

**DESEMPENHO TÉRMICO DE UMA EDIFICAÇÃO COM PAINÉIS SANDUICHE
PRODUZIDOS COM DIFERENTES CONECTORES**

ROBERTA BASTOS DE OLIVEIRA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

BRASÍLIA – DF

ABRIL/2023

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

**DESEMPENHO TÉRMICO DE UMA EDIFICAÇÃO COM PAINÉIS SANDUICHE
PRODUZIDOS COM DIFERENTES CONECTORES**

ROBERTA BASTOS DE OLIVEIRA

ORIENTADOR: MICHELE TEREZA MARQUES CARVALHO
COORIENTADOR: RODRIGO DE MELO LAMEIRAS

BANCA EXAMINADORA
CAIO FREDERICO E SILVA
HELENICE MARIA SACTH

BRASÍLIA, 17 DE ABRIL DE 2023

**DESEMPENHO TÉRMICO DE UMA EDIFICAÇÃO COM PAINÉIS SANDUICHE
PRODUZIDOS COM DIFERENTES CONECTORES**

ROBERTA BASTOS DE OLIVEIRA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDO AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

APROVADO POR:

Prof. Michele Tereza Marques Carvalho, D.Sc (Universidade de Brasília)
(Orientador)

Prof. Rodrigo de Melo Lameiras, D.Sc (Universidade de Brasília)
(Coorientador)

Prof. Caio Frederico e Silva, D.Sc (Universidade de Brasília)
(Examinador Interno)

Prof. Helenice Maria Sacht, D.Sc (Universidade Federal da Integração Latino-Americana)
(Examinador Externo)

BRASÍLIA, 17 DE ABRIL DE 2023

FICHA CATALOGRÁFICA

OLIVEIRA, ROBERTA BASTOS DE

Desempenho térmico de uma edificação com painéis sanduiche produzidos com diferentes conectores. [Distrito Federal] 2023.

120 p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2023). Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

- | | |
|---------------------------------------|--------------------------|
| 1. Polímero Reforçado com Fibra (PRF) | 3. Estruturas Compósitas |
| 2. Concreto Armado | 4. Conectores |
| I. ENC/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

OLIVEIRA, R. B. (2023). Desempenho térmico de uma edificação com painéis sanduiche produzidos com diferentes conectores. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação M20-04A, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 120 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Roberta Bastos de Oliveira

TÍTULO: Desempenho térmico de uma edificação construída com painéis sanduiche para diferentes conectores.

GRAU: Mestre ANO: 2023

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Roberta Bastos de Oliveira

e-mail: robertab.o@hotmail.com

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por todas as pessoas que conheci, pelo conhecimento adquirido, e por estar vencendo mais uma etapa, e aos meus intercessores celestiais por me ajudarem a tirar ânimo todas as vezes em que pensei que não conseguiria. Gratidão por terem me feito merecedora de tudo isso.

Aos meus pais, Joana e Adailton, e ao meu irmão Mateus, meus grandes referenciais no caminho do estudo e do conhecimento. Gratidão por tudo e por tanto. Ao meu esposo e companheiro de vida Gabriel, que nesses últimos meses se mostrou incansável ao assumir as tarefas de casa pra que eu pudesse me dedicar à conclusão dessa etapa em minha vida. Obrigada por sempre se fazer presente e por toda a compreensão.

À minha segunda família Fernanda, Roberto, Giovana e Júlia por tanto amor e carinho. Vocês foram paz e segurança em meio ao caos, me permitindo viver essa etapa com mais leveza. Se não fosse o apoio de vocês de tantas formas, eu não teria conseguido. Minha eterna gratidão, meus amores.

À minha amada professora Dra. Maria Cláudia Salomão, amiga e referência. Sem seu incentivo para me inscrever no mestrado, nada disso seria possível. Obrigada por acreditar que eu conseguiria, mesmo sem eu saber.

À professora e orientadora Dra. Michele Tereza. Não tenho palavras para expressar a gratidão que tenho por ter vivido essa experiência e por toda a compreensão, companheirismo e amizade que construímos juntas sempre. Que Deus em sua infinita bondade possa retribuir tudo aquilo que eu humanamente não fui capaz.

Ao professor Dr. Rodrigo Lameiras, que me incentivou na escolha do tema, e desde sempre se prontificou a me coorientar e compartilhar comigo todo o conhecimento. Gratidão pela confiança e compreensão.

À minha querida amiga Lissa Araújo, parceira de projetos de pesquisa, choros, desabafos e risadas, que se fez tão presente, mesmo tão distante fisicamente. Sou extremamente grata por nossos caminhos terem se cruzado.

Aos amigos Gregori Ullmann e Artur Kamimura pela atenção e carinho prestados, e por me ajudarem a tornar as simulações possíveis. E à professora Dra. Ana Carolina Maciel pela prontidão em me receber e me ajudar a nortear minhas análises.

Gratidão aos professores do PECC e da Faculdade de Arquitetura por todos os ensinamentos, apoio e carinho que sempre recebi, em especial às professoras Dr. Vanda Zaroni e Raquel Blumenschein tão queridas e admiradas. Gratidão à Universidade de Brasília (UnB) por todo o suporte prestado.

Escrevo essas palavras com lágrimas, mas de extrema gratidão por ter vencido mais essa etapa, que por muitas vezes se tornou interminável. Mas ousou dizer que passaria por tudo de novo, pra ter novamente a oportunidade de crescer como cresci, como pessoa e principalmente como profissional e pesquisadora.

RESUMO

A demanda crescente por energia elétrica no Brasil aumenta a necessidade de sistemas de refrigeração, que são responsáveis por uma parcela considerável do consumo de energia elétrica nas unidades habitacionais (UH), cuja redução pode ser proporcionada pela utilização de sistemas energeticamente eficientes. Como opção tem-se os painéis sanduíches, que no entanto, apresentam geralmente conectores metálicos que geram pontes térmicas e podem reduzir o desempenho. O emprego dos conectores de Polímero Reforçado com Fibras de Vidro (FRP), surgem como alternativa. O objetivo geral é comparar o desempenho térmico de uma edificação conforme a NBR 15575 (2021a; 2021 b), verificando sobretudo o impacto dos conectores metálico e FRP nos resultados. Fez-se necessário o cálculo das resistências equivalentes seguindo os métodos da NBR 15220 (ABNT 2005; 2022) e da ASHRAE (2016), de Fluxo Paralelo e Planos Isotérmicos, além de uma simulação numérica por Elementos Finitos (MEF). Foi determinado assim o desempenho térmico pelo método simplificado para todas as situações, nas quais todos os painéis sanduíche atenderam ao nível mínimo. Em seguida, realizou-se a simulação computacional de uma UH, para cidades brasileiras das 8 zonas bioclimáticas, com variação de dois tipos de absorvância e para todos os métodos de resistência equivalente, totalizando 144 simulações no *software EnergyPlus*. Foram analisados o nível do desempenho térmico, o PHFT (percentual de horas de ocupação da UH dentro da faixa de temperatura operativa) e a CgTT (carga térmica total anual de aquecimento e resfriamento). Por conta do PHFT, 80 simulações foram reprovadas, e nas demais ocasiões, não foi possível estabelecer um padrão de redução ou aumento de CgTT ligado ao tipo de conector. Como contribuições, reforça-se que o PHFT e CgTT não podem ser analisados isoladamente para a tomada de decisão projetual, e que as estratégias bioclimáticas são imprescindíveis. Realizou-se ainda um tratamento estatístico para a verificação de significância das variáveis absorvância, método de resistência equivalente, e tipo de parede, sobre os indicadores. O método de obtenção da resistência não apresentou resultado significativo para nenhuma situação, o tipo de parede/conector foi relevante no nível de desempenho térmico apenas, e a absorvância apresentou influência significativa sobre os resultados de CgTT e nível de desempenho.

Palavras-chave: Desempenho térmico. NBR 15575. Painéis sanduíche. Conectores FRP. Ponte térmica.

ABSTRACT

The growing demand for electrical energy in Brazil increases the need for cooling systems, which are responsible for a considerable portion of the electrical energy consumption in housing units (UH), whose reduction can be provided by the use of energy-efficient systems. As an option we have the sandwich panels, which, however, usually have metallic connectors that generate thermal bridges and can reduce performance. The use of Glass Fiber Reinforced Polymer (FRP) connectors is an alternative. The general aim is to compare the thermal performance of a building according to NBR 15575 (2021a; 2021b), verifying the impact of metallic and FRP connectors on the results. It was necessary to calculate the equivalent resistances following the methods of NBR 15220 (ABNT 2005; 2022) and ASHRAE (2016), of Parallel Flow and Isothermal Planes, in addition to a numerical simulation by Finite Element Method (FEM). Thermal performance was determined by the simplified method for all situations, in which all sandwich panels achieved the minimum level. Then, the computational simulation of a UH was carried out for Brazilian cities in the 8 bioclimatic zones, with variations of two types of absorptance and for all the equivalent resistance methods, totaling 144 simulations in the EnergyPlus software. The thermal performance level, the PHFT (percentage of hours of occupancy of the UH within the operating temperature range) and the CgTT (total annual thermal load for heating and cooling) were analyzed. Due to the PHFT, 80 simulations failed, and on the other occasions, it was not possible to establish a pattern of reduction or increase of CgTT linked to the type of connector. As contributions, it is reinforced that the PHFT and CgTB cannot be analyzed in isolation for design decision making, and that bioclimatic strategies are essential. A statistical treatment was also carried out to verify the significance of the variables absorptance, method of equivalent resistance, and type of wall, on the indicators. The method for obtaining the resistance did not show significant results for any situation, the type of wall/connector was relevant in the level of thermal performance only, and the absorptance showed significant influence on the results of CgTT and performance level.

Keywords: Thermal performance. NBR 15575. Sandwich panels. FRP connectors. Thermal bridges.

SUMÁRIO

RESUMO.....	VII
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo geral	6
1.2 Objetivos específicos.....	6
1.3 Condições de contorno do estudo.....	7
1.4 Estrutura do trabalho	7
2 REVISÃO DA LITERATURA	8
2.1 Desempenho térmico de edificações.....	8
2.2 Painéis de paredes estruturais de concreto com isolamento térmico incorporado	12
2.3 Métodos de análise e determinação do desempenho térmico de edificações.....	14
2.3.1 Normatização brasileira.....	14
2.3.2 Métodos analíticos.....	20
2.3.3 Métodos experimentais.....	22
2.3.4 Métodos numéricos	22
2.3.5 BIM	23
2.4 Desempenho térmico de painéis sanduíche: estado da arte.....	25
2.5 Influência das pontes térmicas no desempenho térmico.....	28
3 METODOLOGIA	36
3.1 Etapa 1: Verificação do nível de desempenho térmico dos painéis	36
3.1.1 Parede de concreto simples e painel sanduíche sem conector.....	36
3.1.2 Painéis sanduíche com conectores metálico e PERFOFRP	36
3.1.3 Determinação do nível de desempenho térmico pelo método simplificado.....	40
3.2 Etapa 2: Simulação numérica dos painéis em 2D por MEF.....	40
3.3 Etapa 3: Simulação computacional de uma UH.....	42
3.3.1 Caracterização da Unidade Habitacional	43
3.3.2 Cidades e climas adotados.....	45
3.3.3 Dados de entrada para o Software e modelos simulados	46
3.3.4 Dados de saída dos modelos simulados	48
3.3.5 Tratamento estatístico.....	48
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	50
4.1 Etapa 1: Verificação do nível de desempenho térmico dos painéis	50
4.2 Etapa 2: Simulação numérica dos painéis em 2D por MEF.....	55

4.3	Etapa 3: Simulação computacional da UH	60
4.3.1	Análises estatísticas	65
4.3.2	Discussões	74
5	CONCLUSÕES	80
	REFERÊNCIAS	84
A.	APÊNDICE A – CÁLCULO DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA TÉRMICA PARA OS CONECTORES	93
B.	APÊNDICE B – RESULTADOS DE CGTT DA UH PARA CADA CIDADE ANALISADA	94
C.	APÊNDICE C – RESULTADOS DE PHFT DA UH PARA CADA CIDADE ANALISADA	97
D.	APÊNDICE D – RESULTADOS DE DESEMPENHO DA UH PARA CADA CIDADE ANALISADA	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exemplos de cidades representativas para as 8 zonas bioclimáticas do Brasil	11
Tabela 2 - Critérios para avaliação da transmitância e capacidade térmicas de paredes externas	16
Tabela 3 – Características dos conectores utilizados nas simulações	32
Tabela 4 – Propriedades térmicas dos materiais dos painéis e da UH	35
Tabela 5 – Cidades e climas adotados na simulação	45
Tabela 6 – Condições de conforto das cidades adotadas	46
Tabela 7 – Resultados obtidos para a resistência equivalente dos painéis	50
Tabela 8 – Comparativo entre os resultados de R_T em ($m^2 \cdot K / W$) e os 3 métodos	51
Tabela 9 – Resultados para o critério de transmitância térmica do método simplificado	53
Tabela 10 – Resultados para o critério de capacidade térmica do método simplificado	53
Tabela 11 – Resultados para o atendimento ao nível mínimo de desempenho térmico com as resistências equivalentes	54
Tabela 12 – Fluxo de calor e resistência térmica para os painéis a partir da simulação numérica	55
Tabela 13 – Compilação das resistências térmicas equivalentes (R_t) para os métodos avaliados	58
Tabela 14 – Resultados para o atendimento ao nível mínimo de desempenho térmico após simulação numérica	60
Tabela 15 – Sistemas equivalentes utilizados nas simulações computacionais	60
Tabela 16 – Resultados de C_{gTT} , PHFT e nível de Desempenho Térmico das simulações	63
Tabela 17 – Resultado da significância da absorvância na variável C_{gTT}	66
Tabela 18 – Resultado da significância da absorvância na variável PHFT	66
Tabela 19 – Resultado da significância da absorvância no nível de Desempenho Térmico	68
Tabela 20 – Resultado da significância dos 4 tipos de parede na variável C_{gTT}	69
Tabela 21 – Resultado da significância dos 4 tipos de parede na variável PHFT	69
Tabela 22 – Resultado da significância do tipo de parede e conector no nível de Desempenho Térmico	70
Tabela 23 – Resultado da significância dos métodos de resistência equivalente na variável C_{gTT}	71
Tabela 24 – Resultado da significância dos métodos de resistência equivalente na variável PHFT	71
Tabela 25 – Resultado da significância dos métodos de resistência equivalente no nível de Desempenho Térmico	72

Tabela 26 – Resumo dos resultados das análises de significância estatísticas.....	73
Tabela 27 – Ordem decrescente de CgTT entre os dois conectores, e os cenários sem conector, excluindo os casos de reprovação no desempenho térmico	77
Tabela 28 – Simulações que forneceram as maiores e menores CgTTs dentre os painéis com conectores, não reprovados pela NBR 15575.....	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática de painel sanduíche com diferentes conectores	3
Figura 2 - Zoneamento bioclimático brasileiro	11
Figura 3 – Procedimentos para avaliação de desempenho térmico	17
Figura 4 – Indicadores de desempenho térmico avaliados nas simulações	19
Figura 5 – Critérios para atendimento dos níveis mínimo, intermediário e superior de desempenho térmico por simulação computacional.....	19
Figura 6 – Esquema do cálculo de resistência equivalente pelos métodos de fluxo Paralelo e Planos Isotérmicos	21
Figura 7 – Fluxograma da Metodologia	31
Figura 8 – Distribuição dos conectores de placas planas ao longo de uma parede	33
Figura 9 – Cálculo da espessura equivalente para o conector metálico do tipo treliça	34
Figura 10 – Esquema e dimensões dos painéis.....	36
Figura 11 – Esquema de cálculo da resistência equivalente por fluxo paralelo associado ao painel sanduíche	37
Figura 12 - Esquema de cálculo da resistência equivalente por planos isotérmicos associado ao painel sanduíche	38
Figura 13 - Esquema de cálculo da resistência equivalente pela ABNT NBR 15220: 2022	39
Figura 14 - Malhas computacionais utilizadas nas simulações numéricas pelo método dos volumes finitos	41
Figura 15 - Condições de contorno dos sistemas	42
Figura 16 – Planta baixa da UH utilizada na simulação computacional	44
Figura 17 – Modelo de simulação tridimensional da UH no <i>EnergyPlus</i>	44
Figura 18 – Modelos simulados para cada cidade.....	48
Figura 19 – Comparação gráfica entre os dois tipos de conectores e os métodos de obtenção da resistência térmica equivalente total (R_T) em ($m^2 \cdot K / W$)	51
Figura 20 – Valores de transmitância térmica (U) em ($W / m^2 \cdot K$) e limites máximos normativos por zona bioclimática.....	52
Figura 21 – Valores de capacidade térmica (CT) em ($kJ / m^2 \cdot K$) e limites mínimos normativos por zona bioclimática.....	53
Figura 22 – Mapas de calor das simulações em MEF para os 4 painéis simulados (a) parede simples, (b) sanduíche sem conector, (c) sanduíche com conector metálico e (d) sanduíche com conector FRP	56

Figura 23 – Valores de transmitância térmica (U) em (W/ m ² .m ² .K) incluindo a análise por MEF e limites máximos normativos por zona bioclimática	59
Figura 24 – Gráfico da análise de significância da absorptância na variável CgTT	67
Figura 25 – Gráfico da análise de significância da absorptância na variável PHFT	67
Figura 26 – Gráfico da análise de significância da absorptância no nível de Desempenho Térmico	68
Figura 27 – Gráfico da análise de significância do tipo de parede na variável CgTT.....	69
Figura 28 – Gráfico da análise de significância do tipo de parede na variável PHFT	69
Figura 29 – Gráfico da análise da significância do tipo de parede e conector no nível de Desempenho Térmico.....	70
Figura 30 – Gráfico da significância dos métodos de resistência equivalente na variável CgTT.	71
Figura 31 – Gráfico da significância dos métodos de resistência equivalente na variável PHFT.	72
Figura 32 – Gráfico da análise da significância dos métodos de resistência equivalente no nível de Desempenho Térmico.....	73
Figura 33 – Resultado do cálculo da CgTT (kWh/ano) da UH por cidade, comparando o cenário sem conector com os dois conectores, excluindo os casos de reprovação no desempenho térmico	75
Figura 34 – Resultado do cálculo do PHFT (%) da UH por cidade, comparando o cenário sem conector com os dois conectores, excluindo os casos de reprovação no desempenho térmico	76
Figura 35 – Resultado do nível de desempenho térmico da UH por cidade, comparando o cenário sem conector com os dois conectores, excluindo os casos de reprovação no desempenho térmico	76

1 INTRODUÇÃO

O consumo de energia elétrica no Brasil vem crescendo nos últimos anos. As edificações residenciais em 2021 foram responsáveis pelo consumo de aproximadamente 11% da energia do país, segundo Brasil (2022a). E, desse consumo, em torno de 45% é proveniente de energia elétrica.

