4	95	-	200	-	30
C5	105	-	200	-	30
C6	80	-	120	30	(CB)
C7	80	-	120		60
C8	80	-	200		60
C9	80	30	120	30	
C10	80	30	200	30	
C11	80	30	120	60	
C12	80	30	200	60	

Fonte: A autora (2023).

Quadro 7. Demonstração dos elementos de CLT para as diferentes envoltórias.

Caso	Configurações do CLT na parede externa	Configuração da laje de CLT	
		ZB 1 a 7	ZB 8
C1	 95 mm		
C2	 105 mm		

C3			
C4			
C5			
C6			CB
C7			
C8			
C9			
C10			



Fonte: A autora (2023).

Quadro 8. Transmitância térmica das envoltórias para as diferentes envoltórias.

Caso	Transmitância térmica [W/m ² .K]											
	Parede						Cobertura		Piso 3,85			
	1	2	3	4	5	6	Z1 a 7	Z8				
C1	0,84	0,80	0,71	0,88	1,09	1,17	0,78	0,51				
C2	0,79	0,76	0,67				0,53	0,39				
C3	0,93	0,88	0,77				0,51	CB				
C4	0,84	0,80	0,71				0,38					
C5	0,79	0,76	0,67				0,31					
C6	0,93	0,88	0,77				0,51					
C7							0,39					
C8	0,57	0,56	0,51				0,38					
C9							0,31					
C10	0,57	0,56	0,51				0,51					
C11							0,39					
C12							0,38					
							0,31					

Fonte: A autora (2023).

Quadro 9. Capacidade térmica das envoltórias para as diferentes envoltórias.

Caso	Capacidade térmica [kJ/m ² .K]											
	Parede						Cobertura		Piso 303,89			
	1	2	3	4	5	6	Z1 a 7	Z8				
C1	129,32	165,79	165,79	165,32	128,86	92,40	149,64	150,09				
C2	140,87	177,34	177,34				242,04	253,53				
C3	112,00	148,46	148,46				150,09	CB				
C4	129,32	165,79	165,79				150,54					
C5	140,87	177,34	177,34				253,98					
C6	112,00	148,46	148,46				150,09					
C7							150,09					
C8							150,09					
C9	112,45	148,91	148,91				150,09					

C10							253,53	
C11							150,54	
C12							253,98	

Fonte: A autora (2023).

Vale ressaltar que para o piso da edificação, a fim de simular o mesmo tipo de contato com o solo para todas os casos (e devido a evitar-se o contato direto do CLT com a umidade do solo), optou-se por manter a laje de concreto associada à revestimento cerâmico, conforme a configuração presente no modelo real do caso base apresentado no item 3.3.2.1.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são apresentados os resultados obtidos nesta pesquisa, divididos por cidade, de acordo com os Intervalos 1, 2 e 3 da NBR 15.575 (ABNT, 2021), para facilitar a interpretação e verificação dos dados. Primeiramente são apresentados os casos base de CLT e, na sequência, os casos adaptados, comparando-se os resultados com os modelos de alvenaria e referência. Por último, são apresentados os parâmetros informativos do procedimento de simulação computacional (PHsFT e PHiFT), com a finalidade de obter índices complementares sobre o desempenho térmico das edificações.

4.1 CASOS BASE

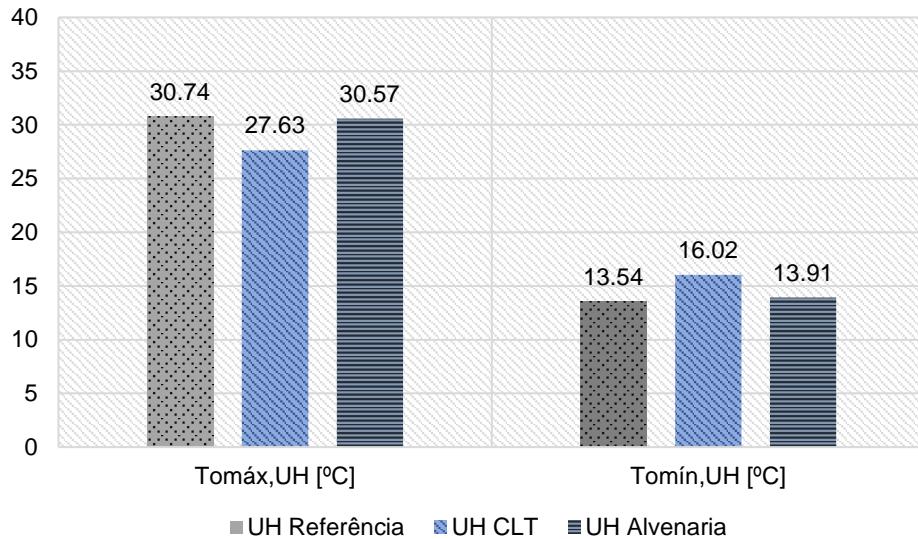
4.1.1 Curitiba

Para a simulação termoenergética realizada em Curitiba (ZB 1 e Intervalo 1), os resultados obtidos para a envoltória em CLT foram bastante satisfatórios, pois a UH real atingiu nível de desempenho superior em todos os parâmetros de avaliação. Quando comparada à UH de Alvenaria, o modelo de CLT também apresentou valores superiores de desempenho térmico.

Conforme é possível analisar na Figura 25, as Tomáx e Tomín obtidas no modelo real de CLT apresentaram valores menores e maiores do que a referência, respectivamente. A Tomáx verificada no modelo real foi de 27,63°C contra 30,74°C no modelo da referência, e a Tomín foi de 16,02°C e 13,54°C, respectivamente. Desta forma, devido a Tomáx da UH de CLT apresentar variação inferior a 2°C quando comparada ao valor de Tomáx da UH de referência, confirma-se que a UH de CLT atende ao nível mínimo obrigatório para esse parâmetro avaliativo. Da mesma forma, como a Tomín apresentou variação superior a 1°C em relação à referência, o critério foi atendido. Quando realizada a comparação com o modelo de alvenaria, os resultados se assemelham bastante ao caso anterior, pois as Tomáx e Tomín verificadas para a UH de alvenaria foram de 30,57°C e 13,91°C, respectivamente. Apesar dessas temperaturas se assemelharem muito às do modelo de referência, elas também

atendem ao nível mínimo de desempenho térmico estabelecido pela NBR 15.575 (ABNT, 2021). O Quadro 10 demonstra os valores e a designação para o atendimento aos critérios de desempenho térmico para essa avaliação.

Figura 25. Temperaturas operativas anuais para as UH de Curitiba.



Fonte: A autora (2023).

Quadro 10. Critérios de avaliação da Tomáx e Tomín para as UH de Curitiba.

Nível de desempenho	Critério de avaliação para Tomáx e Tomín [°C]	CLT		Alvenaria	
		Tomáx e Tomín UH [°C]	Atende ao critério avaliativo	Tomáx e Tomín UH [°C]	Atende ao critério avaliativo
Mínimo	$\text{Tomáx}_{\text{UH,real}} \leq 32,74$	27,97	SIM	30,57	SIM
	$\text{Tomín}_{\text{UH,real}} \geq 12,54$	16,02	SIM	13,91	SIM

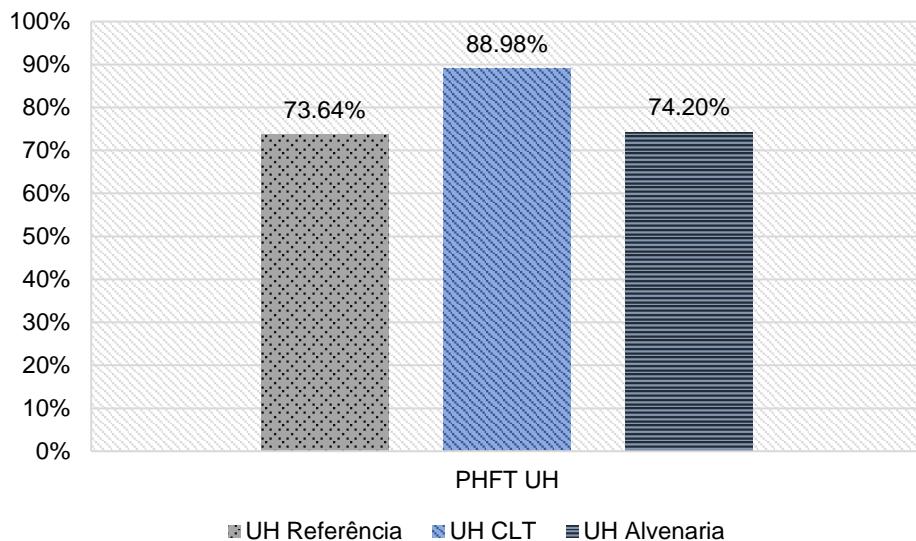
Fonte: A autora (2023).

Na avaliação para o critério do PHFT, a UH de CLT atingiu nível superior de desempenho térmico quando comparada à UH de referência. Conforme apresentado na Figura 26, o valor do PHFT_{UH} do CLT atingiu o valor de 88,98%, o que representou um incremento de 15,34% em relação ao PHFT da UH do modelo de referência, que correspondeu a 73,64%. Como os valores de PHFT da UH de referência superam os 70%, qualquer valor equivalente ou superior para o ΔPHFT da UH real já seria suficiente para enquadrá-la em um nível superior de desempenho térmico.

O modelo de alvenaria, por sua vez, também foi capaz de atingir nível superior de desempenho para esse critério, pois apresentou um incremento,

ainda que pequeno, de 0,56% em relação ao modelo de referência. O Quadro 11 detalha melhor essa avaliação conforme os parâmetros exigidos para este caso. É possível verificar, portanto, que o modelo de CLT apresenta valores mais elevados de PHFT_{UH} em relação ao modelo de alvenaria, apresentando 14,78% a mais de horas de conforto dentro da faixa de temperatura operativa de 18°C a 26°C estabelecida para o Intervalo 1.

Figura 26. PHFT para as UH de Curitiba.



Fonte: A autora (2023).

Quadro 11. Critérios de avaliação do PHFT e Δ PHFT das UH de Curitiba.

Nível de desempenho	Critério de avaliação para PHFT e Δ PHFT UH	CLT		Alvenaria	
		PHFT e Δ PHFT UH [%]	Atende ao critério avaliativo	PHFT e Δ PHFT UH [%]	Atende ao critério avaliativo
Mínimo	PHFT _{UH,real} > 66,27	88,98	SIM	74,20	SIM
Intermediário	Δ PHFT \geq 0	15,34	SIM	0,56	SIM
Superior			SIM		SIM

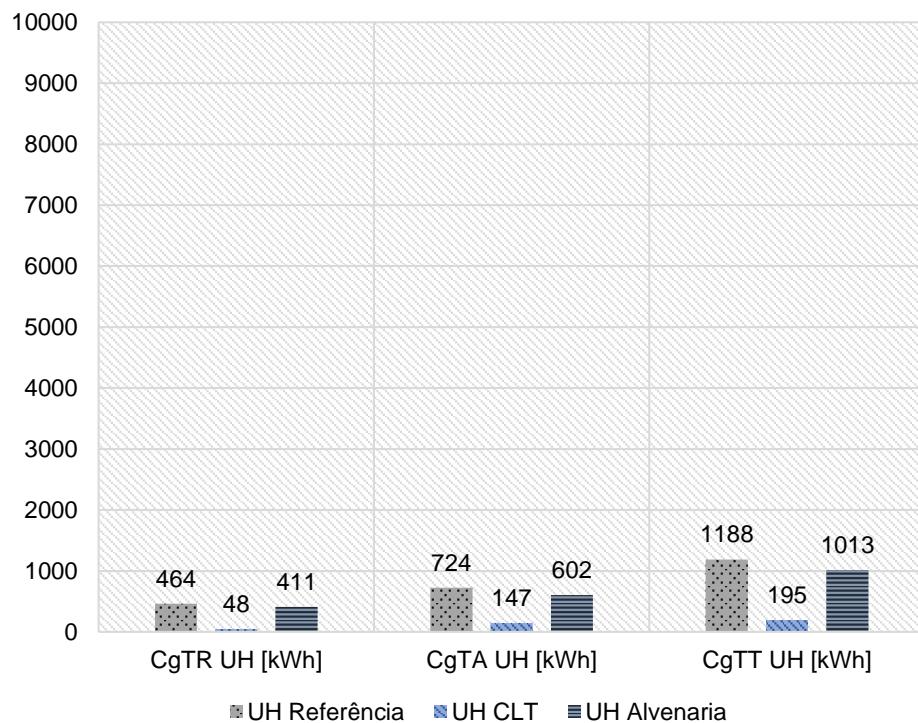
Fonte: A autora (2023).

Em relação ao critério das cargas térmicas, o modelo real de CLT igualmente apresentou resultados com nível superior de desempenho térmico, os quais corresponderam a uma redução das cargas térmicas totais da UH de 83,59%. Enquanto o modelo de referência consumiu uma CgTT_{UH} de 1.188 kWh/ano, a envoltória de CLT consumiu apenas 195 kWh/ano. Como a RedCgTT da UH de CLT, neste caso, foi superior aos 17% e 35% especificados como exigência mínima pela normativa para atendimento aos níveis intermediários e

superior de desempenho térmico, respectivamente, a envoltória de CLT enquadrou-se no nível mais alto.

Quando realizada a análise para o modelo de alvenaria, verificou-se que para esse critério a edificação real atendeu somente ao nível mínimo de desempenho térmico, pois apresentou uma $RedCgTT_{UH}$ em comparação com o modelo de referência de apenas 14,74%. A Figura 27 e Quadro 12 exemplificam com mais detalhes o exposto.

Figura 27. Cargas térmicas anuais para as UH de Curitiba.



Fonte: A autora (2023).

Quadro 12. Critérios de avaliação quanto a $RedCgTT$ das UH para Curitiba.

Nível de desempenho	Critério de Redução mínima $CgTT_{UH,real} [\%]$	CLT		Alvenaria	
		$RedCgTT_{mín} UH [\%]$	Atende ao critério avaliativo	$RedCgTT_{mín} UH [\%]$	Atende ao critério avaliativo
Intermediário	$RedCgTT \geq 17$	83,59	SIM	14,74	NÃO
Superior	$RedCgTT \geq 35$		SIM		NÃO

Fonte: A autora (2023).

Realizando a compilação dos resultados para o atendimento a todos os critérios avaliativos de desempenho térmico para as UH em geral é possível verificar que a edificação de CLT se enquadra no nível superior devido a todos

os critérios avaliados atenderem a esse critério. A edificação de alvenaria, porém, devido a não atender aos níveis intermediário e superior nos critérios avaliativos da redução da carga térmica, enquadra-se em um nível mínimo de desempenho térmico em relação ao modelo de referência. O Quadro 13 apresenta em detalhes o exposto.

Quadro 13. Classificação do desempenho térmico das UH para Curitiba.

Níveis	Critério	Atendimento	
		CLT	Alvenaria
Mínimo	PHFT UH	SIM	SIM
	Tomáx UH	SIM	SIM
	Tomín UH	SIM	SIM
Intermediário	ΔPHFT UH	SIM	SIM
	RedCgTT UH	SIM	NÃO
Superior	ΔPHFT UH	SIM	SIM
	RedCgTT UH	SIM	NÃO
Atende ao nível mínimo?		SIM	SIM
Atende ao nível intermediário?		SIM	NÃO
Atende ao nível superior?		SIM	NÃO
		NÍVEL SUPERIOR	NÍVEL MÍNIMO

Fonte: A autora (2023).

Dessa forma, é possível dizer que para a cidade de Curitiba, a utilização do CLT na envoltória da edificação seria mais eficaz do que a alvenaria convencional, em termos de eficiência energética.

