DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO DE HABITAÇÃO EM CLT POR MEIO DE SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS PARA DIFERENTES CLIMAS BRASILEIROS

Amanda Knop (1); Fernanda Perazzolo Disconzi (2)
(1) Arquiteta, Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, amandaknop@gmail.com.
(2) Doutora, Professora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, fernanda.disconzi@udesc.br.
Universidade do Estado de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil. Rua Paulo Malschitzki, 200. Zona Industrial Norte, Joinville / SC. CEP 89.219-710. Tel: (47)3481-7900.

RESUMO
Diante da necessidade do setor da construção civil em utilizar materiais renováveis, que minimizem os impactos ambientais e possam contribuir para o conforto térmico e redução do consumo de energia dos edifícios, vem se destacando o uso das madeiras engenheiradas como elementos construtivos para diferentes tipologias de edificações, em especial do CLT (*Cross Laminated Timber*). Assim sendo, se faz fundamental o estudo do desempenho térmico desses elementos, quando aplicados nas envoltórias das edificações. Este trabalho teve como objetivo analisar o desempenho termoenergético de um sistema construtivo de CLT de *Pinus taeda*, por meio de simulações computacionais para uma habitação, localizada em quatro cidades brasileiras de diferentes zonas bioclimáticas (ZB). Para isso, foi utilizado o programa de simulação computacional *EnergyPlus* versão 23.1.0 e as recomendações da normativa brasileira para o desempenho térmico de habitações, a ABNT NBR 15.575-1:2021. 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 para um modelo real e outro de referência. Os resultados apresentaram que nas cidades de clima mais ameno, como Curitiba (ZB 1) e Brasília (ZB 4), o CLT atingiu níveis superiores de desempenho térmico para a unidade habitacional, porém em cidades com climas mais quentes, como Recife (ZB 8) e Teresina (ZB 7), atingiu-se apenas o nível mínimo de desempenho térmico nas habitações. Concluiu-se que o CLT se apresenta como uma tecnologia promissora para habitações brasileiras energeticamente mais eficientes, principalmente em climas mais amenos, sendo necessário mais estudos sobre o seu comportamento térmico em climas mais quentes, a fim de promover níveis de desempenho mais satisfatórios.

Palavras-chave: desempenho termoenergético, madeira laminada cruzada, CLT, simulação computacional.

ABSTRACT
Given the need for the construction sector to use renewable materials that minimize environmental impacts and can contribute to thermal comfort and reduce energy consumption of buildings, the use of engineered wood as building elements for different types of buildings, especially of CLT (Cross Laminated Timber), has been highlighted. Therefore, it is essential to study the thermal performance of these elements when applied to the building envelope. This paper aimed to analyze the thermo-energetic performance of a CLT building system of *Pinus taeda* through computer simulations for a house located in four Brazilian cities in different bioclimatic zones (BZ). For this, were used the computer simulation program *EnergyPlus* version 23.1.0 and the recommendations of the Brazilian standard for the thermal performance of dwellings, ABNT NBR 15.575-1:2021. The values of temperature inside the dwelling, the percentage of occupancy hours within an operating temperature range, and the total thermal loads for a real model and a reference model were compared. The results showed that in cities with milder climates, such as Curitiba (BZ 1) and Brasilia (BZ 4) CLT achieved higher levels of thermal performance for the dwelling unit, but in cities with warmer climates, such as Recife (BZ 8) and Teresina (BZ 7), only the minimum level of thermal performance was achieved in the dwellings. It was concluded that CLT presents itself as a promising technology for more energy efficient Brazilian dwellings, especially in milder climates. Further studies on its thermal behavior in warmer climates are necessary in order to promote more satisfactory performance levels.

Keywords: thermo-energetic performance, cross laminated timber, CLT, computer simulation.

1. INTRODUÇÃO

O consumo de energia global vem aumentando significativamente ao longo dos anos. Dados divulgados pela *Internacional Energy Agency* (IEA, 2022), 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, 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, acima dos 30 % em 2010. Em particular, o resfriamento de ambientes registrou o maior aumento na demanda em 2021 em todos os usos finais dos edifícios, o que significou um aumento de mais de 6,5 % em relação a 2020 (IEA, 2022).

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, 2022). No Brasil, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2022), por meio do Balanço Energético Nacional 2022, estima que 26,4 % da eletricidade total consumida no país foi para atender edificações residenciais no ano de 2021, ocupando a segunda colocação em comparação aos demais setores. A variação em relação ao ano anterior foi de 1,09 % no consumo de eletricidade em residências.

Como forma de reduzir o acréscimo na demanda de energia das edificações, o documento intitulado *The Future of Cooling* (IEA, 2018), salienta a importância do projeto adequado quanto ao uso do espaço (relação entre o espaço interno e a área da superfície do edifício), pois esse fator afeta a taxa na qual o calor é transferido entre o interior e o exterior, bem como a quantidade de área de construção que está sujeita a ganhos de calor solar. Dessa maneira, 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 se faz essencial (IEA, 2018).