Entre 2005 e 2017, o consumo de energia elétrica do setor residencial passou de 83 TWh para 134 TWh, crescendo 61% nesse período. Tal crescimento foi fortemente influenciado pela elevação do uso de aparelhos de ar-condicionado. Em termos de participação no consumo total de eletricidade no setor residencial, o aumento da quantidade de unidades vendidas permitiu que os condicionadores de ar apresentassem um ganho de participação relevante nos últimos anos, assumindo a posição do quarto equipamento que mais consome eletricidade nos domicílios (BRASIL, 2018). Espera-se que a demanda por eletricidade devido ao uso de condicionadores de ar continue aumentando nas próximas décadas, principalmente devido ao crescimento da população.

Ainda nesse contexto, os estudos de Greici *et al.* (2021) demonstraram que a maioria da população brasileira, de acordo com a entrevista aplicada, prefere ambientes com ventilação natural em todas as zonas bioclimáticas, demonstrando a importância de serem melhorados os elementos arquitetônicos. Foi identificado também que o comportamento dos ocupantes quanto ao hábito de abrir as janelas ou acionar o aparelho de ar condicionado está ligada não só ao clima, mas também às finanças e preferências do usuário. Contudo os resultados mostram ainda que aqueles que apresentaram preferência quanto ao uso do ar condicionado, ligar o equipamento é o principal comportamento adaptativo como estratégia de resfriamento. Em outras palavras, quem já faz o uso desse equipamento, não recorre à abertura de janelas e portas quando em dias quentes, reforçando ainda mais esse aumento de demanda energética nos próximos anos.

Espera-se também, um considerável crescimento nas construções residenciais, sobretudo de Habitações de Interesse Social (HIS), a fim de atender o *déficit* habitacional existente no país, que foi maior que 5 milhões e 800 mil unidades segundo FJP (2021). Considerando o impacto

e o crescimento das HIS, é fundamental abordar esse setor nas estratégias para redução do consumo de energia no Brasil (TRIANA; LAMBERTS; SASSI, 2015).

Diante desse cenário, a elaboração de um bom projeto de uma edificação pode atuar na redução desses consumos energéticos. Freitas *et al.* (2016) ponderam que uma boa parte das edificações desperdiça grande parcela de energia para obtenção de conforto ambiental, por não incorporar em seus projetos os avanços da arquitetura bioclimática, materiais e técnicas construtivas adequadas.

Neste sentido, estimar a transmitância térmica geral dos componentes da envoltória do edifício também é crucial, a fim de otimizar o *design* e a configuração dos elementos de construção e reduzir a demanda de energia por ar condicionado durante a fase operacional. Deve-se então, escolher os elementos opacos em termos de suas diferentes camadas sucessivas, levando em consideração a espessura e a condutividade térmica de cada uma (SOARES *et al.*, 2019).

Segundo Maciel (2018), a conservação de energia nas edificações carece de uma inovação no *design* da edificação, principalmente da envoltória, pela qual se pode contribuir com a aplicação de sistemas construtivos eficientes, pensados para a localidade e clima no qual estão inseridos.

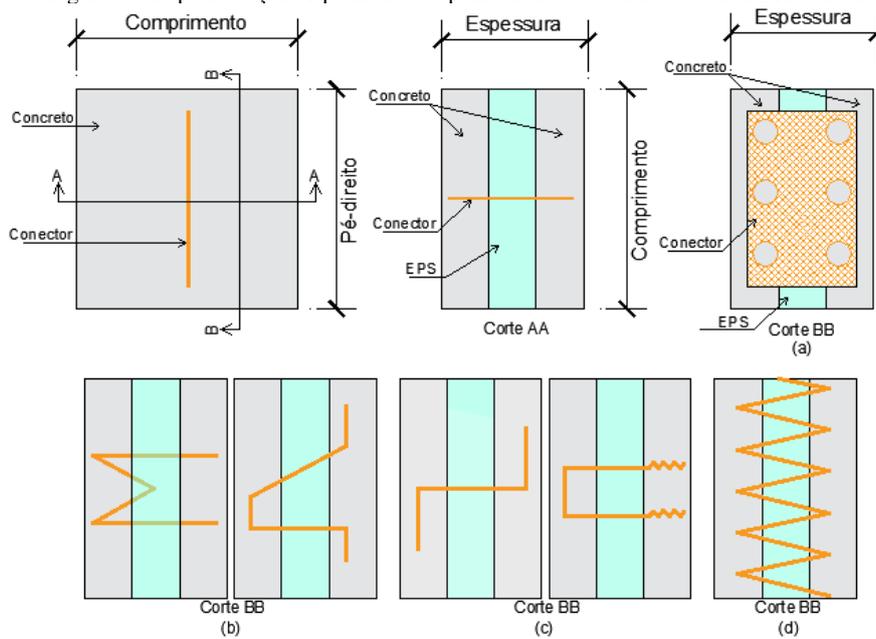
Avaliar quanto calor é perdido por meio da envoltória do edifício é um requisito vital para a simulação e auditoria de energia do edifício, e também é necessário para apoiar a tomada de decisões durante o projeto, construção e reforma (SASSINE, 2016).

Os painéis sanduíche surgem como uma opção para a manutenção do desempenho termoenergético de edificações. De acordo com Kinnane, West e Hegarty (2020) e com Yu *et al.* (2022), eles têm sido especificados em uma gama cada vez maior de edifícios com diferentes funções e localizações, principalmente, por conta dos seus benefícios de conservação de energia. Eles consistem, basicamente, em duas camadas externas de concreto, entre as quais uma camada interna, constituída por material isolante, é inserida, geralmente por placas de poliestireno expandido (EPS) ou extrudido (XPS).

A Figura 1 exemplifica um painel sanduíche com conector do tipo placa plana perfurada (a) e outros tipos de conectores como (b) barras redondas, (c) pinos e (d) treliças planas. As camadas

interna e externa são interligadas por conectores de cisalhamento, onde a variação da quantidade e do tipo dos conectores permite que o painel atue em vários níveis de ação composta (NAITO *et al.*, 2011).

Figura 1 – Representação esquemática de painel sanduíche com diferentes conectores



Fonte: A Autora (2020)

É necessário interligar as camadas de concreto, para que o painel se mantenha unido durante as etapas de içamento, transporte e ao longo da vida útil da edificação. Para este fim, são utilizados conectores, geralmente metálicos. Entretanto, a colocação dos conectores interrompe a camada de isolamento contínuo, dando origem a pontes térmicas que, no caso do aço, devido à sua alta condutividade térmica, pode conduzir energia a uma taxa muito mais alta que o isolamento, reduzindo assim a eficácia do sistema (LEE; PESSIKI, 2004, 2006). As pontes térmicas também aumentam o risco de condensação, mofo e apodrecimento nas superfícies internas, que podem ser evitadas por meio de projeto e construção adequados (TENI; KRSTIĆ; KOSIŃSKI, 2019).

Como a tecnologia dos painéis sanduíche busca uma maior eficiência energética dos painéis de vedação, uma das grandes preocupações diz respeito à redução ou eliminação dessas pontes térmicas. Nos estudos de Gioielli e Cunha (2014), Freitas *et al.* (2016) e Caetano, Souza e

Gomes (2018), tem-se a comprovação da influência das pontes térmicas para o desempenho termoenergético de edificações brasileiras. Tal cenário evidencia um problema de pesquisa relevante.

De acordo com O’Hegarty e Kinnane (2020), novos conectores de Polímero Reforçado com Fibra (PRF), comumente chamados também pela sigla FRP, do termo em língua inglesa *Fiber Reinforced Polymer*, foram desenvolvidos e testados para facilitar a transferência de cargas de cisalhamento por meio das camadas, minimizando a perda de calor localizada.

O emprego dos conectores PERFOFRP, que são placas planas e perfuradas fabricadas com Polímero Reforçado com Fibras de Vidro (PRFV) surge como alternativa para esse problema, e sua utilização em painéis sanduíche foi originalmente proposto por Lameiras (2015) e investigado por outros pesquisadores, como Huang e Dai (2019) e Silva (2020). O PRFV possui baixa condutividade térmica (0,04 W/m·K), quando comparado com o aço (50,2 W/m·K), e com o concreto (0,8 W/m·K), conforme dados de Young e Freedman (2008).

Apesar da pesquisa de Lameiras (2015) ter comprovado a viabilidade da aplicação dos conectores PERFOFRP, considerando aspectos construtivos e estruturais, não foram realizados estudos que comprovassem a melhoria do desempenho térmico dos painéis constituídos pelos conectores propostos. Assim, ainda é necessário avaliar como esses painéis e seus conectores afetam o desempenho térmico de uma edificação por meio da análise das pontes térmicas.

No contexto nacional, a análise do desempenho térmico de uma edificação é obrigatória e regulamentada pelas normas NBR 15220 (ABNT 2005; 2022). – Desempenho térmico de edificações, e NBR 15575 (2021a; 2021 b) – Edificações habitacionais – Desempenho, conhecida como “Norma de Desempenho”. É de caráter obrigatório o atendimento aos requisitos e critérios para obtenção do nível de desempenho mínimo, e facultativo para os níveis intermediário e superior.

Para o primeiro, deve ser realizado o procedimento simplificado normativo, que avalia os sistemas de vedações verticais externas (SVVE) e de coberturas. Já no segundo, faz-se necessária a simulação computacional, para análise da unidade habitacional (UH) como um todo, que avalia também aspectos como orientação solar, cor das paredes (absortância solar),

ventilação natural, condicionamento artificial, percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa, entre outros.

A ABNT NBR 15575 (ABNT, 2021a) apresenta as características que um programa de simulação computacional deve apresentar para cálculos efetivos, e o *Energy Plus* se apresenta como uma das ferramentas indicadas, além de ser comumente utilizado entre os pesquisadores da área, inclusive indicado pelo LabEEE (2022) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Nas versões anteriores, a “Norma de Desempenho” não abordava o assunto de pontes térmicas, entretanto, passou a discorrer sobre o assunto na sua última atualização de 2021, fato que contribui para a relevância do objeto de pesquisa.

Pesquisadores como O’Hegarty e Kinnane (2020), por meio de uma revisão da literatura, constataram um número considerável de estudos voltados para o desempenho estrutural de painéis sanduíche, mas uma pequena quantidade de estudos voltados para a validação térmica, sejam experimentais ou por simulação, enfatizando a necessidade de pesquisas nessa área.

Nesse mesmo sentido, O’Hegarty *et al.* (2020) também afirmam que existe uma escassez de trabalhos que avaliam termicamente os painéis sanduíche de concreto, usando métodos experimentais de teste ou simulações, sobretudo para aqueles voltados à utilização residencial que devem ter espessuras menores que as comumente estudadas e por sua vez são mais prejudicados pelas pontes térmicas. Reforçam ainda que é essencial essa validação para que sejam considerados como uma tecnologia viável para edifícios de baixo consumo de energia e alto desempenho, visto que a alta resistência térmica é um fator que os distingue de outros tipos de revestimento de concreto.

As simulações numéricas pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) auxiliam essa quantificação da transferência de calor para os modelos em regime permanente e transiente, tornando possível a verificação da presença de pontes térmicas. O’Hegarty *et al.* (2020) afirmam ainda que, o MEF pode ser usado para investigar o impacto da utilização de recursos específicos durante a fase de projeto, não considerados no passado, no desempenho térmico de painéis.

Dentro desse contexto, esta pesquisa enquadra-se nos estudos de desempenho do ambiente construído, especificamente na linha de pesquisa “Gestão e Sustentabilidade” do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília.

1.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é comparar o desempenho térmico de uma edificação para as 8 zonas bioclimáticas brasileiras conforme a NBR 15575 (2021a; 2021 b), com diferentes soluções para os painéis sanduíche de concreto aplicados nas paredes da edificação, comparando-se também os métodos de cálculo de resistência térmica (Método dos Elementos Finitos, NBR 15220 (ABNT 2005; 2022). e ASHRAE (2016).

1.2 Objetivos específicos

- Calcular a resistência equivalente, por meio de cálculos analíticos e por simulação numérica, de quatro tipos de paredes sendo: concreto simples, painel sanduíche de concreto sem conector, painel sanduíche de concreto com conector de PERFOFRP, e painel sanduíche de concreto com conector metálico;
- Determinar o nível de desempenho térmico para os quatro tipos de paredes de acordo com o método simplificado da NBR 15575-4 (ABNT 2021b) para todos os métodos de resistência equivalente;
- Calcular o PHFT (percentual de horas de ocupação da edificação dentro da faixa de temperatura operativa) e a CgTT (carga térmica total anual de aquecimento e resfriamento) para uma UH selecionada, por meio de simulação computacional, para os quatro tipos de paredes, considerando os métodos analíticos de resistência equivalente;
- Determinar o nível de desempenho térmico por meio de simulação computacional, para os quatro tipos de paredes e para os métodos analíticos de resistência equivalente, de acordo com os padrões normativos da NBR 15575-1 (ABNT, 2021a);
- Comparar os níveis de desempenho térmico, e os indicadores PHFT e CgTT, obtidos entre os quatro tipos de paredes e entre os métodos analíticos de resistência equivalente.

1.3 Condições de contorno do estudo

Algumas delimitações foram necessárias para tornar esta pesquisa viável, são elas:

- Foi utilizada uma única edificação nas simulações computacionais, visando a comparação exclusiva das características dos tipos de envoltórias analisadas. Entende-se que outras estratégias em conjunto como sombreamento, ventilação natural, área de exposição das fachadas, elementos transparentes e materiais diferentes são estratégias bioclimáticas eficazes, porém, essa diversificação de análises desviaria o foco da comparação dos painéis, sobretudo entre os conectores;
- Foi mantida também uma única orientação solar pelo mesmo princípio de ser mantido o mesmo padrão de comparação, que por sua vez é a mais crítica dentro das simulações termoenergéticas no país;
- A seleção da unidade habitacional (UH) tomada como referência nesta pesquisa não levou em consideração legislações específicas de uso e ocupação do solo de cada cidade, apesar de ter sido utilizada em um orçamento público referencial.

1.4 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está estruturado da seguinte forma:

Capítulo 1 – INTRODUÇÃO: breve contextualização do assunto, objetivos gerais e específicos;

Capítulo 2 – REVISÃO DA LITERATURA: apresentação dos conceitos e referências teóricas principais para embasamento do estudo;

Capítulo 3 – METODOLOGIA: apresentação da metodologia adotada com um fluxograma para melhor entendimento e divisão por etapas;

Capítulo 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES: explanação dos resultados obtidos com a concretização dos objetivos;

Capítulo 5 - CONCLUSÕES: apresenta-se as conclusões da pesquisa e as sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo contém uma breve contextualização do tema desempenho térmico de edificações no cenário nacional e internacional. Em seguida, tem-se uma exposição sobre o que são painéis sanduíche. São apresentados também os principais métodos de análise tratados na literatura. Por fim, tem-se uma compilação do estado da arte dos estudos que correlacionam os painéis sanduíche ao desempenho térmico de edificações, englobando o impacto das pontes térmicas nesses resultados.

2.1 Desempenho térmico de edificações

No cenário internacional as principais normas são a ISO 17772-1 (ISO, 2017a) para Desempenho Térmico, e ASHRAE Standard 90.1 (ASHRAE, 2016) e ISO 52000-1 (ISO, 2017b) para eficiência energética de edificações. Nelas, pode-se obter os parâmetros recomendados para as avaliações termoenergéticas quanto aos sistemas de aquecimento/resfriamento, ventilação, e agenda de ocupação dos ambientes.

Dentro de uma perspectiva histórica, em 2016 os regulamentos mais antigos sobre o desempenho térmico de construções completaram 40 anos na Europa (PAPADOPOULOS, 2016). Os primeiros requisitos de isolamento térmico, mencionando explicitamente valores de transmitância térmica (U), resistência térmica (R) e materiais de isolamento específicos datam das décadas de 1950 e 1960, na Alemanha e Suécia (SMEDS, 2004).

Segundo Cornelis (2019), a maioria dos países da União Europeia iniciou a discussão sobre os seus marcos regulatórios que tratam do desempenho térmico de construções a partir de 1991. Já na América do Sul, de acordo com Bienvenido-Huertas *et al.* (2019), as discussões foram iniciadas em 1976 no Chile e 1981 na Argentina, cujos países, junto com o Brasil, foram destacados por possuírem uma regulamentação consolidada de eficiência energética.

Ao longo dos anos, as regulamentações europeias tornaram-se mais rigorosas, a fim de serem alcançados valores de transmitância térmica constantemente reduzidos para os sistemas da edificação (BIENVENIDO-HUERTAS *et al.*, 2019; GALVIN, 2010; PAPADOPOULOS,

2016). Nesse sentido, tem-se a busca contínua por materiais que proporcionem o atingimento dos níveis estabelecidos.

Quanto aos valores normativos para a transmitância térmica, não é possível estabelecer uma comparação direta entre os diferentes países, visto que as exigências são proporcionais às suas zonas bioclimáticas, que por mais semelhantes que sejam, apresentam peculiaridades. Para uma visão ampla, Papadopoulos (2016) apresenta diversas comparações quanto aos critérios normativos, bem como os limites para a transmitância térmica dos sistemas de vedação vertical, piso e cobertura, para diferentes cidades europeias, com seus respectivos graus-hora de aquecimento e resfriamento.

Num cenário mais próximo, Bienvenido-Huertas *et al.* (2019), sintetizam os dados de Espanha, França, Chile, Portugal, Brasil e Argentina com os limites para os mesmos sistemas em questão, com a observação de que os três últimos não apresentam parâmetros para o sistema de pisos. É ressaltado também que dos seis países analisados, apenas o Brasil não indica a transmitância para as janelas na norma atual. Apesar das tendências diferentes entre as simulações feitas para essas regiões, os autores detectaram uma alta demanda de energia nos edifícios construídos de acordo com a regulamentação brasileira, e um consumo estimado de energia mais baixo nos países europeus.

A consideração das pontes térmicas é abordada na maioria dos regulamentos dos estados membros da União Europeia, não sendo necessariamente imposta essa consideração, como na Itália onde há apenas a recomendação da sua observância (PAPADOPOULOS, 2016). A norma ISO 14683 (ISO, 2007) é a principal referência para o cálculo da transferência de calor através das pontes térmicas nos países europeus, estabelecendo um método simplificado para determinação dos fluxos de calor considerando pontes térmicas lineares.