4.1.2 Brasília

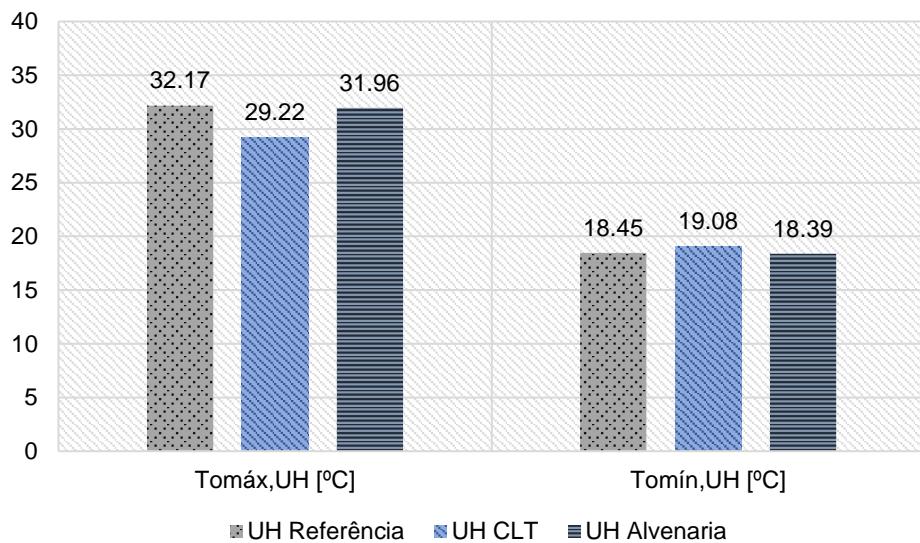
As simulações termoenergéticas realizadas para Brasília (ZB 4 e Intervalo 1) também apresentaram resultados gerais superiores para o desempenho térmico da envoltória em CLT, quando comparada com a edificação de referência e, igualmente, quando comparada à UH de alvenaria.

Conforme é possível visualizar na Figura 28 e no Quadro 14, as Tomáx e Tomín obtidas no modelo real de CLT apresentaram valores menores e maiores do que a referência, respectivamente. A Tomáx verificada no modelo real foi de 29,22 °C contra 32,17 °C no modelo da referência, e a Tomín foi de 19,08 °C no modelo real e 18,45 °C no de referência. Devido, portanto, a Tomáx da UH real de CLT apresentar-se com quase 3 °C a menos do que a da UH de referência, e

a Tomín com 0,63 °C a mais, confirma-se que a UH de CLT atende ao nível mínimo obrigatório para os dois parâmetros avaliativos.

Quando realizada a comparação com o modelo de alvenaria, em que as Tomáx e Tomín verificadas para a UH real foram, respectivamente, de 31,96 °C e 18,39 °C, observa-se que o CLT apresenta valores mais satisfatórios, apesar deste caso também atender ao requisito do nível mínimo, quando comparado com a edificação de referência, conforme é estabelecido pela NBR 15.575 (ABNT, 2021).

Figura 28. Temperaturas operativas anuais para as UH de Brasília.



Fonte: A autora (2023).

Quadro 14. Critérios de avaliação da Tomáx e Tomín para as UH de Brasília.

Nível de desempenho	Critério de avaliação para Tomáx e Tomín [°C]	CLT		Alvenaria	
		Tomáx e Tomín UH [°C]	Atende ao critério avaliativo	Tomáx e Tomín UH [°C]	Atende ao critério avaliativo
Mínimo	Tomáx _{UH,real} ≤ 34,17	29,22	SIM	31,96	SIM
	Tomín _{UH,real} ≥ 17,45	19,08	SIM	18,39	SIM

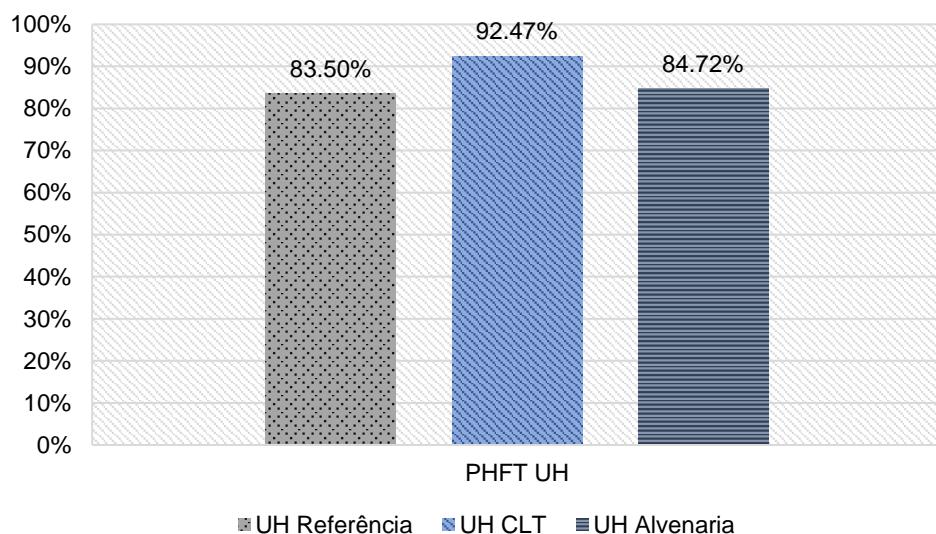
Fonte: A autora (2023).

Na avaliação para o critério do PHFT, a UH de CLT atingiu nível superior de desempenho térmico quando comparada à UH de referência, assim como a UH de alvenaria. Conforme pode ser analisado na Figura 29 e no Quadro 15, o valor do PHFT_{UH} do modelo real de CLT atingiu 92,47%, o que representou um incremento de 8,97% em relação ao PHFT_{UH} do modelo de referência, que

correspondeu a 83,50%. O modelo de alvenaria, por sua vez, apresentou valor de 84,72% para o $\Delta\text{PHFT}_{\text{UH}}$, correspondendo à um aumento de 1,22 % em relação à referência.

Da mesma maneira que para Curitiba, como os valores de PHFT da UH de referência superam os 70%, qualquer valor equivalente ou superior para o ΔPHFT da UH real já seria suficiente para enquadrá-la nos níveis intermediários e superior de desempenho térmico. Sendo assim, a UH de CLT consegue atingir o nível mais alto para este critério avaliativo.

Figura 29. PHFT para as UH de Brasília.



Fonte: A autora (2023).

Quadro 15. Critérios de avaliação do PHFT e ΔPHFT para as UH de Brasília.

Nível de desempenho	Critério de avaliação para PHFT e ΔPHFT	CLT		Alvenaria	
		PHFT e ΔPHFT UH [%]	Atende ao critério avaliativo	PHFT e ΔPHFT UH [%]	Atende ao critério avaliativo
Mínimo	$\text{PHFT}_{\text{UH,real}} > 75,15$	92,47	SIM	84,72	SIM
Intermediário	$\Delta\text{PHFT} \geq 0$	8,97	SIM	1,22	SIM
			SIM		SIM

Fonte: A autora (2023).

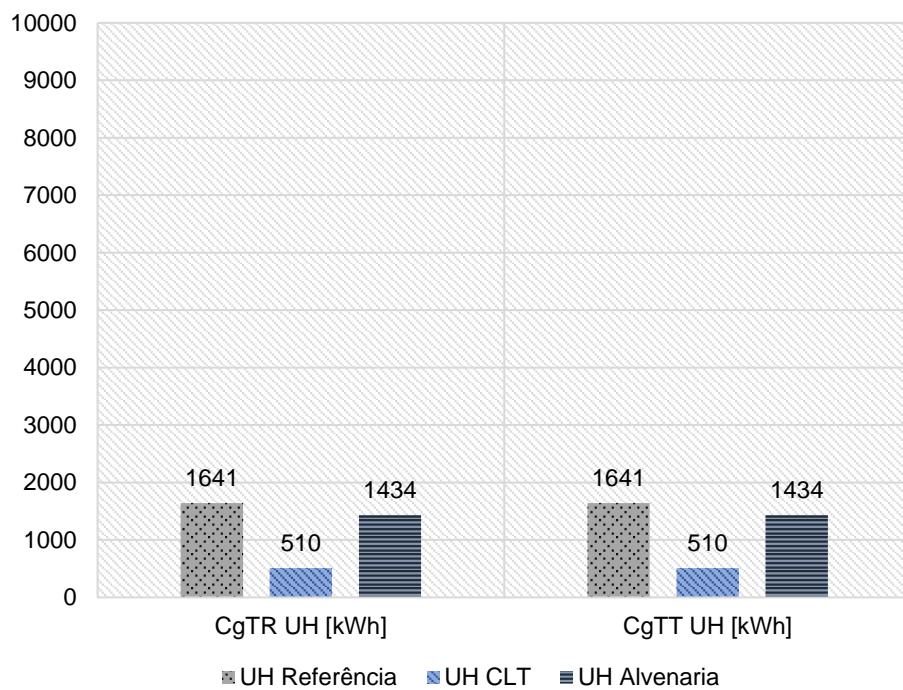
Quanto ao atendimento ao critério de avaliação das cargas térmicas, o modelo real de CLT para Brasília também alcançou nível superior de desempenho térmico, pois a redução da CgTT da UH real em comparação com a de referência foi de 68,92%, superando os valores de 17% e 35% de redução necessários para o atendimento aos níveis intermediário e superior,

respectivamente, para este caso. Enquanto o modelo de referência consumiu uma $CgTT_{UH}$ de 1.641 kWh/ano, a envoltória de CLT consumiu 510 kWh/ano.

O modelo de alvenaria, porém, não foi capaz de atingir o nível de desempenho intermediário nem o superior para este critério. A $CgTT_{UH}$ consumida pela envoltória real foi de 1.434 kWh/ano, o que representou uma redução, insuficiente, de 12,61%.

Para melhor apresentar o exposto, a Figura 30 apresenta o gráfico comparativo para as cargas térmicas das três UH mencionadas (de referência, CLT e alvenaria) e o Quadro 16, na sequência, apresenta os critérios de avaliação e atendimento aos níveis de desempenho térmico das envoltórias quanto à Red $CgTT_{UH}$ dos modelos reais. Cabe salientar que os resultados da $CgTA_{UH}$ para todas as envoltórias simuladas em Brasília foram nulos (visto que todas as Tomín apresentadas ficaram acima dos 18°C) e, portanto, não foram inseridos no gráfico, fazendo com que a $CgTR_{UH}$ seja equivalente à $CgTT_{UH}$ de cada uma delas.

Figura 30. Cargas térmicas anuais para as UH de Brasília.



Fonte: A autora (2023).

Quadro 16. Critérios de avaliação quanto à RedCgTT das UH para Brasília.

Nível de desempenho	Critério de Redução mínima CgTT _{UH,real} [%]	CLT		Alvenaria	
		RedCgTT _{mín} UH [%]	Atende ao critério avaliativo	RedCgTT _{mín} UH [%]	Atende ao critério avaliativo
Intermediário	RedCgTT ≥ 17	87,38	SIM	12,61	NÃO
Superior	RedCgTT ≥ 35		SIM		NÃO

Fonte: A autora (2023).

Em relação ao nível geral de desempenho térmico para as UH simuladas em Brasília foi possível verificar que, quando comparadas à edificação de referência, a UH com sistema construtivo de CLT atende ao nível superior de desempenho térmico, enquanto a UH de alvenaria convencional atende apenas ao nível mínimo. No Quadro 17 é possível analisar com maior precisão a classificação dos critérios e do nível de desempenho térmico geral para as UH.

Quadro 17. Classificação do desempenho térmico das UH de Brasília.

Níveis	Critério	Atendimento	
		CLT	Alvenaria
Mínimo	PHFT UH	SIM	SIM
	Tomáx UH	SIM	SIM
	Tomín UH	SIM	SIM
Intermediário	Δ PHFT UH	SIM	SIM
	RedCgTT UH	SIM	NÃO
Superior	Δ PHFT UH	SIM	SIM
	RedCgTT UH	SIM	NÃO
Nível da Edificação	Atende ao nível mínimo?	SIM	SIM
	Atende ao nível intermediário?	SIM	NÃO
	Atende ao nível superior?	SIM	NÃO
		NÍVEL SUPERIOR	NÍVEL MÍNIMO

Fonte: A autora (2023).

Conclui-se, portanto, que para a cidade de Brasília, igualmente à Curitiba, a utilização do CLT na envoltória da edificação seria mais eficaz do que o uso da alvenaria convencional, em termos de eficiência energética, muito possivelmente devido à menor transmitância térmica e, consequentemente, maior resistência térmica da envoltória de CLT, o que faz que as trocas de calor entre o meio externo e interno através dos elementos das paredes e cobertura seja menor, potencializando a inércia térmica do ambiente.

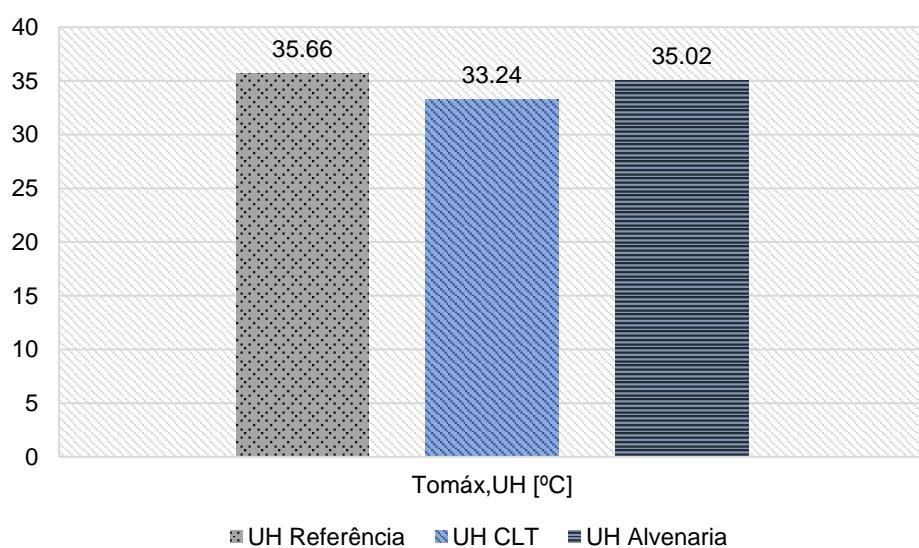
4.1.3 Rio de Janeiro

Os resultados das simulações termoenergéticas para a UH de CLT realizadas para a cidade do Rio de Janeiro (ZB 8 e Intervalo 1) também apresentaram valores mais satisfatórios de desempenho térmico, quando comparadas às envoltórias de referência e de alvenaria, porém não foram suficientes para atingir os níveis intermediário e superior.

Por se tratar da ZB 8, de acordo com a NBR 15.575 (ABNT, 2021), a avaliação do critério das temperaturas operativas analisa apenas a variação da Tomáx. Sendo assim, conforme é possível visualizar na Figura 31, a Tomáx obtida no interior da UH de CLT, que foi de 33,24°C, apresenta valor inferior à Tomáx do modelo de referência e do modelo de alvenaria, as quais foram de 35,66°C e 35,02°C, respectivamente.

Diante do exposto, conforme demonstra o Quadro 18, a Tomáx da UH real de CLT apresenta variação de 2,4°C a menos do que a da UH de referência, enquanto a de alvenaria, apesar de também atender ao nível mínimo de desempenho térmico, apresenta variação inferior de apenas 0,63°C. A variação da Tomáx da envoltória do CLT quando comparada à da envoltória de alvenaria corresponde a 1,78°C a menos.

Figura 31. Temperaturas operativas anuais para as UH do RJ.



Fonte: A autora (2023).

Quadro 18. Critério de avaliação da Tomáx para as UH do RJ.

