XIX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
ENTAC 2022

Ambiente Construído: Resiliente e Sustentável
Canela, Brasil, 9 a 11 novembro de 2022

Análise do desempenho térmico e energético de painéis CLT nacionais para o clima de Foz do Iguaçu-PR

Analysis of the thermal and energy performance of national CLT panels for the climate of Foz do Iguaçu-PR

Karine Hilgenberg Martins
Universidade da Integração Latino-Americana | Foz do Iguaçu | Brasil | karine_hilgenberg@yahoo.com.br
Helenice Maria Sacht
Universidade da Integração Latino-Americana | Foz do Iguaçu | Brasil | helenice.sacht@unila.edu.br

Resumo
Esse trabalho teve por objetivo analisar o desempenho térmico do sistema construtivo Cross Laminated Timber (CLT), com base no procedimento de simulação computacional estabelecido pela NBR 15575-1 e considerando as características climáticas da cidade de Foz do Iguaçu - PR. A análise foi realizada por meio de modelos representativos, com diferentes tipologias e configurações de painéis CLT utilizando o software Energyplus. Os resultados indicam que esse sistema construtivo pode ser favorável para climas quentes e úmidos, como o da cidade considerada, especialmente quando aliado ao uso de vidros de alto desempenho térmico.

Palavras-chave: Cross Laminated Timber (CLT). Painéis de madeira. Eficiência Energética. Desempenho Térmico. Vedações Verticais Externas.

Abstract
This paper aimed to analyze the thermal performance of the Cross Laminated Timber (CLT) construction system, based on the computer simulation procedure by NBR 15575-1 and considering the climatic characteristics of the city of Foz do Trabalho Iguaçu - PR. The analysis was performed using representative models, with different typologies and configurations of CLT panels using the Energyplus software. The results indicate that this construction system can be favorable for hot and humid climates, such as the city considered, especially when combined with the use of high thermal performance glass.

Keywords: Cross Laminated Timber (CLT). Wood panels. Energy Efficiency. Thermal Performance. Exterior Walls.

Como citar:
MARTINS, K. H; SACHT, H. M. Análise do desempenho térmico e energético de painéis CLT nacionais para o clima de Foz do Iguaçu-PR. In: XIX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 19., 2022, Canela. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2022. p. XXX-XXX.

INTRODUÇÃO

Reconhecidamente, a construção civil é um dos setores industriais que mais provocam impactos ambientais, seja pela exploração de grandes quantidades de matéria-prima não renovável, seja pela geração de resíduos, ou ainda, pela produção de gases geradores do efeito estufa. Além do impacto dos processos e materiais empregados na construção, observa-se que a maioria das obras no Brasil desperdiça considerável parcela de energia, devido a não incorporação de equipamentos e tecnologias construtivas voltadas para eficiência energética. De acordo com dados divulgados pelo Balanço Energético Nacional (BEN) 2021, ano base 2020, as edificações no Brasil são responsáveis por 51,2% do consumo total de energia elétrica do país, considerando-se os setores residencial (27,6%), comercial (15,7%) e público (7,9%) [1].

O consumo energético das edificações se torna fator ainda mais preponderante em localidades nas quais o clima não proporciona conforto de maneira natural. Essa situação é evidente na cidade de Foz do Iguaçu-PR, onde, de acordo com a série histórica do período de 1970 a 2015, disponível no site do Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná - IAPAR-EMATER (2019), foram registrados 1,1°C - 2ºC de temperatura mínima absoluta e 38,1°C - 39ºC de temperatura máxima absoluta [2]. Embora esses dados representem medidas extremas, é comum Foz do Iguaçu registrar temperaturas acima dos 34°C no verão e temperaturas abaixo de 10°C no inverno, tornando essencial a escolha de materiais com melhor desempenho térmico para as vedações externas das edificações.

As vedações externas ou envoltória é o que separa o ambiente interno do ambiente externo, por essa razão, é a principal responsável pelas trocas de calor entre uma edificação e seu exterior. Ela pode ser dividida em fechamentos opacos e fechamentos transparentes ou translúcidos [3] e [4]. A escolha dos materiais que constituem as envoltórias, com base em suas propriedades térmicas e óticas é crucial para a redução dos ganhos térmicos e solares, além das estratégias passivas de ventilação e sombreamento indicadas para climas quentes [5].

Um material que tem destaque na construção civil, tanto na Europa quanto na América do Norte, é a madeira. De acordo com [6] países como Estados Unidos, Canadá, Alemanha, Austrália, Escandinávia, e Reino Unido tem investido em estruturas em madeira pela agilidade na construção, eficiência na produção e menores impactos ambientais. Além disso, a madeira possui um calor específico relativamente alto em relação a outros materiais, ou seja, ela se aquecerá menos que materiais com menor calor específico, como metais, concretos e tijolos, estando sob a mesma condição de aplicação de calor [7].

Considerado o exposto, o objetivo desse trabalho foi analisar o desempenho térmico e a eficiência energética obtidos com a aplicação de um sistema construtivo em madeira denominado *Cross Laminated Timber* (CLT), ou Madeira Laminada Colada Cruzada (MLCC) em português.

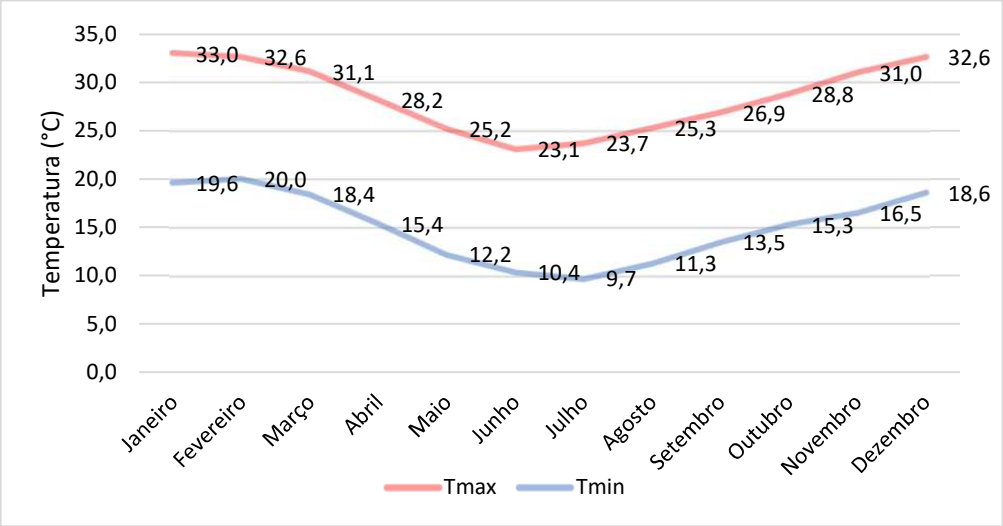
MÉTODO

A metodologia utilizada seguiu cinco etapas: a caracterização climática da cidade de Foz do Iguaçu-PR; a definição do modelo habitacional; a definição da metodologia de análise de desempenho térmico; a caracterização dos sistemas construtivos a serem analisados e os parâmetros para simulação computacional.

LOCALIZAÇÃO CLIMÁTICA

A cidade escolhida para análise foi Foz do Iguaçu-PR, que de acordo com classificação Köppen-Geiger apresenta clima "Cfa" (clima temperado úmido com verão quente) [8]. Com relação às temperaturas anuais, a cidade apresenta grande amplitude térmica diária, sendo as maiores variações registradas nos meses de julho e novembro (14°C e 14,5°C respectivamente) [9]. A Figura 1 apresenta a distribuição mensal de temperaturas ao longo do ano.

Figura 1: Média das temperaturas anuais de Foz do Iguaçu



Fonte: Elaborado a partir das Normais Climatológicas (1961 – 1990) [9].

MODELO HABITACIONAL

O modelo habitacional selecionado foi o Residencial Foz do Iguaçu I, da Companhia de Habitação do Paraná (COHAPAR) [10] pelo programa Casa fácil Paraná. Trata-se de habitações multifamiliares térreas geminadas, de 42 m² contendo: sala integrada à cozinha, dois quartos e um banheiro.