Quando se trata de sustentabilidade, especialmente na indústria da construção civil, Silva, Branco e Lourenço (2012) comentam sobre o potencial da utilização da madeira como forte aliada das políticas ambientais que visam diminuir as emissões de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera. A madeira, dentre os materiais empregados no setor, 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 o cimento consome 1.750 kWh/m³ para a produção de um metro cúbico, a 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.

Neste contexto, tem se destacado o uso promissor das madeiras engenheiradas como elementos construtivos para diferentes tipologias de edificações, em especial o da Madeira Laminada Colada Cruzada (MLCC), mais conhecida como *Cross Laminated Timber* (CLT), a qual consiste na sobreposição de lamelas de madeira maciça coladas em sentidos opostos e alternados, entremeados por adesivo estrutural. Os painéis de CLT são pré-fabricados já com aberturas para portas, janelas e dutos cortados com alta precisão por equipamentos roteadores em CNC, e 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 a inserção recente dos painéis de CLT no cenário da construção civil brasileira 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).

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é analisar o desempenho termoenergético de um sistema construtivo de CLT, por meio de simulações computacionais em uma tipologia de edificação residencial unifamiliar, localizada em quatro cidades brasileiras de diferentes zonas bioclimáticas.

3. MÉTODO

O método deste trabalho está dividido em cinco etapas principais:

1. Definição de um modelo geométrico representativo para a edificação residencial a ser simulada;

2. Seleção dos climas e cidades para a simulação, a fim de verificar o desempenho térmico da edificação para diferentes zonas bioclimáticas e intervalos de temperaturas externas;
3. Definição da composição do sistema construtivo de painéis CLT a ser utilizada na configuração da envoltória do modelo real;
4. Definição das condições de contorno para realizar as simulações termoenergéticas no *EnergyPlus*.
5. Avaliação e síntese dos resultados obtidos nas simulações computacionais.

3.1. Definição da tipologia da edificação

A tipologia utilizada neste trabalho consiste em 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. A perspectiva da residência, sua planta baixa e o esquema dos ambientes de permanência prolongada (APP) podem ser visualizadas na Figura 1, assim como as áreas úteis dos ambientes, conforme a geometria modelada no programa de simulação computacional.

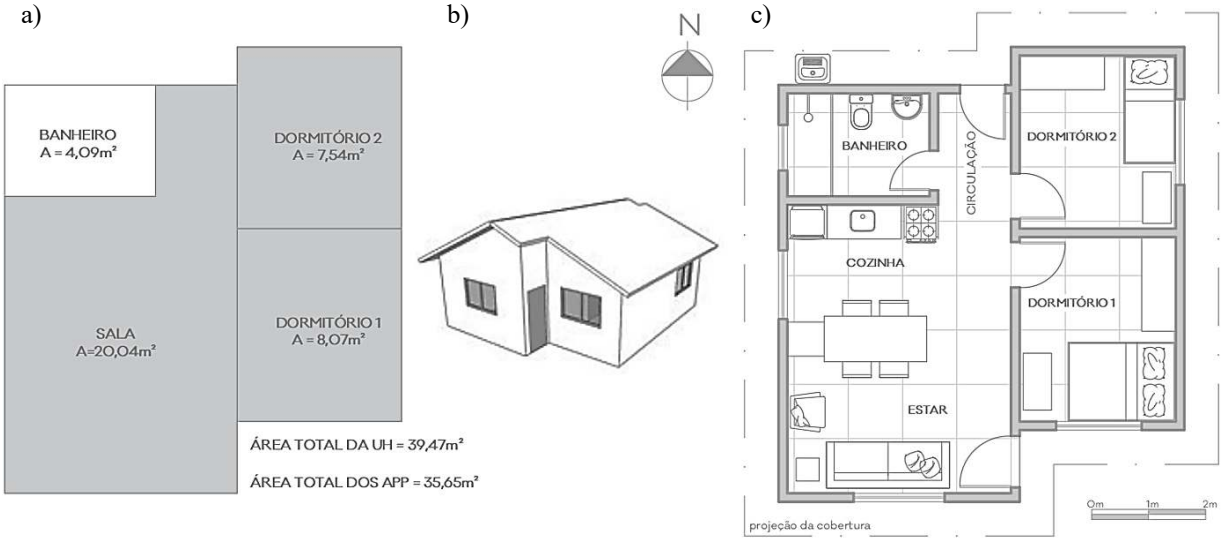


Figura 1 - Esquema dos APP(a); perspectiva da edificação(b); planta baixa(c) (Adaptado de TRIANA, LAMBERTS e SASSI, 2015).

Os parâmetros de entrada definidos para o caso base incluem características geométricas, levantadas por Triana, Lamberts e Sassi (2015), e definições presentes no método de simulação computacional para avaliação de desempenho térmico de edificações residenciais da NBR 15.575 (ABNT, 2021). As características da edificação modelada incluem: pé-direito de 2,50 m, beiral com 0,50 m, esquadrias em alumínio e vidro simples transparente 3mm, 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, com peitoril de 1,10 m. No banheiro, a janela é do tipo pivotante com eixo horizontal superior e possui peitoril de 1,60 m. Outras características das janelas são descritas na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros estabelecidos para as janelas da edificação (Adaptado de TRIANA, LAMBERTS e SASSI, 2015).