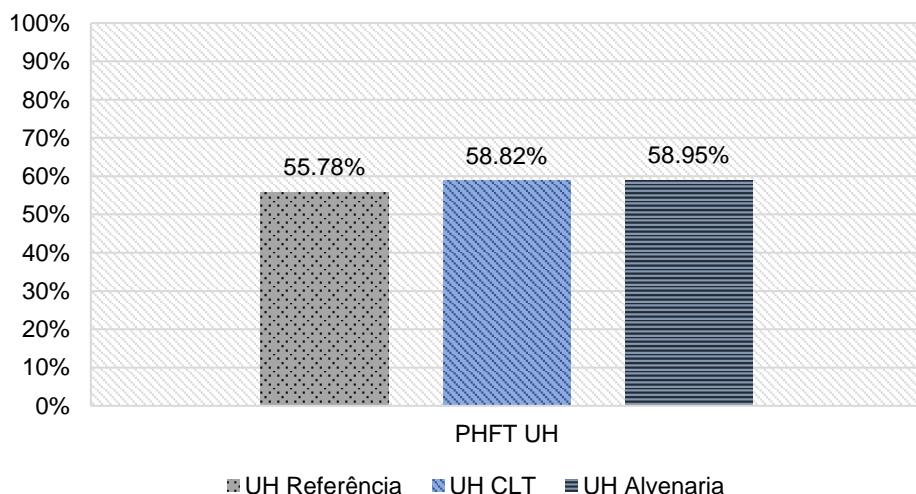
Nível de desempenho	Critério de avaliação para Tomáx e Tomín [°C]	CLT		Alvenaria	
		Tomáx e Tomín UH [°C]	Atende ao critério avaliativo	Tomáx e Tomín UH [°C]	Atende ao critério avaliativo
Mínimo	Tomáx _{UH,real} ≤ 37,66	33,24	SIM	35,02	SIM

Fonte: A autora (2023).

Na avaliação para o critério do PHFT_{UH} , nem a UH de CLT nem a UH de alvenaria foram capazes de atingir nível intermediário ou superior de desempenho térmico quando comparadas à UH de referência. Conforme pode ser analisado na Figura 32, o valor do PHFT_{UH} do modelo de CLT atingiu 58,82%, o que representou um pequeno aumento de 3,04% em relação ao PHFT_{UH} da referência. O modelo de alvenaria, por sua vez, apresentou valor de 58,95% para o PHFT_{UH} , correspondendo a um aumento de 3,17% em relação à referência, e inclusive ligeiramente maior ao do CLT. Por se apresentarem com valores acima dos 90% do valor do PHFT_{UH} da UH de referência, ambas as edificações reais atenderam ao critério mínimo de desempenho térmico exigido.

Como neste caso o valor do PHFT_{UH} da referência é inferior a 70%, o cálculo do incremento mínimo do PHFT_{UH} necessário para atender aos níveis mais elevados de desempenho térmico, correspondeu a 12,65%. Sendo assim, devido ao ΔPHFT das envoltórias de CLT e alvenaria estarem abaixo deste valor, ambas não foram capazes de atender aos níveis intermediário e superior de desempenho térmico para este critério, conforme apresenta o Quadro 19.

Figura 32. PHFT para as UH do RJ.



Fonte: A autora (2023).

Quadro 19. Critérios de avaliação do PHFT e Δ PHFT para as UH do RJ.

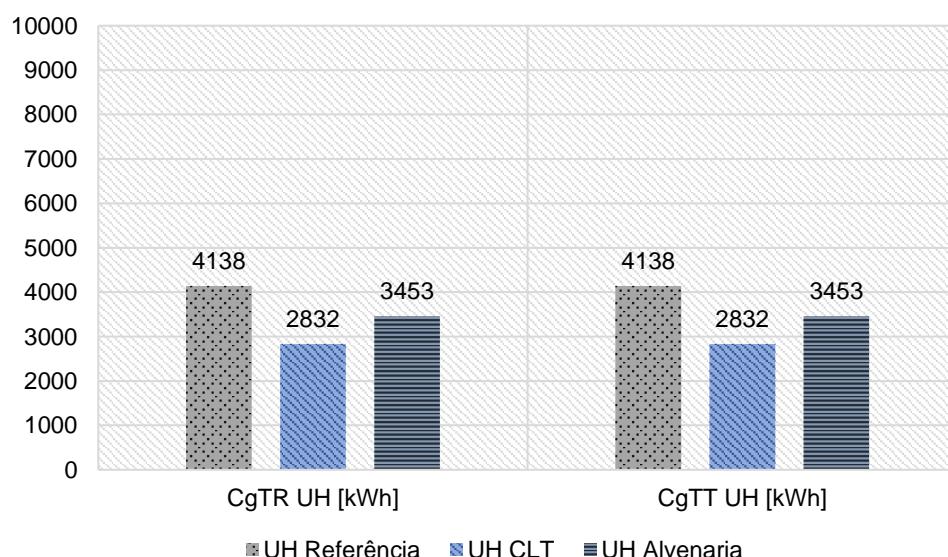
Nível de desempenho	Critério de avaliação para PHFT e Δ PHFT UH	CLT		Alvenaria	
		PHFT e Δ PHFT UH [%]	Atende ao critério avaliativo	PHFT e Δ PHFT UH [%]	Atende ao critério avaliativo
Mínimo	$PHFT_{UH,real} > 50,20$	58,82	SIM	58,95	SIM
Intermediário	$\Delta PHFT \geq 12,65$	3,04	NÃO	3,17	NÃO
Superior			NÃO		NÃO

Fonte: A autora (2023).

Quanto ao critério de avaliação das cargas térmicas, ambos os modelos reais atingiram nível intermediário de desempenho térmico, quando comparados ao modelo de referência. Enquanto a referência consumiu 4.138 kWh/ano, a envoltória de CLT consumiu 2.832 kWh/ano e a de alvenaria, 3.453 kWh/ano. De acordo com esses valores, calculou-se que as RedCgTT_{UH} foram de 31,56% para o CLT e 16,55% para a alvenaria.

Para melhor entendimento, a Figura 33 apresenta o gráfico do consumo das CgTT_{UH}, levando em consideração que, por se tratar da ZB 8, a CgTA_{UH} não é avaliada e a CgTT_{UH} corresponde ao valor equivalente à CgTR_{UH}. O Quadro 20 apresenta os critérios de avaliação e atendimento aos níveis de desempenho térmico das envoltórias quanto à RedCgTT_{UH} para o Rio de Janeiro, observando-se que aqui, devido à relação entre o consumo da CgTT_{UH} da referência e a área dos APP ser maior do que 100 (Anexo C), a redução mínima das CgTT_{UH} para obter o nível superior deveria ser igual ou maior à 55%.

Figura 33. Carga térmica anual para as UH do RJ.



Fonte: A autora (2023).

Quadro 20. Critérios de avaliação quanto à RedCgTT das UH para o RJ.

Nível de desempenho	Critério de Redução mínima CgTT _{UH,real} [%]	CLT		Alvenaria	
		RedCgTT _{mín} UH [%]	Atende ao critério avaliativo	RedCgTT _{mín} UH [%]	Atende ao critério avaliativo
Intermediário	RedCgTT ≥ 0	31,56	SIM	16,55	SIM
Superior	RedCgTT ≥ 55		NÃO		NÃO

Fonte: A autora (2023).

Em relação ao nível geral de desempenho térmico para as UH simuladas no Rio de Janeiro foi possível verificar que, quando comparadas à edificação de referência, tanto a UH de CLT quanto a UH de alvenaria atendem apenas ao nível mínimo. No Quadro 21 é possível analisar a classificação dos critérios e do nível de desempenho térmico geral para as UH.

Quadro 21. Classificação do desempenho térmico das UH para o RJ.

Níveis	Critério	Atendimento	
		CLT	Alvenaria
Mínimo	PHFT UH	SIM	SIM
	Tomáx UH	SIM	SIM
	Tomín UH	Não analisado	Não analisado
Intermediário	Δ PHFT UH	NÃO	NÃO
	RedCgTT UH	SIM	SIM
Superior	Δ PHFT UH	NÃO	NÃO
	RedCgTT UH	NÃO	NÃO
Nível da Edificação	Atende ao nível mínimo?	SIM	SIM
	Atende ao nível intermediário?	NÃO	NÃO
	Atende ao nível superior?	NÃO	NÃO
		NÍVEL MÍNIMO	NÍVEL MÍNIMO

Fonte: A autora (2023).

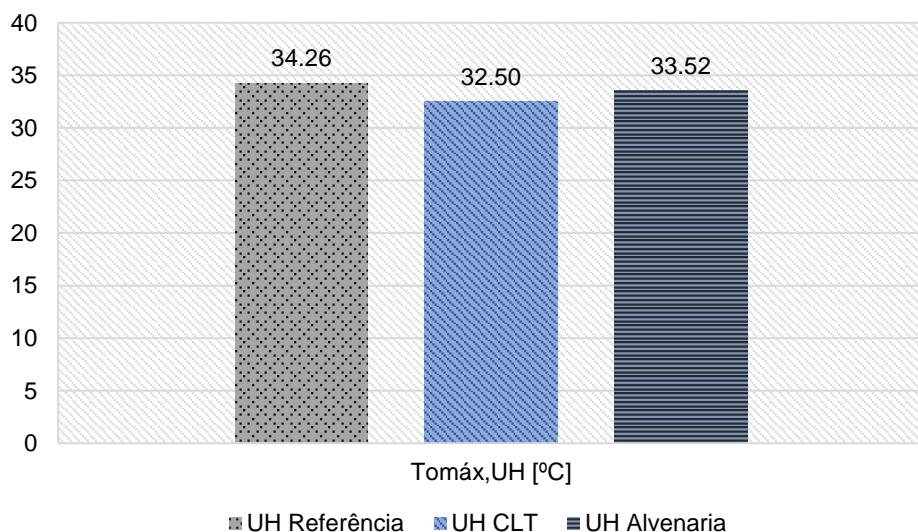
Vale salientar que, em termos de eficiência energética, apesar de não atender aos níveis mais elevados de desempenho térmico para a cidade do Rio de Janeiro, a envoltória de CLT apresenta resultados mais satisfatórios para o PHFT e, principalmente, para a RedCgTT_{UH} em comparação com os resultados da envoltória de alvenaria convencional, o que nos indica a possibilidade de utilização do CLT.

4.1.4 Recife

Para a cidade de Recife (ZB 8 e Intervalo 2), os resultados das simulações termoenergéticas para a UH de CLT apresentaram valores mais satisfatórios de desempenho térmico do que as envoltórias de referência e de alvenaria, porém, igualmente ao Rio de Janeiro, apenas o nível mínimo foi atendido.

Para análise das temperaturas operativas, por se tratar da ZB 8, conforme comentado anteriormente, considerou-se apenas a variação da Tomáx. É possível visualizar na Figura 34, e comprovar no Quadro 22, que a Tomáx obtida no interior da UH de CLT foi de 32,50 °C, apresentando-se menor do que as Tomáx da UH de referência e de alvenaria em 1,76 °C e 1,02 °C, respectivamente, o que significou o atendimento a esse critério avaliativo.

Figura 34. Temperaturas operativas anuais para as UH de Recife.



Fonte: A autora (2023).

Quadro 22. Critério de avaliação da Tomáx para as UH do Recife.

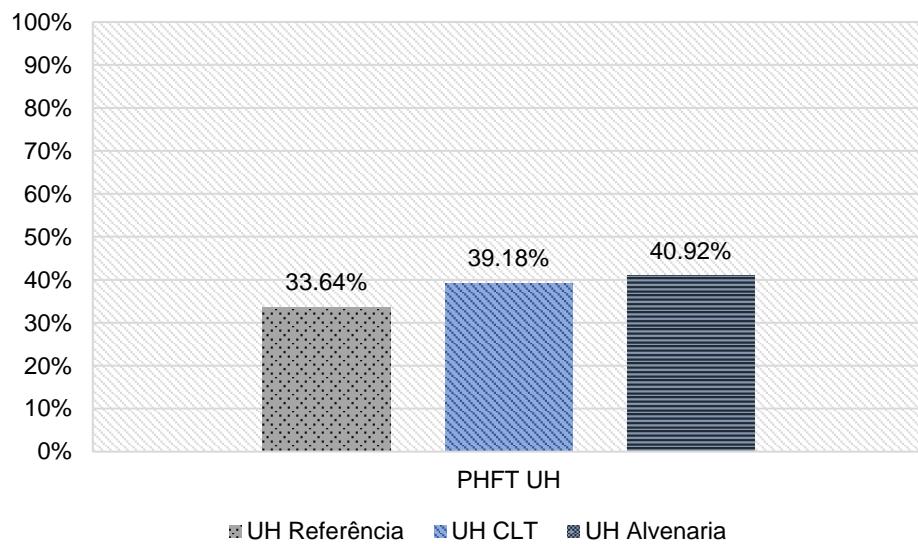
Nível de desempenho	Critério de avaliação para Tomáx e Tomín [°C]	CLT		Alvenaria	
		Tomáx e Tomín UH [°C]	Atende ao critério avaliativo	Tomáx e Tomín UH [°C]	Atende ao critério avaliativo
Mínimo	$\text{Tomáx}_{\text{UH,real}} \leq 34,26$	32,50	SIM	33,52	SIM

Fonte: A autora (2023).

Na avaliação do PHFT, a UH de CLT, igualmente à de alvenaria, não atendeu aos níveis intermediário e superior de desempenho térmico quando

comparada à UH de referência, pois era necessário que o ΔPHFT se apresentasse maior ou igual a 25,48% para esse critério, conforme orientações da norma constantes nos Anexos A, B e C. Conforme demonstram a Figura 35 e o Quadro 23, o PHFT do CLT atingiu 39,18%, o que representou um pequeno incremento de 5,54% em relação valor da UH de referência. A alvenaria, por sua vez, apresentou valores ligeiramente maiores, que corresponderam a 40,92% para o PHFT_{UH} e 7,28% para o $\Delta\text{PHFT}_{\text{UH}}$.

Figura 35. PHFT para as UH de Recife.



Fonte: A autora (2023).

Quadro 23. Critérios de avaliação do PHFT e ΔPHFT para as UH de Recife.

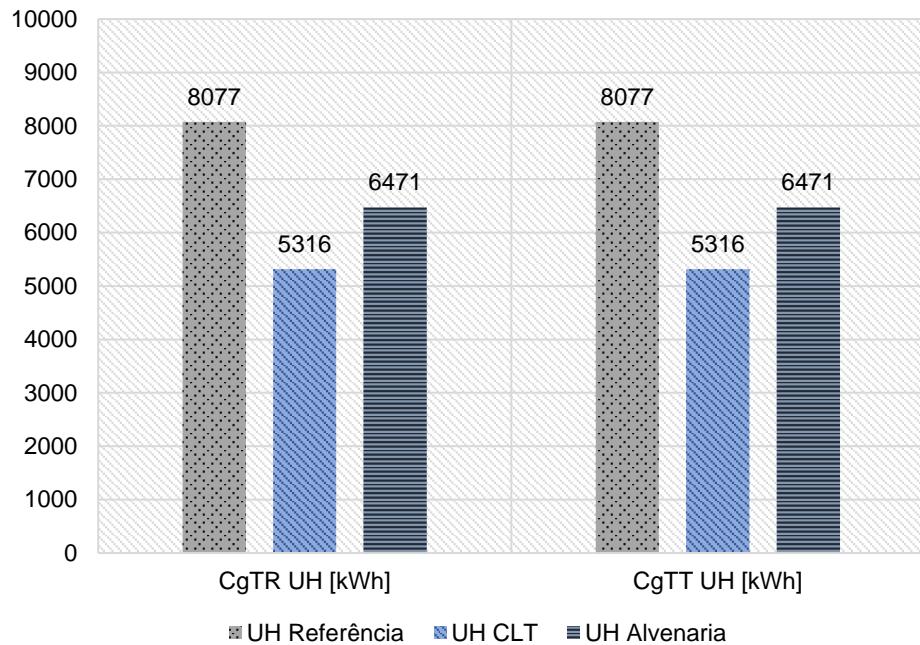
Nível de desempenho	Critério de avaliação para PHFT e ΔPHFT UH	CLT		Alvenaria	
		PHFT e ΔPHFT UH [%]	Atende ao critério avaliativo	PHFT e ΔPHFT UH [%]	Atende ao critério avaliativo
Mínimo	$\text{PHFT}_{\text{UH,real}} > 30,27$	39,18	SIM	40,92	SIM
Intermediário	$\Delta\text{PHFT} \geq 25,48$	5,54	NÃO	7,28	NÃO
Superior			NÃO		NÃO

Fonte: A autora (2023).