METODOLOGIA DE ANÁLISE DE DESEMPENHO TÉRMICO

O método de avaliação de desempenho térmico e energético utilizado foi o procedimento de simulação computacional estabelecido pela NBR 15575-1 [11]. Como o procedimento da norma é recente, optou-se por simular um modelo em alvenaria convencional, por ser um dos mais utilizados em Foz do Iguaçu e na região, para comparação com os resultados dos modelos em madeira. As etapas do procedimento são apresentadas resumidamente no Quadro 1 e os critérios considerados foram para o modelo habitacional multifamiliar térreo, conforme apresentados na Tabela 1.

Quadro 1: Etapas para procedimento de simulação computacional - NBR 15575-1 [11]

Etapa I	Etapa II	Etapa III (OBRIGATÓRIA)	Etapa IV (FACULTATIVA)
Definição da faixa de temperatura operativa (To) a ser considerada: Foz do Iguaçu-PR: TBSm = 21,5°C: Intervalo 1 (< 25,0°C) Faixa de To: **18,0°C < ToAPP < 26,0°C.**	Modelagem das unidades Habitacionais: **MODELO DE REFERÊNCIA:** com as carasterísticas e propriedades térmicas **MODELO REAL:** Com as características e propriedades térmicas da edificação a ser avaliada.	Análise das simulações na condição de ventilação natural para classifiacação com o nível mínimo de **$To_{máx,real} \leq To_{máx,ref.} + 2°C$** **$To_{mín,real} \geq To_{mín,ref.} - 1 °C$** Percentual de horas dentro da faixa de temperatura operativa (18,0°C a 26,0°C) **$PHFT_{UH,\ real} > 0,9\ .\ PHFT_{UH,\ ref.}$**	Análise das simulações com e sem ventilação natural para classificação nos níveis intermediário ou superior de desempenho térmico: Calculo do **ΔPHFTmín** de acordo com ábaco ou equações fornecidas pela norma para cada modelo habitacional Calculo da **RedCgTT** do modelo real em relação ao modelo de referência. Limites mínimos também estabelecidos de acordo com modelo habitacional e nível de desempenho e ser alcançado.

Fonte: A autora, 2022.

Tabela 1: Critérios para classificação de desempenho térmico de uma UH multifamiliar (Térrea) conforme NBR 15575-1 [11]

Nível de desempenho	Critérios		
Mínimo (M)	$PHFT_{UH,\ real} > 0,9\ .\ PHFT_{UH,\ ref.}$		
	$To_{máx,real} \leq To_{máx,ref.} + 2°C$		
	$To_{mín,real} \geq To_{mín,ref.} - 1 °C$		
Intermediário (I)	$PHFT_{UH,\ ref.} < 70\ \%$	$\Delta PHFT_{mín} = 22 - 0,21.\ PHFT_{UH,\ ref.}$ $RedCgTT_{mín} = 0$	
	$PHFT_{UH,\ ref.} \geq 70\ \%$	$\Delta PHFT_{mín} = 0$	
		RedCgTT %	≥ 15 % se $CgTT_{UH,\ ref.} / Ap,_{UH} < 100$
			≥ 20 % se $CgTT_{UH,\ ref.} / Ap,_{UH} \geq 100$
Superior (S)	$PHFT_{UH,\ ref.} < 70\ \%$	$\Delta PHFT_{mín} = 22 - 0,21.\ PHFT_{UH,\ ref.}$	
	$PHFT_{UH,\ ref.} \geq 70\ \%$	$\Delta PHFT_{mín} = 0$	
	Para todos os valores de $PHFT_{UH,\ ref.}$	RedCgTT %	≥ 30 % se $CgTT_{UH,\ ref.} / Ap,_{UH} < 100$
			≥ 40 % se $CgTT_{UH,\ ref.} / Ap,_{UH} \geq 100$

LEGENDA:

$PHFT_{UH,\ real}$ = percentual de horas dentro da faixa de temperatura operativa da unidade habitacional real;

$PHFT_{UH,\ ref.}$ = percentual de horas dentro da faixa de temperatura operativa da unidade habitacional de referência;

$\Delta PHFT_{mín}$ percentual mínimo de incremento de horas dentro da faixa de temperatura operativa;

$To_{máx,real}$ = temperatura operativa máxima da unidade habitacional real;

$To_{mín,real}$ = temperatura operativa mínima da unidade habitacional real;

$RedCgTT_{mín}$ = percentual mínimo de redução das cargas térmicas totais da unidade habitacional;

$CgTT_{UH,\ ref}$ = carga térmica total da unidade habitacional de referência;

$A_{p,\ UH}$ = área de piso dos ambientes de permanência prolongada da unidade habitacional.

Fonte: Adaptado de [11].

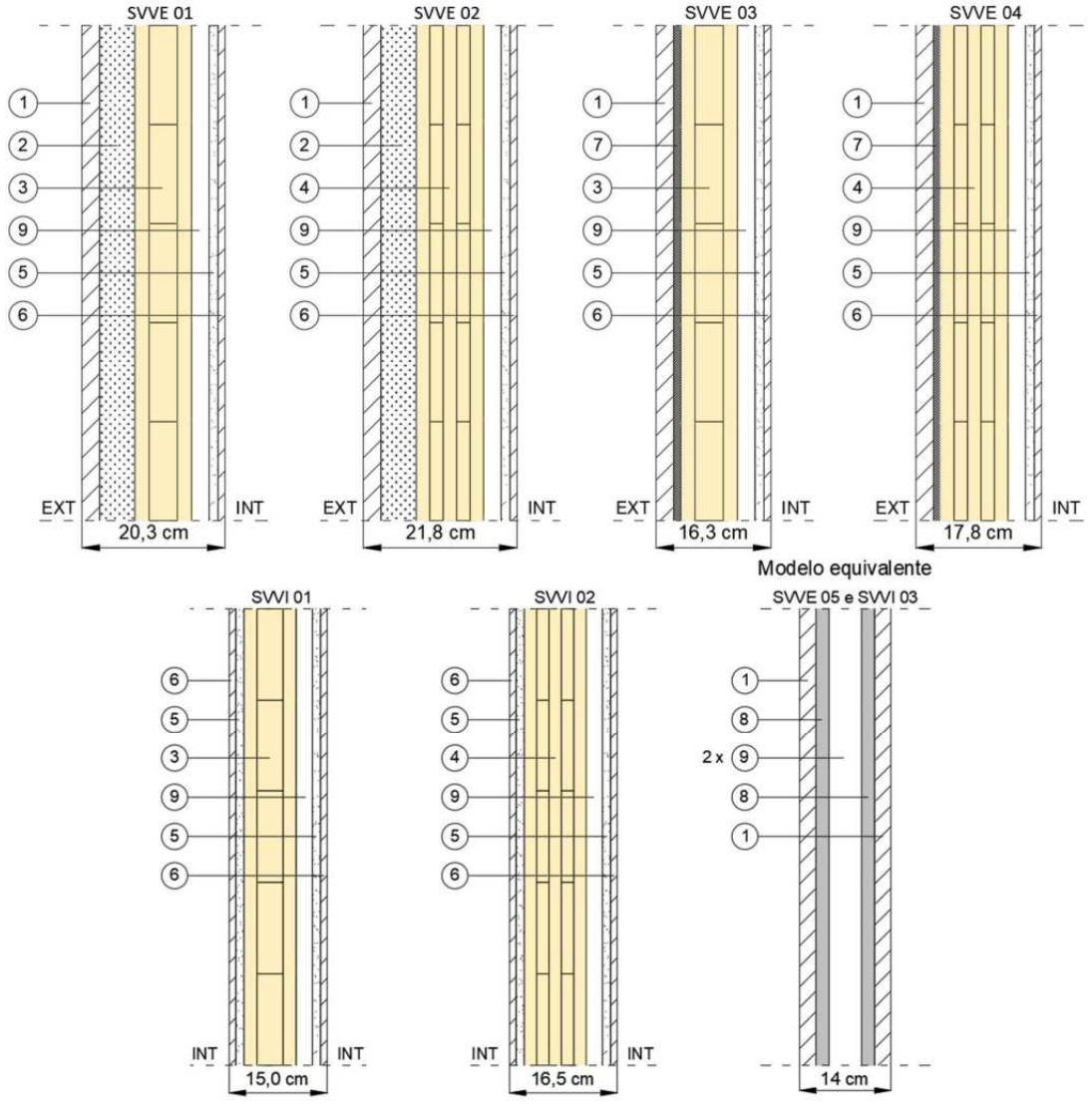
SISTEMAS CONSTRUTIVOS

A Figura 2 apresenta os sistemas de vedações verticais externos (SVVE) e internos (SVVI) estabelecidos para simulação. Foram consideradas as principais espessuras de painéis utilizadas para edificações residenciais, ou seja: 3 lamelas (20+40+20 mm),