Ambiente	Área de abertura [m²]	Orientação	Fator de ventilação	Fator de iluminação
Sala	2,02	Sul	0,45	0,8
	1,62	Oeste	0,45	0,65
Dormitório 1	1,51	Sul	0,45	0,8
Dormitório 2	1,51	Leste	0,45	0,8
Banheiro	0,48	Oeste	0,90	0,65

Enfatiza-se que esta tipologia de edificação foi utilizada para as simulações computacionais incorporando materiais e técnicas construtivas para o modelo de referência e para o modelo real com sistema construtivo em CLT.

3.2. 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 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: Curitiba, Brasília, Recife e Teresina. Na Tabela 2 são apresentados as cidades, as ZB, os intervalos e a Temperatura de Bulbo Seco (TBS) de cada uma, assim como o nome e fonte do arquivo climático utilizado para as simulações.

Tabela 2 - Parâmetros climáticos utilizados.

Cidade	ZB	Intervalo	TBS [ºC]	Arquivo Climático	Fonte
Curitiba	ZB 1	Intervalo 1	17,38	BRA_PR_Curitiba.838420_INMET	Diretório sugerido pela NBR 15.575 Parte 1-1 (ABNT, 2021)
Brasília	ZB 4	Intervalo 1	21,08	BRA_DF_Brasilia.867150_INMET	
Recife	ZB 8	Intervalo 2	25,75	BRA_PE_Recife.819580_INMET	
Teresina	ZB 7	Intervalo 3	27,69	BRA_PI_Teresina.818320_INMET	

3.3. Painéis CLT

Para o desenvolvimento das simulações optou-se por utilizar as tipologias de painéis CLT (Figura 2) citadas no estudo de Oliveira (2018) como sendo as mais utilizadas por esse sistema construtivo no Brasil até então. O painel utilizado para fechamentos verticais consiste em três camadas, composto por duas camadas externas de 20 mm e uma interna de 40 mm, totalizando 80 mm de espessura. Já para a configuração das lajes, Oliveira (2018) aponta que a tipologia mais utilizada é a de três camadas com espessura total de 120 mm, que consiste na composição de um painel com três lamelas de CLT de 40 mm cada uma.



Figura 2 - Painel CLT (OLIVEIRA, 2018).

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), a qual especifica condutividade térmica de 0,13 W/m.K, densidade de 550 kg/m³ e calor específico de 2100 J/kg.K. Além disso, essa madeira é seca em estufa com 12% ± 2% de umidade e o seu tratamento preservativo é realizado em autoclave com CCB (borato de cobre cromatado). 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).

3.4. Condições de contorno da simulação

Para atender as premissas da NBR 15.575 (ABNT, 2021) quanto ao programa de simulação computacional, optou-se por utilizar o *EnergyPlus*, na sua mais recente versão 23.1.0.

Seguindo a normativa citada, os modelos reais e o modelo de referência foram simulados sob duas condições de utilização dos ambientes de longa permanência (APP): uma com o uso da ventilação natural (VN), para a determinação do percentual de horas de ocupação da unidade habitacional (UH) dentro da faixa de temperatura operativa ($PHFT_{UH}$) e das temperaturas operativas anuais máxima ($Tomáx_{UH}$) e mínima ($Tomín_{UH}$), necessários para as avaliações de todos os níveis de desempenho térmico; e outra sem o uso da ventilação natural (AC), 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). O somatório das $CgTR_{UH}$ e $CgTA_{UH}$ resulta na carga térmica total da UH ($CgTT_{UH}$).

3.4.1 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, além de não considerar elementos de sombreamento, como o beiral.

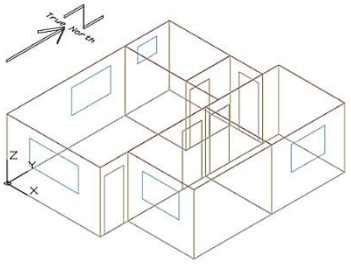


Figura 3 - Geometria do modelo de referência (LabEEE, 2022).

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 3. Os elementos construtivos e os valores inseridos para suas propriedades termofísicas nas simulações são descritos na Tabela 3.

Tabela 3 - Propriedades termofísicas dos elementos construtivos do modelo de referência (ABNT, 2021; LabEEE, 2022).

Elemento Construtivo	Espessura [m]	Condutividade térmica [W/m.K]	Densidade [kg/m³]	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

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 a cidade de Recife, por estar localizada na ZB 8, considerou-se o uso de isolamento sobre a laje com resistência térmica igual a 0,67 (m².K)/W e absortância solar de 0,50.

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.

3.4.2 Modelo real

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 e alterou-se a composição dos materiais das paredes e laje da cobertura a fim de analisar o sistema construtivo de CLT. As configurações adotadas para as paredes do modelo real foram baseadas nas principais composições utilizadas nas construções brasileiras realizadas com CLT, as quais foram levantadas por Oliveira (2018) em seu estudo sobre esse sistema construtivo. A geometria da edificação e suas configurações são apresentadas na Figura 4.