Os regulamentos europeus atuais são partes integrantes da Diretiva de Desempenho Energético dos Edifícios, com seu objetivo de alcançar o status Quase Zero de Edifícios Energéticos (*Zero Energy Buildings - ZEB*), reforçando a aplicabilidade do conceito *Passive House*. Referem-se a edificações que proporcionem conforto higrotérmico com baixo consumo de energia, não só em países de clima frio, mas também em regiões subtropicais, quentes e secas (VETTORAZZI, 2019).

Echarri-Iribarren *et al.* (2019) enfatizam o desafio para atingir esse propósito nas regiões mais quentes para que sejam garantidos desempenhos aceitáveis no verão. Para os países da América do Sul, Bienvenido-Huertas *et al.* (2019) apontam como promissora a busca por ZEBs, apesar de não detectadas medidas específicas para esse objetivo.

Atualmente, além dos valores limites para U e R, tem-se a associação das normas internacionais do desempenho térmico da edificação com: o conforto térmico do usuário envolvendo conceitos como graus-hora de aquecimento e resfriamento, zona de conforto e temperatura operativa; com a sustentabilidade, como é o caso das certificações ambientais; e eficiência energética como os programas de etiquetagem.

No Brasil, a partir da atualização da ABNT NBR 15575 em 2021, os assuntos de desempenho térmico e conforto passaram a ser abordados em conjunto.

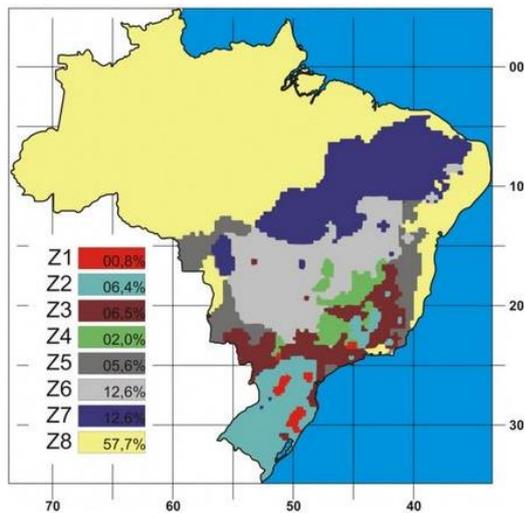
Como certificação ambiental nacional, existe o Selo Casa Azul da Caixa Econômica Federal e outras de origem internacional como o LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*) e AQUA (Alta Qualidade Ambiental) que são utilizadas como atrativo de mercado na maioria das vezes e possuem organismos certificadores no país.

Por fim, a etiquetagem no Brasil é estabelecida pela Instrução Normativa Inmetro para edificações residenciais (INI-R) e comerciais (INI-C), lançada pelo INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia) com apoio do PROCEL Edifica (Programa de Eficiência Energética em Edificações) e da Eletrobras, como um meio voluntário de etiquetagem energética, estabelecido no ano de 2012 (BRASIL, 2012), e atualizado em 2022 (BRASIL, 2022b), também atualizado para conformidade com os novos métodos de cálculos e simulação da NBR 15575 (2021a; 2021 b). Os níveis da etiqueta variam de A (mais eficiente) para E (menos eficiente) onde são avaliados aspectos como envoltória e sistema de aquecimento de água para residências.

O desempenho térmico faz parte do critério de habitabilidade da normativa vigente (NBR 15575 (2021a; 2021 b), onde a edificação deve atender às exigências mínimas considerando-se a zona bioclimática definida na NBR 15220-3 (ABNT, 2005). O território brasileiro é dividido em oito

zonas (Figura 2), relativamente homogêneas quanto ao clima e, para cada uma delas, tem-se um conjunto de recomendações técnico-construtivas como as do PROJETEEE (2022), que otimizam o desempenho térmico das edificações, por meio de sua melhor adequação climática. A Tabela 1 apresenta algumas cidades representativas de cada zona bioclimática brasileira. Na NBR 15220-3 (ABNT, 2005) pode ser consultada a lista completa de todas as cidades que possuem arquivo climático e seu zoneamento. A plataforma (PROJETEEE, 2022) apresenta de forma didática as melhores estratégias bioclimáticas para cada cidade brasileira de acordo com a zona no qual está inserida.

Figura 2 - Zoneamento bioclimático brasileiro



Fonte: ABNT (2005a)

Tabela 1 – Exemplos de cidades representativas para as 8 zonas bioclimáticas do Brasil

Zona Bioclimática	Exemplo de cidade
Zona 1	Curitiba
Zona 2	Santa Maria
Zona 3	Belo Horizonte
Zona 4	Brasília
Zona 5	Duque de Caxias
Zona 6	Campo Grande
Zona 7	Cuiabá
Zona 8	Salvador

Fonte: A Autora (2023)

É válido ressaltar que, já existe uma atualização proposta para uma nova divisão do território brasileiro em 10 zonas bioclimáticas, que correlaciona dados de carga térmica, climas, relevo e biomas (WALSH, CÓSTOLA e LABAKI, 2023).

Quanto às classificações bioclimáticas internacionais, tem-se a definida pela ASHRAE Standard 90.1 e a classificação Köppen-Geiger (KOTTEK *et al.*, 2006). A primeira divide o Brasil somente em quatro zonas, que vão de levemente quentes e úmidas a extremamente quentes e úmidas, não possuindo nenhuma zona térmica fria. Já a Köppen-Geiger divide o Brasil em nove regiões climáticas (IPEF, 2013). Apesar de considerada genérica, é a mais utilizada na climatologia, ecologia e geografia, que relaciona o clima com a vegetação, a precipitação pluvial e características sazonais de acordo com Ayoade (1996 *apud* (MACIEL, 2018).

Além dos parâmetros normativos, atenção especial deve ser dada aos materiais que compõem a envoltória da edificação, pois ao exercerem sua função de separar o ambiente interno do externo, são responsáveis por filtrar as transferências de calor, podendo afetar o consumo energético geral da edificação com um grande impacto (FAVRETTO, 2016; HALAWA *et al.*, 2018).

Pondera-se ainda que, o interesse em ter edifícios energeticamente eficientes não se limita apenas aos aspectos de sustentabilidade ambiental, mas também a razões econômicas sob uma perspectiva da edificação como um todo. Nesse sentido, os painéis sanduíche se apresentam como boa alternativa para as HIS. Além disso, a seleção e instalação de conectores estruturais é uma etapa crítica para o desempenho térmico, inclusive para o atingimento de certos limites para a transmitância térmica (KEENEHAN *et al.*, 2012).

2.2 Painéis de paredes estruturais de concreto com isolamento térmico incorporado

Os painéis de paredes estruturais de concreto com isolamento incorporado são conhecidos também como painéis sanduíche de concreto. Esses painéis consistem em uma seção interna de concreto, uma camada isolante de espuma ou placas de poliestireno expandido ou extrudido, e

uma camada externa de concreto, e podem ser concretados no local ou pré-fabricados, como já mostrado na Figura 1.

A espessura e o material de cada camada de concreto depende de sua função estrutural, cobertura requerido, ancoragem de conectores, comportamento quanto ao cisalhamento, entre outros. Frequentemente, ambas as camadas de concreto são da mesma espessura e a superfície externa pode incluir detalhes arquitetônicos para proporcionar a estética desejada (LEE; PESSIKI, 2004). A espessura do isolamento é escolhida dependendo da resistência térmica necessária do edifício (WOLTMAN; NOEL; FAM, 2017).

O arranjo mais comum consiste em duas camadas estruturais e uma para isolamento, no entanto, Lee e Pessik (2004, 2006) propuseram um painel com três camadas de concreto e duas de isolamento térmico com o objetivo de reduzir os efeitos das pontes térmicas, causadas pela interrupção da continuidade que os conectores provocam no isolante ou pelas próprias regiões sólidas de concreto que existem em algumas configurações. A magnitude das pontes térmicas depende do material utilizado para as conexões.

Os conectores são comumente metálicos, do tipo treliça plana com ângulos internos de 45° e diâmetro dos vergalhões de 10 mm (KNÖNER, 2019), mas existem outros tipos como os PERFOFRP, proposto inicialmente por Lameiras (2015) e também investigado por Huang e Dai (2019) e Silva (2020), demonstrando sua aplicabilidade nos painéis sanduíche do ponto de vista estrutural.

Os painéis sanduíche são também uma alternativa para sistemas construtivos que geram menos impacto na natureza, em comparação aos métodos construtivos tradicionais de alvenaria, e que ao mesmo tempo permitem um desempenho satisfatório das estruturas nos quais são empregados (SILVA *et al.*, 2018; ARANTES *et al.*, 2023). A utilização das fibras de vidro em substituição aos conectores metálicos reforçam ainda mais esse embasamento sustentável (COLLING, 2023). Além disso, com o advento da indústria 4.0,0, existe a recorrente preocupação de diminuir o tempo e aumentar a produção em larga escala.

Os conectores PERFOFRP podem ser facilmente padronizados para produção em massa ou customizados para uma determinada aplicação, e não necessitam de grandes plantas industriais para serem fabricados, assim como não exigem grande investimento em maquinário para serem

produzidos (SILVA, 2020). Suas dimensões mais comuns são: comprimento entre 40 e 60 cm, largura do painel respeitando um cobrimento nominal mínimo de 1,5 cm, e espessura média de 2,3 mm (LAMEIRAS, 2015; SILVA, 2020).

Silva (2020) avaliou os efeitos da variação da geometria dos conectores de PERFOFRP no comportamento mecânico das conexões de painéis sanduíche. Os conectores com furos de diâmetros iguais a 12,70 mm apresentaram os melhores desempenhos, para todos os espaçamentos entre furos adotados (1,75 mm, 2,00 mm e 3,00 mm), com a ressalva de que a otimização da configuração dos furos está associada a um espaçamento característico para cada diâmetro. Além disso, o autor não verificou uma tendência de incremento de resistência das conexões com o aumento da resistência do concreto.

Lameiras (2015) comenta ainda que a principal vantagem do uso de painéis sanduíche na construção civil está relacionada à eficiência estrutural e térmica, sendo possível inclusive obter painéis leves devido às camadas de concreto finas, rígidas e dúcteis, podendo ser facilmente manipulados e erguidos.

Quanto à eficiência termoenergética dos sistemas de uma edificação, existem normativas específicas para cada país, de acordo com as suas características bioclimáticas. Nesse sentido, tem-se a necessidade da contextualização desse tema nos âmbitos nacional e internacional.

2.3 Métodos de análise e determinação do desempenho térmico de edificações

2.3.1 Normatização brasileira

No contexto brasileiro, o método de análise e determinação do desempenho térmico de uma edificação deve seguir todos os critérios e requisitos estabelecidos na NBR 15575 (2021a; 2021 b).

Os procedimentos normativos para a avaliação do desempenho térmico são: simplificado e simulação computacional.

O primeiro avalia os sistemas de vedação vertical externo e de cobertura, e deve ser utilizado para determinação do nível de desempenho térmico mínimo da UH, envolvendo o cálculo da

transmitância térmica (U), inverso da resistência térmica total, da capacidade térmica (CT), quantidade de calor necessária para variar em uma unidade a temperatura de um sistema, e dos percentuais de abertura para ventilação e de elementos transparentes. Também deve ser considerada a absorvância (α), que depende da cor da superfície, e cujos cálculos e valores são previstos na NBR 15220 (ABNT 2005; 2022).

Para o cálculo da Resistência Térmica Total (R_T), utiliza-se a Equação 1, onde R_{se} é a resistência superficial externa e R_{si} a superficial interna, cujos valores são 0,04 e 0,13, respectivamente, considerando um fluxo de calor horizontal (ABNT, 2005b). R_t é a resistência térmica do sistema, obtida pela Equação 2, onde “ e ” é a espessura da camada em metros e “ λ ” a condutividade térmica do material em $W/(m \cdot K)$, considerando “ n ” camadas homogêneas do sistema em série.

$$R_T = R_{se} + R_t + R_{si} \quad (1)$$

$$R_t = \sum_{i=1}^n \left(\frac{e}{\lambda} \right) \quad (2)$$

A obtenção da capacidade térmica depende por sua vez da condutividade (λ) e resistência térmica (R_t), espessura (e), calor específico (c) e densidade de massa aparente (ρ) do material de cada camada (Equação 3). A Tabela 2 mostra as exigências normativas para paredes externas associando essas variáveis de acordo com a zona bioclimática (ZB).

$$C_T = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot R_{ti} \cdot c_i \cdot \rho_i = \sum_{i=1}^n e_i \cdot c_i \cdot \rho_i \quad (3)$$

Em se tratando de componentes com camadas não homogêneas, o cálculo da CT pode ser desdobrado conforme a (Equação 4), onde C_{Tj} são as capacidades térmicas dos componentes para cada seção, $j = a, b, n$ e A_j são as áreas de cada seção. O cálculo detalhado encontra-se na NBR 15220 (ABNT 2005; 2022).

$$C_T = \frac{A_a + A_b + \dots + A_n}{\frac{A_a}{C_{Ta}} + \frac{A_b}{C_{Tb}} + \dots + \frac{A_n}{C_{Tn}}} \quad (4)$$

Tabela 2 - Critérios para avaliação da transmitância e capacidade térmicas de paredes externas

Transmitância térmica U (W/ m².K)		
Zonas 1 e 2	Zonas 3 a 8	
U ≤ 2,7	α ≤ 0,6	α > 0,6
	U ≤ 3,7	U ≤ 2,5
α é a absorptância à radiação solar da superfície externa da parede.		
Capacidade térmica - CT (kJ/ m².K)		
Zonas 1 a 7	Zona 8	
CTpar ≥ 130	Sem requisito	

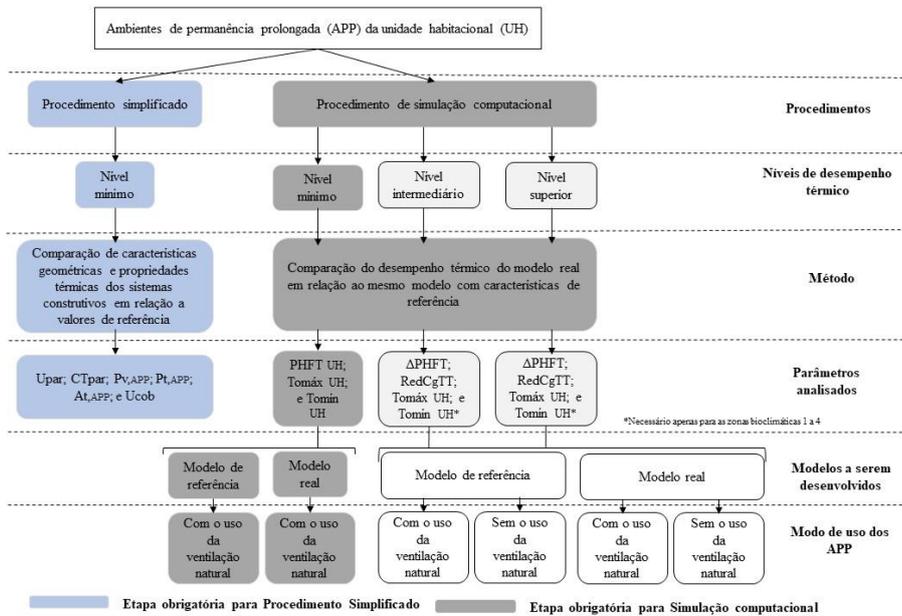
Fonte: Adaptado de ABNT (2021b)

Nesse sentido, procura-se valores menores de transmitância térmica e uma maior capacidade térmica para um bom desempenho térmico dos sistemas, dentro dos limites estabelecidos e para cada região bioclimática. Para verificação do atendimento aos níveis intermediário e superior, deve-se utilizar a simulação computacional.

A simulação do desempenho térmico da UH deve ser realizada para os ambientes de permanência prolongada (APP), que são os ambientes que possuem ocupação contínua por um ou mais indivíduos, como salas e dormitórios.

A Figura 3, resume os procedimentos de avaliação do desempenho térmico da NBR 15575 (2021a; 2021 b) (ABNT, 2021a). O modelo real consiste na modelagem da UH avaliada conservando suas características geométricas, propriedades térmicas e composições construtivas, enquanto o modelo de referência mantém as dimensões da UH com as demais características estabelecidas na ABNT NBR 15575-1 (ABNT, 2021a). A determinação do nível de desempenho térmico da UH acontece a partir da comparação dos parâmetros obtidos nessas duas situações: PHFT (percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa); CgTT (carga térmica total); To máx (temperatura operativa máxima) e To mín (temperatura operativa mínima).

Figura 3 – Procedimentos para avaliação de desempenho térmico



Fonte: Adaptado de ABNT (ABNT, 2021a)

A versão de 2013 da “Norma de Desempenho” recomendava a utilização dos dados climáticos de referência para as temperaturas externas, correspondentes aos dias típicos de projeto de verão e de inverno, que, no entanto, tinha suas fronteiras questionadas (FERREIRA; PEREIRA, 2012; OLIVEIRA; ALVES, 2019; OLIVEIRA; ALVES, 2021; OLIVEIRA; SALOMÃO, 2018; SILVA *et al.*, 2014; SOARES; SILVA, 2013; SORGATO *et al.*, 2012; SORGATO; MELO; LAMBERTS, 2013; ZANONI; SANCHEZ; BAUER, 2017), já recomendavam a simulação ao longo de todo o ano totalizando 8760 horas. A última publicação de 2021 traz por fim essa obrigatoriedade de simulação anual com a utilização de arquivos climáticos das cidades desejadas, provenientes da base-padrão com características mínimas exigidas.

Para as etapas de simulação computacional, a ABNT NBR 15575-1 (ABNT, 2021a) estabelece as características que o *software* deve possuir, com os *inputs* e *outputs* necessários. O *EnergyPlus* cumpre essas exigências e por isso é comumente utilizado entre os pesquisadores. Nele, a simulação ocorre com a inserção do arquivo climático da cidade selecionada e de um

arquivo de extensão *.idf* com os dados referente à modelagem que, posteriormente, são submetidos aos algoritmos matemáticos do *software* para realização da simulação.