totalizando 80 mm de espessura e 5 lamelas de 19 mm, totalizando 95 mm de espessura. Quanto aos acabamentos externos, foram considerados o *Exterior Insulation and Finish Systems* (EIFS) e o de revestimento com placas cimentícias.

Para as paredes internas, foi considerado o revestimento com gesso acartonado. Os painéis de gesso acartonado podem ser fixados diretamente na estrutura em CLT ou serem fixados em barrotes para facilitar a passagem de tubulações hidráulicas ou elétricas, criando uma câmara de ar não ventilada. Como não há necessidade de barrotear as duas faces da parede, foi considerado o barroteamento em apenas uma das faces de cada parede (interna e externa) a ser simulada (Figura 2).

Figura 2: Sistemas de vedações verticais externos e internos



Legenda:
1 - Argamassa externa. 2 - EPS (espuma de poliestireno). 3 - Painel CLT 80 mm. 4 - Painel CLT 95 mm. 5 - Gesso acartonado. 6 - Argamassa interna. 7 – Placa cimentícia. 8 – Bloco cerâmico. 9 - Câmara de ar sem ventilação.
Fonte: A autora, 2022.

Por fim, foi simulado um modelo em alvenaria convencional para comparação com os SVVE e SVVI em madeira. O modelo do bloco cerâmico considerado, que corresponde ao modelo equivalente apresentado na Figura 2, foi o de seis furos (9x14x24 cm), com

câmaras de ar, medindo 3x3,33 cm e a espessura da argamassa de assentamento de 1 cm. A escolha pelo bloco de seis furos está baseada em consultas anteriores realizadas com arquitetos e engenheiros civis atuantes na região, realizadas para embasamento de pesquisas, nas quais se confirma ser o mais comum utilizado em Foz do Iguaçu.

Após a definição dos sistemas de vedações verticais, foram obtidas as propriedades térmicas de cada material que compõe as camadas dos sistemas, de acordo com a NBR 15220-2 [12]. A Tabela 2 apresenta os valores de espessura (e), densidade de massa aparente (ρ), condutividade térmica (λ) e calor específico (c) dos materiais.

Tabela 2: Propriedades térmicas materiais vedações verticais

Item	Material	e [m]	ρ [kg/m³]	λ [W/mK]	c [J/kgK]
1	Argamassa externa	0,0250	2000	1,150	1000
2	EPS	0,0500	18	0,040	1420
3	Painel CLT 80 mm	0,0800	525	0,150	1340
4	Painel CLT 95 mm	0,0950	525	0,150	1340
5	Gesso acartonado	0,0125	750	0,350	840
6	Argamassa interna	0,0100	2000	1,150	1000
7	Placa cimentícia	0,0100	1000	0,350	1000
8	Bloco cerâmico	0,0200	1600	0,900	920
9	Câmara de ar sem ventilação	0,0250	-	-	-

Fonte: [12].

Também foram definidas as tipologias de cobertura para cada sistema construtivo analisado. As camadas das coberturas são: telha cerâmica; câmara de ar sem ventilação “cobertura”; laje em CLT com 120 mm de espessura para os SVVE de 1 a 4 e em concreto com 100 mm de espessura para o SVVE 5; câmara de ar sem ventilação “forro”; gesso acartonado e argamassa interna. A Tabela 3 apresenta as propriedades térmicas dos materiais das coberturas.

Tabela 3: Propriedades térmicas materiais coberturas

Item	Material	e [m]	ρ [kg/m³]	λ [W/mK]	c [J/kgK]
1	Telha cerâmica esmaltada branca	0,0100	1600	0,900	920
2	EPS	0,0500	18	0,040	1420
3	Painel CLT 120 mm	0,1200	525	0,150	1340
4	Laje concreto	0,1000	2200	1,750	1000
5	Gesso acartonado	0,0125	750	0,350	840
6	Argamassa interna	0,0100	2000	1,150	1000
7	Câmara de ar sem ventilação cobertura	> 0,0500	-	-	-
8	Câmara de ar sem ventilação forro	0,0200 < e ≤ 0,0500	-	-	-

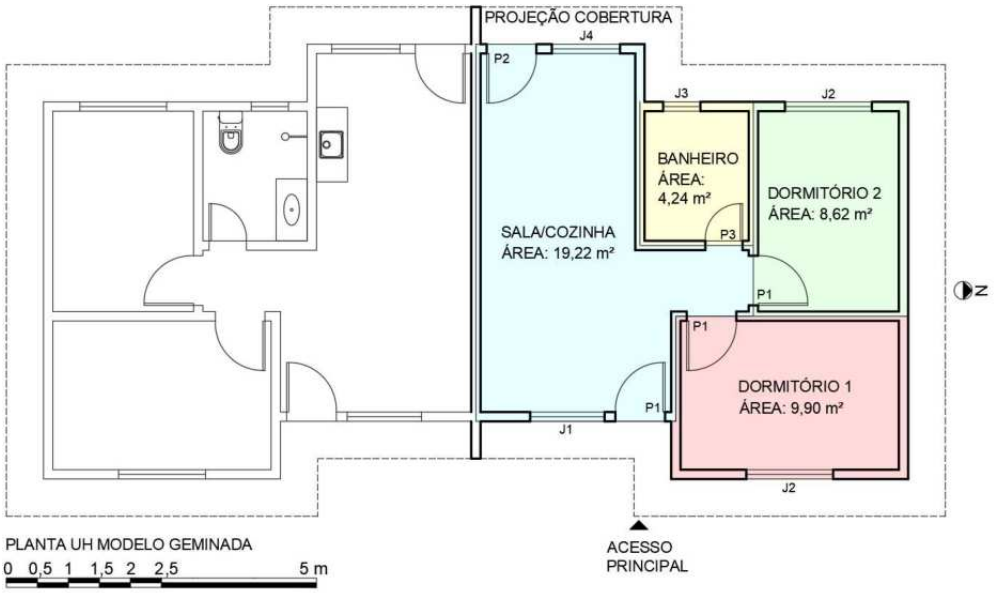
Fonte: [12].

Por fim, as paredes foram consideradas com absortância à radiação solar $\alpha = 0,102$, considerando a aplicação de tinta Acrílica Fosca nº 50 (Branco Neve), conforme determinado por [13] e emissividade $\varepsilon = 0,9$ [12]. Para a cobertura foi considerado o uso de telha cerâmica esmaltada branca, com absortância $\alpha = 0,16$ [14] e emissividade $\varepsilon = 0,9$ [12].