Na avaliação das cargas térmicas, tanto o modelo de CLT, quanto o de alvenaria atingiram nível intermediário de desempenho térmico quando comparados ao modelo de referência. Por se tratar da ZB 8, a CgTA_{UH} não foi avaliada. Enquanto o modelo de referência consumiu uma CgTT_{UH} de 8.077 kWh/ano, a envoltória de CLT consumiu 5.316 kWh/ano e a de alvenaria, 6.471 kWh/ano. As reduções da CgTT_{UH} , portanto, corresponderam a 34,18% e

19,88% para os casos de CLT e alvenaria, respectivamente, apresentando-se abaixo do valor mínimo de 55% exigidos pela norma, conforme Anexo C, para o atendimento ao nível superior. A Figura 36 e Quadro 24 demonstram os resultados.

Figura 36. Carga térmica anual para as UH de Recife.



Fonte: A autora (2023).

Quadro 24. Critérios de avaliação quanto à RedCgTT das UH para Recife.

Nível de desempenho	Critério de Redução mínima $CgTT_{UH,real} [\%]$	CLT		Alvenaria	
		RedCgTT _{mín} UH [%]	Atende ao critério avaliativo	RedCgTT _{mín} UH [%]	Atende ao critério avaliativo
Intermediário	RedCgTT ≥ 0	34,18	SIM	19,88	SIM
Superior	RedCgTT ≥ 55		NÃO		NÃO

Fonte: A autora (2023).

Devido a atenderem apenas um dos critérios do nível intermediário de desempenho térmico das UH, tanto a edificação de CLT quanto a de alvenaria se enquadram apenas no nível mínimo para a cidade de Recife. No Quadro 25 é possível analisar com maior precisão a classificação dos critérios e do nível de desempenho térmico geral para as UH.

Quadro 25. Classificação do desempenho térmico das UH para Recife.

Níveis	Critério	Atendimento	
		CLT	Alvenaria
Mínimo	PHFT UH	SIM	SIM
	Tomáx UH	SIM	SIM
	Tomín UH	Não analisado	Não analisado
Intermediário	ΔPHFT UH	NÃO	NÃO
	RedCgTT UH	SIM	SIM
Superior	ΔPHFT UH	NÃO	NÃO
	RedCgTT UH	NÃO	NÃO
Nível da Edificação	Atende ao nível mínimo?	SIM	SIM
	Atende ao nível intermediário?	NÃO	NÃO
	Atende ao nível superior?	NÃO	NÃO
		NÍVEL MÍNIMO	NÍVEL MÍNIMO

Fonte: A autora (2023).

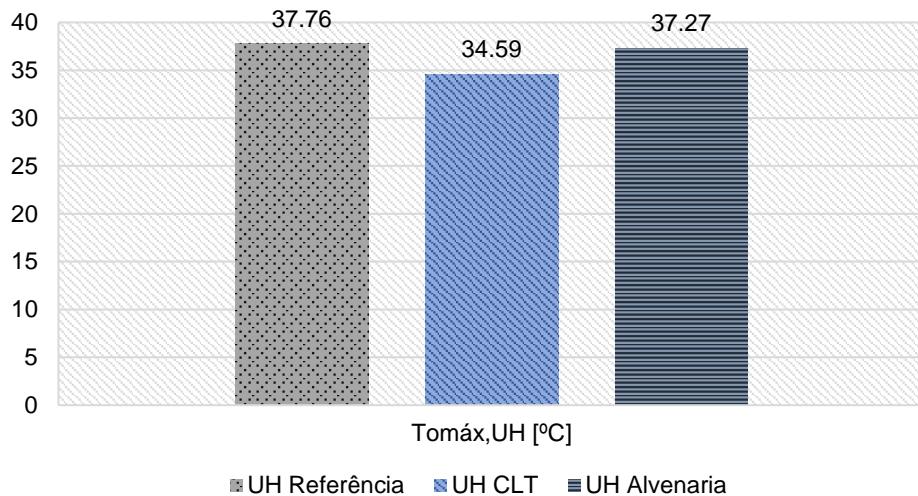
Para a cidade de Recife cabe salientar que, em termos de eficiência energética, apesar de não atender aos níveis mais elevados de desempenho térmico, também existe potencial de utilização do CLT, visto que a Tomáx no interior da edificação é inferior à das outras envoltórias, assim como o consumo da carga térmica, que representou um consumo de 17,8% a menos quando comparada com a alvenaria e 34,18% com a de referência.

4.1.5 Teresina

Para a última cidade avaliada, Teresina (ZB 7 e Intervalo 3), os resultados das simulações termoenergéticas foram os menos satisfatórios. A UH de CLT, apesar de apresentar-se com potencial de utilização, também atingiu apenas o nível mínimo de desempenho térmico quando comparada a UH de referência, da mesma forma que a UH de alvenaria.

Para o quesito da Tomáx, a edificação de CLT apresentou valores inferiores significativos de redução, os quais fizeram com que esse critério fosse atendido. A Tomáx do CLT correspondeu a aproximadamente 3°C a menos em comparação com a das edificações de referência e de alvenaria. A Figura 37 apresenta os valores e a variação correspondente para os valores das Tomáx de cada UH e o Quadro 26 afirma o atendimento ao critério avaliativo.

Figura 37. Temperaturas operativas anuais para as UH de Teresina.



Fonte: A autora (2023).

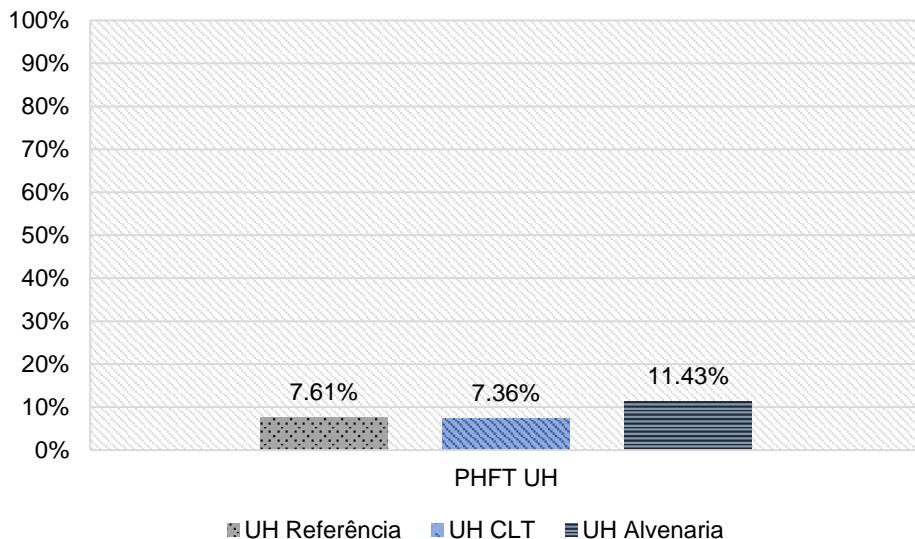
Quadro 26. Critério de avaliação da Tomáx para as UH de Teresina.

Nível de desempenho	Critério de avaliação para Tomáx e Tomín [°C]	CLT		Alvenaria	
		Tomáx e Tomín UH [°C]	Atende ao critério avaliativo	Tomáx e Tomín UH [°C]	Atende ao critério avaliativo
Mínimo	$\text{Tomáx}_{\text{UH,real}} \leq 39,76$	34,59	SIM	37,27	SIM

Fonte: A autora (2023).

Na avaliação do PHFT_{UH} , diferentemente dos outros casos analisados, a UH de CLT apresentou resultados inferiores ao da UH de referência e de alvenaria, sendo que apenas o nível mínimo foi atendido. O valor verificado para a envoltória de CLT foi de 7,36%, contra 7,61% para o $\text{PHFT}_{\text{UH,ref}}$. Sendo assim, o ΔPHFT se apresentou como insuficiente para atingir níveis mais elevados de desempenho térmico, apresentando valor negativo inclusive, de -0,25%. A edificação de alvenaria, por sua vez, apresentou valores maiores de PHFT_{UH} (11,43%) e ΔPHFT (3,82%) quando comparada à referência, porém igualmente não foram suficientes para atendimento aos níveis intermediário e superior de desempenho térmico. A Figura 38 e o Quadro 27 apresentam os valores para este critério de avaliação e a classificação quanto aos níveis de desempenho.

Figura 38. PHFT para as UH de Teresina.



Fonte: A autora (2023).

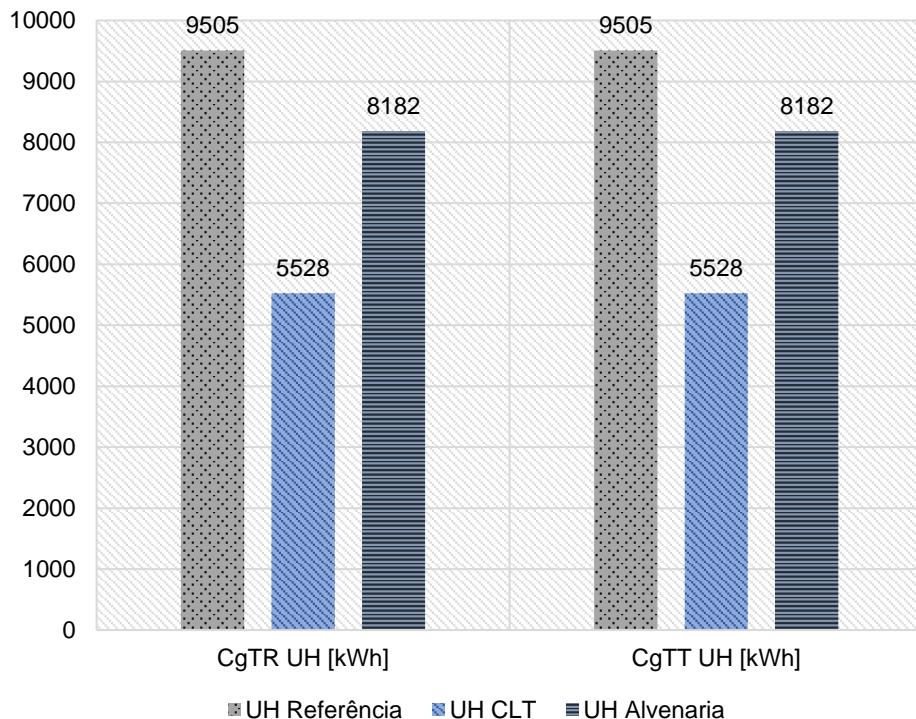
Quadro 27. Critérios de avaliação do PHFT e Δ PHFT para as UH de Teresina.

Nível de desempenho	Critério de avaliação para PHFT e Δ PHFT	CLT		Alvenaria	
		PHFT e Δ PHFT UH [%]	Atende ao critério avaliativo	PHFT e Δ PHFT UH [%]	Atende ao critério avaliativo
Mínimo	$PHFT_{UH,real} > 6,85$	7,36	SIM	11,43	SIM
Intermediário	$\Delta PHFT \geq 40,59$	-0,25	NÃO	3,82	NÃO
Superior			NÃO		NÃO

Fonte: A autora (2023).

Por outro lado, quando analisados os valores das cargas térmicas, a edificação de CLT apresenta valores melhores do que as outras duas. Conforme demonstrado na Figura 39, enquanto os modelos de referência e de alvenaria consumiram 9.505 kWh/ano e 8.182 kWh/ano, respectivamente, a envoltória de CLT consumiu 5.528 kWh/ano. Essa diferença significou uma redução de 41,84 % quando comparada à referência e de 32,43 % quando comparada à de alvenaria. Na comparação entre a alvenaria e a referência, o valor da RedCgTT_{UH} verificado foi de 13,92 %. O Quadro 28 apresenta as RedCgTT_{UH} e o atendimento aos níveis de desempenho térmico, observando-se que aqui a redução para obter o nível superior deveria ser igual ou maior à 55%. Vale relembrar que por se tratar da ZB 7, a CgTA_{UH} não foi avaliada e, portanto, a CgTR_{UH} é equivalente à CgTT da UH.

Figura 39. Carga térmica anual para as UH de Teresina.



Fonte: A autora (2023).

Quadro 28. Critérios de avaliação quanto à RedCgTT das UH para Teresina.

Nível de desempenho	Critério de Redução mínima $CgTT_{UH,real} [\%]$	CLT		Alvenaria	
		RedCgTT _{mín} UH [%]	Atende ao critério avaliativo	RedCgTT _{mín} UH [%]	Atende ao critério avaliativo
Intermediário	RedCgTT ≥ 0	41,84	SIM	13,92	SIM
Superior	RedCgTT ≥ 55		NÃO		NÃO

Fonte: A autora (2023).

Para Teresina, devido a também atenderem apenas um dos critérios do nível intermediário de desempenho térmico das UH, tanto a edificação de CLT quanto a de alvenaria se enquadram apenas no nível mínimo. No Quadro 29 é possível analisar com maior precisão a classificação dos critérios e do nível de desempenho térmico geral para as UH.

Quadro 29. Classificação do desempenho térmico das UH para Teresina.

Níveis	Critério	Atendimento	
		CLT	Alvenaria
Mínimo	PHFT UH	SIM	SIM
	Tomáx UH	SIM	SIM
	Tomín UH	Não analisado	Não analisado
Intermediário	Δ PHFT UH	NÃO	NÃO

	RedCgTT UH	SIM	SIM
Superior	ΔPHFT UH	NÃO	NÃO
	RedCgTT UH	NÃO	NÃO
Nível da Edificação	Atende ao nível mínimo?	SIM	SIM
	Atende ao nível intermediário?	NÃO	NÃO
	Atende ao nível superior?	NÃO	NÃO
		NÍVEL MÍNIMO	NÍVEL MÍNIMO

Fonte: A autora (2023).

Igualmente à Recife, observa-se que, em termos de eficiência energética, apesar de apresentar PHFT inferior e manter-se no nível mínimo de desempenho térmico, existe potencial de utilização do CLT, visto que a Tomáx no interior da edificação é significativamente inferior à das outras envoltórias, assim como o consumo da carga térmica.

4.2 MODELOS CONFIGURADOS PARA ESTRATÉGIAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Igualmente ao capítulo anterior, a demonstração dos resultados das simulações termoenergéticas realizadas para os modelos com diferentes combinações dos elementos para a envoltória, a fim de verificar estratégias de eficiência energética, foi dividida por cidade para facilitar a análise dos dados.

4.2.1 Curitiba

Os resultados obtidos para as novas simulações termoenergéticas em Curitiba (ZB 1 e Intervalo 1) foram bastante satisfatórios. A UH real atingiu nível de desempenho térmico superior em todos os casos, para todos os parâmetros de avaliação. Conforme pode ser analisado no Quadro 30, o Caso 12 (C12), o qual associou os painéis de CLT de 80 mm com isolamento 30 mm para as paredes, e painéis de 200 mm com isolamento de 60 mm para laje de cobertura, apresentou os melhores resultados, sendo capaz de atingir 97,60% para o PHFT da edificação e um valor de apenas 33 kWh para o somatório das cargas térmicas totais da UH.