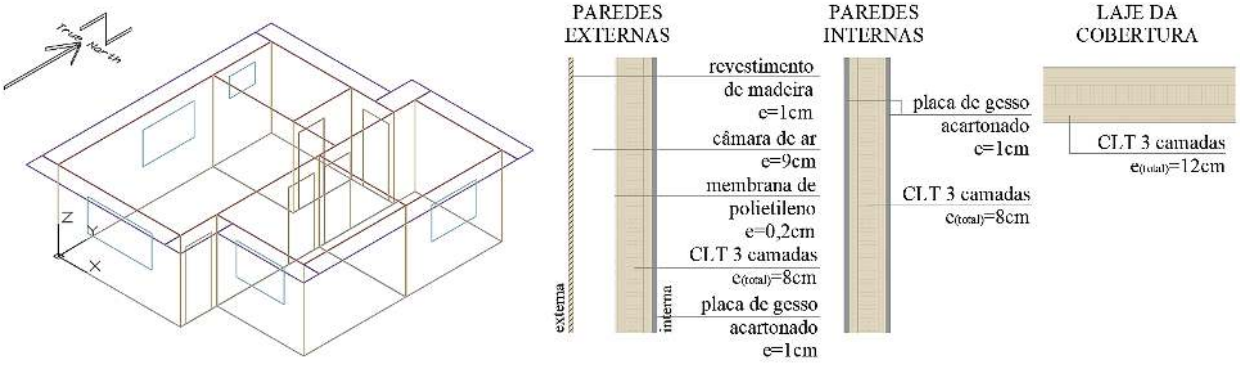


Figura 4 - Geometria da edificação e configuração dos elementos de vedação.

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 (m².K)/W e, exclusivamente para a cidade de Recife, por estar localizada na ZB 8, considerou-se o uso de isolamento sobre a laje com resistência térmica igual a 0,67 (m².K)/W e absortância solar de 0,50.

Como forma de proteger e ventilar a fachada, para a composição das paredes externas, com fins de simplificação, entre o CLT e o revestimento externo de madeira também considerou-se uma câmara de ar vertical, porém aqui com resistência térmica de 0,17 (m².K)/W, segundo a NBR 15.220 (ABNT, 2005). Os valores dos parâmetros termofísicos para os demais materiais inseridos nas simulações deste modelo podem ser verificados na Tabela 4.

Tabela 4 - Materiais e parâmetros termofísicos inseridos no modelo real.

Material	Espessura [m]	Condutividade térmica [W/m.K]	Densidade [kg/m³]	Calor específico [J/kg.K]	Absortância
CLT 3 camadas (paredes)	0,08	0,13	550	2100	0,50
CLT 3 camadas (laje)	0,12	0,13	550	2100	0,50
Concreto (piso)	0,10	1,75	2200	1000	0,58
Chapa de gesso acartonado	0,01	0,35	750	840	0,50
Telha cerâmica	0,006	1,05	2000	920	0,65
Madeira para portas	0,03	0,15	600	1340	0,50
Madeira para revestimento externo	0,01	0,15	600	1340	0,50
Membrana impermeável de polietileno	0,002	0,16	950	1850	0,70

3.4.3 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 5, Tabela 6, Tabela 7 e Tabela 8 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 5 - 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

Tabela 6 - Período de uso e potência dos equipamentos.

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

Tabela 7 - Sistema de iluminação.

Ambiente	DPI- Densidade de Potência Instalada [W/m²]
Sala	5,0
Dormitório	5,0

Tabela 8 - Taxa metabólica para os usuários.

Ambiente	Período de uso	Atividade realizada	Calor produzido [W/m²]	Calor produzido para área de pele = 1,80m² [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

3.4.4 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 modelo real. Optou-se por utilizar a forma de modelagem do *Ground Domain*, 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 são condutividade térmica de 1 W/m.K; densidade de 1.250 kg/m³; e calor específico de 1.200 J/kg.K.

3.5. Avaliação dos resultados

A análise dos resultados e determinação do nível de desempenho térmico das edificações utilizou os indicadores presentes na NBR 15.575 (ABNT, 2021), 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 carga térmica total (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, sendo eles: Intervalo 1 (TBS < 25 ºC), Intervalo 2 (25 ºC ≤ TBS < 27ºC) ou Intervalo 3 (TBS ≥ 27ºC). 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 (ΔTomáx) de 2 ºC 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 (ΔTomín) de 1 ºC 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 (To_{APP}) para cada intervalo, sendo elas: Intervalo 1 (18 ºC < To_{APP} < 26 ºC), Intervalo 2 (To_{APP} < 28 ºC) e Intervalo 3 (To_{APP} < 30 ºC). Posteriormente, para o atendimento ao critério de $PHFT_{UH}$ no nível mínimo, o modelo real deveria apresentar, ao longo de um ano e durante os períodos de ocupação dos APP, $PHFT_{UH,real}$ que fosse superior a 90 % do obtido para o modelo de referência ($PHFT_{UH,ref}$). Para os níveis intermediário e superior, foi realizada avaliação por meio de um incremento do $PHFT_{UH,real}$ (ΔPHFT) em relação ao $PHFT_{UH,ref}$, conforme metodologia apresentada nas tabelas 20 e 21 da NBR 15.575 (ABNT, 2021).