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

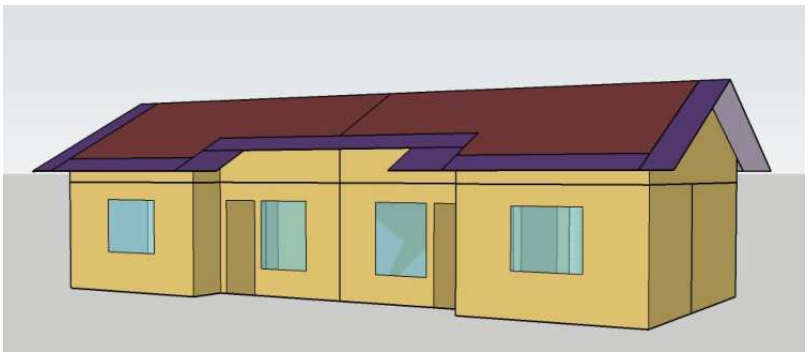
A planta da UH está dividida em cinco zonas térmicas, (Figura 3). A primeira é a Sala/Cozinha (azul), a segunda é o Dormitório 1 (vermelha), a terceira é o Dormitório 2 (verde), a quarta é o Banheiro (amarelo) e a quinta é a Cobertura. As três primeiras zonas térmicas são os ambientes de permanência prolongada (APP) e a última é um ambiente de permanência transitória (APT). Após a definição das zonas térmicas, a UH foi modelada no software *Sketchup* 2017, por meio do plug-in *Euclid* 9.4.3, considerando o pé-direito do piso até o forro de 2,50 m de altura, (Figura 4).

Figura 3: Planta zonas térmicas da UH



Fonte: A autora, 2022.

Figura 4: Modelo de simulação



Fonte: A autora, 2022.

A única diferença na volumetria do modelo de real em relação ao modelo de referência é que o primeiro possui beirais de 60 cm, que se configuram como proteções solares, pois a NBR 15575-1 orienta considerar elementos de proteção solar apenas no modelo real [11]. Além disso, embora a NBR 15575-1 [11] estabeleça as porcentagens de aberturas para ventilação e de áreas transparentes para o modelo de referência, esses critérios foram considerados iguais aos dos modelos reais, de modo que os resultados das simulações refletissem apenas a influência dos diferentes sistemas construtivos e dos elementos de sombreamento externo.

Após a modelagem, as demais configurações para simulação computacional foram inseridas na interface do programa *Energyplus* 9.3. Os pisos das UHs foram configurados na mesma forma para todos os modelos e seguindo as propriedades que a norma estabelece para o modelo de referência. As trocas de calor entre o piso e o solo foram simuladas pelo método de cálculo *Finite Difference*, configurando no objeto *Site:GroundDomain:Slab* a condutividade térmica λ = 1 W/m.K; a densidade ρ = 1250 kg/m³ e o calor específico c = 1200 J/kg.K do solo [15].

A modelagem da ocupação e das cargas internas segue as diretrizes da NBR 15575-1 (Tabelas 4, 5, 6, 7 e 8). De acordo com [11], deve-se considerar o mesmo padrão de ocupação, calor dissipado por pessoa e fração radiante para todos os dias do ano, incluindo finais de semana.

Tabela 4: Padrões de ocupação diários dos APPs

Horário	Ocupação	
	Dormitório [%]	Sala [%]
00:00 - 07:59	100	0
08:00 - 13:59	0	0
14:00 - 17:59	0	50
18:00 - 21:59	0	100
22:00 - 23:59	100	0

Fonte: [11].

Tabela 5: Taxa metabólica e fração radiante para os usuários

Ambiente	Período de uso	Atividade realizada	Calor produzido por área de superfície corporal [W/m²]	Calor produzido por uma pessoa com 1,80 m² de área de superfície corporal [W]	Fração radiante
Dormitório	00:00 - 07:59 e 22:00 - 23:59	Dormindo ou descansando	45	81	0,30
Sala	14 - 21:59	Sentado ou assistindo TV	60	108	0,30

Fonte: [11].

Tabela 6: Padrão de uso do sistema de iluminação artificial dos APP

Horário	Iluminação	
	Dormitório [%]	Sala [%]
00:00 - 05:59	0	0
06:00 - 07:59	100	0
08:00 - 15:59	0	0
16:00 - 21:59	0	100
22:00 - 23:59	100	0

Fonte: [11].

Tabela 7: Densidade de potência instalada, fração radiante e fração visível para o sistema de iluminação artificial

Ambiente	DPI [W/m²]	Fração radiante	Fração visível
Dormitório	5	0,32	0,23
Sala	5	0,32	0,23

Fonte: [11].

Tabela 8: Período de uso, densidade de cargas interna e fração radiante para equipamentos dos APP

Ambiente	Período de uso	Potência [W]	Fração radiante
Sala	14:00 - 21:59	120	0,30

Fonte: [11].

De acordo com [11], o controle das aberturas para ventilação natural deve considerar os períodos de ocupação do APP e ser acionado quando a temperatura de bulbo seco interna do APP for maior ou igual a 19ºC e quando a temperatura de bulbo seco interna do APP for superior à temperatura de bulbo seco externa. Além disso, deve-se considerar as infiltrações por frestas nas janelas e portas, quando fechadas. Nesse caso, foi considerado um percentual de abertura igual a 0,8 para a janela do banheiro e tanto os vidros quanto as esquadrias das janelas dos modelos reais foram configuradas de acordo com os critérios que a norma estabelece para o modelo de referência.

Tabela 9: Parâmetros da ventilação natural para portas e janelas nos APP e APT

Parâmetros	Portas
Coeficiente de fluxo de ar por frestas, quando a abertura está fechada (kg/(s.m)	0,0024
Expoente de fluxo de ar por frestas quando a abertura está fechada (adimensional)	0,59
Coeficiente de descarga (C_d) da abertura (adimensional)	0,60

Fonte: [11].

As portas internas dos modelos simulados com uso de ventilação natural foram consideradas abertas, exceto a porta do banheiro. As portas externas foram consideradas fechadas e com infiltração por frestas o ano inteiro. A porta de acesso à área de serviço operada de acordo com as janelas. Para os modelos simulados sem o uso de ventilação natural, todas as portas e janelas foram consideradas fechadas durante todo o ano, com exceção da janela do banheiro [11].

De acordo com a norma, os dados de saída da simulação devem ser solicitados para as 8.760 horas do ano. Deve-se obter os percentuais de horas dentro da faixa de temperatura operativa de cada ambiente de permanência prolongada ($PHFT_{APP}$), bem como os valores de $To_{máx,APP}$ e $To_{mín,APP}$, durante os períodos de ocupação. No modelo sem uso de ventilação natural deve-se solicitar as cargas térmicas para refrigeração e para aquecimento de cada APP durante os períodos de ocupação [11].

Com base nos primeiros resultados, optou-se por realizar novas simulações dos modelos reais, substituindo o vidro de espessura 3 mm padrão da NBR 15575-1 [11] para o modelo de referência, por vidro de melhor desempenho térmico, de modo a verificar como esses elementos alterariam o desempenho térmico geral dos sistemas construtivos analisados.

Para a escolha dos novos vidros, foi considerado como critério o ΔPHFT necessário para que os sistemas construtivos pudessem alcançar o nível superior de desempenho térmico quando aplicados ao clima de Foz do Iguaçu - PR. Optou-se então, por considerar a substituição de um vidro com fator solar elevado (FS = 0,87) (vidro 3 mm padrão da norma) por um significativamente menor (FS = 0,31). O vidro escolhido foi o “Cool-Lite SKN Verde” da fabricante CEBRACE, publicado no anexo da portaria INMETRO Nº 50/2013 [16] e denominado nesse trabalho “vidro verde 8 mm”.

RESULTADOS

Com base nos resultados apresentados nas Tabelas 10 e 11, e considerando a tolerância estabelecida na norma, todos os sistemas construtivos analisados cumpriram satisfatoriamente os critérios para obtenção do nível mínimo de desempenho térmico.

A classificação do desempenho térmico nos níveis intermediário ou superior demanda o atendimento a critérios adicionais. Como o resultado do $PHFT_{UH,ref}$ ficou inferior a 70%, o incremento do PHFT dos modelos reais deveria ser ΔPHFT ≥ 13,4%, tanto para o nível intermediário quanto para o nível superior. Sendo assim, nenhum sistema construtivo analisado poderia ser classificado com tais níveis de desempenho térmico.