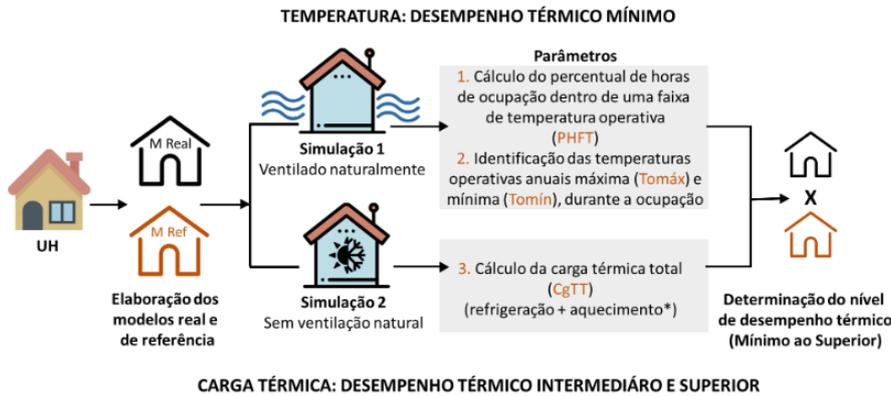
Os dados do *idf* podem ser visualizados e alterados em um editor de texto. É neste arquivo que todo o modelo é configurado para simulação e nele ficam salvas todas as características do modelo: volumetria, localização, rotinas de ocupação da UH, cargas internas, materiais que compõem o sistema construtivo com suas respectivas propriedades térmicas. Existem também *plugins* que podem atuar como meio gráfico para facilitar a modelagem da geometria e a inserção dos dados no arquivo *idf*, como o caso do *Euclid*, que funciona dentro do *SketchUp*.

Os *outputs* das simulações devem ser: temperatura operativa horária e as cargas térmicas para aquecimento e refrigeração para cada APP. Define-se temperatura operativa como o valor médio entre a temperatura do ar e a temperatura radiante média do ambiente, após consideradas as rotinas de ocupação e cargas internas de iluminação e equipamentos.

Após a realização das simulações computacionais seguindo todas as indicações normativas, são obtidos os dados de saída por UH a partir desses *outputs*, resumidos também na Figura 4:

- PHFT (%): percentual de horas de ocupação da UH dentro da faixa de temperatura operativa de cada zona bioclimática;
- To máx (°C) e To mín(°C): temperatura operativa anual máxima e mínima detectada na simulação da UH;
- CgTT (kWh/ano): carga térmica total anual de aquecimento e resfriamento de cada APP, cujas somas resultados nas cargas térmicas totais da UH.

Figura 4 – Indicadores de desempenho térmico avaliados nas simulações



Fonte: LabEEE (2022)

A Figura 5 mostra os critérios normativos para atingimento dos níveis de desempenho térmico da UH, por meio da comparação entre os indicadores obtidos para o modelo real e modelo de referência.

Figura 5 – Critérios para atendimento dos níveis mínimo, intermediário e superior de desempenho térmico por simulação computacional

NÍVEL DE DESEMPENHO TÉRMICO	CRITÉRIO
MÍNIMO	$PHFT_{UH,real} > 0,9 \cdot PHFT_{UH,ref}$ $Tomáx_{UH,real} \leq Tomáx_{UH,ref} + \Delta Tomáx$ $Tomín_{UH,real} \geq Tomín_{UH,ref} - \Delta Tomín^1$
INTERMEDIÁRIO	$\Delta PHFT \geq \Delta PHFT_{min}$ $Tomáx_{UH,real} \leq Tomáx_{UH,ref} + \Delta Tomáx$ $Tomín_{UH,real} \geq Tomín_{UH,ref} - \Delta Tomín^1$ $RedCgTT \geq RedCgTT_{min}$
SUPERIOR	$\Delta PHFT \geq \Delta PHFT_{min}$ $Tomáx_{UH,real} \leq Tomáx_{UH,ref} + \Delta Tomáx$ $Tomín_{UH,real} \geq Tomín_{UH,ref} - \Delta Tomín^1$ $RedCgTT \geq RedCgTT_{min}$

Fonte: LabEEE (2022)

O LabEEEE (2022) disponibiliza também uma planilha que facilita o cálculo desses indicadores e a determinação do nível de desempenho térmico da UH, por meio da inserção dos *outputs* obtidos na simulação computacional.

Além do contexto normativo brasileiro, são listadas na literatura outras formas de obtenção das variáveis térmicas R_t e U .

2.3.2 Métodos analíticos

A Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar Condicionado (ASHRAE, 2001) apresenta três métodos para o cálculo da resistência térmica do sistema (R_t): método de zona, método de fluxo paralelo e método de planos isotérmicos. Neles, as resistências térmicas dos materiais são tratadas como resistências elétricas dispostas em paralelo ou em série, ou uma combinação das duas, para estimar a resistência térmica do conjunto (LEE; PESSIKI, 2004). Para Kim e Allard (2014), esses métodos podem facilmente ser aplicados para os painéis sanduíche na obtenção da resistência térmica equivalente.

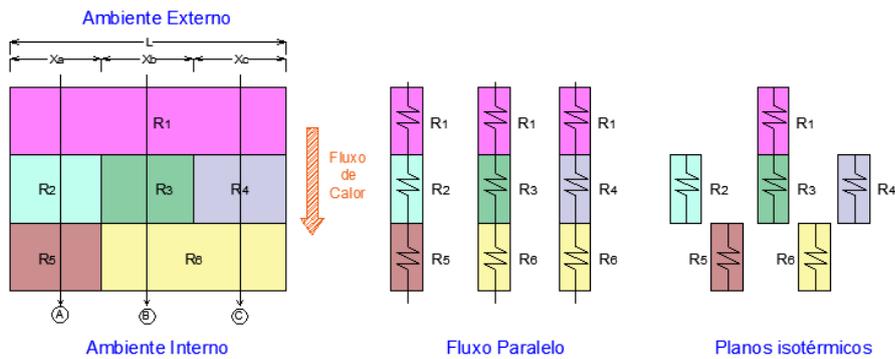
O método de fluxo paralelo assume que o calor flui num conjunto de diferentes materiais em caminhos paralelos de diferentes condutividades, não havendo fluxo de calor lateral entre eles. Determina-se a resistência em série de cada caminho, e posteriormente, a R_t considera esses caminhos em paralelo.

O método de planos isotérmicos assume que o calor flui lateralmente em qualquer camada contínua, resultando em planos isotérmicos transversais. A R_t é obtida pela soma das resistências individuais de cada caminho, que são calculadas pelo método de fluxo paralelo.

Já no método de zona, sua aplicação é recomendada quando existe um espaço amplo entre elementos de alta condutividade térmica de uma área substancial de seção transversal. Deve-se determinar a largura da zona de influência desse elemento (zona A) e as demais são definidas como zona B. Calcula-se então a resistência de cada um dos caminhos pelo método de planos isotérmicos, que são posteriormente combinados pelo método de fluxo paralelo.

A Figura 6 ilustra a diferença do cálculo de resistência para os métodos de Fluxo Paralelo e Planos Isotérmicos. O exemplo contempla 6 materiais diferentes identificados por cores.

Figura 6 – Esquema do cálculo de resistência equivalente pelos métodos de fluxo Paralelo e Planos Isotérmicos



Fonte: Adaptado de Lee e Pessik (2004)

No Fluxo Paralelo, as resistências são calculadas considerando a soma da resistência de cada caminho independente (A, B e C) em paralelo, resumida na Equação 5, onde R_a , R_b ... R_n são as resistências de cada caminho paralelo, e x_a , x_b ... x_n são as frações do comprimento total L.

$$\frac{1}{R_t} = \left(\frac{x_a}{L}\right) \cdot \frac{1}{R_a} + \left(\frac{x_b}{L}\right) \cdot \frac{1}{R_b} + \left(\frac{x_c}{L}\right) \cdot \frac{1}{R_c} + \dots + \left(\frac{x_n}{L}\right) \cdot \frac{1}{R_n} \quad (5)$$

Já nos Planos Isotérmicos, a resistência térmica total pode ser obtida pela Equação 6, onde R_{L1} , R_{L2} ... R_{Lm} são as resistências individuais de cada camada que são calculadas através do método de fluxo paralelo descrito na Equação 5.

$$R_t = R_{L1} + R_{L2} + R_{L3} + \dots + R_{Lm} \quad (6)$$

No entanto, Kosny *et al.* (1994 *apud* (SOARES *et al.*, 2019) discordam que esses métodos não respondem totalmente pelos efeitos 3D criados por elementos como estrutura de aço em painéis de *steel-frame* com camadas de isolamento com fibra de vidro, pois subestimam os valores reais da resistência térmica das paredes. O estudo foi realizado em aparelho do tipo caixa quente calibrada (*Calibrated Hot Box* – CHB), comparando os resultados experimentais com as três técnicas propostas pela ASHRAE.

2.3.3 Métodos experimentais

Dentre os métodos experimentais existentes para a obtenção de variáveis térmicas, o aparelho de “caixa quente” personalizado (CHB – *calibrated hot box*) é um dos mais citados e utilizados na literatura e que pode ser usado para estimar o desempenho térmico de conjuntos como os painéis sanduíche (SANTOS, 2010). O método CHB é regulamento pela ASTM C1363-11 (ASTM, 2011), e permite a determinação das propriedades de transmissão térmica dos elementos de construção em estado estacionário, medindo o fluxo térmico através dos componentes do sistema e as correspondentes diferenças de temperatura através dele.

A caixa quente é dividida em dois lados: um quente com aquecedor de resistência elétrica; e um frio com um permutador de calor ligado a um refrigerador. O sistema a ser ensaiado é posicionado entre eles, e toda a caixa é colocada num ambiente fortemente isolado.

O ensaio é realizado estabelecendo uma diferença de temperatura constante desejada entre o painel de teste por um período de tempo, do modo a assegurar que o fluxo de calor e a diferença de temperatura existente no painel sejam constantes. Quando a temperatura do ar dentro da caixa de medição é mantida sempre a mesma, a transferência de calor entre essa caixa e a caixa de resguardo é zero. Neste momento, o fluxo de calor no painel é medido, além da obtenção das temperaturas superficiais em condições de estado estacionário.

2.3.4 Métodos numéricos

A simulação numérica do desempenho térmico das edificações com o uso de programas computacionais tem gerado várias vantagens construtivas para o estabelecimento de uma edificação energeticamente eficiente. Por meio desses recursos é possível simular o consumo de energia elétrica e o pico da carga térmica de resfriamento da edificação, otimizando o funcionamento do sistema por meio de estratégias mais eficientes (GOMES; SOUZA, 2013).

No contexto dos painéis sanduíche, devido aos seus conectores de cisalhamento ou das nervuras de concreto entre as camadas dos painéis sanduíche, tem-se uma ocorrência maior de pontes térmicas nas vedações. Algumas normas internacionais como a ISO 14683 (ISO, 2007)

descrevem procedimentos para a simplificação do cálculo de pontes térmicas lineares, entretanto, o efeito de ponte térmica pode ser superior ao previsto nesses cálculos, porque o fluxo de calor não é linear.

Nesse sentido, uma determinação mais precisa do fluxo de calor não linear pode ser fornecida por análise numérica bidimensional ou tridimensional, como as baseadas em método dos elementos finitos (MEF). Lee e Pessik (2004) demonstram os pontos fracos dos métodos do Manual da ASHRAE para cálculo da resistência térmica para painéis sanduíche e apoiam a justificativa para o uso dos cálculos por MEF, que foi utilizado pelos autores com análises bidimensionais de transferência de calor em estado estacionário. Santos (2010) também indicam a determinação da resistência térmica de painéis sanduíche pelo MEF, justificada pela comparação entre a obtenção da propriedade por método analítico e simulação numérica.

2.3.5 BIM

A utilização de *softwares* BIM (*Bulding Information Modelling*) para a modelagem de edificações tem se consolidado no mercado com as prerrogativas de proporcionar uma visualização mais realista e completa, reduzir o tempo, aumentar o grau de precisão e detalhamento, entre diversos benefícios como a previsão da demanda de energia durante as fases mais preliminares do projeto quando vinculado às análises termoenergéticas, auxiliando nas escolhas projetuais.

Os programas existentes para as simulações de desempenho (BES – Building Energy Simulation) são vários, variando a forma de entrada e saída de dados, o ambiente de modelagem e forma de visualização. Em geral, a maioria usa o *EnergyPlus* como motor de cálculo para as análises, por se tratar de um programa consolidado e capaz de atender as normativas de praticamente todos os países (MACIEL, 2018).

Alguns autores estudaram a possibilidade de automatização da análise do desempenho térmico de edificações com relação ao método simplificado da versão de 2013 da ABNT NBR 15575. Silva Junior (2016) e Silva Junior e Mitidieri Filho (2018) propuseram uma forma de incorporar a verificação dos critérios normativos de desempenho utilizando BIM por meio da verificação de regras e parâmetros (*Code Validation*) no *Autodesk Revit (Revit)*, com a atribuição de

etiquetas, filtros e cores nos elementos e ambientes da edificação. Para a análise simplificada, foi detectado um potencial de 100% de atendimento aos critérios. Entretanto, os autores ponderam que para análises mais robustas, como simulações completas, os dados podem ser enviados para análise em *softwares* específicos, como o *EnergyPlus*.

Aljundi, Pinto e Rodrigues (2016) compararam os resultados da análise de energia de uma célula de teste obtidos por uma simulação BIM, com o *Revit* e o *Green Building Studio* (GBS), e um modelo desenvolvido no *EnergyPlus* com o auxílio do *SketchUp* e *OpenStudio*. Os autores afirmam que as ferramentas BIM forneceram uma solução integrada com 100% de interoperabilidade por serem da mesma empresa. Entretanto, apresentaram grandes diferenças em relação ao modelo diretamente no *EnergyPlus*.

Apesar dos benefícios que o BIM pode proporcionar nas simulações termoenergéticas, ainda são críticos os problemas relacionados à falta de interoperabilidade e perdas de informação ao gerar o modelo energético a partir da modelagem arquitetônica.

Corroborando com essa discussão, foi detectado por meio de uma Revisão Sistemática da Literatura (OLIVEIRA; LAMEIRAS; CARVALHO, 2020), uma forte tendência quanto à necessidade de redução do tempo e dos esforços demandados no processo de modelagem e simulação termoenergética, proporcionada pelas simulações BIM-BES, além da utilização do *software Revit* associado a outro programa ou *plug-in* como o GBS. Para o cenário brasileiro, foi então pontuado uma necessidade de aprimoramento na utilização dessas duas ferramentas associadas, para eliminar possíveis problemas de interoperabilidade visto que possuem os mesmos desenvolvedores. No entanto, os autores afirmam ainda que, em se tratando de simulação térmica associada ao BIM, os problemas relacionados à interoperabilidade e à perda de informações precisam ser solucionados, para possibilitar resultados confiáveis.

Côrtes e Maciel (2021), apontam que mesmo analisando uma edificação simples e com baixo nível de detalhamento, a transferência de dados não foi satisfatória, e que projetos de maior complexidade certamente devem apresentar maiores incompatibilidades.

A utilização do GBS a partir da modelagem da edificação no *Revit*, por exemplo, também requer simplificações para camadas paralelas e homogêneas, como em Maciel (2018), Santos (2020)

e Sušnik (2020). E ainda assim, Sušnik (2020) encontrou obstáculos na transferência de dados e interpretação dos resultados.

Diante do exposto, por falta de ferramentas que permitam uma análise confiável do desempenho termoenergético de edificações em BIM, pela complexidade do sistema de vedação vertical a ser analisado (painel sanduíche com elementos heterogêneos não-paralelos ao fluxo de calor), e pelas normativas vigentes, conclui-se que as análises pelo *EnergyPlus* ainda sobressaem.

2.4 Desempenho térmico de painéis sanduíche: estado da arte

Do ponto de vista térmico, McCall (1985) conduziu um estudo sobre painéis sanduíche, constatando que o uso de conectores de pino de aço, que representa 0,08% da área do painel, pode reduzir a performance térmica desse painel em até 38%. O'Hegarty *et al.* (2020) falam de um percentual de até 70% para painéis altamente isolados.

Van Geem e Shirley (1987 *apud* (WOLTMAN; NOEL; FAM, 2017) relataram uma queda de 7% na resistência térmica de painéis sanduíche de concreto com conectores de aço inoxidável, enquanto a resistência térmica foi maior em painéis com conectores GFRP (polímero reforçado com fibra de vidro). Kosny *et al.* (2001 *apud* (WOLTMAN; NOEL; FAM, 2017) também descobriram que os painéis sanduíche com conectores de GFRP requeriam muito menos energia para proporcionar conforto térmico em comparação com a construção tradicional de *wood frame*.

Sala *et al.* (2008) analisaram numericamente em modelo estacionário e dinâmico o desempenho térmico de uma parede composta por três camadas: gesso no interior, bloco cerâmico oco e uma camada isolante de EPS na face externa. As simulações foram feitas para as condições reais da parede com camadas heterogêneas e com uma parede com camadas homogêneas equivalentes. Foram realizados também ensaios em uma unidade de CHB para fins de comparação. Os resultados obtidos com a parede homogênea equivalente foram muito semelhantes aos resultantes dos dados experimentais, com erro médio em torno de 3%. No entanto, os autores apontam percentuais maiores quando a diferença de temperatura entre o ambiente externo e o interior é reduzida, uma vez que o fluxo de calor é controlado em grande parte pelo calor sensível armazenado no material e, conseqüentemente, pela inércia da própria parede.

Kim e Allard (2014) examinaram o desempenho térmico de um sistema de parede sanduíche submetido a um ambiente típico de região fria, com variações de temperatura de 25° C a -30°C por um período de 12 h. Foram utilizados 3 tipos de conectores de aço com geometrias diferentes. Modelos tridimensionais de transferência de calor foram desenvolvidos pelo MEF para prever o comportamento térmico do sistema sanduíche e posteriormente utilizados em um estudo paramétrico para comparar o efeito das propriedades geométricas dos conectores. Os autores também discorrem sobre os três métodos indicados pela ASHRAE para determinação da resistência térmica dos painéis. Como resultados apontados, tem-se que a geometria do conector (diâmetro e comprimento) controlam a taxa de transferência de calor, e que o nível de interação térmica foi reduzido com um aumento do espaçamento entre conectores, melhorando assim a resistência térmica do sistema sanduíche.

Mayer *et al.* (2014) usaram o equipamento do tipo caixa quente protegida (*Guarded Hot Box - GHB*) para avaliar o desempenho térmico de diferentes conjuntos de paredes com camadas isolantes e conectores. Estudaram as limitações da análise 2D e desenvolveram uma abordagem de modelagem térmica de análise por elementos finitos em 3D, cujos resultados experimentais foram usados para comparação e validação. Os dados empíricos indicaram um valor de R de 15% a 32% mais baixo do que o determinado numericamente, com a ponderação de que algumas amostras apresentaram evidências quanto ao vazamento de ar, o que pode ter prejudicado os resultados.