Para o último indicador, considerou-se inicialmente a avaliação da carga térmica total da UH ($CgTT_{UH}$) 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, os quais são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Valores de temperatura operativa para $CgTR_{APP}$ e da $CgTA_{APP}$ (ABNT, 2021).

Intervalos de temperatura externa	Faixa de To para o cálculo da $CgTR_{APP}$	Faixa de To para cálculo da $CgTA_{APP}$
Intervalo 1	$To_{APP} \geq 26$ ºC	$To_{APP} \leq 18$ ºC
Intervalo 2	$To_{APP} \geq 28$ ºC	Não considera
Intervalo 3	$To_{APP} \geq 30$ ºC	Não considera

Na sequência foi verificado o valor da redução da carga térmica total (RedCgTT) do modelo real ($RedCgTT_{UH,real}$) em relação à referência ($RedCgTT_{UH,ref}$), o qual deveria ser maior ou igual a uma redução mínima ($RedCgTT_{mín}$) estabelecida e calculada por meio das tabelas 20 e 21 da normativa (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). Esses parâmetros representam a fração de horas, ao longo do ano, em que o APP se encontra ocupado e com temperaturas operativas superiores ou inferiores, respectivamente, às estabelecidas pela faixa de temperaturas da tabela 3 da NBR 15.575 (ABNT, 2021).

4. RESULTADOS

Os resultados são apresentados por cidade para facilitar a interpretação e verificação dos dados e, na sequência, para fins de comparação geral, são descritos os parâmetros informativos do procedimento de simulação computacional.

4.1. Curitiba

Para a simulação 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.

Conforme é possível analisar na Figura 5, as Tomáx e Tomín obtidas no modelo real apresentaram valores menores e maiores do que a referência, respectivamente. A Tomáx verificada no modelo real foi de 27,52 ºC contra 30,74 ºC no modelo da referência, e a Tomín foi de 15,96 ºC no modelo real e 13,54 ºC no de referência.

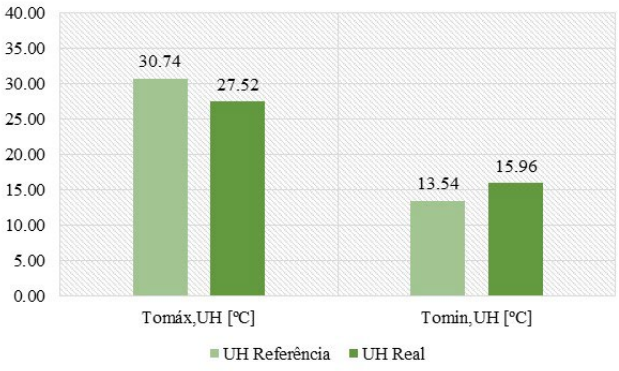


Figura 5 - Tomáx e Tomín para Curitiba.

Dessa mesma maneira, conforme apresentado na Figura 6, o valor do PHFT da UH real foi superior,

atingindo 87,96%, o que representou um incremento de 14,32% em relação ao PHFT da UH do modelo de referência.

Em relação as cargas térmicas, o modelo real de CLT também apresentou resultados com nível superior de desempenho térmico, que corresponderam a uma redução da CgTT da UH de 83,08%. Enquanto o modelo de referência consumiu uma CgTT de 1.188 kWh/ano, o modelo real consumiu apenas 201 kWh/ano. A Figura 7 exemplifica o exposto e apresenta os valores de maneira mais abrangente.

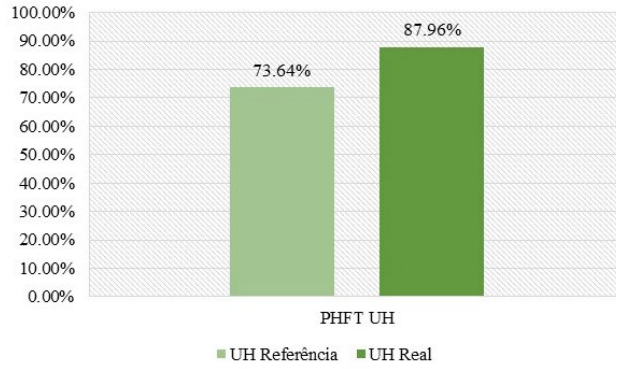


Figura 6 - PHFT da UH para Curitiba.

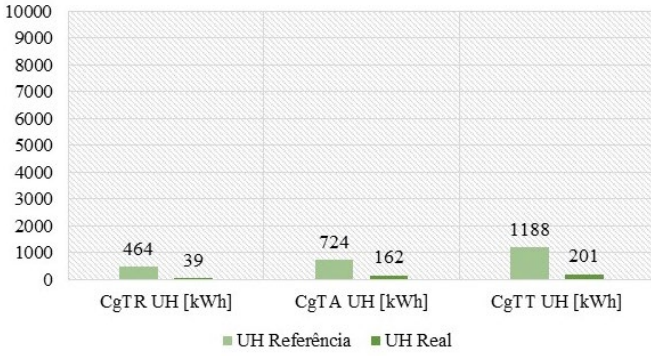


Figura 7 - Cargas térmicas da UH para Curitiba.