Tabela 10: Simulação dos modelos na condição com ventilação natural

Código	Sistema Construtivo	$To_{máx}$ [ºC]	$To_{mín}$ [ºC]	PHFT [%]	ΔPHFT [%]
SVVE $_{ref.}$	Modelo de referência	36,5	12,9	40,8	-
SVVE 01	EIFS CLT 80 mm	32,0	16,5	53,8	13,0
SVVE 02	EIFS CLT 95 mm	32,0	16,6	53,9	13,1
SVVE 03	Placa cimentícia CLT 80 mm	32,0	15,4	53,4	12,6
SVVE 04	Placa cimentícia CLT 95 mm	32,0	15,6	53,3	12,5
SVVE 05	Alvenaria convencional	32,1	12,8	52,2	11,4
Critérios - nível M de desempenho térmico		≤ 38,5	≥ 11,9	> 36,7	-
Critérios - níveis I e S de desempenho térmico					≥ 13,4

Fonte: A autora, 2022.

Tabela 11: Simulação dos modelos na condição sem ventilação natural

Código	Sistema Construtivo	CgTR [kWh/ano]	CgTA [kWh/ano]	CgTT [kWh/ano]	RedCgTT [%]
SVVE $_{ref.}$	Modelo de referência	5120,1	430,8	5550,9	-
SVVE 01	EIFS CLT 80 mm	2774,2	80,0	2854,2	48,6
SVVE 02	EIFS CLT 95 mm	2771,9	75,0	2846,9	48,7
SVVE 03	Placa cimentícia CLT 80 mm	2626,5	174,0	2800,5	49,5
SVVE 04	Placa cimentícia CLT 95 mm	2649,4	158,2	2807,6	49,4
SVVE 05	Alvenaria convencional	2396,3	553,1	2949,4	46,9
Critério - nível I de desempenho térmico					0
Critério - nível S de desempenho térmico					≥ 40

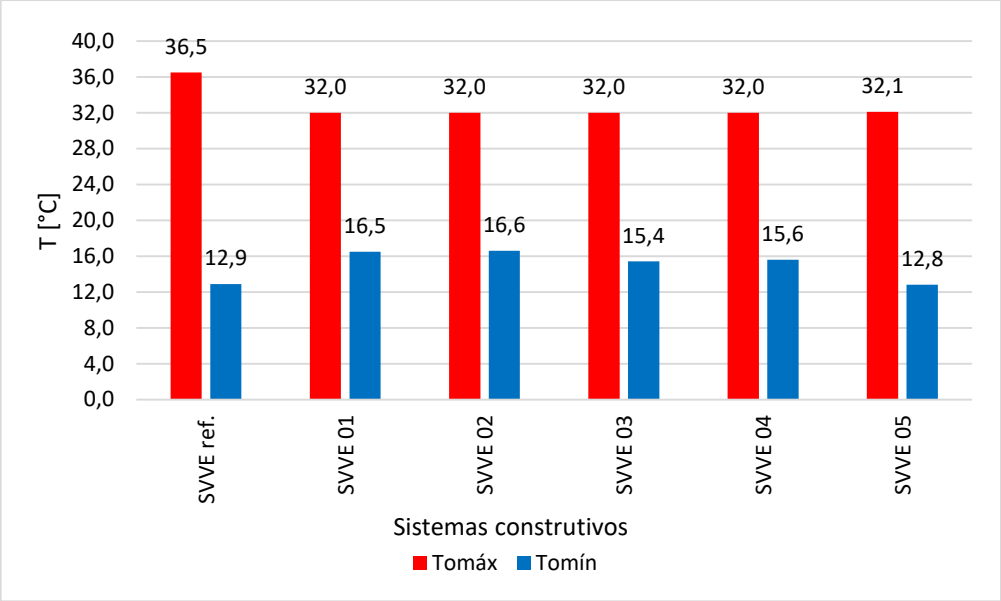
Fonte: A autora, 2022.

Outro critério é com relação a porcentagem de redução das cargas térmicas totais. Para o nível intermediário essa redução não era necessária, porém para classificação no nível superior, deve-se obter redução da carga térmica total RedCgTT ≥ 40%, pois a divisão da carga térmica total do modelo de referência ($CgTT_{UH,ref}$) pela área total de piso dos APPs resultou em 168,5 kWh/(ano.m²). Considerando apenas esse critério, todos os modelos simulados poderiam ser classificados com o nível superior de desempenho térmico, contudo, eles foram reprovados no critério de ΔPHFT mínimo.

Todos os sistemas construtivos em CLT apresentaram melhor desempenho térmico nas condições de inverno quando comparados ao sistema em alvenaria convencional,

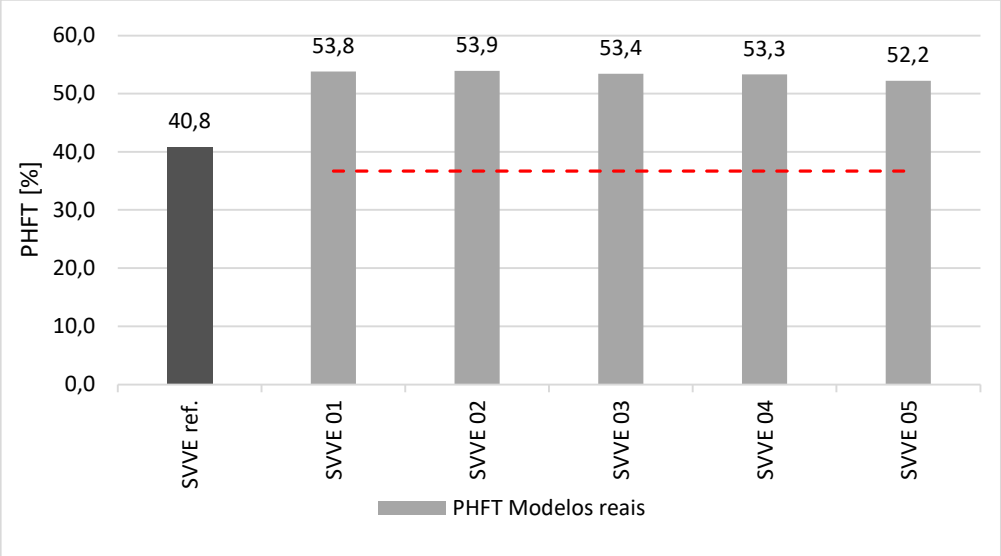
refletido nas maiores temperaturas operativas mínimas e nos maiores percentuais de horas dentro da faixa de temperatura operativa (PHFT), (Figuras 5 e 6).

Figura 5: Resultados temperaturas operativas



Fonte: A autora, 2022.

Figura 6: Resultados PHFT



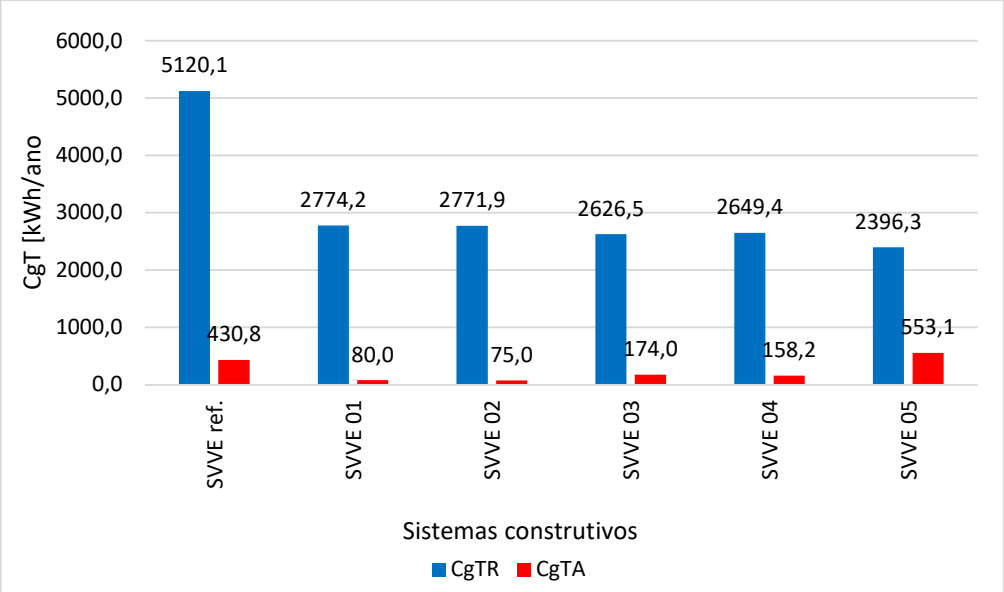
Fonte: A autora, 2022.