Woltman (2014) testou dez painéis em grande escala sob condições de estado estacionário em um aparelho de “caixa quente” personalizado (*CHB – calibrated hot box*). Os painéis consistiam em duas camadas externas de concreto e uma camada intermediária de isolamento, com uma estrutura de concreto com pinos verticais. Os conectores de cisalhamento utilizados eram de GFRP, com variações de espaçamento e tamanhos, e também de aço galvanizado para fins de comparação. Quando os conectores de GFRP foram usados, esses não foram visíveis nas imagens térmicas. Em contrapartida, os conectores de aço foram claramente responsáveis por regiões de fluxo de calor preferencial, apesar de terem metade da área da seção transversal do menor conector GFRP.

Lourensini (2017) avaliou o comportamento térmico de um painel pré-fabricado em concreto armado para vedação com núcleo composto por material para isolamento térmico, por meio de cálculos da transmitância e carga térmica. As cargas térmicas foram obtidas analiticamente com fórmulas que envolvem as áreas de exposição das fachadas, resistência e transmitância térmicas, diferença de temperatura interna e externa, absorvância e o índice de radiação solar de acordo com a orientação de cada fachada. Foram avaliados três tipos de painéis: enchimento em poliuretano, EPS, e maciço, variando-se também o telhado com e sem isolamento. Foi verificado que o isolamento da cobertura foi mais significativo na redução de carga térmica do que a troca do sistema construtivo das paredes. Entretanto, analisando-se os três tipos de painéis dentro de um mesmo sistema de cobertura, os painéis maciços apresentaram uma carga térmica total em torno de 10% maior comparado aos painéis com enchimento em EPS e poliuretano, para cobertura sem isolamento, e aproximadamente 14% acima para cobertura com isolamento.

Woltman, Noel e Fam (2017) testaram diversas opções para um painel sanduíche estrutural, consistindo de uma combinação de concreto, isolamento e conectores, variando o número, tamanho, distribuição e material dos conectores de cisalhamento (aço ou GFRP), além do número e espaçamento dos pinos de concreto. Os testes experimentais foram realizados com um aparelho do tipo “caixa quente” com o objetivo de determinar as propriedades térmicas dos painéis.

Além disso, desenvolveram um modelo unidimensional de transferência de calor para prever os valores de transmitância térmica (R) de acordo com a direção do fluxo de calor e os três possíveis caminhos de transferência, obtendo a resistência térmica total, ponderando as possíveis incertezas por não considerar a interação entre os vários componentes, o potencial de perda de energia pelas interfaces, e as pontes térmicas. Por fim, concluem que as propriedades da camada de isolamento são o parâmetro mais crítico que afeta a resistência térmica dos painéis sanduíche em comparação às outras possíveis variações. Os resultados mostraram ainda que, as paredes com conectores GFRP apresentaram resistência térmica de $2,89 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$, enquanto as paredes com conectores de aço tiveram resistência térmica de $2,74 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$. Nesse sentido, os conectores GFRP atuaram a favor do desempenho térmico dos painéis.

Benedetti *et al.* (2019) desenvolveram uma correlação por um método numérico de elemento espectral que permite estimar a transmitância térmica (U) pontual nas interseções das nervuras em painéis sanduíche de concreto. Os resultados obtidos foram em função da variação dos parâmetros de largura da nervura, espessura das camadas de concreto e da camada interna, condutividade do concreto e do material isolante. A correlação tem desvio padrão igual a 4,5% e erro relativo de 10%, representando uma boa ferramenta prática, segundo os autores, sendo facilmente implementada em uma planilha ou em um código interno para cálculo de U.

Yu *et al.* (2022), propuseram um modelo analítico de cálculo de transferência de calor equivalente para painéis sanduíche de concreto com conectores metálico e de GFRP. Foram realizados também testes experimentais pelo método de “caixa quente”, e análises numéricas por elementos finitos. A espessura da camada de isolamento foi variada em todas as análises de 30 mm para 90 mm, e a espessura total dos painéis de 250 a 310 mm. O modelo analítico proposto demonstrou-se adequado para os conectores metálicos, sendo que para os de GFRP, foi apontada a necessidade de revisões dos modelos. Contudo, comparando-se os resultados experimentais de resistência térmica equivalentes dos painéis entre a mesma espessura da camada de isolamento (60 mm) e espessura total (280 mm), o conector metálico em “U” apresentou 2,140 ($m^2 \cdot K$)/W, o conector metálico em “L” resultou em 2,082 ($m^2 \cdot K$)/W, e o conector de GFRP, 2,373 ($m^2 \cdot K$)/W. Nos resultados finais, os painéis com conectores de GFRP apresentaram menor resistência térmica apenas se comparado ao painel com conector metálico em “U”, porém com uma espessura de isolante 30 mm maior. Os autores ressaltam, portanto, que, o impacto dos conectores sobre o desempenho térmico das paredes não pode ser ignorado.

2.5 Influência das pontes térmicas no desempenho térmico

As pontes térmicas no edifício afetam seu desempenho energético bem como conforto térmico do usuário e a durabilidade dos elementos do edifício, e a intensidade dos efeitos depende das condições climáticas, práticas de construção e padrões operacionais (PAPADOPOULOS, 2016). O efeito das pontes térmicas aumenta quanto mais baixo o valor da transmitância térmica se torna, de acordo com análises numéricas (CAPOZZOLI; GORRINO; CORRADO, 2013) e por medições (THEODOSIOU *et al.*, 2015).

A ABNT NBR 15575-1 (ABNT, 2021a), aponta que as pontes térmicas nas superfícies externas que compõem os APP (ambiente de permanência prolongada) devem ser consideradas na modelagem da simulação computacional, se o coeficiente de transferência térmica ($H_{el,i}$) do elemento representar mais do que 20% do coeficiente de transferência térmica total (H_{total}) da superfície.

Outro fator importante é a necessidade de utilização de propriedades equivalentes, quando se tem a presença de elementos heterogêneos como blocos cerâmicos ou de concreto, ou conectores como nos painéis sanduíche, seja nos métodos prescritivos ou nos programas de simulação. Nesse sentido, as pontes térmicas podem continuar sendo negligenciadas por incluírem apenas o fluxo de calor unidimensional.

Martins (2022) avaliou conforme a NBR 15575 (2021a; 2021 b) o desempenho térmico de três sistemas construtivos para a cidade de Foz do Iguaçu no Paraná: *Cross Laminated Timber* (CLT) composto por madeira, *wood frame* e alvenaria de blocos cerâmicos. Para as simulações em CLT e *wood frame*, foram calculados os coeficientes de transferência de calor, conforme prerrogativa normativa, demonstrando a necessidade de ser considerado um sistema equivalente para as paredes em *wood frame* com a presença da estrutura de madeira. Os sistemas em madeira apresentaram comportamentos próximos, e sob condição de ventilação natural, apresentaram maior PHFT dentro de um ano, e sob condicionamento artificial, também apresentaram menor CgTT, quando comparados à alvenaria convencional, para as UHs analisadas.

Lameiras *et al.* (2010) calcularam a resistência e transmitância térmicas de painéis sanduíche com modelos numéricos bidimensionais baseados em MEF considerando as pontes térmicas dos seus conectores, com o uso do *software* TNO DIANA BV. Foram feitos estudos paramétricos com as seguintes variações: material e tipo do conector, tipo de isolamento, espessura da camada de concreto. O conector de FRP proporcionou uma resistência térmica de 2,7778 ($m^2 \cdot ^\circ C/W$), 11% maior que o metálico, com 2,4516 ($m^2 \cdot ^\circ C/W$). Quanto à influência da espessura do concreto, detectaram que a melhor solução depende de vários fatores, principalmente estruturais e econômicos. Foram sugeridas também espessuras de isolamento para melhores resultados de U para as três zonas bioclimáticas de Portugal. Um maior detalhamento das análises desse estudo pode ser visto em Santos (2010).

Song, Lim e Song (2016) avaliaram, por meio de elementos finitos, alternativas para redução de pontes térmicas em sistemas de painéis de cortinas metálicas (painéis de metal e um material interno, normalmente gesso, fixados às treliças de aço usando suportes ou parafusos, podendo conter também camadas de isolamento à vácuo e espuma fenólica). As principais pontes térmicas lineares ocorrem nas juntas vertical e horizontal entre os painéis de metal, onde o isolamento não é contínuo, além das pontes térmicas pontuais causadas pelos fixadores metálicos. A alternativa mais viável foi a utilização de um disjuntor térmico de poliuretano inserido no suporte de alumínio original e diminuição nos comprimentos do molde de alumínio nas laterais do painel, reduzindo a perda de calor geral e o fator U efetivo em 68,0% em comparação com o caso existente. Analisaram também os custos ao longo do ciclo de uma vida útil de 40 anos, onde a alternativa escolhida reduziria em 10,9% em relação ao caso existente

Ximei, Yonghui e Xueming (2018) examinaram o desempenho térmico de painéis sanduíche de concreto com enchimento em poliuretano, e concluíram que a melhor opção seria utilizar um conector híbrido, sendo ele metálico (vergalhões de 10 mm de diâmetro) envolvido com nylon, responsáveis por reduzir as pontes térmicas e melhorar o desempenho térmico. Para uma mesma espessura de camada isolante, o conector sem o invólucro de nylon apresentou uma transmitância térmica de $1,390 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, e $1,176 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, quando híbrido, reduzindo os valores de transmitância térmica em 32,4%. Além disso, o aumento do espaçamento entre os conectores e da espessura da camada isolante, e a redução do diâmetro do vergalhão do conector metálico também foram determinantes para os melhores resultados.

Kinnane, West e Hegarty (2020) investigaram o desempenho de vinte e cinco painéis sanduíche, variando a espessura das camadas e as dimensões do conector metálico. Foi percebido que, a obtenção de alta resistência térmica e, portanto, baixos valores de U, requer um aumento na espessura do isolamento, que em geral diminuiu a capacidade de cisalhamento e a rigidez do conector, a menos que as camadas de concreto também aumentem. No entanto, os autores frisam que a capacidade de cisalhamento não deve ser a única medida para a escolha do tipo de conector do painel, sendo necessário considerar o impacto térmico, custo, resistência à tração e rigidez. Em números, para uma mesma espessura de isolamento (240 mm), sem considerar a ponte térmica dos conectores, o valor de U foi de $0,11 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, e considerando-os, tem-se um aumento para $0,19 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

O'Hegarty e Kinnane (2020) compilaram os valores de transmitância térmica obtidos nos estudos levantados para painéis sanduíche. Dentre os que utilizaram EPS como isolamento térmico, os resultados variaram de 0,20 W/m²·K (28 cm de espessura total com 16 cm de EPS) até 1,04 W/m²·K (12,5 cm de espessura total com 2,5 cm de EPS). A maioria dos painéis não atenderiam às normas irlandesas, o que em contrapartida, atenderia com folga aos requisitos brasileiros para todas as ZBs, corroborando com as conclusões dos autores. No entanto, os valores apresentados não contabilizaram o efeito das pontes térmicas, alertando para a não confiabilidade dos mesmos.

O'Hegarty *et al.* (2020) testaram experimentalmente painéis sanduíche “finos” (150 mm de espessura total), usando um aparelho de placa quente para avaliar seu desempenho térmico, cujos dados foram comparados pela modelagem de elementos finitos em 3D para investigar potenciais áreas de perda de calor. O painel de amostra é constituído por duas camadas de concreto reforçado com fibra de alta resistência, camadas de isolamento à vácuo e espuma fenólica, e conectores de Polímero Reforçado com Fibra (FRP). O modelo foi validado com os resultados dos testes experimentais mostrando alta precisão, com erros inferiores a 5%. Foram comparados também os valores da transmitância térmica sugeridos pelas normas considerando o fluxo de calor em uma direção, com os experimentais, resultando em erros de 35% e 83% a depender da posição dos conectores no painel, visto que o cálculo simples negligência todas as fontes de pontes térmicas. Por fim, os autores avaliam outras possibilidades de espessura para as camadas e de espaçamento entre os conectores, visando um *design* otimizado. Ponderam então que, um maior espaçamento entre os conectores ou sua eliminação devido ao desempenho do concreto reduz ou elimina as pontes térmicas.

Theodosiou e Papadopoulos (2008) e Papadopoulos (2016) detectaram um efeito menor das pontes térmicas da envoltória nas cargas de resfriamento da edificação, e portanto, menos significativos para regiões de clima mais quentes, como em Chipre, Malta, sul da Itália e Grécia. Apesar disso, estudos apontam a influência das pontes térmicas no desempenho termoenergético das edificações no Brasil, como será descrito.

Nos estudos de Freitas *et al.* (2016) no Brasil quanto à existência de pontes térmicas em edificações residenciais, foram realizadas simulações computacionais no *software Design*

Builder, para dois tipos de sistemas de vedação vertical; esqueleto estrutural de concreto armado com alvenaria cerâmica (chamado de modelo com ponte térmica), e alvenaria cerâmica autoportante (simplificação comum nas modelagens computacionais). Foram variados os valores de absorvância das paredes, e analisados o consumo energético para cada zona bioclimática. A partir dos resultados obtidos, os autores concluíram que, para as ZBs 1 e 2, de clima frio no inverno, a presença das pontes térmicas acarretou num maior consumo energético, ocorrendo o inverso nas demais ZBs.

Gioielli e Cunha (2014) analisaram o impacto de pontes térmicas em estruturas de concreto armado no desempenho energético da envoltória de um edifício hoteleiro para as zonas bioclimáticas brasileiras de 1 a 6 utilizando simulação computacional, comprovando que as pontes térmicas interferem nos resultados de consumo de energia, associados ao percentual de abertura transparente (PAFT) da edificação, e às variações de densidade de carga interna (DCI) e densidade de potência de iluminação (DPI). Os resultados mostraram que para os menores valores de DCI e DPI conjugados com maiores ganhos por condução pelos vidros, as pontes térmicas geraram um aumento do consumo entre 2% e 3%, chegando a 4% quando considerados valores altos para DCI e DPI. No geral, as simulações com pontas térmicas resultaram num aumento do consumo final energético, quando PAFT em 30% ou 45%, e numa redução, quando PAFT igual a 60%, independente da ZB analisada. Entretanto, na zona bioclimática 1, observa-se o maior impacto nos aumentos percentuais de consumo.

Weber (2018) desenvolveu um modelo equivalente de avaliação de propriedades térmicas e elaborou uma biblioteca de componentes construtivos adequados à realidade brasileira para aplicação no programa *EnergyPlus*. A modelagem dos componentes foi feita por MEF em modelo bidimensional, verificando também a influência de pontes térmicas no comportamento termoenergético de um componente construtivo, por meio da análise do fluxo de calor e da temperatura das superfícies do modelo. A influência de pontes térmicas foi verificada também no programa *EnergyPlus*, analisando-se a taxa de troca de calor por condução e as cargas térmicas de aquecimento e resfriamento. O elemento construtivo, modelado de forma homogênea e heterogênea, foi simulado para três cidades brasileiras e os resultados obtidos foram comparados.

Caetano, Souza e Gomes (2018) avaliaram a influência das pontes térmicas geradas pela estrutura exposta em aço no desempenho térmico de edificações comerciais naturalmente ventiladas e condicionadas artificialmente no Brasil, com impactos mais expressivos na segunda situação. Foram comparadas as situações com e sem a exposição da estrutura, consideradas três absorvâncias, e analisadas as 8 ZBs brasileiras. Para as situações com ventilação natural, a ZB 2 com paredes claras apresentou maior variação na temperatura interna com maiores valores para o caso com pontes térmicas. Quando considerado o condicionamento de ar, a simulação para a ZB 4 apresentou um aumento de 10,60% na carga térmica total de resfriamento quando considerado os perfis metálicos. Em termos de consumo energético para resfriamento, todos os modelos com pontes térmicas apresentaram aumento, chegando a 12,50% da ZB 4, seguido por 9,09% na ZB 2 e 8,57% na ZB 5. O efeito da ponte térmica foi mais evidente nos ambientes mais fechados e em climas mais frios, para condições de ventilação natural, e foram ainda mais evidentes nas situações de condicionamento artificial.

As pontes térmicas em edificações podem também ser ocasionadas por elementos transversais às camadas dos SVVEs, e por isso muitas das vezes negligenciadas pelo fato de que os métodos de obtenção de resistência térmica consideram as camadas paralelas entre si e perpendiculares ao fluxo de calor. Tem-se então a necessidade de se obter sistemas equivalentes com uma mesma resistência térmica total. Lameiras (2015) comenta que é necessária uma validação por cálculos numéricos pelo menos uma vez, para então ser usado o método simplificado.

Muzzi, Souza e Gomes (2021) compararam a resistência térmica de uma parede típica brasileira em *Light Steel Frame* (LSF) entre os métodos simplificados de cálculo da resistência térmica e uma análise numérica com o *software ANSYS*. Nos resultados de resistência térmica, foi observado uma diferença de 9% entre as duas formas de obtenção. Além disso, nos locais em que havia perfis metálicos, o fluxo de calor detectado foi 54% maior do que nas demais regiões do painel.

Ainda sobre LSF, Rezende, Carrasco e Magalhães (2022) também realizaram ensaios numéricos no *ANSYS*, considerando uma composição comumente empregada no Brasil, com as seguintes camadas do interior para o exterior: gesso acartonado, placa OSB, lã de PET, placa OSB e placa cimentícia, interligadas por perfis metálicos. Foi simulada também a situação com a adição de placas de vermiculita após a placa OSB interna, para avaliar o impacto na resistência

térmica. Os autores traçaram as curvas do fluxo de calor após as simulações numéricas. A parede com vermiculita apresentou um pico de fluxo de calor de 2013,8 W/m² em 11 minutos, enquanto a parede sem a placa de vermiculita apresentou um fluxo de calor máximo de 2187,1 W/m², em 9 minutos.

As pontes térmicas em edificações também ocorrem no encontro das estruturas de concreto armado com paredes de blocos cerâmicos, como investigado por Freitas *et al.* (2020). Foram simuladas no *EnergyPlus*, paredes equivalentes diferenciadas pelas ponderações das transmitâncias térmicas, considerando ou não a estrutura em diferentes situações. A região brasileira analisada foi a zona bioclimática 2. Dentro de um mesmo percentual de isolamento das paredes, o modelo real simulado com os elementos estruturais apresentou de 4% a 13% maior consumo de energia na edificação, comparado aos modelos com sistemas simplificados. Por fim, os autores ponderam ainda que, nas edificações com maior percentual isolamento considerado, as pontes térmicas ocasionaram diferenças ainda maiores de consumo, comparadas às menos isoladas.