4.2. Brasília

Para Brasília (ZB 4 e Intervalo 1) o desempenho do modelo real de CLT também atingiu níveis superiores de desempenho em todos os parâmetros analisados, quando comparado ao modelo de referência.

A Tomáx da edificação real obteve um valor de aproximadamente 3 ºC a menos do que a da edificação de referência, sendo de 29,15 ºC no primeiro caso e 32,17 ºC no segundo caso, respectivamente. A Tomín por sua vez, apresentou aumento de 0,56 ºC, tendo sido obtidos os valores de 19,01 ºC no modelo real e 18,45 ºC no modelo de referência. A Figura 8 apresenta graficamente esses resultados.

O PHFT da UH real obteve um valor expressivo, conforme pode ser analisado na Figura 9, que foi de de 92,98%, significando um incremento de 9,48% em relação ao PHFT da UH de referência.

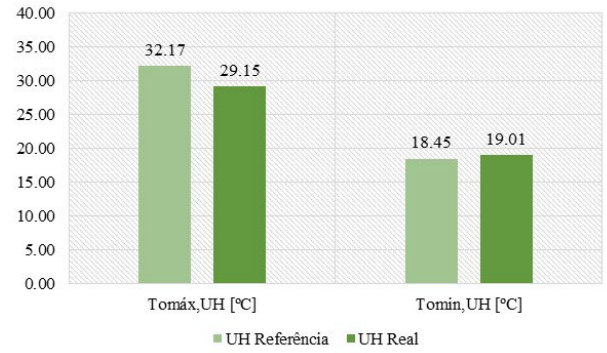


Figura 8 - Tomáx e Tomín para Brasília.

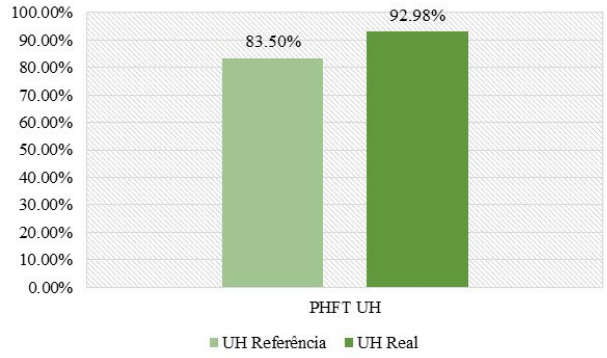


Figura 9 - PHFT da UH para Brasília.

Para as cargas térmicas, os valores obtidos para a CgTT da UH real também apresentaram valores reduzidos. Enquanto no modelo de referência foram consumidos 1.641 kWh/ano, no modelo real foram consumidos 471 kWh/ano, uma redução expressiva de 71,29%. A Figura 10 apresenta com mais detalhes o gráfico comparativo dos resultados e o valor das cargas térmicas totais, de resfriamento e aquecimento, esta última resultando nula devido à $Tomín_{UH}$ ter sido superior à mínima de 18 ºC estabelecida para o Intervalo 1.

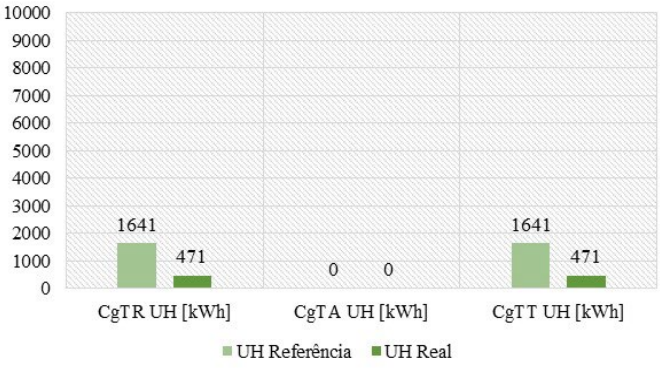


Figura 10 - Cargas térmicas da UH para Brasília.

4.3. Recife

Em Recife (ZB 8 e Intervalo 2), os resultados da simulação diferem dos casos anteriores. Apesar das simulações para o caso de CLT apresentarem valores melhores para os parâmetros de desempenho, a UH real atingiu apenas o nível mínimo na avalição geral.

Conforme demonstra graficamente a Figura 11, houve uma redução da Tomáx da UH, cujo valor foi de 1,84 ºC. Enquanto no modelo de referência a Tomáx obtida foi de 34,26 ºC, no modelo real obteve-se o valor de 32,42 ºC. Como a cidade de Recife encontra-se na ZB 8, os parâmetros de Tomín não foram avaliados.

Devido aos valores do PHFT da UH real apresentarem um incremento de apenas 6,72% em relação ao modelo de referência, apenas o nível de desempenho mínimo foi atendido para esse parâmetro avaliado. No primeiro caso, o percentual obtido foi de 33,64% e no segundo caso, de 40,36%. A Figura 12 compara graficamente esses resultados.