O melhor desempenho térmico dos modelos em CLT nos períodos frios, também pode ser observado, quando analisadas as cargas térmicas de aquecimento (Figura 7). Isso ocorre porque esses sistemas construtivos em madeira apresentam maior isolamento térmico que o sistema em alvenaria convencional analisado.

Embora, as temperaturas operativas máximas obtidas sejam quase idênticas, observa-se que a carga térmica para refrigeração dos sistemas construtivos em CLT foi maior que a do sistema construtivo em alvenaria convencional. Porém, conforme ilustrado na Figura 8, as cargas térmicas totais dos sistemas construtivos em madeira resultaram menores que no sistema construtivo em alvenaria convencional. Este fato se deve à

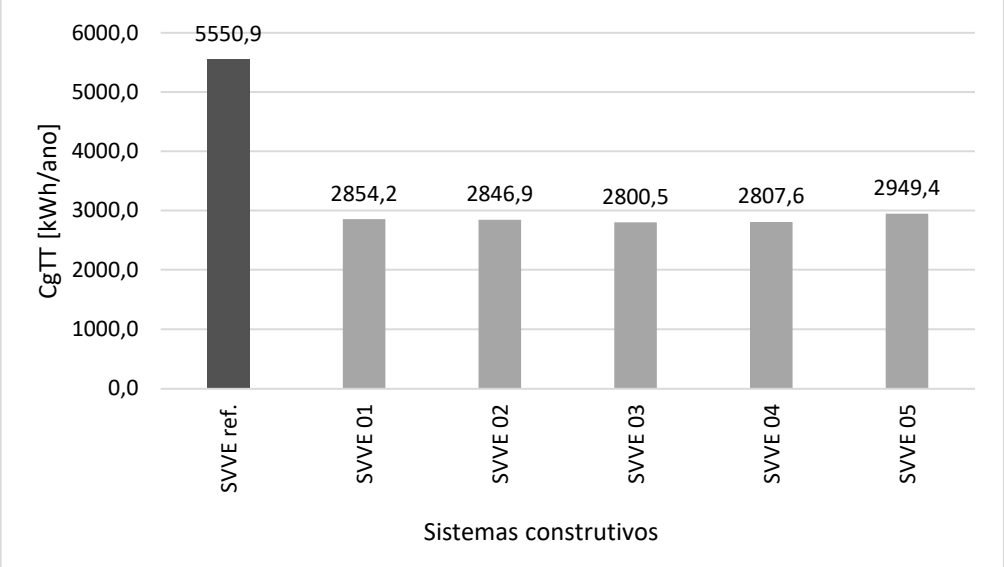
maior carga térmica de aquecimento demandada pelo sistema construtivo em alvenaria convencional, que compensa a menor carga térmica de refrigeração.

Figura 7: Cargas térmicas para refrigeração e aquecimento



Fonte: A autora, 2022.

Figura 8: Cargas térmicas totais



Fonte: A autora, 2022.

Notou-se que existe alguma variabilidade no desempenho térmico dos sistemas construtivos em CLT, associada diretamente à espessura do painel e à presença ou não de material de isolamento térmico (EPS). Como esperado, o desempenho térmico no inverno é superior com o aumento da espessura e conforme se incorpora isolante térmico.

Conforme descrito na metodologia, o vidro utilizado nas primeiras simulações foi o vidro que a norma especifica para o modelo de referência, denominado nesse trabalho como “vidro 3 mm padrão da norma”. Com isso, todos os sistemas construtivos analisados obtiveram a classificação mínima de desempenho térmico de acordo com

[11] pois, os resultados obtidos para o critério de ΔPHFT dos modelos reais ficaram abaixo do necessário para que pudessem alcançar os níveis intermediário ou superior de desempenho térmico quando aplicados ao clima de Foz do Iguaçu – PR.

Após a substituição dos vidros das aberturas, todos os sistemas simulados passaram a atender o critério do nível superior de desempenho térmico estabelecido pela NBR 15575-1 [11], conforme apresentado na Tabela 12. Notou-se adicionalmente ligeira diminuição das $To_{máx}$ e $To_{mín}$, indicando redução da influência da radiação solar nas temperaturas internas dos modelos. Esse fenômeno pode ser encarado como positivo nos períodos quentes, porém, menos desejável no inverno.

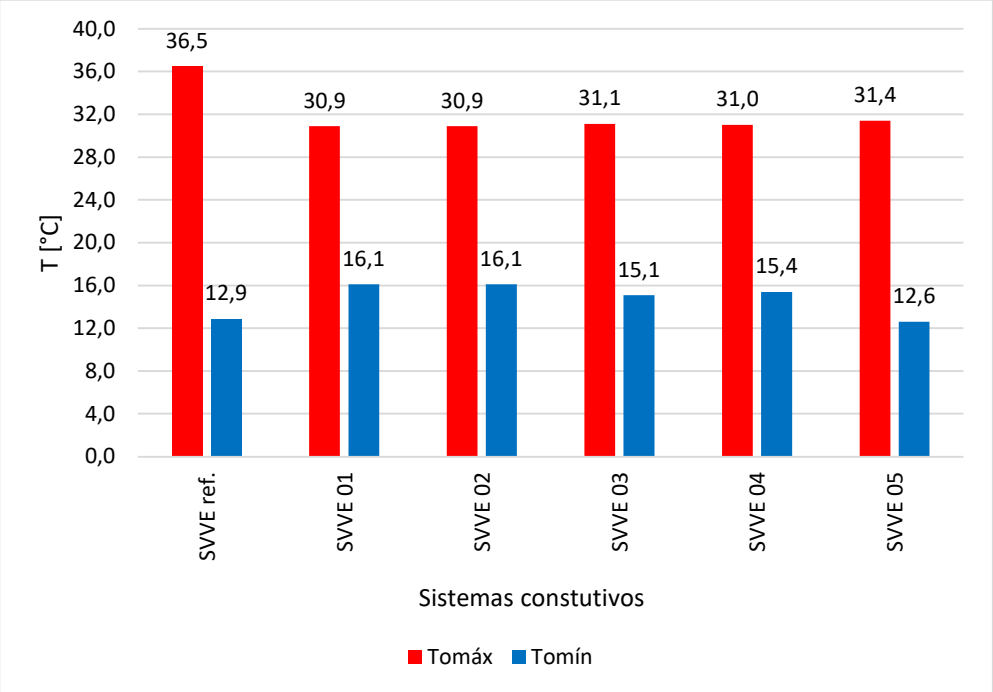
Tabela 12: Resultados vidro verde 8 mm com ventilação natural

Código	Sistema Construtivo	$To_{máx}$ [%]	$To_{mín}$ [%]	PHFT [%]	ΔPHFT [%]
SVVE $_{ref.}$	Modelo de referência	36,5	12,9	40,8	
SVVE 01	EIFS CLT 80 mm	30,9	16,1	58,4	17,6
SVVE 02	EIFS CLT 95 mm	30,9	16,1	58,4	17,6
SVVE 03	Placa cimentícia CLT 80 mm	31,1	15,1	57,3	16,5
SVVE 04	Placa cimentícia CLT 95 mm	31,0	15,4	57,5	16,7
SVVE 05	Alvenaria convencional	31,4	12,6	55,2	14,4
Critérios - nível M de desempenho térmico		≤ 38,5	≥ 11,9	≥ 36,7	-
Critérios – níveis I e S de desempenho térmico					≥ 13,4

Fonte: A autora, 2022.