Schlichting *et. al* (2023) avaliaram, conforme diretrizes da NBR 15575 (2021a; 2021 b), essa interferência para diferentes percentuais de elementos estruturais expostos nas fachadas para uma edificação unifamiliar térrea para as cidades de Florianópolis, Urubici e Palmas no Brasil. Foram calculados os sistemas equivalentes para inserção no *EnergyPlus* a partir da determinação dos valores de transmitância e capacidade térmicas dos sistemas. Os resultados avaliados foram os indicadores PHFT e CgTT para cada cidade, nas diferentes proporções de exposição dos elementos estruturais. Para o PHFT, as variações de porcentagem apresentadas foram suficientes para alterar o desempenho de edificações, tanto para aumentar ou reduzir o desempenho, dependendo do clima do local e da transmitância das paredes. Nas cidades de Palmas e Florianópolis, o PHFT aumentou com o aumento da transmitância térmica das paredes, acontecendo o oposto em Urubici. Os resultados de CgTT mostraram que os locais com climas mais quentes, como Palmas e Florianópolis, apresentaram maior desempenho quando do aumento das pontes térmicas. Já para Urubici, região mais fria, as pontes térmicas diminuíram o desempenho da UH. Os autores reforçam por fim, a necessidade de serem considerados esses elementos nas simulações, uma vez que, ao serem ignorados, o desempenho térmico pode ser subdimensionado em climas quentes ou superdimensionado em climas frios.

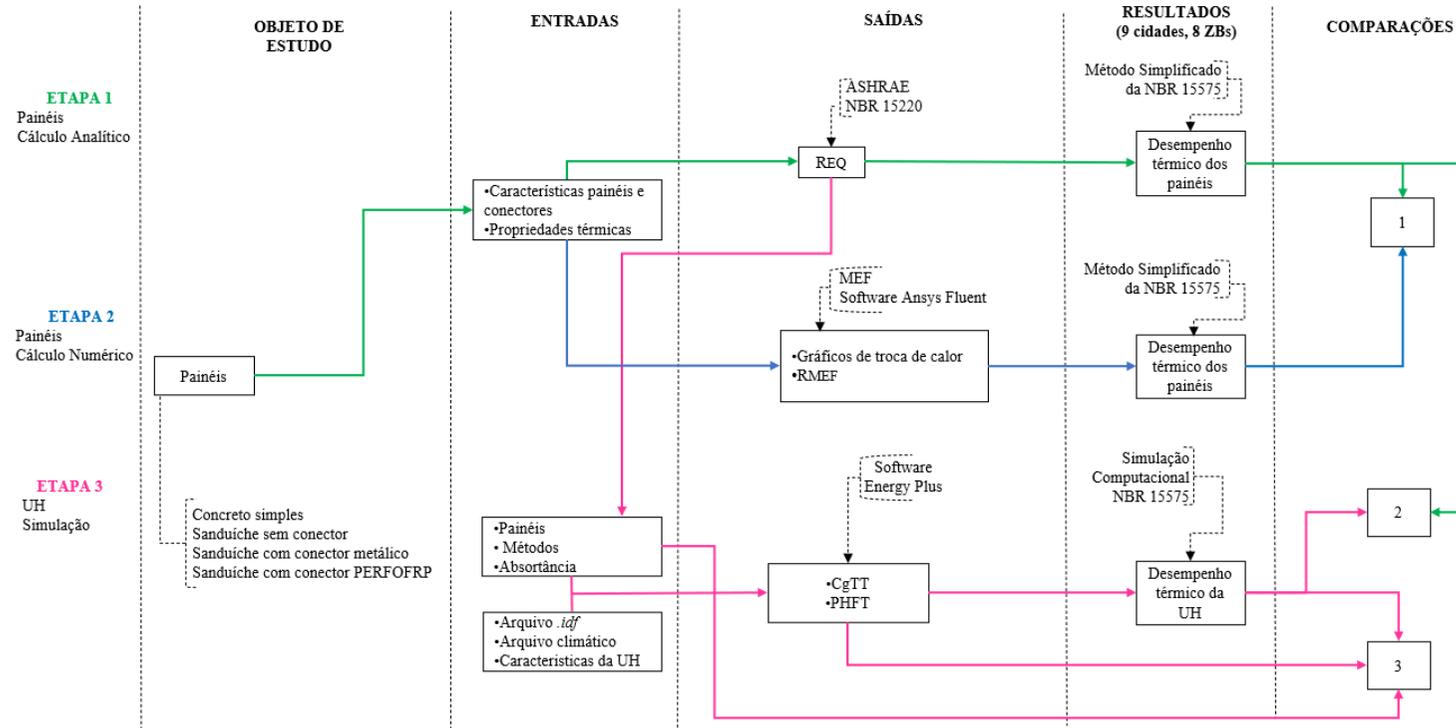
Diante disso, reforça-se a necessidade de considerar as pontes térmicas ao se determinar o desempenho térmico de uma edificação. As simulações por MEF demonstram-se válidas e confiáveis para a avaliação das pontes térmicas de sistemas construtivos como os painéis sanduíche. Por outro lado, para uma análise completa da edificação como um todo, a prática comum é adotar um *software* específico para atendimento das normas como no caso do *EnergyPlus*, onde são inseridas as resistências térmicas equivalentes dos sistemas heterogêneos, que devem levar em consideração as pontes térmicas, bem como a infinidade das outras variáveis requeridas como: localização, orientação solar, absorvância das paredes externas, cargas internas equipamentos, rotinas de ocupação.

3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta os procedimentos para o desenvolvimento deste trabalho, estruturado conforme os objetivos propostos, cujo fluxograma é apresentado na Figura 7. O trabalho foi dividido em três etapas: (1ª) verificação do atendimento ou não ao nível mínimo de desempenho térmico de diferentes painéis sanduíche a serem usados como envoltória de uma UH, pelo método de análise simplificado da ABNT 15575-4:2021, por meio da obtenção das resistências térmicas equivalentes dos painéis por métodos analíticos; (2ª) simulação numérica 2D por MEF dos painéis com a verificação do nível de desempenho térmico pelo método de análise simplificado da ABNT 15575-4:2021 e (3ª) simulação computacional do comportamento térmico de uma UH. Foram feitas comparações entre os resultados obtidos nas etapas 1 e 2 (comparação 1). Na etapa 3, foram calculados os indicadores PHFT e CgTT para a UH selecionada, e determinado o nível de desempenho térmico de cada situação conforme a ABNT 15575-1:2021. Comparou-se então o desempenho térmico do método simplificado com a simulação computacional (comparação 2). Por fim, realizou-se análises estatísticas para a verificação do impacto das variáveis consideradas nos resultados da etapa 3 (comparação 3).

Em todas as etapas foram considerados os 4 tipos de parede e suas respectivas abreviações utilizadas: (a) um painel simples de concreto (parede simples) e três painéis sanduíches, sendo (b) um sem conector (sanduíche sem conector), (c) um com conector metálico (conector metálico) e outro (d) com conector PERFOFRP (conector FRP). O painel simples de concreto foi utilizado como uma referência, uma vez que essa tecnologia também tem sido amplamente empregada. Para fins de padronização, a espessura do isolamento térmico foi mantida constante em todos os painéis sanduíche.

Figura 7 – Fluxograma da Metodologia



Fonte: A Autora (2023)

A UH analisada se encaixa nos padrões de uma HIS, e foi selecionada devido ao considerável crescimento de construções desse modelo para atender ao *déficit* habitacional, além da alta replicabilidade dos projetos em todo o país sem a consideração das características bioclimáticas.

Para a modelagem dos conectores, foram tomados como base os modelos de Lameiras (2015) e Silva (2020) para os PERFOFRP, e a treliça metálica plana de 10 mm de diâmetro com ângulos internos de 45° mencionada em Knöner (2019). Para o conector metálico, uma área equivalente foi calculada, levando em conta o número de vezes em que a camada de isolamento é atravessada pelo vergalhão da treliça metálica, convertendo-o em uma placa plana com as mesmas dimensões do PERFOFRP, variando apenas a espessura, processo análogo ao aplicado por Santos (2010).

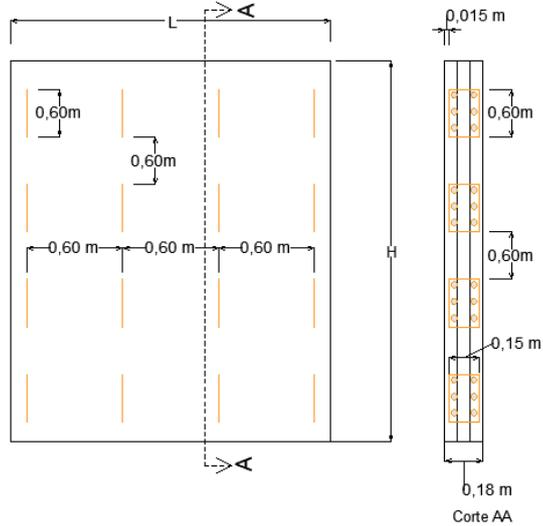
A Tabela 3 apresenta as dimensões adotadas para os conectores. A Figura 8 mostra o esquema da distribuição dos conectores de placas planas perfuradas ao longo de uma parede, seguindo um dos modelos propostos por Lameiras (2015).

Tabela 3 – Características dos conectores utilizados nas simulações

	Referência	Adotado
Lameiras (2015)	Altura: entre 40 e 60 cm	60 cm
	Largura: 15 cm	15 cm
	Cobrimto nominal: 1,5cm	1,5 cm
	Espaçamento vertical entre conectores: 60 cm	60 cm
	Espaçamento horizontal entre conectores: máximo 1 m	60 cm
Silva (2020)	Espessura conector PERFOFRP: 2,3 mm	2,3 mm
A Autora (2023)	Espessura conector metálico (Figura 9)	0,524 mm

Fonte: Lameiras (2015); Silva (2020)

Figura 8 – Distribuição dos conectores de placas planas ao longo de uma parede

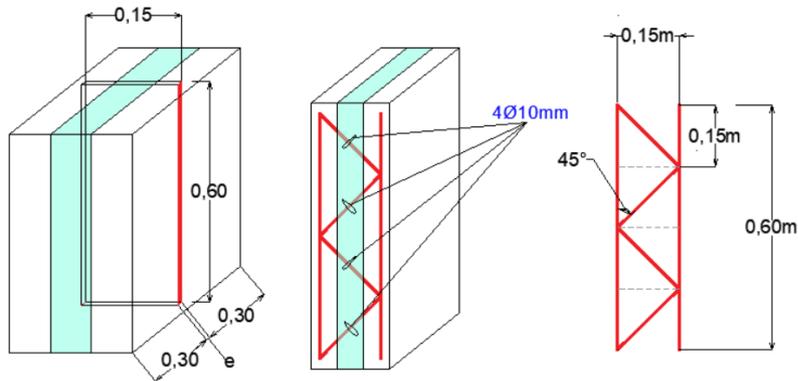


Fonte: A Autora (2023).

A obtenção da espessura equivalente do conector metálico foi obtida pelos seguintes passos:

- Área equivalente da placa plana que atravessa a camada de isolamento (Figura 9): espessura “ e ” x $0,60\text{ m}$ (altura fixa do conector);
- Verificação do número de vezes em que a camada de isolamento é atravessada pelo vergalhão da treliça metálica de ângulos internos com 45° (Figura 9): 4 seções transversais de 10 mm de diâmetro cada, que resultam numa área de $3,1415 \times 10^{-4}\text{ m}^2$;
- Obtenção da nova espessura para a placa plana metálica, fixando a área dos 4 vergalhões e a altura de $0,60\text{ m}$, resultando num valor de “ e ” igual a $5,24 \times 10^{-4}\text{ m}$.

Figura 9 – Cálculo da espessura equivalente para o conector metálico do tipo treliça



Fonte: A Autora (2023)

Para as três etapas, fez-se necessário a determinação das propriedades térmicas dos painéis, bem como dos componentes presentes na UH para a simulação da etapa 3, e estão apresentadas na Tabela 4.

Para os materiais concreto e EPS, a NBR 15220 (ABNT 2005; 2022). apresenta intervalos de valores. Foram usados também valores estabelecidos pela ASHRAE Standard 90.1 (ASHRAE, 2016), complementados por outras referências, como indicado na Tabela 4. A coluna equivalente aos valores de absorvância estão relacionadas às cores de cada material, com exceção das paredes em concreto, que foram consideradas claras (absorvância 0,2) ou escuras (absorvância 0,7) para a comparação dessa variável nos resultados das simulações. As cores das paredes, a partir dos estudos de Dornelles (2008) podem ser relacionadas às cores comerciais Pérola acrílica fosca (absorvância 0,221) e Concreto acrílica fosca (absorvância 0,715). As demais características da UH estão descritas na seção 3.3.

Tabela 4 – Propriedades térmicas dos materiais dos painéis e da UH

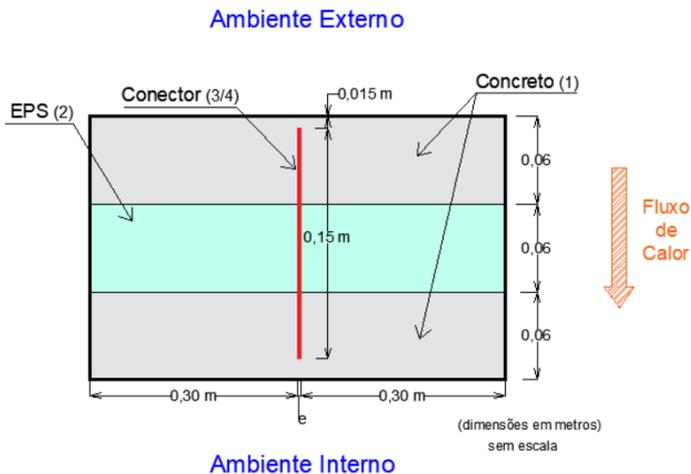
Propriedade Térmica	Espessura (m)	Condut. Térmica (λ - W/m.K)	Calor específico (c - kJ/kg.K)	Densidade (ρ - kg/m ³)	Absortância (α)	Emissividade (ϵ)
Concreto (Paredes)	0,06	1,046 ⁽¹⁾	0,657 ⁽¹⁾	2300 ⁽¹⁾	0,2/0,7*	0,95 ⁽²⁾
Concreto (Laje/ Piso)	0,10	1,046 ⁽¹⁾	0,657 ⁽¹⁾	2300 ⁽¹⁾	0,73 ⁽²⁾	0,95 ⁽²⁾
EPS	0,06	0,035 ⁽¹⁾	1,47 ⁽¹⁾	23 ⁽¹⁾	0,2 ⁽²⁾	0,9 ⁽²⁾
Conector Metálico	0,000524	45 ⁽²⁾	0,48 ⁽²⁾	7850 ⁽²⁾	0,25 ^{(2)**}	0,25 ⁽²⁾
Conector FRP	0,0023	0,35 ⁽³⁾	1,053 ⁽³⁾	1890 ⁽³⁾	0,3 ^{(2)***}	0,9 ⁽²⁾
Telha Cerâmica	0,01	0,9 ⁽²⁾	0,92 ⁽²⁾	1450 ⁽²⁾	0,78 ⁽²⁾	0,9 ⁽²⁾
Madeira (portas internas)	0,035	0,15 ⁽²⁾	1,34 ⁽²⁾	600 ⁽²⁾	0,50 ⁽²⁾	-
Alumínio (portas externas)	0,035	230 ⁽²⁾	0,88 ⁽²⁾	2700 ⁽²⁾	0,2 ⁽²⁾	0,2 ⁽¹⁾
Piso cerâmico	0,10 ⁽²⁾	1,75 ⁽²⁾	1,00 ⁽²⁾	2200 ⁽²⁾	0,5 ⁽²⁾	0,5 ⁽²⁾
Vidro comum	0,06 ⁽²⁾	1,00 ⁽²⁾	0,84 ⁽²⁾	2500 ⁽²⁾	-	-

⁽¹⁾ (ASHRAE, 2016); ⁽²⁾ (ABNT, 2005b); ⁽³⁾ (MORGADO *et al.*, 2016); *representa a cor da tinta com variação conforme a simulação para cores claras e escuras; **considerado chapa de aço galvanizada nova e brilhante; ***admitido cor amarelada para o conector

Fonte: (ABNT, 2005b), (MORGADO *et al.*, 2016) e ASHRAE (2016)

A Figura 10 exemplifica as dimensões consideradas para cada componente do painel. No caso do concreto simples, foi simulada uma parede com espessura total de 18 cm, e no painel sem conector, três camadas de 6 cm cada (concreto-EPS-concreto). Foi adotado um revestimento nominal de concreto de 1,5 cm de espessura, entre o ambiente externo e o conector, e um módulo de repetição do conector de 60 cm na horizontal (Tabela 3), o que resulta em 30 cm para cada lado do conector. Os índices abaixo equivalem ao tipo de material: (1) concreto, (2) EPS, (3) conector metálico e (4) conector de FRP, e serão utilizados nas equações para diferenciação.

Figura 10 – Esquema e dimensões dos painéis



Fonte: A Autora (2023)

3.1 Etapa 1: Verificação do nível de desempenho térmico dos painéis

A verificação do nível de desempenho térmico dos painéis se encaixa no método simplificado da ABNT NBR 15575-4 (ABNT, 2021b), onde os valores de transmitância térmica (U) e capacidade térmica (CT) são comparados aos valores da Tabela 2.

3.1.1 Parede de concreto simples e painel sanduíche sem conector

Para os sistemas parede de concreto simples e painel sanduíche sem conector, a R_t foi calculada pelo método convencional, considerando o sistema em série, com a soma das resistências de cada camada, obtida pela Equação 1, acrescida de 0,17 (soma das resistências superficiais interna e externa), conforme indicado pela NBR 15220 (ABNT 2005; 2022).