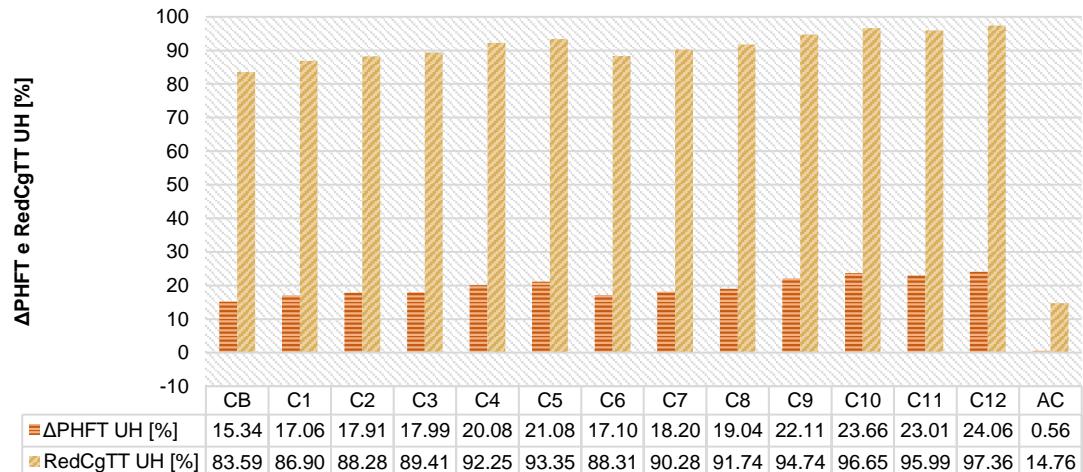
Quadro 30. Resultados para estratégias de eficiência energética em Curitiba.

Casos	Tomáx _{UH} [°C]	Tomín _{UH} [°C]	PHFT _{UH} [%]	CgTT _{UH} [kWh]	Desempenho térmico final da UH
C1	27,45	16,18	90,70	156	SUPERIOR
C2	27,36	16,27	91,55	139	SUPERIOR
C3	26,97	16,39	91,63	126	SUPERIOR
C4	26,81	16,55	93,72	92	SUPERIOR
C5	26,73	16,64	94,72	79	SUPERIOR
C6	27,11	16,32	90,74	139	SUPERIOR
C7	26,92	16,47	91,84	115	SUPERIOR
C8	26,71	16,64	92,68	95	SUPERIOR
C9	26,90	16,75	95,75	62	SUPERIOR
C10	26,59	17,03	97,30	40	SUPERIOR
C11	26,70	16,88	96,65	48	SUPERIOR
C12	26,49	17,10	97,70	31	SUPERIOR

Fonte: A autora (2023).

A Figura 40 demonstra os resultados do $\Delta\text{PHFT}_{\text{UH}}$ e da $\text{RedCgTT}_{\text{UH}}$ para cada caso simulado e os compara com os valores que foram obtidos anteriormente para o caso base (CB) de CLT (CLT de 80 mm na composição das paredes, com laje CLT de 120 mm sem isolamento térmico) e o de alvenaria convencional (AC). Sendo assim, é possível verificar que o C12 ainda apresenta os valores mais expressivos, quando comparada à UH de referência, contando com um $\Delta\text{PHFT}_{\text{UH}}$ de 24,06% e significativa $\text{RedCgTT}_{\text{UH}}$ de 97,36%. Tal desempenho também se demonstra bastante expressivo quando comparado ao caso base de alvenaria, apresentando um incremento de mais de 23% no PHFT da UH e uma redução da CgTT_{UH} de 82,60%. Observa-se também que, em geral, os casos em que há a associação do isolante térmico nas paredes e cobertura são os que apresentam os melhores resultados para o desempenho térmico (C10, C11 e C9), sendo seguidos pelos casos com maior espessura do CLT em ambos os elementos de paredes e lajes, sem isolamento térmico (C5 e C4).

Figura 40. Resultados das estratégias de eficiência energética para Curitiba.



Fonte: A autora (2023).

Diante do exposto e de acordo com as opções simuladas, é possível dizer que, para a cidade de Curitiba, a melhor estratégia para conseguir maior eficiência energética utilizando o CLT na envoltória da edificação seria associar mais massa térmica e/ou isolamento aos elementos das paredes e cobertura, a fim de retardar a perda de calor do interior da UH durante o inverno e os ganhos de calor durante os períodos do verão. Deve levar-se em consideração, porém, que com o atual cenário de aquecimento global, o uso do isolante térmico deve ser aplicado com cautela.

4.2.2 Brasília

Para Brasília, igualmente à Curitiba, todos os novos casos simulados atingiram níveis superiores de desempenho térmico para a UH real, sendo que, conforme pode ser verificar no Quadro 31, os melhores resultados também foram obtidos para o C12. Apesar das temperaturas operativas não variarem muito nos diferentes casos, o valor do PHFT_{UH} para o C12 foi de expressivos 95,95% e o somatório das cargas térmicas totais resultou em 249 kWh.

Quadro 31. Resultados para estratégias de eficiência energética em Brasília.

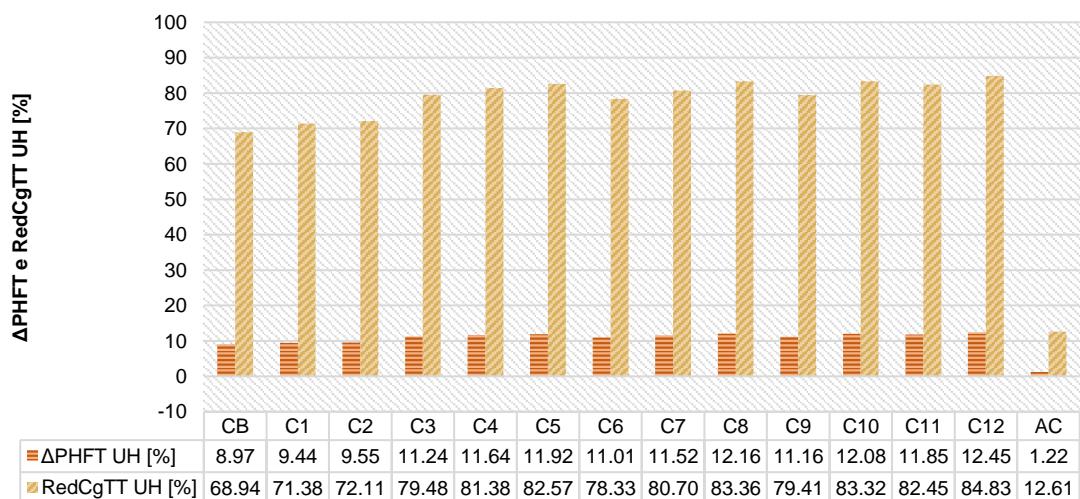
Casos	Tomáx _{UH} [°C]	Tomín _{UH} [°C]	PHFT _{UH} [%]	CgTT _{UH} [kWh]	Desempenho térmico final da UH
C1	29,08	19,08	92,94	470	SUPERIOR

C2	29,03	19,06	93,05	458	SUPERIOR
C3	28,73	19,09	94,74	337	SUPERIOR
C4	28,59	19,11	95,14	305	SUPERIOR
C5	28,53	19,16	95,42	286	SUPERIOR
C6	28,81	19,15	94,51	356	SUPERIOR
C7	28,65	19,13	95,02	317	SUPERIOR
C8	28,54	19,19	95,66	273	SUPERIOR
C9	28,68	19,11	94,66	338	SUPERIOR
C10	28,49	19,14	95,58	274	SUPERIOR
C11	28,53	19,09	95,35	288	SUPERIOR
C12	28,41	19,13	95,95	249	SUPERIOR

Fonte: A autora (2023).

Quando comparados os resultados do $\Delta\text{PHFT}_{\text{UH}}$ e da $\text{RedCgTT}_{\text{UH}}$ para cada caso, e com o caso base (CB) e de alvenaria (AC), nota-se que o C12 ainda apresenta os maiores valores para os dois parâmetros avaliativos, contando com um incremento no PHFT da UH de 12,45% em relação a UH de referência e uma redução da CgTT_{UH} de 84,83%. O C8 fica logo atrás nos resultados devido a apresentar valores muito semelhantes, 12,16% e 83,36% respectivamente, o que pode estar relacionado com a maior associação de massa térmica na cobertura, o que acaba por dificultar as trocas de calor entre o exterior e interior através desse elemento. A Figura 41 demonstra o que foi descrito.

Figura 41. Resultados das estratégias de eficiência energética para Brasília.



Fonte: A autora (2023).

Pode-se observar ainda que em comparação ao caso de alvenaria convencional, todos os modelos de CLT apresentaram resultados mais satisfatórios de desempenho térmico para a envoltória da UH, o que reforça o potencial de uso do CLT para o clima da cidade de Brasília.

4.2.3 Rio de Janeiro

Os resultados das novas simulações termoenergéticas realizadas para a cidade do Rio de Janeiro (ZB 8 e Intervalo 1) mantiveram em totalidade o nível mínimo de desempenho térmico. Os valores dos parâmetros avaliativos apresentaram-se sempre superiores aos da edificação de referência e, em geral, os melhores casos analisados para esta cidade foram o C12 e o C8, os quais incorporaram paredes mais leves com e sem isolamento, respectivamente, e laje mais espessa com associação de isolamento 60 mm. Para o primeiro caso, a Tomáx e a CgTT_{UH} foram os parâmetros que atingiram melhores resultados, sendo estes, respectivamente, 32,57 °C e 2.619 kWh. Já o C8, apresentou pouca variação em relação a esses dois parâmetros citados, porém contou com um PHFT_{UH} de 60,13%, superior ao C12 em quase 1%.

O Quadro 32 demonstra os resultados obtidos para o Rio de Janeiro, sendo importante salientar que por se tratar da ZB 8, de acordo com a NBR 15.575 (ABNT, 2021), a avaliação do critério das temperaturas operativas analisa apenas a variação da Tomáx.

Quadro 32. Resultados para estratégias de eficiência energética no RJ.

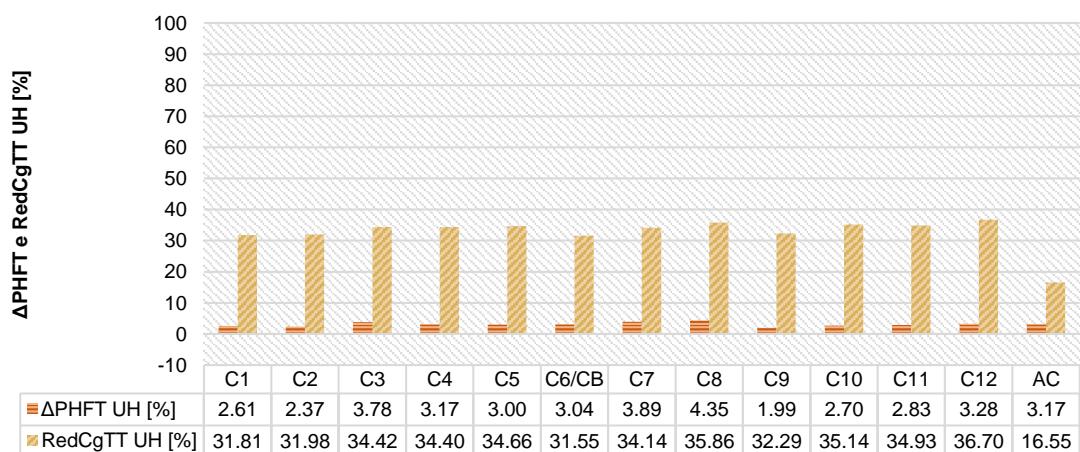
Casos	Tomáx _{UH} [°C]	Tomín _{UH} [°C]	PHFT _{UH} [%]	CgTT _{UH} [kWh]	Desempenho térmico final da UH
C1	33,06	Não analisada	58,39	2821	MÍNIMO
C2	32,98	Não analisada	58,15	2814	MÍNIMO
C3	32,94	Não analisada	59,56	2713	MÍNIMO
C4	32,77	Não analisada	58,95	2714	MÍNIMO
C5	32,68	Não analisada	58,78	2706	MÍNIMO
C6	Caso Base				MÍNIMO
C7	33,02	Não analisada	59,67	2725	MÍNIMO

C8	32,82	Não analisada	60,13	2654	MÍNIMO
C9	33,01	Não analisada	57,77	2802	MÍNIMO
C10	32,71	Não analisada	58,48	2683	MÍNIMO
C11	32,78	Não analisada	58,61	2692	MÍNIMO
C12	32,57	Não analisada	59,06	2619	MÍNIMO

Fonte: A autora (2023).

Quando analisado o gráfico comparativo da Figura 42, pode-se observar que os valores do critério do $\Delta\text{PFHT}_{\text{UH}}$ apresentam-se inferiores em alguns casos quando comparados à alvenaria, devido, principalmente, ao incremento de massa térmica no elemento das paredes, como nos casos C1 e C2. O melhor caso analisado neste critério (C8) apresentou um pequeno incremento no PHFT da UH de 4,35% em relação à referência. Ao analisar as reduções das cargas térmicas, nota-se que, em sua totalidade, os casos de CLT continuam apresentando resultados mais expressivos que o caso de alvenaria, chegando a atingir níveis intermediários de desempenho térmico, porém não sendo suficientes para elevar o nível total de desempenho da UH, o qual se manteve como mínimo na classificação geral. A maior RedCgTT_{UH} foi observada para o C12 cujo valor foi de 36,70%. O C8 fica na segunda posição neste quesito, com valor de 35,85%, e o C10 na terceira posição, com 35,14%, justificando que os melhores resultados estariam relacionados à associação de maior massa térmica e isolamento na cobertura.

Figura 42. Resultados das estratégias de eficiência energética para o RJ.



Fonte: A autora (2023).

Vale salientar que, igualmente aos resultados apresentados no item 4.1.3, em termos de eficiência energética, apesar de não atenderem aos níveis mais elevados de desempenho térmico para a cidade do Rio de Janeiro, as envoltórias de CLT apresentam resultados satisfatórios, principalmente em relação às reduções de carga térmica quando comparadas à envoltória de alvenaria convencional. Além disso, apesar de nem sempre apresentarem PHFT superior à alvenaria, as edificações de CLT apresentam alto potencial de utilização pelo viés sustentável de sua matéria-prima.

4.2.4 Recife

Igualmente ao Rio de Janeiro, os resultados das novas simulações termoenergéticas realizadas para a cidade do Recife (ZB 8 e Intervalo 2) mantiveram em totalidade o nível mínimo de desempenho térmico. Os casos que apresentaram melhores valores para a Tomáx, PHFT_{UH} e CgTT_{UH} foram o C5, C8 e C12, respectivamente, com valores de 32,32°C, 42,85% e 4.804 kWh. O Quadro 33 demonstra todos os resultados para os casos simulados desta cidade.

Quadro 33. Resultados para estratégias de eficiência energética em Recife.