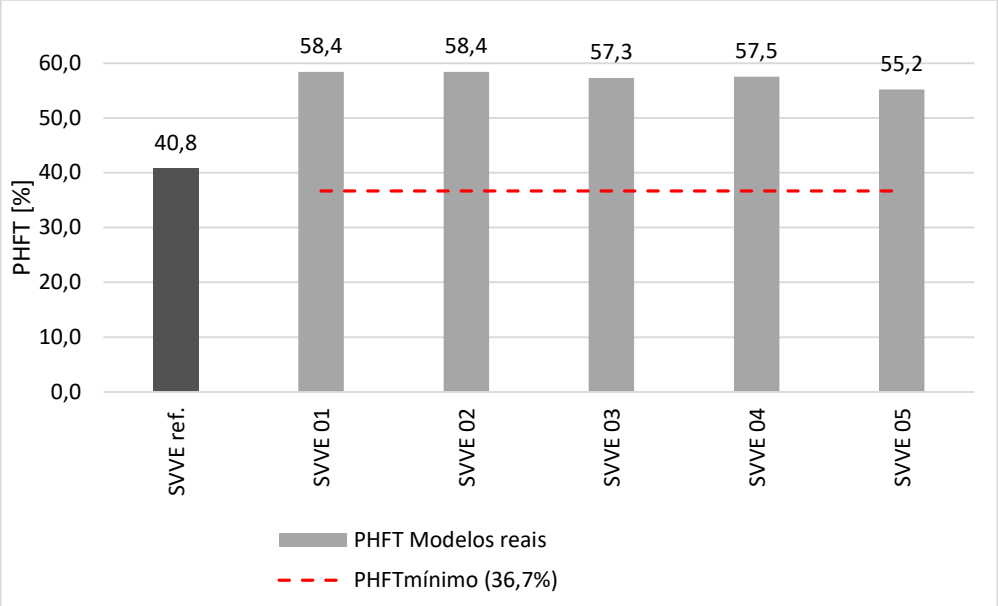
Além disso, foi possível observar que, embora o desempenho térmico do sistema construtivo em alvenaria convencional também tenha melhorado nos períodos quentes (evidenciado pela diminuição de $To_{máx}$), seu desempenho térmico nos períodos frios, que já era baixo, quando considerado o uso do vidro 3 mm padrão da norma, ficou ainda inferior com a utilização do vidro verde 8 mm, (Figuras 9 e 10).

Figura 9: Resultados temperaturas operativas vidro verde



Fonte: A autora, 2022.

Figura 10: Resultados PHFT vidro verde



Fonte: A autora, 2022.

No que diz respeito à condição sem ventilação natural, a Tabela 13 apresenta os resultados das cargas térmicas. Observou-se que em todos os modelos construtivos houve diminuição na carga térmica para refrigeração (CgTR) e aumento na carga térmica para aquecimento (CgTA), como consequência da menor quantidade de radiação solar que consegue atravessar o vidro e atingir o interior dos ambientes (Figura 11). Destaca-se que o modelo com menor isolamento térmico (alvenaria convencional) apresentou a menor CgTR, porém, a maior CgTA, em comparação com os sistemas em madeira e com o modelo de referência da norma.

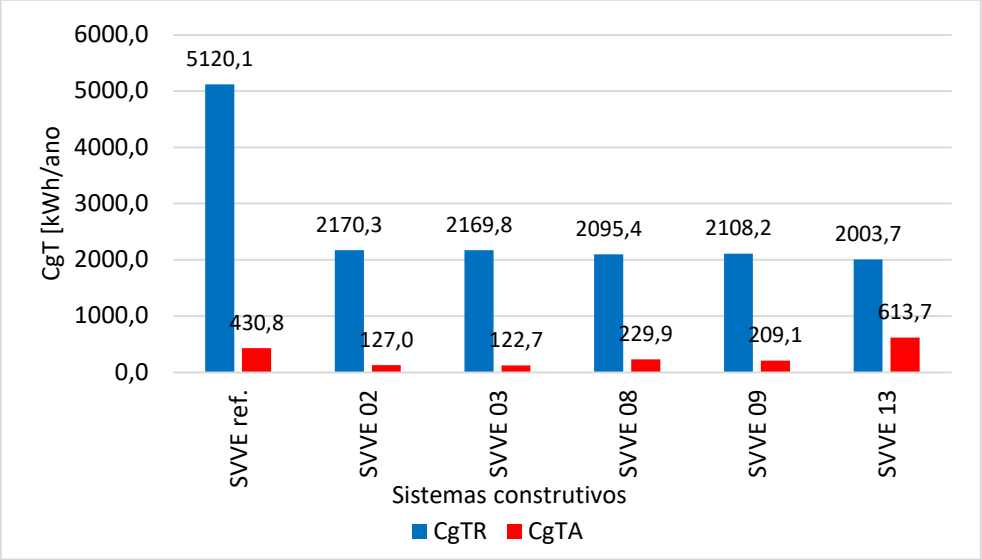
Tabela 13: Resultados vidro verde sem ventilação natural

Código	Sistema Construtivo	CgTR [kWh/ano]	CgTA [kWh/ano]	CgTT [kWh/ano]	RedCgTT [%]
SVVE $_{ref.}$	Modelo de referência	5120,1	430,8	5550,9	-
SVVE 02	EIFS CLT 80 mm	2170,3	127,0	2297,3	58,6
SVVE 03	EIFS CLT 95 mm	2169,8	122,7	2292,5	58,7
SVVE 08	Placa cimentícia CLT 80 mm	2095,4	229,9	2325,3	58,1
SVVE 09	Placa cimentícia CLT 95 mm	2108,2	209,1	2317,3	58,3
SVVE 13	Alvenaria convencional	2003,7	613,7	2617,4	52,8
Critério - nível I de desempenho térmico					0
Critério - nível S de desempenho térmico					≥ 40

Fonte: A autora, 2022

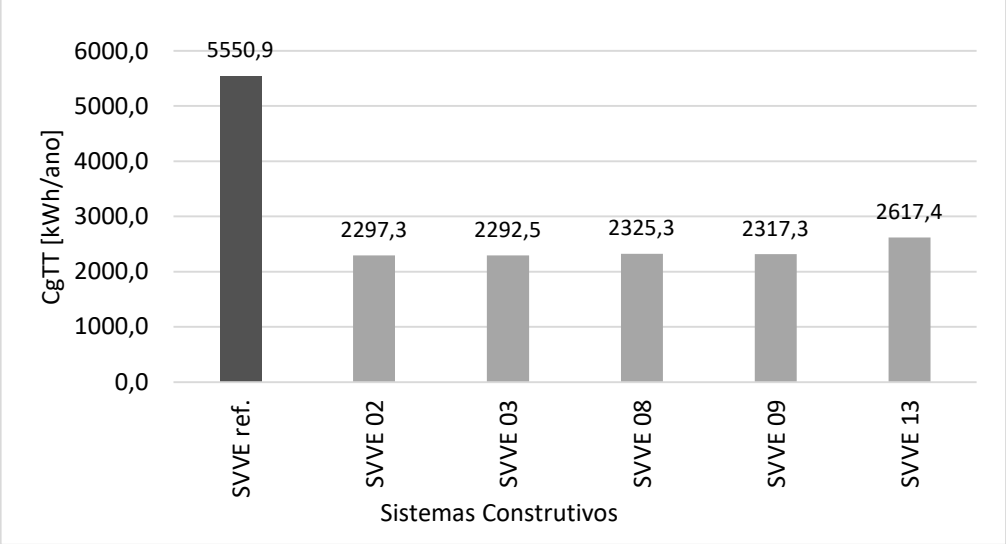
Antes da substituição dos vidros, todos os sistemas construtivos analisados já apresentavam reduções das cargas térmicas totais acima do limite estabelecido para serem classificados com o nível superior de desempenho térmico (RedCgTT ≥ 40%). Com essa substituição, a RedCgTT ficou próxima a 60% para os sistemas em madeira, enquanto que com vidros de 3 mm a redução se aproximava de 50%. Já no sistema em alvenaria convencional, a RegCgTT subiu de 46,9% para 52,8% (Figura 9). A Figura 10 apresenta as CgTT dos sistemas construtivos analisados em comparação com o modelo de referência.