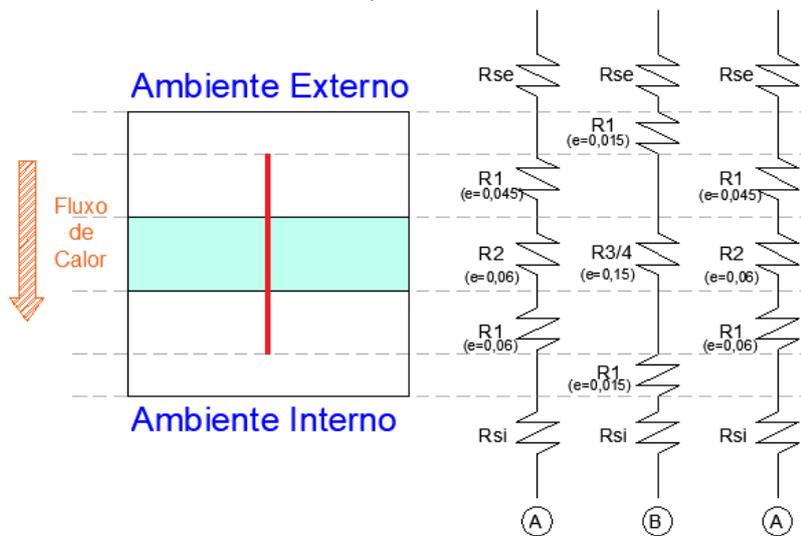
3.1.2 Painéis sanduíche com conectores metálico e PERFOFRP

Para os painéis com conectores, metálico e PERFOFRP, os métodos usados foram: Fluxo Paralelo e Planos Isotérmicos da ASHRAE (2001). O método de zona não foi utilizado, por ser recomendado em situações em que os conectores estão altamente espaçados.

Fluxo Paralelo

A Figura 11 apresenta o painel sanduíche analisado e o esquema dos caminhos definidos para o método de fluxo paralelo e das resistências a serem calculadas, de acordo com a subdivisão do painel sanduíche. A obtenção do valor de R_t para os painéis pode ser então calculada considerando cada caminho de fluxo de calor independente e sua resistência. A Equação 7 mostra, então a obtenção da resistência equivalente final, onde R_A e R_B são as resistências em série de cada caminho, dadas pela soma das resistências R_1 , R_2 e $R_{3/4}$, determinadas pela Equação 1.

Figura 11 – Esquema de cálculo da resistência equivalente por fluxo paralelo associado ao painel sanduíche



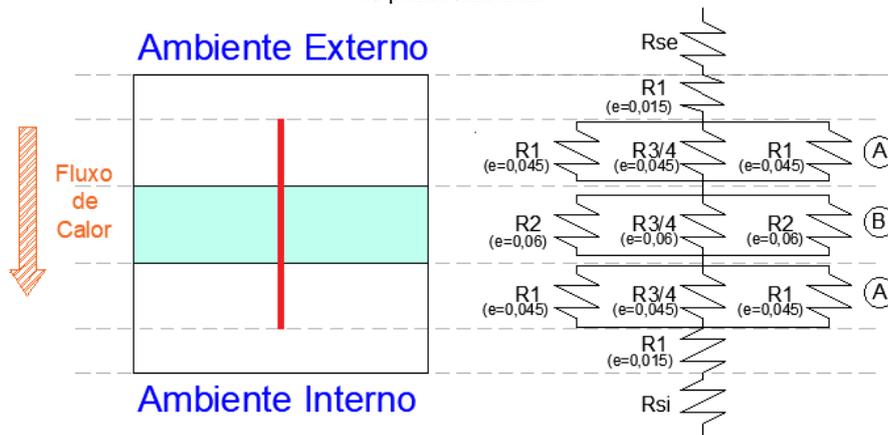
Fonte: A Autora (2023)

$$R_t = \frac{1}{\frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_A}} \quad (7)$$

Planos Isotérmicos

A Figura 12 apresenta o esquema dos caminhos definidos para o método de planos isotérmicos e das resistências a serem calculadas, de acordo com a subdivisão do painel sanduíche. A resistência total das camadas combinadas, é a soma numérica das resistências de todas as partes da construção em série. Assim, o valor R_t é uma combinação serial de camadas, na qual a resistência de cada camada é calculada pelo método de fluxo paralelo, conforme as equações 8, 9 e 10.

Figura 12 - Esquema de cálculo da resistência equivalente por planos isotérmicos associado ao painel sanduíche



Fonte: A Autora (2023)

$$R_t = 2 \cdot R_1 (1,5 \text{ cm}) + 2 \cdot R_A + R_B \quad (8)$$

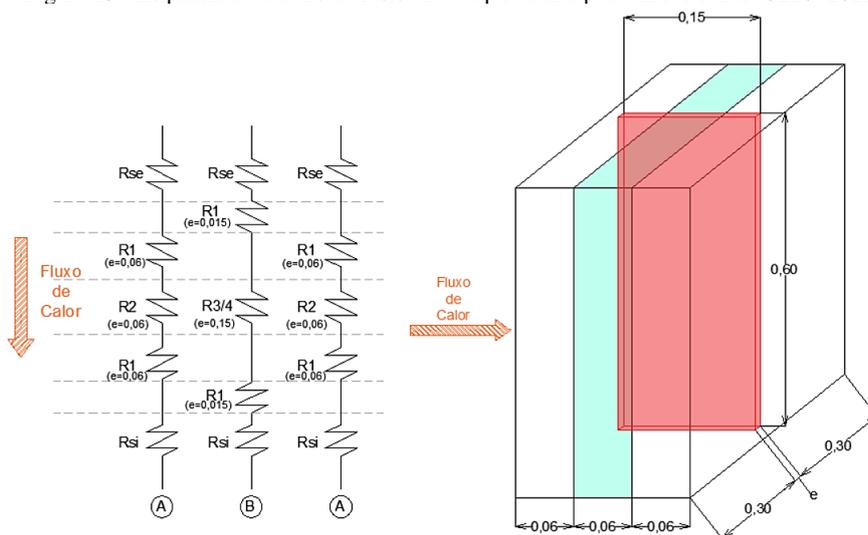
$$R_A = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_{3/4}} + \frac{1}{R_1}} \text{ com } e = 4,5 \text{ cm} \quad (9)$$

$$R_B = \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_{3/4}} + \frac{1}{R_2}} \text{ com } e = 6 \text{ cm} \quad (10)$$

Método da ABNT NBR 15220-2: 2022

A NBR 15220 (ABNT 2005; 2022). traz um método equivalente para cálculo da resistência térmica para camadas não homogêneas de um sistema, considerando um fluxo de calor perpendicular. O processo é análogo ao de fluxos paralelos, considerando, no entanto, a terceira dimensão do módulo da parede, conforme Figura 13. A equação 11 contém a forma em que deve ser calculado o valor R_t , onde R_A e R_B são as resistências em série de cada caminho, dadas pela soma das resistências R_1 , R_2 e $R_{3/4}$, determinadas pela Equação 1, e A_A e A_B são as áreas perpendiculares ao fluxo de calor de cada caminho.

Figura 13 - Esquema de cálculo da resistência equivalente pela ABNT NBR 15220: 2022



Fonte: A Autora (2023)

$$R_t = \frac{2.A_A + A_B}{\frac{2.A_A}{R_A} + \frac{A_B}{R_B}} \quad (11)$$

3.1.3 Determinação do nível de desempenho térmico pelo método simplificado

O atendimento ou não ao nível de desempenho térmico mínimo dos 4 tipos de parede estudados foi verificado a partir dos critérios de transmitância térmica e capacidade térmica explicitados na Tabela 2.

3.2 Etapa 2: Simulação numérica dos painéis em 2D por MEF

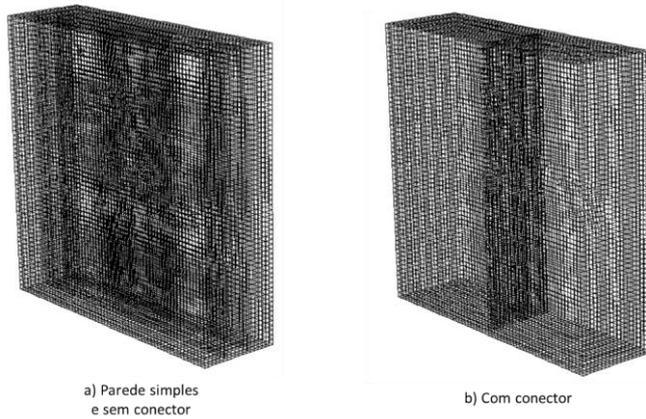
Este trabalho não se propõe a analisar profundamente a transferência de calor nos painéis por meio de simulação numérica. Essa etapa foi conduzida para obtenção de uma ferramenta de visualização do comportamento dos diferentes painéis quando submetidos a uma transferência de calor. Também foi conduzida para a comparação/validação dos resultados de resistência equivalente da Etapa 1, com os obtidos nessa fase, e uma possível validação de um método em detrimento dos demais, tendo como referência os estudos de Lee e Pessiki (2004).

Foram modelados os mesmos 4 tipos de paredes: parede simples, sanduíche sem conector, sanduíche com conector FRP, e sanduíche com conector metálico, de acordo com as especificações da Figura 10.

As simulações de transferência de calor no sistema proposto foram realizadas utilizando-se o método dos volumes finitos. Nele, o domínio é inicialmente subdividido em pequenos volumes de controle, denominados elementos ou células. A equação de energia é então discretizada para ser resolvida em cada volume de controle e definida de forma que os volumes de controle comuniquem a informação entre si (VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, 2007).

Nesse contexto, o grau de refino da malha computacional que subdivide o domínio é importante para garantir a precisão do resultado numérico. Sendo assim, os modelos utilizados para as simulações consistiram em 69.071 elementos e 70.236 elementos para os sistemas sem conector e com conector, respectivamente. As malhas são apresentadas na Figura 15.

Figura 14 - Malhas computacionais utilizadas nas simulações numéricas pelo método dos volumes finitos

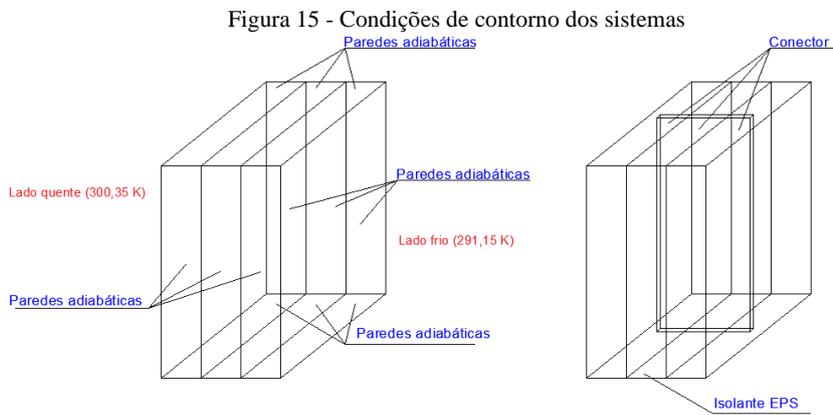


Fonte: A Autora (2023)

As simulações foram realizadas em regime estacionário com temperaturas fixas atribuídas as faces opostas do domínio. As paredes laterais do sistema foram definidas como adiabáticas (ver Figura 15), simulando assim um fluxo de calor 2D. Os respectivos materiais e suas propriedades foram definidos e aplicados em cada camada do sistema conforme a Tabela 4.

Por se tratar de um problema com fluxo de calor 2D em regime estacionário, a diferença de temperatura entre o lado quente e o lado frio não interferiu nos resultados de fluxo de calor, mesma analogia aos métodos analisados na etapa 1. Nesse sentido, a temperatura para o lado quente foi definida como 300,35 K e para o lado frio 291,15 K. As condições de contorno e outros constituintes do sistema são apresentadas na Figura 15.

A equação de energia foi resolvida utilizando-se o esquema de discretização *upwind* de segunda ordem (*Second Order Upwind*). O sistema foi resolvido até que o resíduo da equação de energia atingisse $1e^{-6}$. As simulações foram realizadas no *solver* Fluent (Ansys Student 2022 R2).



Fonte: A Autora (2023)

A partir das simulações, tem-se como *output*, o fluxo de calor resultante Q que passa através dos painéis. Com ele, pode-se calcular a resistência térmica por meio da equação 12, onde ΔT é igual a 9,2 K, e A é a área de contato da face dos painéis (0,60 m x 0,60 m), equivalente a 0,360 m². A partir disso, com a resistência térmica de face a face, R_t , obtida, pode-se comparar com os valores encontrados na etapa 1.

$$R_t = \frac{\Delta T}{Q/A} \quad (12)$$

3.3 Etapa 3: Simulação computacional de uma UH

A terceira etapa deste trabalho consiste na simulação computacional para avaliação do desempenho térmico de uma UH completa para os 4 tipos de paredes já analisados anteriormente, segundo os critérios da ABNT NBR 15575-1 (ABNT, 2021a), cujo procedimento está descrito na Figura 3.

Para as simulações computacionais foi adotado o programa *EnergyPlus* versão 9.3.0, que está de acordo com a ASHRAE Standard 90.1 (ASHRAE, 2016) e também atende os requisitos mínimos normativos de: estimar as variações da temperatura operativa, as cargas térmicas de refrigeração, aquecimento e do uso de ventilação natural na UH, apresentados de forma horária ao longo das 8760 horas do ano. Foi utilizado também o *plugin Euclid* do *SketchUp* como

ferramenta gráfica para modelagem da UH. As demais configurações foram feitas diretamente no *idf*.

3.3.1 Caracterização da Unidade Habitacional

A UH selecionada refere-se a uma casa térrea de padrão baixo, tendo por base o projeto indicado no Sumário de Publicações do SINAPI (Sistema Nacional de Pesquisas de Custos e Índices da Construção Civil) gerenciado pela Caixa Econômica Federal (CEF, 2020). Ressalta-se que, como parte das condições de contorno, a seleção da UH tomada como referência nesta pesquisa não levou em consideração legislações específicas de uso e ocupação do solo de cada cidade. As plantas e o orçamento referencial têm como código o número 13105, cujas informações são de domínio público. Foram feitas algumas adaptações visto que as medidas internas dos cômodos não são fornecidas. Resultou-se então na planta baixa indicada na Figura 16 e no modelo de simulação tridimensional da Figura 17.

A UH conta com uma área construída de 44,80 m², distribuídos em: sala, 2 quartos, banheiro, cozinha; pé-direito de 2,60 m; fundação do tipo radier; cobertura com estrutura de madeira e telha cerâmica; janelas de vidro liso comum de 6mm de espessura (dimensões 1,50 m x 1,00 m nos quartos e sala e 0,65 m x 0,65 m no banheiro); porta externa de alumínio e portas internas de madeira (dimensões 0,80 m x 2,10 m); paredes com espessura final de 0,18 m. A modelagem da cobertura foi simplificada, desconsiderando a inclinação, e as águas do telhado. Esse modelo da UH utilizado como representativo pra essa tipologia unifamiliar, está de acordo com as portarias mais recentes em relação à área útil da habitação, ao número e tamanho de cômodos e às exigências de pé direito para habitações de interesse social (BRASIL, 2020; 2022).

A orientação solar adotada foi a mesma para todas as simulações, fixando assim essa variável, uma vez que o objetivo deste trabalho é comparar o comportamento térmico dos SVVs (sistemas de vedações verticais, externos e internos) para uma mesma condição de exposição. Sendo assim, as janelas dos quartos foram posicionadas para oeste, sendo uma condição crítica na perspectiva de simulações termoenergéticas brasileiras. Sabe-se ainda que outras variáveis podem influenciar no desempenho térmico da UH como aberturas para ventilação, mas também não foram alteradas analisadas e nem alteradas as suas dimensões neste trabalho, porque dependem das dimensões em planta da edificação, cuja avaliação também não faz parte do

escopo. Em cada simulação, foi considerado o mesmo tipo de painel para todas as paredes da UH, sejam elas internas ou externas.

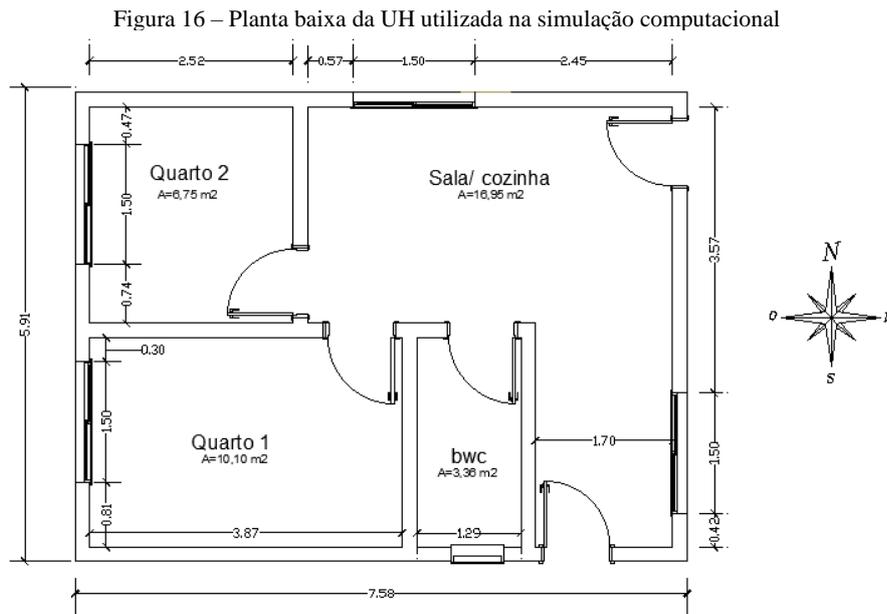
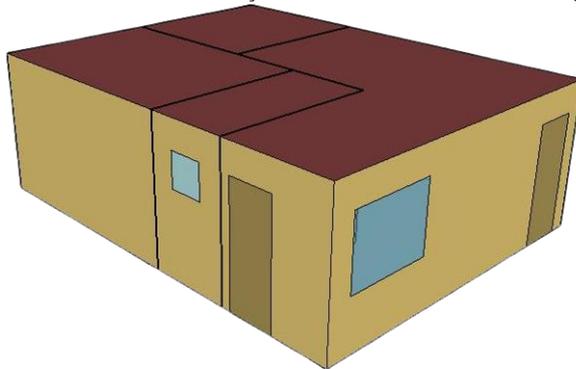


Figura 17 – Modelo de simulação tridimensional da UH no *EnergyPlus*



Fonte: A Autora (2023)

3.3.2 Cidades e climas adotados

Foram analisadas três normativas para definição das cidades, com base nas classificações climáticas brasileira e internacionais: a NBR 15220-3 (ABNT, 2005), a ASHRAE Standard 90.1 (ASHRAE, 2016) e a classificação Köppen-Geiger (KOTTEK *et al.*, 2006). Desse modo, foram selecionadas 9 cidades brasileiras, apresentadas na Tabela 5, com as respectivas zonas bioclimáticas dentro de cada classificação respectivamente.