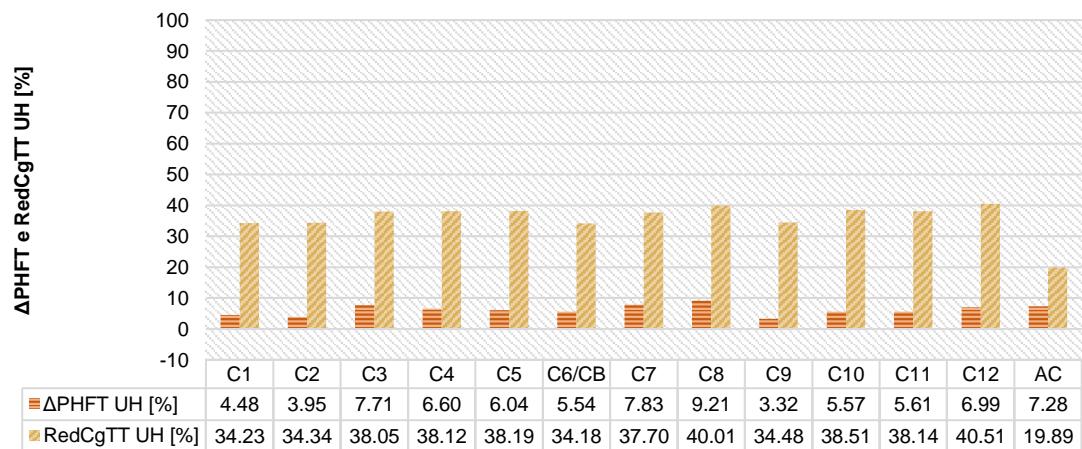
Casos	Tomáx _{UH} [°C]	Tomín _{UH} [°C]	PHFT _{UH} [%]	CgTT _{UH} [kWh]	Desempenho térmico final da UH
C1	32,44	Não analisada	38,12	5312	MÍNIMO
C2	32,42	Não analisada	37,59	5303	MÍNIMO
C3	32,41	Não analisada	41,35	5003	MÍNIMO
C4	32,34	Não analisada	40,24	4998	MÍNIMO
C5	32,32	Não analisada	39,68	4992	MÍNIMO
C6	Caso base				MÍNIMO
C7	32,39	Não analisada	41,47	5032	MÍNIMO
C8	32,34	Não analisada	42,85	4845	MÍNIMO
C9	32,51	Não analisada	36,96	5292	MÍNIMO
C10	32,41	Não analisada	39,21	4966	MÍNIMO
C11	32,39	Não analisada	39,25	4996	MÍNIMO
C12	32,33	Não analisada	40,63	4804	MÍNIMO

Fonte: A autora (2023).

Comparando-se os valores dos resultados obtidos para os parâmetros avaliativos da Figura 43, pode-se observar que os valores da redução de carga térmica nas UH de CLT sempre se mantêm acima da UH de alvenaria, apresentando variação máxima de mais de 20% quando comparados os resultados com o melhor caso C12, por exemplo. Os casos C1 e C2 apresentam os piores resultados para o ΔPHFT , com valores de 4,48% e 3,95%, o que possivelmente se deve à maior espessura das paredes de CLT fazer aumentar sua massa e resistência térmica, dificultando as trocas de calor da edificação com o meio externo, mantendo as temperaturas internas elevadas por um período mais longo de horas.

Por outro lado, os valores do incremento no PHFT_{UH} apresentam melhores valores apenas quando as paredes se mantêm mais finas e sem isolamento e são associadas a uma cobertura mais pesada e isolada, como nos casos C8, C7 e C3.

Figura 43. Resultados das estratégias de eficiência energética para o Recife.



Fonte: A autora (2023).

Para o caso do Recife, portanto, também é válido salientar que em termos de eficiência energética, apesar de não atenderem aos níveis mais elevados de desempenho térmico, as envoltórias de CLT apresentam resultados satisfatórios, principalmente em relação às reduções de carga térmica quando comparadas à envoltória de alvenaria convencional. Além disso, as edificações de CLT

apresentam alto potencial sustentável para sua utilização, principalmente devido a sua matéria-prima prover de fontes renováveis.

4.2.5 Teresina

Diferentes das outras cidades, os resultados das novas simulações para a cidade de Teresina não foram satisfatórios para todos os casos. Os casos C1, C2, C4, C5 e C9 não atingiram o nível mínimo obrigatório de desempenho térmico exigido, devido aos valores de PHFT apresentarem-se inferiores a até 90% do valor do PHFT da UH de referência (6,85%), conforme determina a NBR 15.575 (ABNT, 2021). O caso que apresentou melhor valor para este parâmetro avaliativo foi o C8, contando com um PHFT de 9,68%, sendo seguido pelo C7, com 9,44%, ambos associados a paredes leves e sem isolamento e lajes pesadas com isolamento. Para os parâmetros de Tomáx e CgTT_{UH} o melhor caso avaliado foi o C12, com Tomáx de 33,79 °C e um consumo total de cargas térmicas de 4.157 kWh, conforme apresenta o Quadro 34.

Quadro 34. Resultados para estratégias de eficiência energética em Teresina.

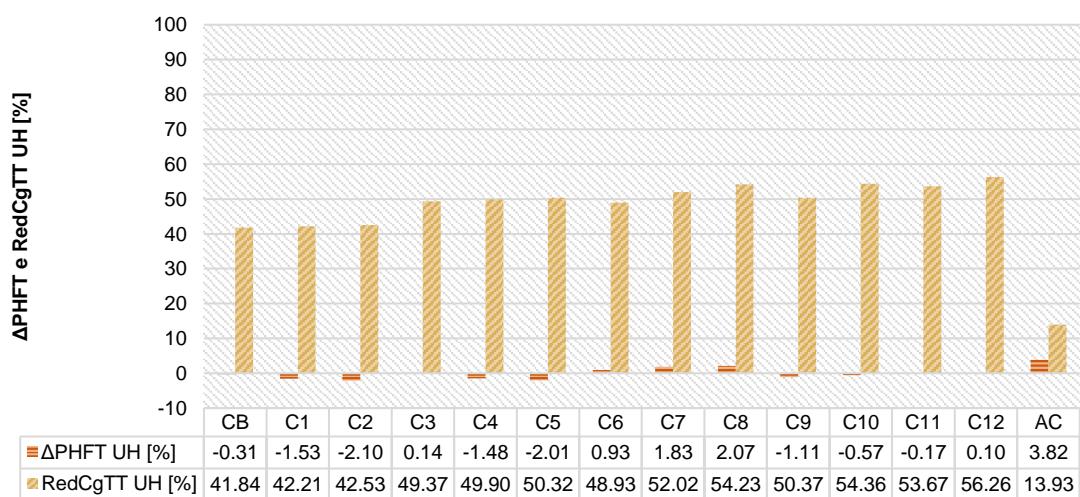
Casos	Tomáx _{UH} [°C]	Tomín _{UH} [°C]	PHFT _{UH} [%]	CgTT _{UH} [kWh]	Desempenho térmico final da UH
C1	34,46	Não analisada	6,08	5493	NÃO ATENDE O MÍNIMO
C2	34,41	Não analisada	5,51	5463	NÃO ATENDE O MÍNIMO
C3	34,10	Não analisada	7,47	4812	MÍNIMO
C4	33,97	Não analisada	6,18	4762	NÃO ATENDE O MÍNIMO
C5	33,91	Não analisada	5,60	4722	NÃO ATENDE O MÍNIMO
C6	34,19	Não analisada	8,54	4854	MÍNIMO
C7	34,03	Não analisada	9,44	4560	MÍNIMO
C8	33,92	Não analisada	9,68	4350	MÍNIMO
C9	34,07	Não analisada	6,50	4717	NÃO ATENDE O MÍNIMO
C10	33,86	Não analisada	7,04	4338	MÍNIMO
C11	33,92	Não analisada	7,44	4404	MÍNIMO
C12	33,79	Não analisada	7,71	4157	MÍNIMO

Fonte: A autora (2023).

Na Figura 44 é possível identificar os valores dos incrementos do PHFT_{UH} e as reduções de carga térmica total de todos os casos. Nota-se que todos os casos de CLT apresentam valores superiores em relação a RedCgTT_{UH}, os quais atingem o nível intermediário de desempenho térmico para este parâmetro avaliativo, com exceção do C12 o qual consegue atingir o nível superior. Por outro lado, ao analisar os valores dos incrementos no PHFT_{UH} de cada caso observa-se vários valores negativos e verifica-se que todos apresentam-se abaixo dos valores da UH de alvenaria convencional, sendo o pior caso avaliado o C2, o qual conta com maior espessura de CLT (105 mm) nas paredes e laje com 120 mm, sem isolamento.

De acordo com o exposto, os piores resultados relacionam-se, portanto, com o aumento da massa térmica nos elementos das paredes, ou seja, aumentando a espessura dos painéis de CLT. Os melhores resultados, ainda que o PHFT apresente valores baixos, estão relacionados com o aumento da massa térmica e isolamento na cobertura, o que dificulta as trocas de calor através deste elemento, e com o mantimento das paredes leves e sem isolamento para facilitar as trocas de calor entre o meio externo e interno.

Figura 44. Resultados das estratégias de eficiência energética para Teresina.



Fonte: A autora (2023).

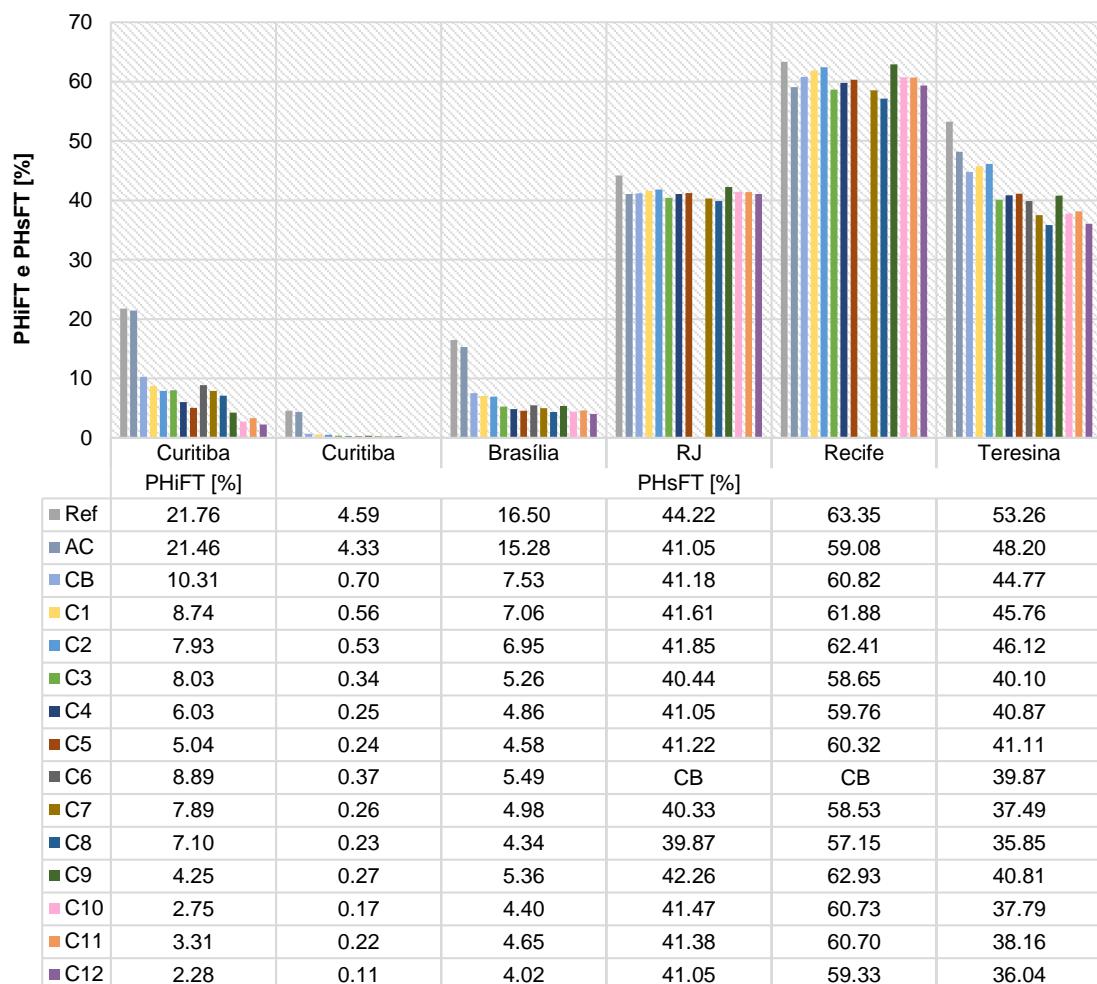
É pertinente salientar, portanto, que para a cidade de Teresina seria imprescindível aliar outras estratégias bioclimáticas, como possivelmente

maiores aberturas para ventilação, maior possibilidade de ventilação cruzada e sombreamento da edificação, para que se consiga atingir melhores níveis de desempenho térmico geral para a UH.

4.3 PARÂMETROS INFORMATIVOS DO PROCEDIMENTO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Os resultados dos parâmetros informativos de PHsFT e PHiFT para todos os casos simulados são apresentados na Figura 45. Vale salientar que o valor do PHiFT foi analisado apenas para Curitiba, pois foi a única cidade que apresentou temperaturas abaixo dos 18 °C estabelecidos como mínimos para a faixa de temperatura operativa do Intervalo 1.

Figura 45. PHiFT e PHsFT de todos os casos simulados.



Fonte: A autora (2023).

É possível observar que, para as frações de horas ao longo do ano em que a UH se encontra ocupada e com temperaturas acima ou abaixo às estabelecidas pela faixa de temperatura da Tabela 2, os modelos de CLT apresentam resultados melhores do que o modelo de referência em sua totalidade, sendo bastante expressivos nas cidades de Brasília e Curitiba, as quais apresentam climas com maiores amplitudes térmicas.

Em Curitiba em especial, ao analisarmos os valores de PHiFT, podemos verificar que eles são quase nulos na maioria dos casos, o que reforça o potencial de uso do CLT em regiões de climas mais frios.

Quando comparados os resultados com a UH de alvenaria convencional (AC), observa-se que a grande maioria dos modelos de CLT alcança valores inferiores, com algumas exceções, principalmente nas cidades do Rio de Janeiro e Recife. Isso significa que substituir residências construídas em alvenaria por construções em CLT é melhor do ponto de vista da eficiência energética.

Em Teresina, apesar de alguns casos não atingirem sequer o nível geral mínimo para o desempenho térmico da edificação, é possível notar que o percentual de horas de desconforto é menor, em totalidade, do que nos casos da referência e da alvenaria convencional. Tal observação vem a reforçar que a associação de outras estratégias passivas de eficiência energética poderia contribuir para elevar o desempenho térmico e potencial de utilização do CLT nas regiões mais quentes.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho analisou o desempenho térmico de um sistema construtivo de madeira engenheirada de CLT, por meio de simulações computacionais, quando aplicado à uma tipologia habitacional unifamiliar térrea, localizada em cinco cidades brasileiras de diferentes zonas bioclimáticas, sendo elas: Curitiba (ZB 1), Brasília (ZB 4), Rio de Janeiro (ZB 8), Recife (ZB 8) e Teresina (ZB 7). Para tal, foi utilizado o programa de simulação computacional *EnergyPlus*, em sua versão 23.1.0, e as regulamentações da norma brasileira de desempenho de habitações residenciais, a NBR 15.575-1 (ABNT, 2021). As simulações foram realizadas sob duas condições, uma com ventilação natural e outra com condicionamento artificial e foram comparados os valores de temperaturas operativas máxima (Tom_áx) e mínima (Tom_{ín}) no interior da edificação, o percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa (PHFT) e as cargas térmicas totais (CgTT) de cada modelo.