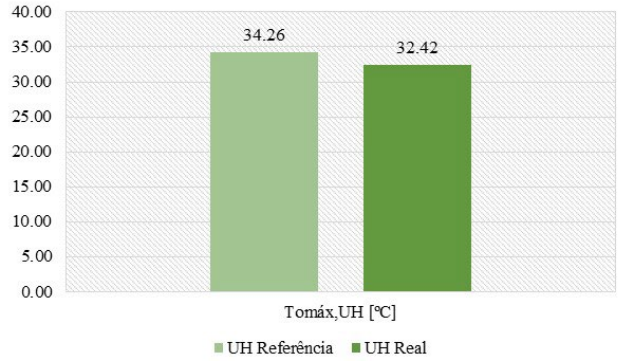


Figura 11 - Tomáx e Tomín para Recife.

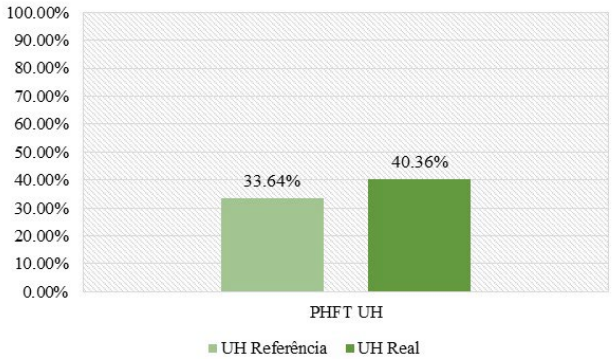


Figura 12 - PHFT da UH para Recife.

Na avaliação das cargas térmicas, a edificação real apresentou valores menores para o consumo de energia em relação ao modelo de referência, atingindo o nível intermediário de desempenho. A CgTT consumida pela UH, que é igual à $CgRT_{UH}$ nesse caso, foi de 8.077 kWh/ano no modelo de referência, enquanto o valor para o modelo real foi de 5.247 kWh/ano, o que significou uma RedCgTT da UH de 35,03%. A Figura 13 exemplifica esses resultados graficamente.

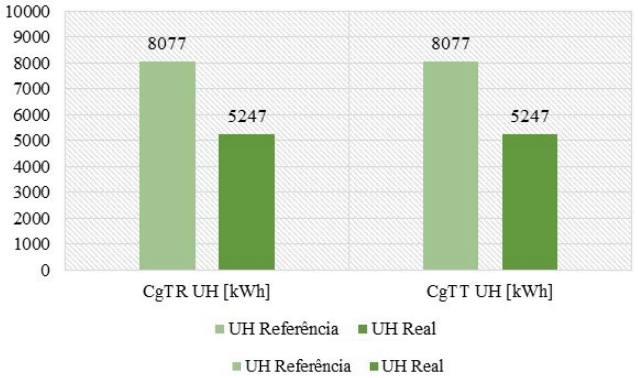


Figura 13 - Cargas térmicas da UH para Recife.

4.4. Teresina

Por fim, Teresina (ZB 7 e Intervalo 3) apresentou nível de desempenho térmico igual a Recife, alcançando apenas o nível mínimo para a avaliação da UH em geral.

Conforme pode ser analisado no gráfico da Figura 14, o modelo real apresentou uma redução expressiva da Tomáx, cujo variação foi de 3,24 ºC. A Tomáx verificada para o modelo de referência foi de 37,76 ºC, enquanto no modelo real verificou-se uma Tomáx de 34,52 ºC. Por se tratar da ZB 7, a Tomín para Teresina também não foi avaliada.

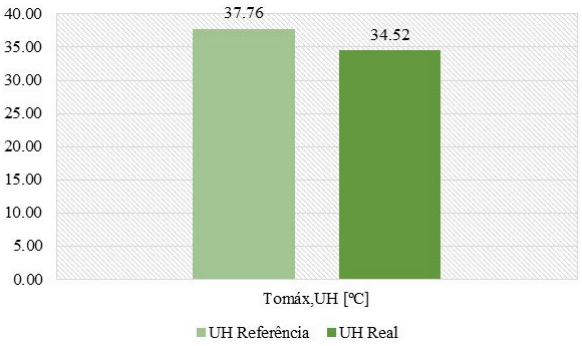


Figura 14 - Tomáx e Tomín para Teresina.

O incremento no PHFT, porém, foi pouco expressivo totalizando apenas 0,09 %, o que fez com que a edificação permanecesse com o nível mínimo de desempenho térmico. Os valores do PHFT neste caso foram inferiores a todos os outros casos, apresentando valores relativamente baixos. A edificação de referência apresentou percentual de 7,61 % para esse parâmetro e a edificação real apresentou 7,70 % apenas. A Figura 15 apresenta o gráfico comparativo para esses resultados.

Com relação ao cálculo das cargas térmicas, a edificação real conseguiu uma redução de 42,93 %, o que lhe conferiu o nível de desempenho intermediário neste quesito. A CgRT da edificação real, que representa o mesmo valor para a CgTT da UH, apresentou valor de 5.424 kWh/ano, ao contrário da edificação de referência em que o valor consumido foi de 9.505 kWh/ano. A Figura 16 demonstra esses resultados.