Figura 11: Cargas térmicas para refrigeração e aquecimento vidro verde



Fonte: A autora, 2022

Figura 12: Cargas térmicas para refrigeração e aquecimento vidro verde



Fonte: A autora, 2022

Com base os resultados, foi possível demonstrar que a aplicação dos vidros verdes com espessura de 8 mm foi benéfica do ponto de vista de desempenho térmico. Com a substituição dos vidros, todos os sistemas construtivos alcançaram o nível superior de desempenho térmico da NBR 15575 1 [11].

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando os períodos frios do ano, os sistemas construtivos em CLT apresentaram desempenho térmico consideravelmente superior à alvenaria convencional, evidenciado pela disparidade nas temperaturas mínimas operativas e nas cargas térmicas para aquecimento.

Notou-se que para todos os sistemas construtivos avaliados sob as condições climáticas de Foz do Iguaçu - PR, a adoção de vidros com melhor comportamento

térmico favoreceu os resultados, porém, de maneira mais significativa para os sistemas construtivos em madeira.

Os resultados encontrados nessa pesquisa foram condizentes com os resultados publicados por [17]. Os pesquisadores analisaram dois tipos de painéis CLT, sendo: um com 60 mm (3 lamelas de 20 mm) e o outro com 100 mm (5 lamelas de 20 mm); revestidos internamente com placas de gesso acartonado e externamente com um painel de madeira de 2 cm e três tipos de isolamento (câmara de ar não ventilada de 3 cm, lã de vidro de 3 cm e lã de vidro de 10 cm; totalizando seis tipologias de sistemas de vedações verticais em CLT.

Ao comparar os resultados obtidos dos sistemas em CLT com um sistema em alvenaria convencional, nas condições climáticas de três cidades brasileiras: Curitiba – PR (ZB1), São Paulo – SP (ZB3) e Belém – PA (ZB8); Nunes et al. (2020) concluíram que, no geral, os painéis CLT, apresentam os melhores resultados de desempenho térmico considerando um dia típico de verão e outro de inverno. Contudo, analisando os resultados apresentados na pesquisa, ficou evidente que o comportamento térmico desses sistemas é mais favorável a climas com temperaturas amenas ou mais frias do que em climas mais quentes como o da cidade de Belém.

Tomando como base esses resultados, a aplicação do sistema construtivo em painéis CLT elevou os percentuais de horas dentro da faixa de conforto estabelecida pela NBR 15575-1 [11], quando comparado ao modelo de referência e ao modelo em alvenaria convencional. Além disso, implicou numa redução de consumo energético ao longo do ano, quando considerada climatização artificial, com destaque para as maiores reduções das cargas térmicas de aquecimento.

AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem à Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA) pelo apoio financeiro para o desenvolvimento dessa pesquisa, à empresa Pisossul Engenharia e Construção e à Prefeitura Municipal de Foz do Iguaçu – PR pelas visitas técnicas e entrevistas concedidas para realização desse trabalho.

REFERÊNCIAS

[1] BRASIL. **Balanço Energético Nacional – BEN 2021**. Disponível em: https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021. Acesso em: 12 Ago. 2022.

[2] NITSCHE, P. R; CARAMORI, P. H; RICCE, W. S; PINTO, L. F. D. **Atlas Climático**. Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná – IAPAR – EMATER, 2019. Disponível em: http://www.idrparana.pr.gov.br/Pagina/Atlas-Climatico#. Acesso em: 12 Ago. 2022.

[3] OLIVEIRA, R. P. O projeto de arquitetura para clima quente e úmido: diretrizes para residências unifamiliares em Fortaleza-CE. **Revista Tecnol. Fortaleza**. Fortaleza, v. 33, n 2, p. 165-176, dez. 2012. Disponível em: https://periodicos.unifor.br/tec/article/view/4588/3699. Acesso em: 12 Ago. 2022

[4] PEREIRA, C. D; MARINOSKI, D. L; LAMBERTS, R; GÜTHS, S; GHISI, E. **Guia de medição e cálculo para refletância e absortância solar em superfícies opacas**. Centro Brasileiro de

Eficiência Energética em Edificações - CB3E. Florianópolis, mai. 2015. Disponível em: https://cb3e.ufsc.br/sites/default/files/Guia_medicao_refletancia_CB3E_v1.pdf. Acesso em: 12 Ago. 2022.

[5] WONG, N. H; JUSUF, S. K. Urban Heat Island and Mitigation Strategies at City and Building Level. In: **Advances in the Development of Cool Materials for the Built Environment**. Bentham Science Publishers, 2013. eISBN: 978-1-60805-471-8. ISBN: 978-1-60805-597-5.

[6] ARAUJO, V. A. de; VASCONCELOS, J. S; MORALES, E. A. M; GAVA, M; SAVI, A. F. Wooden residential buildings – a sustainable approach. **Bulletin of the Transilvania University of Braşov**. V. 9 nº 2. Romênia, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/312489541_Wooden_Residential_Buildings_-_A_Sustainable_Approach. Acesso em: 12 Ago. 2022.

[7] MORESCHI, J. C. Propriedades da madeira. Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal da Universidade Federal do Paraná, 2014. Disponível em: http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasmoreschi/PROPRIEDADES%20DA%20MADEIRA.pdf. Acesso em: 12 Ago. 2022.

[8] KOTEEK, M; GRIESER, J; BECK, C; RUDOLF, B; RUBEL, F. **World map of the Köppen-Geiger climate classification updated**. Meteorologische Zeitzchrift, v. 15, n° 3, p. 259-263. Berlin, 2006. DOE: 10.1127/0941-2948/2006/0130

[9] INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Normais climatológicas**. 2021. Disponível em: https://portal.inmet.gov.br/normais. Acesso em: 12 Ago. 2022.

[10] COMPANHIA DE HABITAÇÃO DO PARANÁ (COHAPAR), 2021. **Residencial Foz do Iguaçu I**. Disponível em: https://www.cohapar.pr.gov.br/Tags/Foz-do-Iguacu. Acesso em: 12 Ago. 2022.

[11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 15575-1:** Edificações habitacionais – Desempenho – Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

[12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 15220-2**: Desempenho térmico de edificações – Parte 2. Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

[13] DORNELLES, K. A. **Absortância solar de superfícies opacas**: método de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e PVA. Tese (Doutorado) Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2008. Disponível em: https://repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe/429167?guid=1651449605964&returnUrl=%2Fresultado%2Flistar%3Fguid%3D1651449605964%26quantidadePaginas%3D1%26codigoRegistro%3D429167%23429167&i=4. Acesso em: 12 Ago. 2022.

[14] DORNELLES. K. A. **Biblioteca de absortância de telhas**. Base de dados para análise de desempenho térmoenergético de edifícios. Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo - IAU - USP, São Paulo, 2021. DOE: 10.11606/9786586810103

[15] ELI, L. G; KRELLING, A. F; MENDES, L. S; SILVA, R. M. e; MAZZAFERRO, L; MELO, A. P; LAMBERTS, R. **Manual de simulação computacional de edifícios com o uso do objeto Ground Domain no programa Energyplus** – versão 9.0.1. LabEEE – Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. Florianópolis, 2019. Disponível em: https://labeee.ufsc.br/NBR15575-2020. Acesso em 12 Ago. 2022.

[16] INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). **Anexo geral V** - catálogo de propriedades térmicas de paredes, coberturas e vidros. Anexo da portaria INMETRO nº 50/2013. Brasília, 2015. Disponível em: http://www.pbeedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/anexos_rac/AnexoV.pdf. Acesso em: 12 Ago. 2022.

[17] NUNES, G. MOURA, J. D. M; GÜTHS; ATEM, C; GIGLIO, T. Termo-energetic performance of wooden dwellings: Benefits of cross-laminated timber in Brazilian climates. **Journal of Building Engineering**, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101468.