Após selecionar e apresentar a tipologia habitacional a ser estudada, além dos climas e condições de contorno das simulações, foram configurados os modelos geométricos para realizar as avaliações de desempenho termoenergéticas. Primeiramente, simularam-se dois casos base, um de CLT e outro de alvenaria convencional, os quais foram comparados a um modelo de referência (configurado conforme recomendações da normativa), e também entre si. Essa análise constatou que nas cidades de Curitiba e Brasília, ambas pertencentes ao Intervalo 1 da NBR 15.575:2021, o modelo de CLT apresentou valores superiores de desempenho térmico em relação à edificação de referência, e um aumento significativo no PHFT_{UH} e RedCgTT_{UH} quando comparado ao modelo de alvenaria convencional. No Rio de Janeiro, cidade também pertencente ao Intervalo 1, porém localizada na ZB 8, o modelo de CLT, apesar de apresentar valores mais satisfatórios para todos os parâmetros avaliativos, obteve apenas níveis mínimos de desempenho térmico quando comparado à referência. Por outro lado, quando comparados os resultados com o modelo de alvenaria, o qual também manteve nível mínimo de desempenho, apenas os valores da Tom_áx e da CgTT_{UH} foram superados pelo CLT. Já no Recife e em Teresina, cidades pertencentes ao Intervalo 2 e 3 da normativa,

respectivamente, o caso base de CLT manteve níveis mínimos de desempenho térmico em todos os casos quando comparado à referência, com valores mais satisfatórios que esta, porém em comparação à alvenaria, apenas superou os valores de Tomáx e das reduções das cargas térmicas totais da UH, apresentando um $\Delta\text{PHFT}_{\text{UH}}$ inferior a esta em ambos os casos.

Na sequência, com o intuito de verificar possibilidades de melhorar o desempenho térmico da edificação e verificar qual elemento construtivo poderia influenciar mais nesta avaliação, foram configurados e simulados outros doze modelos com diferentes configurações para os painéis de vedação vertical e horizontal de CLT, sendo estes associados ou não a uma camada de isolamento térmico de 30 ou 60 mm de lá de rocha.

Os resultados para essas novas configurações, igualmente ao cenário anterior nas cidades com clima mais ameno, apresentaram os melhores valores para os parâmetros avaliativos. Em Curitiba e Brasília, o caso C12 (paredes externas com CLT 80 mm e 30 mm de isolante, paredes internas simples de CLT 80mm, e laje de CLT de 200 mm com isolamento de 60 mm) foi o que obteve melhores índices de desempenho térmico, alcançando nível superior em relação à referência, com valores expressivos de $\Delta\text{PHFT}_{\text{UH}}$ correspondentes a 97,70% e 95,95%, respectivamente. As RedCgTT_{UH} também foram bastante significativas para este caso, atingindo valores de 97,36% em Curitiba e 84,83% em Brasília. No Rio de Janeiro, dois casos obtiveram os melhores resultados, o C8 (CLT 80 mm nas paredes e laje de 200 mm com isolamento 60 mm) e o C12, sendo que o primeiro deles atingiu melhores valores em relação ao $\Delta\text{PHFT}_{\text{UH}}$, que correspondeu a 60,13%, e o segundo obteve resultados melhores para a Tomáx e para a RedCgTT_{UH}, com valores de 32,57°C e 36,70%, respectivamente. Apesar das reduções das cargas térmicas nos casos C8 e C12 atingirem valores para enquadramento em um nível intermediário de desempenho térmico, a edificação manteve-se com nível mínimo em sua totalidade devido ao ΔPHFT ter sido mínimo nos dois casos. Isso indica que o sistema construtivo em madeira apresenta maior atraso térmico nas trocas de calor com o meio externo, mantendo o resfriamento interno da edificação por mais tempo. No Recife, o C8 também apresentou melhores valores para o $\Delta\text{PHFT}_{\text{UH}}$ no interior da edificação (42,85%) e o C12 para as reduções das cargas térmicas (40,51%), porém o C5

(CLT 105 mm nas paredes e laje CLT 200 mm com isolamento de 30 mm), apesar de pouca variação, foi o caso que registrou a menor Tomáx, com valor de 32,32°C. Apesar da RedCgTT_{UH} atingir nível intermediário de desempenho térmico, devido ao PHFT_{UH} apresentar valores inferiores, a UH em geral se restringiu ao nível mínimo. Por fim, para a cidade de Teresina, os melhores casos igualaram-se aos do RJ, sendo o C8 com melhores valores de PHFT_{UH} (9,68%) e o C12 com a RedCgTT_{UH} (56,26%), conseguindo atingir nível superior de desempenho neste último critério, porém mantendo-se no nível mínimo de desempenho térmico quando realizada a avaliação geral da UH. Os casos C1, C2, C4, C5 e C9 não atingiram o nível mínimo exigido pela NBR 15.575 (ABNT, 2021), pois o PHFT_{UH} apresentou valores menores do que os 90% do PHFT_{UH}, ref. Isso se deve, principalmente, à associação de mais massa térmica nos elementos construtivos das paredes, prejudicando as trocas de calor entre o meio externo e interno, uma vez que não houve modificações nos parâmetros de aberturas da edificação para maior possibilidade de trocas de ar, por exemplo.

Em uma última etapa, com finalidades informativas, foi realizada a verificação dos percentuais de horas superiores e inferiores à faixa de temperatura operativa, PHsFT e PHiFT, respectivamente, para todos os casos simulados. Os resultados obtidos constataram que nas cidades de clima mais ameno, como Curitiba e Brasília, os valores de PHsFT são bastante baixos, sendo que o PHiFT (que só pôde ser analisado para Curitiba) foi quase nulo em todos os casos. Já as cidades com climas mais quentes apresentam valores mais expressivos de PHsFT, o que demonstra que há um percentual elevado de desconforto térmico no interior da edificação. Por isso, pode-se apontar que seria imprescindível associar outras estratégias passivas de conforto térmico, como modificação nas aberturas, sombreamento da edificação e absorção solar dos materiais, a fim de minimizar o uso do condicionamento térmico e elevação do consumo de cargas térmicas para refrigeração.

De modo geral, os resultados obtidos nesta pesquisa corroboram com outros estudos que indicam uma elevada capacidade de isolamento e resistência térmica da madeira, devido a sua baixa condutividade térmica. Existem significativos benefícios provenientes do uso de estratégias de desempenho térmico e uso eficiente de energia em habitações, os quais estão ligados com a

melhoria na qualidade de vida da população ao residirem em um ambiente agradável e que ofereça boas condições de conforto térmico. Soma-se a isso a significativa redução dos impactos ambientais quando são utilizados recursos naturais renováveis na construção civil, como no caso do CLT em substituição à alvenaria convencional, pois essa atitude reduz substancialmente a geração de resíduos sólidos e emissão de dióxido de carbono produzidos pelo setor. Além disso, a redução no consumo energético promove a longo prazo uma economia financeira nas despesas com tarifa de energia elétrica, por exemplo, o que poderia vir a compensar, a longo prazo, investimentos realizados na fase de construção das habitações.

Assim sendo, sob uma ótica global, a substituição do uso da alvenaria convencional pelo sistema construtivo de CLT nas habitações se vê viável para todas as análises realizadas, mesmo nos casos em que o desempenho térmico verificado não tenha atingido níveis mais elevados. Para esses casos, as variações nos parâmetros de eficiência energética entre o CLT e a alvenaria não apresentaram valores substanciais, o que justificaria a substituição dos materiais diante da escolha por premissas mais responsáveis sustentavelmente, levando em consideração o atual cenário de mudanças climáticas. Ademais, conforme visto, uma construção em CLT apresenta reduções significativas no tempo de construção, devido à racionalização das etapas e pré-fabricação dos elementos, bem como em economias possíveis consideráveis de mão-de-obra.

Cabe ressaltar que este estudo investigou o sistema construtivo de CLT no âmbito do desempenho térmico e eficiência energética e, para que ele seja consolidado como uma alternativa atrativa para a construção de edificações, seria necessário averiguar o seu processo construtivo de um modo geral, englobando estudos de estabilidade, durabilidade e segurança. Além disso, se faz importante citar algumas das limitações que foram encontradas no desenvolvimento desta pesquisa, sendo elas: I) consideração de apenas um modelo representativo de habitação residencial brasileira; II) condicionamento da mesma orientação solar para todas as simulações; III) escolha de apenas de cinco cidades e climas brasileiros, bem como de quatro zonas bioclimáticas; IV) simulação da habitação como uma unidade habitacional isolada no lote, sem considerar possíveis sombreamentos e desvios ou canalizações do vento em

decorrência de elementos do entorno urbano; V) consideração de um mesmo padrão de uso e ocupação da habitação, sugeridas pela normativa, o que pode não refletir a realidade em relação a esses parâmetros para outras habitações; VI) existência de limitações correspondentes aos arquivos climáticos utilizados, bem como algoritmos do programa *EnergyPlus*, correspondentes a elementos específicos de transferência de calor, condução, convecção e radiação térmica, por exemplo; VII) embasamento dos valores dos parâmetros termofísicos dos materiais em catálogos de fornecedores ou de normativas vigentes; VIII) limitação do uso de algumas possíveis configurações para o sistema construtivo de CLT; IX) validade dos resultados apenas para as configurações das envoltórias e tipologia de habitação escolhida, assim como para os climas brasileiros utilizados.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros a autora sugere: I) replicar a metodologia para outras cidades, com diferentes climas e zonas bioclimáticas; II) considerar outras tipologias habitacionais, bem como diferentes orientações solares; III) estabelecer a associação de estratégias passivas de desempenho térmico e eficiência energética, sobretudo para os climas mais quentes; IV) alterar os padrões de uso e ocupação; V) variar a composição da envoltória, diferindo as espessuras do CLT, do isolamento e os materiais de acabamento; VI) realizar testes em laboratório de amostras de painel CLT para obter valores de parâmetros termofísicos com maior precisão; VII) realizar estudos de viabilidade financeira do sistema construtivo quando comparado aos sistemas tradicionais, levando em consideração o ciclo de vida das edificações, o qual visa avaliar os impactos das edificações em toda sua vida útil, desde a extração dos recursos naturais, fabricação dos materiais, montagem/construção, operação e manutenção, demolição e destinação dos recursos.

REFERÊNCIAS

- ALBATICI, R.; GADOTTI, A.; ROSSA, G.; FRATTARI, A. *Comparison of thermal comfort conditions in multi-storey timber frame and cross-laminated residential buildings*. **Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering**, 2017. <http://dx.doi.org/10.5755/j01.sace.19.2.17531>.
- ALVES, Elson Fabiano. **Norma de desempenho NBR 15.575**: introdução e histórico. 2021. Disponível em: <https://www.inteligenciaurbana.org/2021/06/norma-desempenho-nbr-15575.html>. Acesso em: 02 de out. 2022.
- AMATA. **Conheça o processo de fabricação da madeira engenheirada**. 2020. Disponível em: <https://amatabrasil.com.br/da-floresta-para-a-cidade/>. Acesso em: 25 de set. 2022.
- ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers. **ANSI/ASHRAE 90.2-2018: Energy-Efficient Design Of Low-Rise Residential Buildings**. Atlanta, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15.220**: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005.
- _____. **NBR 15.575**: Edificações habitacionais – desempenho. Rio de Janeiro, 2021.
- _____. **NBR 7190**: Projetos de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 2022.
- ASSUNÇÃO, Juliano; SCHUTZE, Amanda; BROLHATO, Sara. **Panorama e desafios da eficiência energética no Brasil**. Climate Policy Initiative. Núcleo de Avaliação de Políticas Climáticas. PUC-Rio, 2018.
- BANDHARI, S.; RIGGIO, M.; JAHEDI, S.; FISCHER, E. C.; MUZSYNSKI, L.; LUO, Z. *A review of modular cross laminated timber construction: Implications for temporary housing in seismic areas*. **Journal of Building Engineering**, v. 63, Part A, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105485>.
- BAUER, L. A. Falcão. **Materiais de construção**. v. 2. 5. ed. revisada. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- BRANCO, Jorge M. Casas de madeira: Da tradição aos novos desafios. In: SEMINÁRIO CASAS DE MADEIRA, Lisboa, 2013. **Casas de madeira**. ISISE - Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães, 2013. Capítulo de livro, p 75-86. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1822/23748>. Acesso em: 05 de mar. 2022.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Quem é Quem da Eficiência Energética no Brasil**. 2020.

_____. **Portaria Inmetro nº 18, de 16 de janeiro de 2012.** Aprova a revisão do Regulamento Técnico da Qualidade para a Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R). Rio de Janeiro, 2012.

_____. **Portaria Inmetro nº 309, de 06 de setembro de 2022.** Aprova as Instruções Normativas e os Requisitos de Avaliação da Conformidade para a Eficiência Energética das Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas e Residenciais (INI-R). Rio de Janeiro, 2022.

BULIGON, Liliane Bonadiman. **Comportamento higrotérmico e energético de painéis de vedação vertical externa em madeira para a Zona Bioclimática 2.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, RS, 2021. 145 p.

CAMBIASO, Fabiana; PIETRASANTA, Matteo Varioli. *Innovative Timber Construction: Sustainability and High Performance Building*. **International Journal of Engineering and Technology**, vol. 6, nº. 1, 2014.

CAVALHEIRO, Raquel S. **Madeira laminada colada de *Schizolobium amazonicum* Herb. (Paricá):** combinação adesivo/tratamento preservante. 2014. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2014.

CHANG, Seong Jin et al. Assessment of effect of climate change on hygrothermal performance of cross-laminated timber building envelope with modular construction. **Case Studies in Thermal Engineering**, 28, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101703>.

CHEN, Y.J. **Comparison of environmental performance of a five-storey building built with cross-laminated timber and concrete.** Sustainable Building Science Program, Department of Wood Science, University of British Columbia Vancouver, Canadá, 2012, p. 1–31.

CHO, Hyun Mi et al. Energy retrofit analysis of cross-laminated timber residential buildings in Seoul, Korea: Insights from a case study of packages. **Energy & Buildings**: 202, 2019a. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.07.046>.

CHO, Hyun Mi et al. Hygrothermal properties analysis of cross-laminated timber wall with internal and external insulation systems. **Journal of Cleaner Production**: vol. 231, 2019b, p. 1353-1363. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.197>.

COSTA, Ana Alexandra Pontes da. **Construção de edifícios com Cross Laminated Timber (CLT).** Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto. Porto, Portugal, 2013.

CROSSLAM. **Guia orientativo para uso e manutenção de estruturas MLC e CLT.** Suzano, São Paulo, 2020. Disponível em: <https://www.crosslam.com.br/site/downloads/>. Acesso em: 20 de jun. 2022.

_____. **Informações Técnicas**. Suzano, São Paulo, s.d. Disponível em: <https://www.crosslam.com.br/site/downloads/>. Acesso em: 20 de jun. 2022.

D'AMICO, B.; POMPONI, F.; HART, J. *Global potential for material substitution in building construction: The case of cross laminated timber*. **Journal of Cleaner Production**, v. 279, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123487>.

DOE – DEPARTMENT OF ENERGY. **Energyplus**. 2018. Disponível em: <http://energyplus.net>.

DOE – U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **EnergyPlus Version 22.2.0 Documentation**: Engineering Reference. 2022.

DUAN, Z.; HUANG, Q.; SUN, Q.; ZHANG, Q. *Comparative life cycle assessment of a reinforced concrete residential building with equivalent cross laminated timber alternatives in China*. **Journal of Building Engineering**, v. 62, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105357>.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Pinus**: perguntas e respostas. 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/florestas/pinus/perguntas-e-respostas>. Acesso em 29 de mai. 2023.

ELI, Letícia Gabriela et al. **Manual de Simulação Computacional de Edifícios com o Uso do Objeto Ground Domain no Programa EnergyPlus** - Versão 9.0.1. Florianópolis, Brasil. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Balanço Energético Nacional 2023**: Ano Base 2022. Rio de Janeiro, Brasil. 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>. Acesso em: 28 de set. 2023.

FARIA, José Amorim. **Madeira na construção**: o futuro promete. In: **6ª SEMANA DAS ENGENHARIAS**, Escola Superior de Tecnologia e de Gestão do Instituto Politécnico de Bragança, 2002.

FRANCO, J. T. A. **Madeira Laminada Cruzada (CLT) é o concreto do futuro?** 03 de ago. 2020. ArchDaily Brasil. (Trad. Souza, Eduardo). Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/922665/amadeira-laminada-cruzada-clt-e-o-concreto-do-futuro>. Acesso em 18 de set. 2023.