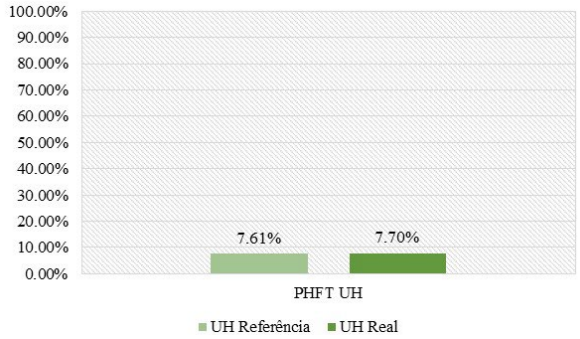


Figura 15 – PHFT da UH para Teresina.

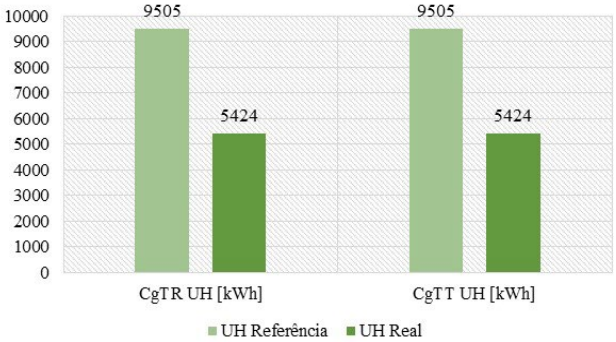


Figura 16 - Cargas térmicas da UH para Teresina.

4.5. Parâmetros informativos do procedimento de simulação computacional

Os resultados dos parâmetros informativos para as UH de cada uma das cidades simuladas são apresentados na Tabela 10. É possível observar que, para o modelo real de CLT, 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 3 da NBR 15.575 (ABNT, 2021) apresentam resultados melhores do que o modelo de referência.

Vale salientar que o valor do PHiFT apenas foi analisado para Curitiba, pois foi a única cidade que apresentou temperaturas abaixo dos 18 ºC estabelecidos como mínimos para o Intervalo 1.

Tabela 10 - Parâmetros informativos das UH.

Parâmetro / Modelo	**Curitiba**		**Brasília**		**Recife**		**Teresina**	
	Refer	***Real***	***Refer***	***Real***	***Refer***	***Real***	***Refer***	***Real***
$PHsFT_{UH}$ [%]	4,59	1,78	16,5	7,01	63,35	59,63	53,26	43,29
$PHiFT_{UH}$ [%]	21,76	11,44	-	-	-	-	-	-

Observando especificamente os casos de Recife e Teresina, que obtiveram o nível mínimo de desempenho térmico para a UH em geral, é possível verificar uma redução de 3,72 % e 9,97 %, respectivamente, no valor do PHsFT, o que demonstra uma melhora, ainda que pouco significativa, no desempenho térmico da UH, confirmando o potencial de utilização do CLT em regiões mais quentes.

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos é possível verificar que o sistema construtivo de madeira engenheirada com CLT é capaz de alcançar resultados superiores de desempenho térmico, especialmente quando aplicado em edificações que estão localizadas em climas mais amenos, compreendidos no Intervalo 1 da NBR 15.575 (ABNT, 2021), por exemplo. Os resultados demonstram que para as cidades de climas mais quentes, compreendidas no Intervalo 2 e 3, é necessário que se realizem outros estudos e simulações que associem diferentes elementos construtivos e estratégias bioclimáticas à envoltória da edificação, a fim de verificar se podem ser obtidos melhores níveis de desempenho térmico.

Em um contexto geral, os resultados desta pesquisa, corroboram com outros estudos que indicam uma elevada capacidade de isolamento térmico da madeira, associada à sua baixa condutividade térmica, viabilizando a possibilidade de ampliação do uso dessa tecnologia na construção de edificações residenciais brasileiras. Existem significativos benefícios provenientes do uso de estratégias de desempenho térmico e eficiência energética 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, pois essa atitude reduz substancialmente a geração de resíduos sólidos e emissão de dióxido de carbono produzidos pelo setor. Cabe ressaltar que este estudo investigou o sistema construtivo das madeiras engenheiradas no âmbito do desempenho térmico e eficiência energética e, para que ele seja consolidado como uma alternativa atrativa para a construção de edificações em geral, é necessário averiguar o seu processo construtivo de modo mais abrangente, englobando estudos de estabilidade, durabilidade e segurança.

AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem a colaboração na apresentação deste estudo ao PROAP/AUXPE/CAPES - Processo 88881.637705/2021-01.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

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 jun. 2022.

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 2022**: Ano Base 2021. Rio de Janeiro, Brasil. 2022a. Disponível em: https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben. Acesso em: 28 set. 2022.

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

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

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES – LABEEE. **NBR 15575-2021 – Desempenho Térmico**. Arquivo de simulação exemplo (residência unifamiliar – modelo de referência). 2022. Disponível em: https://labeee.ufsc.br/NBR15575-2020. Acesso em: 30 mai. 2023.

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.

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.

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

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.

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