FRANÇA, Maria Engel; BOGO, Almicar José. Avaliação de conforto ambiental comparativa em edificações construídas em madeira laminada colada cruzada (Painéis CLT) e em sistemas construtivos tradicionais. **Labor & Engenho**, 2019. DOI: 10.20396/labore.v13i0.8654332.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO - FJP. **Déficit habitacional no Brasil – 2016-2019**. Fundação João Pinheiro. Belo Horizonte: FJP, 2021.

GUO, H.; LIU, Y.; CHANG W.; SHAO, Y.; SUN, C. *Energy saving and carbon reduction in the operation stage of cross laminated timber residential buildings in China*. **Sustainability**: 9, 292, 2017. <https://doi.org/10.3390/su9020292>.

IBGE. **Pesquisa nacional por amostra de domicílios**: PNAD. Características gerais dos domicílios e dos morados em 2018. Rio de Janeiro: IBGE, 2019.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **As árvores cultivadas e madeira na construção civil**: IBÁ, c2017. Disponível em: <https://iba.org/publicacoes/infograficos>. Acesso em: 13 de nov. 2021.

INMETRO. **Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (INI-R)**. PBE Edifica, c2020. Disponível em: <https://pbeedifica.com.br/inir>. Acesso em: 02 de out. 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **Buildings**. IEA, Paris, 2022a. Disponível em: <https://origin.iea.org/reports/buildings>. Acesso em 02 out. 2022.

..... **Data and Statistics**. IEA, Paris. 2022b. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics>. Acesso em: 28 mai. 2022.

..... **Cement**. IEA, Paris. 2022c. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/cement>. Acesso em: 07 out. 2022.

..... **The Future of Cooling**: Opportunities for energy-efficient air conditioning. IEA, Paris, 2018. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling>. Acesso em: 01 out. 2022.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO. **ISO 52000-1**: Energy Perfomance of Buildings. Genebra, 2017.

IZZI, M.; CASAGRANDE, D.; BEZZI, S.; PASCA, D.; FOLLESA, M.; TOMASI, R. *Seismic behaviour of Cross-Laminated Timber structures: A state-of-the-art review*. **Engineering Structures**, v. 170, p. 42-52, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.060>.

KHAVARI, Ali M. et al. Energy consumption analysis of multistory cross-laminated timber residential buildings: a comparative study. **Journal of Architectural Engineering**, 2016. DOI: 10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000206.

KUZMAN, M. K.; KLARIC, S.; BARCIC, A. P.; VLOSKY, R. P.; JANAKIESKA, M. M.; GROSELJ, P. Architect perceptions of engineered wood products: An exploratory study of selected countries in Central and Southeast Europe. **Construction and Building Materials**, v. 179, p. 360-370, 2018.

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES – LabEEE. **NBR 15.575-2021 – Desempenho térmico**. c2023. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/NBR15575-2020>. Acesso em: 07 set. 2023.

LEPAGE, E. S. (Coord.); et al. **Manual de Preservação de Madeiras**. Volume I. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT,

LINDT, John W. van de et al. *Experimental seismic behavior of a two-story CLT platform building*. **Engineering Structures**, v. 183, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.12.079>.

LIU, Y.; GUO, H., SUN, C.; CHANG, W. *Assessing cross laminated timber (CLT) as an alternative material for mid-rise residential buildings in cold regions in China: a life-cycle assessment approach*. **Sustainability**, 8, 1047, 2016. DOI:10.3390/su8101047.

MAKIE, B. Allan. **The owner-built log house**: living in harmony with your environment. Firefly Book, 2001.

MAZZAFERRO, Leonardo. **Análise das recomendações da ASHRAE Standard 90.1 para a envoltória de edificações comerciais**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2015.

McCLUNG, R.; GE, H.; STRAUBE, J.; WANG, J. *Hygrothermal performance of cross-laminated timber wall assemblies with built-in moisture: field measurements and simulations*. **Building and Environment**, v. 71, p. 95-110, 2014.

MEZEIRO, Rafaela Maria Marques. **Construir em madeira**: aplicabilidade de painéis CLT em habitação de média densidade em Portugal. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Arquitetura, Universidade de Lisboa, Portugal. Lisboa, 2018.

MORADPOUR, P.; PIRAYESH, H.; GERAMI, M.; JOUYBARI, I. R. *Laminated strand lumber (LSL) reinforced by GFRP; mechanical and physical properties*. **Construction and Building Materials**, v. 158, p. 236-242, 2018.

MÜLLER, Andreas. **Structural Design for Energy Efficient Multi-Story Timber Houses - State of the Art in Europe**. Bern University of Applied Sciences Biel, Switzerland, 2010.

NOCERA, F.; GAGLIANO, A.; DETOMMASO, M. *Energy Performance of cross-laminated timber panel (X-lam) buildings: A case study*. **Mathematical Modelling of Engineering Problems**, v. 5, p. 175-182, 2018. <https://doi.org/10.18280/mmep.050307>.

NUNES, Gustavo et. al. *Thermo-energetic performance of wooden dwellings: Benefits of cross-laminated timber in Brazilian climates*. **Journal of Building Engineering**, 2020.

OLIVEIRA, Gabriela Lotufo. **Cross Laminated Timber (CLT) no Brasil: processo construtivo e desempenho**: recomendações para o processo do projeto arquitetônico. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, 2018.

OLIVEIRA; G. L.; OLIVEIRA, F. L. de; BRAZOLIN, S. *Wood preservation for preventing biodeterioration of Cross Laminated Timber (CLT) panels assembled in tropical locations*. **Procedia Structural Integrity**, v. 11, p. 242-249, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.11.032>.

PALMER, S. et al. **Sustainable homes: timber frame housing**. Hasto Housing Association. Reino Unido, 2000.

PASSARELI, Rafael Novaes. **Cross Laminated Timber**: Diretrizes para projeto de painel maciço em madeira no estado de São Paulo. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2013.

PIZZONI, Cândida Pasini. **Vedações verticais externas do sistema plataforma em madeira**: medidas para manutenção. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC. 2015.

PROGRAMA BRASILEIRO DE ETIQUETAGEM DE EDIFICAÇÕES – PBE Edifica. **PBE Edifica**. c2020a. Disponível em: <https://pbeedifica.com.br/portariaconsolidada>. Acesso em 18 de set. 2023.

_____. **PBE – Programa Brasileiro de Etiquetagem**. c2020b. Disponível em: <https://www.pbeedifica.com.br/sobre>. Acesso em 18 de set. 2023.

SÁNCHEZ, José Enrique Peraza et al. **Casas de Madera**. Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y Corcho. AITIM. Madrid, Espanha, 1995.

SANTOS FILHO, V. M. Norma de Desempenho: uma visão da história e de seu atendimento no cenário atual da indústria da construção civil. **Revista Especialize On-line IPOG**. Goiânia, edição nº10, vol. 01, 2015.

SENTELHAS, Paulo Cesar et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, [s. l.], v. 22, n. 6, p. 711–728, 2014.

SETTER, L.; SMOORENBURG, E.; WIJESURIYA, S.; TABARES-VELASCO, P. C. *Energy and hygrothermal performance of cross laminated timber single-family homes subjected to constant and variable electric rates*. **Journal of Building Engineering**, 25, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100784>.

SILVA, Catarina; BRANCO, Jorge M.; LOURENÇO, Paulo B. **MLCC na construção em altura**. Congresso Construção 2012. Coimbra, Portugal, 2012.

SILVA, Tânia Sofia Barbosa. **Explorar a Potencialidade de um Edifício Construído com Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC)**: Da organização espacial interior à relação. Dissertação (Mestrado) - Escola de Arquitetura, Universidade do Minho, Portugal. 2014.

SORGATO, M.J.; MARINOSKI, D.L; MELO, A.P.; LAMBERTS, R. **Nota técnica referente à avaliação para a norma de desempenho NBR 15575 em consulta pública.** Florianópolis, 2012.

SOUZA, Andréa de; GUERRA, Jorge Carlos Correa; KRUGER, Eduardo Leite. Os programas brasileiros em eficiência energética como agentes de reposicionamento do setor elétrico. **Revista Tecnologia e Sociedade.** 1ª edição, 2011.

SUN, Xiaofeng; HE, Minjuan; LI, Zheng; LAM, Frank. *Seismic performance assessment of conventional CLT shear wall structures and post-tensioned CLT shear wall structures.* **Engineering Structures**, v. 196, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109285>.

THINKWOOD. **Construction types.** Disponível em: <https://www.thinkwood.com/light-frame-wood-construction>. Acesso em: 24 de set. 2022.

THOMAZ, Ana. Membrana Hidrófuga: o que é, para que serve e como aplicar. **Espaço Smart**, 2023. Disponível em: <https://conteudo.espacosmart.com.br/membrana-hidrofuga-o-que-e-para-que-servir-e-como-aplicar/>. Acesso em: 14 de jun. 2023.

TRIANA, M. A.; LAMBERTS, R.; SASSI, P. *Characterisation of representative building typologies for social housing projects in Brazil and its energy performance.* **Energy Policy**, v. 87, p. 524-541, 2015.

TORRES, João Tiago Caridade. **Sistemas Construtivos Modernos em Madeira.** Dissertação (Mestrado). FEUP, 2010.

URBEM. **Caderno de especificações técnicas e SKU da Indústria URBEM de Madeira Engenheirada.** Vol.1, 2022.

VAIRO, Maurizio; SILVA, Valdir Pignatta; ICIMOTO, Felipe Hideyoshi. *Behavior of cross-laminated timber panels during and after an ISO-fire: An experimental analysis.* **Results in Engineering**, v. 17, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.100878>.

VASSALO, D.; FOLLESA, M.; FRAGIACOMO, M. *Seismic design of a six-storey CLT building in Italy.* **Engineering Structures**, v. 175, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.08.025>.

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

WEISNER, F.; HADDEN, R.; DEENY, S.; BISBY, L. *Structural fire engineering considerations for cross-laminated timber walls.* **Construction and Building Materials**, v. 323, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126605>.

YOSHIDA, Henrique. **Saiba sobre o processo de tratamento da madeira engenheirada.** ReWood, 2022. Disponível em: <https://rewood.com.br/artigo/entenda-o-processo-de-acabamento-de-madeira-enganheirada-3>. Acesso em: 20 de set. 2022.

YOUNIS, Adel; DODOO, Ambrose. *Cross-laminated timber for building construction: A life-cycle-assessment overview*. **Journal of Building Engineering**, v. 52, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104482>.

**ANEXO A – QUADRO PARA INCREMENTO MÍNIMO DO PHFT_{UH, REAL} E
REDUÇÃO MÍNIMA DA CGTT_{UH, REAL} PARA O ATENDIMENTO AO NÍVEL DE
DESEMPENHO TÉRMICO INTERMEDIÁRIO**

Critério	$CgTT_{UH,ref} / A_{p,UH}$ kWh/(ano.m ²)	Tipologia			
		Unifamiliar	Multifamiliar		
		-	Pavimento téreo	Pavimento tipo	Pavimento cobertura
PHFT _{UH,ref} %	$CgTT_{UH,ref} / A_{p,UH}$ kWh/(ano.m ²)	$\Delta PHFT_{min}$ %			
PHFT _{UH,ref} < 70 %	Todos os valores	Obtido a partir do ábaco ou das equações da Figura 4			
PHFT _{UH,ref} ≥ 70 %	Todos os valores	0	0	0	0
PHFT _{UH,ref} %	$CgTT_{UH,ref} / A_{p,UH}$ kWh/(ano.m ²)	$RedCgTT_{min}$ %			
PHFT _{UH,ref} < 70 %	Todos os valores	0	0	0	0
PHFT _{UH,ref} ≥ 70 %	$CgTT_{UH,ref} / A_{p,UH} < 100$	17	15	22	15
	$CgTT_{UH,ref} / A_{p,UH} ≥ 100$	27	20	25	20

Fonte: ABNT (2021).

**ANEXO B – QUADRO PARA INCREMENTO MÍNIMO DO PHFT_{UH,REAL} E
REDUÇÃO MÍNIMA DA CGTT_{UH,REAL} PARA O ATENDIMENTO AO NÍVEL DE
DESEMPENHO TÉRMICO SUPERIOR**

Critério	$CgTT_{UH,ref} / A_{p,UH}$ kWh/(ano.m ²)	Tipologia			
		Unifamiliar	Multifamiliar		
		-	Pavimento téreo	Pavimento tipo	Pavimento cobertura
PHFT _{UH,ref} %	$CgTT_{UH,ref} / A_{p,UH}$ kWh/(ano.m ²)	$\Delta PHFT_{min}$ %			
PHFT _{UH,ref} < 70%	Todos os valores	Obtido a partir do ábaco ou das equações da Figura 4			
PHFT _{UH,ref} ≥ 70%	Todos os valores	0	0	0	0
PHFT _{UH,ref} %	$CgTT_{UH,ref} / A_{p,UH}$ kWh/(ano.m ²)	$RedCgTT_{min}$ %			
Todos os valores	$CgTT_{UH,ref} / A_{p,UH} < 100$	35	30	45	30
	$CgTT_{UH,ref} / A_{p,UH} \geq 100$	55	40	50	40

NOTA. O nível superior também pode ser obtido se o PHFT_{UH,real} do modelo real for maior ou igual a 95 %, juntamente com o atendimento ao critério de temperaturas anuais máxima e mínima (Tomáx_{UH} e Tomín_{UH}).

Fonte: ABNT (2021).

**ANEXO C – ÁBACO E EQUAÇÕES PARA A OBTENÇÃO DO $\Delta\text{PHFT}_{\text{MÍN}}$
QUANDO O $\text{PHFT}_{\text{UH,REF}}$ FOR INFERIOR A 70 %**

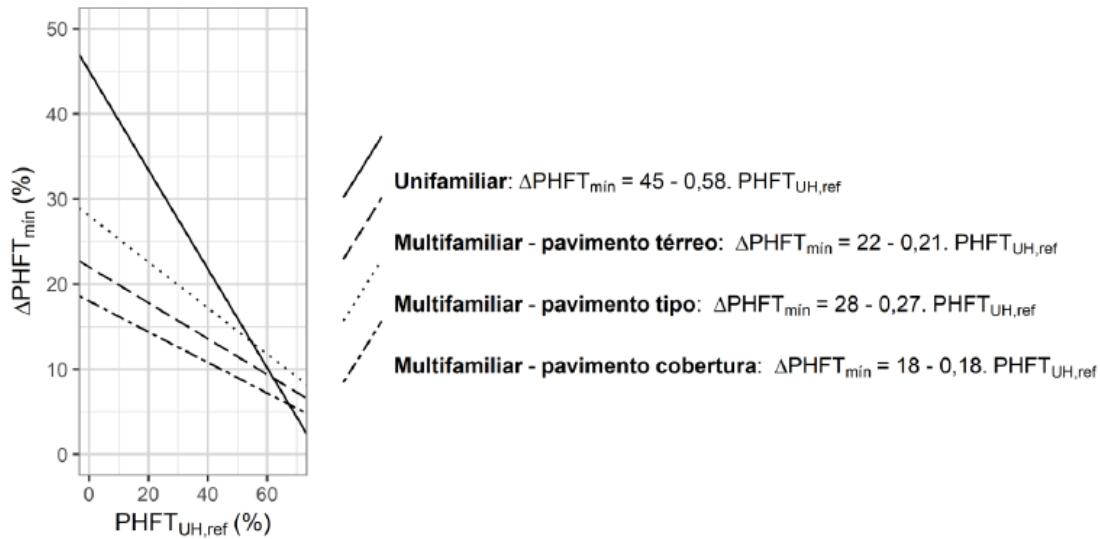


Figura 4 – Ábaco e equações para a obtenção do $\Delta\text{PHFT}_{\text{mín}}$ quando o $\text{PHFT}_{\text{UH,ref}}$ for inferior a 70 %

Fonte: ABNT (2021).