As 9 cidades selecionadas levaram em consideração a confiabilidade dos arquivos climáticos e a variabilidade de climas e estados, além da demanda habitacional potencialmente elevada, com mais de 100 mil habitantes, o que segundo BRASIL (2022) deve ser levado em consideração para a implementação de protótipos de Habitação de Interesse Social.

Tabela 5 – Cidades e climas adotados na simulação

Região	Estado	Cidade	ZB/ ASHRAE/ KÖEPPEN
Centro-Oeste	Distrito Federal	Brasília	4/ 2A/ Aw
Centro-Oeste	Mato Grosso do Sul	Campo Grande	6/ 1A/ Am
Centro-Oeste	Mato Grosso	Cuiabá	7/ 0A/ Aw
Nordeste	Bahia	Salvador	8/ 0A/ Af
Norte	Pará	Belém	8/ 0A/ Am
Sudeste	Minas Gerais	Belo Horizonte	3/ 2A/ Cwb
Sudeste	Rio de Janeiro	Duque de Caxias	5/ NP/ Af
Sul	Paraná	Curitiba	1/ 3A/ Cfb
Sul	Rio Grande do Sul	Santa Maria	2/ NP/ Cfa

Fonte: A Autora (2023)

Os arquivos climáticos para cada cidade foram arquivos com base em dados do INMET, da base padrão citada pela ABNT NBR 15575-1 (ABNT, 2021a).

Com relação às condições climáticas dessas cidades, tem-se as condições de conforto de acordo com (PROJETEEE, 2022) explicitados na Tabela 6.

Tabela 6 – Condições de conforto das cidades adotadas

Cidade	% anual		
	desconforto por frio	conforto térmico	desconforto por calor
Belem	0	3	97
Belo Horizonte	25	50	25
Brasília	46	37	18
Campo Grande	21	45	33
Cuiaba	8	28	64
Curitiba	77	15	8
Duque de Caxias	27	25	49
Salvador	3	49	48
Santa Maria	56	24	20

Fonte: Adaptado de PROJETEEE (2022)

3.3.3 Dados de entrada para o Software e modelos simulados

Os dados de entrada para o *software* de simulação *EnergyPlus* seguiram todos padrões especificados na ABNT NBR 15575-1 (ABNT, 2021a), tanto para os modelos reais, quanto para referência, sendo inseridas também as rotinas de ocupação e as cargas internas de cada APP no arquivo de extensão *idf*, juntamente com as demais propriedades e características já definidas. Considerou-se os quartos totalmente ocupados entre 00:00 e 08:00 e entre 22:00 e 24:00, com 2 pessoas em cada um, e a sala com meia ocupação entre 14:00 e 18:00 e totalmente ocupada entre 18:00 e 22:00, para todos os dias da semana, conforme padrões normativos.

Além das análises com os 4 tipos de parede para as 9 cidades, foram simuladas também duas situações para as cores das paredes externas, inserindo, portanto, a variável absorvância (ARS) de 0,2 para paredes claras e 0,7 para as escuras. A NBR 15575-1 (ABNT, 2021a) prevê o cálculo do coeficiente de transferência térmica dos elementos que estão presentes nas paredes externas para determinar se é necessário considerá-los na modelagem ou não. Quando na composição das superfícies externas, estiver presente qualquer elemento com transferência térmica que represente mais do que 20% do coeficiente de transferência térmica total da superfície, este elemento deve ser considerado na modelagem. Define-se coeficiente de transferência térmica a multiplicação entre sua transmitância térmica e sua área exposta na fachada (ABNT, 2021a).

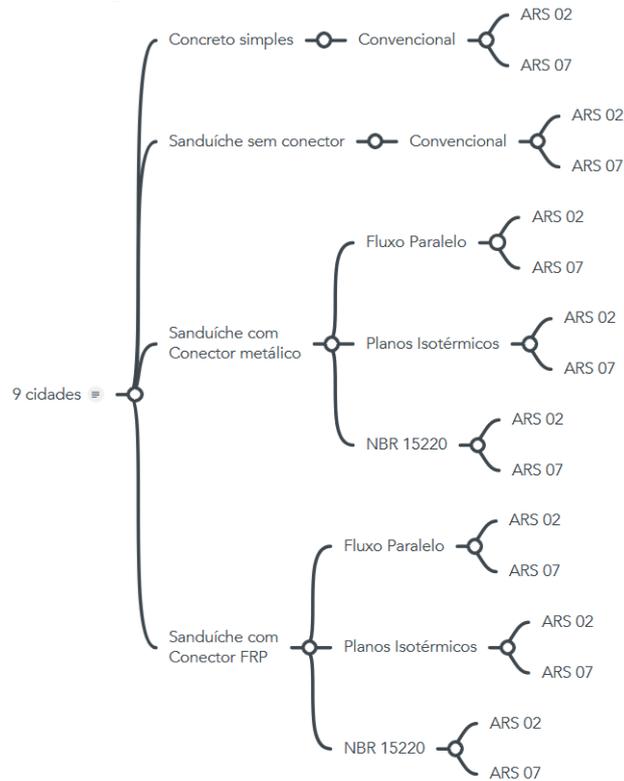
Considerando a disposição e espaçamento adotado para os conectores (Figura 8) e a planta da UH com suas fachadas definidas (Figura 16), foram calculados os coeficientes de transferência térmica para as 4 fachadas tendo por base os dois tipos de conectores (metálico e FRP). Vale

ressaltar que esses não ficam expostos diretamente na fachada, devido à camada de cobrimento nominal em concreto de 1,5 cm de cada lado. Os resultados estão descritos no Apêndice A, nos quais os conectores metálicos apresentaram a necessidade de serem modelados, e os de FRP poderiam ser desconsiderados. No entanto, optou-se por considerar ambos os conectores para realizar uma análise comparativa.

Para a inserção das camadas em série no *idf*, foram considerados os resultados da Etapa 1 de resistência equivalente. Sendo assim, foram inseridos sistemas equivalentes no *idf* que representassem os mesmos valores de R e CT dos painéis sanduíche reais, descritos na seção 4.3. O cálculo dos sistemas equivalentes seguiu os padrões da biblioteca de componentes construtivos disponibilizada pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE), publicada em Weber *et. al* (2017).

A Figura 18 apresenta todas as variáveis incluídas, totalizando 144 simulações completas, e dentro de cada uma delas, foram consideradas a simulação com e sem ventilação natural para determinação dos níveis de desempenho térmico mínimo, intermediário e superior, conforme apresentado na Figura 3. As siglas ARS significam absorvância 0,2 (ARS 02) para paredes claras e 0,7 (ARS 07) para as escuras.

Figura 18 – Modelos simulados para cada cidade



Fonte: A Autora (2023)

3.3.4 Dados de saída dos modelos simulados

Após a realização das simulações computacionais seguindo todas as indicações normativas, foram obtidos os dados de saída por UH, como abordados na Figura 3, Figura 4 e Figura 5 da seção 2.3.1. São eles: PHFT (%), T_o máx (°C), T_o mín (°C) e $CgTT$ (kWh/ano).

3.3.5 Tratamento estatístico

Com a obtenção dos indicadores das 144 simulações realizadas e com a determinação dos níveis de desempenho térmico, realizou-se análises estatísticas no *software IBM SPSS® Statistics* para

a verificação da influência sobre os resultados (CgTT, PHFT e nível de desempenho térmico) de cada uma dessas variáveis:

- a) Absortância;
- b) Tipo de conector/ parede;
- c) Método de obtenção da Req.

Para a análise dos resultados CgTT e PHFT em relação às variáveis, foram realizados testes de hipóteses a fim de verificar significância estatística entre os níveis de cada variáveis. Primeiramente, foi aplicado o teste de normalidade (Shapiro-Wilk) para a tomada de decisão quanto ao teste paramétrico (avalia a significância da diferença entre as médias dos resultados) ou não paramétrico (avalia a significância da diferença entre as medianas dos resultados).

Para os casos em que pelo menos um dos níveis não apresentou normalidade, decidiu-se pelo teste não paramétrico. Para os testes não paramétricos, foram aplicados o teste de Man Whitney na análise (a), possuindo apenas duas amostras (ARS 02 e 07), e o de Kruskal-Wallis para as análises (b) e (c) com mais de duas amostras cada. Para os testes paramétricos, foi utilizada a Análise de Variância (ANOVA) (WALPOLE *et al.*, 2009).

Para a análise dos resultados de desempenho térmico, por se tratar de uma variável qualitativa, foi aplicado o teste Exato de Fisher, alternativo ao teste Qui-quadrado de Pearson, que tem a limitação de amostras grandes e valores esperados de pelo menos 5 nas caselas da tabela de contingência equivalente. O teste Exato de Fisher se baseia na distribuição hipergeométrica, e testa a hipótese nula de ausência de associação entre duas variáveis 2×2 e $m \times n$. Caso seja identificada significância estatística, é realizado o teste de comparações dois a dois (teste Z) controlando o erro do tipo I pelo método de Bonferroni. O nível de significância adotado em todas as situações foi de 5%.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da metodologia descrita, parte-se para a apresentação e discussão dos resultados de cada etapa, para cumprimento dos objetivos geral e específicos.

4.1 Etapa 1: Verificação do nível de desempenho térmico dos painéis

Tendo em vista os métodos descritos na seção 3.1, a Tabela 7 apresenta os resultados obtidos de resistência equivalente, transmitância térmica e capacidade térmica para cada tipo de painel.

Tabela 7 – Resultados obtidos para a resistência equivalente dos painéis

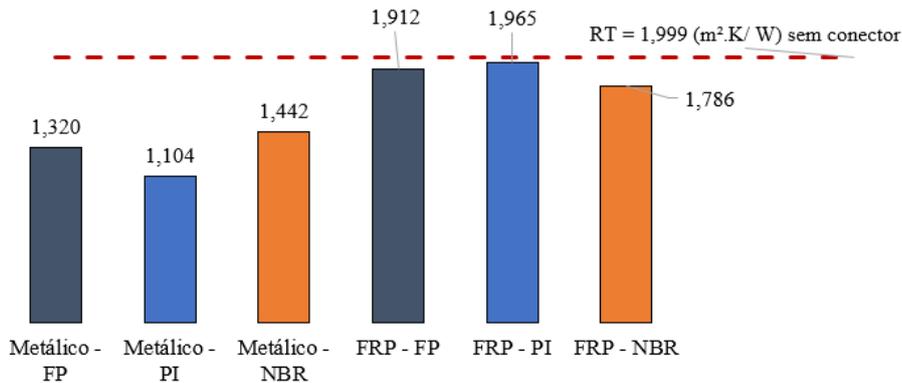
Painel/ Método	Convencional - Camadas Homogêneas				Fluxo Paralelo			
	Rt (m ² .K/ W)	RT (m ² .K/ W)	U (W/ m ² .K)	CT (kJ/ m ² .K)	Rt (m ² .K/ W)	RT (m ² .K/ W)	U (W/ m ² .K)	CT (kJ/ m ² .K)
Simple	0,172	0,342	2,923	271,998	-	-	-	-
Sanduíche sem conector	1,829	1,999	0,500	183,361	-	-	-	-
Conector metálico	-	-	-	-	1,150	1,320	0,758	183,473
Conector FRP	-	-	-	-	1,742	1,912	0,523	183,688
Painel/ Método	Planos Isotérmicos				ABNT NBR 15220: 2005			
	Rt (m ² .K/ W)	RT (m ² .K/ W)	U (W/ m ² .K)	CT (kJ/ m ² .K)	Rt (m ² .K/ W)	RT (m ² .K/ W)	U (W/ m ² .K)	CT (kJ/ m ² .K)
Simple	-	-	-	-	-	-	-	-
Sanduíche sem conector	-	-	-	-	-	-	-	-
Conector metálico	0,934	1,104	0,906	183,433	1,272	1,442	0,693	183,467
Conector FRP	1,795	1,965	0,509	183,493	1,616	1,786	0,560	183,672

Fonte: A Autora (2023)

Comparando especificamente o valor de R_T entre os dois tipos de painel sanduíche e os 3 métodos utilizados, tem-se a Figura 19 que apresenta graficamente as diferenças entre eles, comparando-se ao valor obtido sem o conector. As siglas referem-se ao método utilizado para os cálculos: Convencional (CV), Fluxo Paralelo (FP), Planos Isotérmicos (PI) e NBR 15220:2022 (NBR).

Devido ao limitado número de dados para uma avaliação estatística mais aprofundada, a Tabela 8 apresenta as diferenças numericamente entre os métodos para um mesmo conector, e também as diferenças entre os conectores dentro de um mesmo método.

Figura 19 – Comparação gráfica entre os dois tipos de conectores e os métodos de obtenção da resistência térmica equivalente total (R_T) em ($m^2 \cdot K/ W$)



Fonte: A Autora (2023)

Tabela 8 – Comparativo entre os resultados de R_T em ($m^2 \cdot K/ W$) e os 3 métodos

Painel/ Método	Fluxo Paralelo	Planos Isotérmicos	ABNT NBR 15220: 2005	Média	Mediana	Desvio-padrão
Conector metálico	1,320	1,104	1,442	1,289	1,320	17,12%
Conector FRP	1,912	1,965	1,786	1,887	1,912	9,17%
Diferença FRP (-) metálico	-0,592	-0,861	-0,344	-0,599	-0,592	-

Fonte: A Autora (2023)

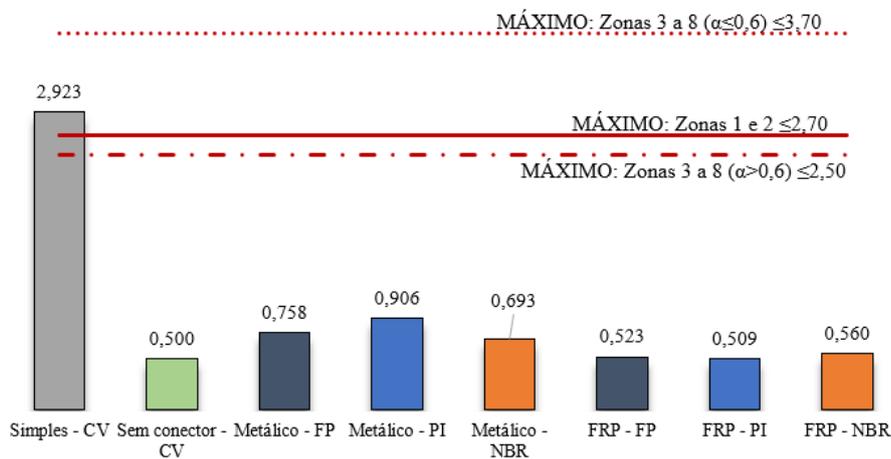
A partir da comparação entre os três métodos para cada tipo de conector, observou-se diferenças nos resultados, que resultaram num desvio padrão de 17,12% para aquele com conector metálico, e de 9,17% para conector de FRP. Comparando-se dentro de um mesmo método, os dois tipos de conectores, notou-se um valor médio superior de 0,599 $m^2 \cdot K/ W$ nos resultados para o conector metálico. Os valores da NBR 15220 (ABNT 2022). apresentaram uma maior proximidade, denotando um menor impacto quanto ao material do conector na R_T .

Em se tratando da comparação entre os dois tipos de conectores, os resultados obtidos mantiveram os padrões encontrados por Woltman, Noel e Fam (2017) e Yu *et al.* (2022). Os autores obtiveram resistências térmicas maiores para os conectores de FRP na ordem de 0,150 $m^2 \cdot K/ W$ a 0,291 $m^2 \cdot K/ W$. Nesse caso, entretanto, as diferenças foram ainda maiores, com 0,344 $m^2 \cdot K/ W$ quando utilizado o método da NBR 15220 (ABNT 2005). e de 0,861 $m^2 \cdot K/ W$ para o cálculo por Planos Isotérmicos.

Confronta-se ainda as resistências térmicas entre os painéis com os dois conectores, e aquele sem conector. Os cenários com conector FRP retornaram uma resistência térmica menor, em média $0,112 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$, e o conector metálico, um valor médio de $0,710 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$, também menor. Tais resultados endossam a impossibilidade de serem desconsiderados a presença dos conectores nesses cálculos, uma vez que ao serem desprezados, as resistências foram superestimadas, independentemente do método, reafirmando as conclusões de Woltman, Noel e Fam (2017) e Yu *et al.* (2022). Constata-se, portanto, a presença das pontes térmicas ocasionadas pelos conectores e seu impacto nos resultados de resistência térmica.

Com os dados de resistência equivalente dos SVVs obtidos, e com os parâmetros normativos da NBR 15220 (ABNT 2005; 2022). (Tabela 2), tem-se os resultados apresentados na Tabela 9 e na Figura 20 para o critério de Transmitância Térmica; na Tabela 10 e na Figura 21 para o de Capacidade Térmica; e a Tabela 11, para o nível mínimo de desempenho térmico de acordo com a zona bioclimática da UH, e da cor da parede externa. As células preenchidas com “SIM”, indicam que o critério foi atingido, e “NÃO” que os valores não se encaixaram nos limites normativos.

Figura 20 – Valores de transmitância térmica (U) em $(\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K})$ e limites máximos normativos por zona bioclimática

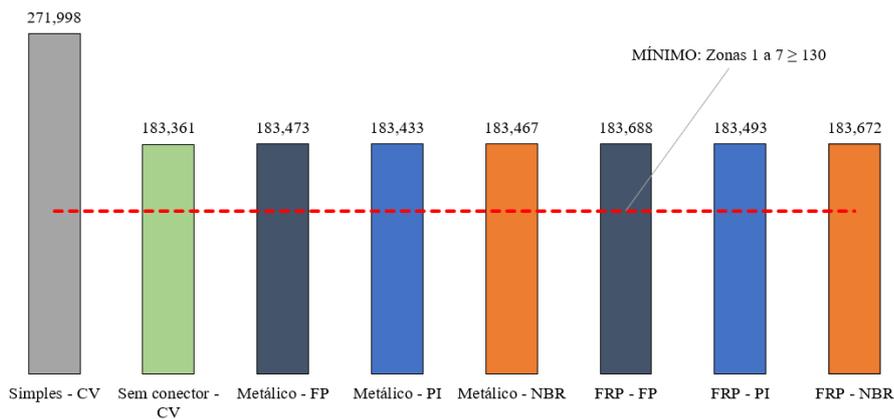


Fonte: A Autora (2023)

Tabela 9 – Resultados para o critério de transmitância térmica do método simplificado

Painel	Zonas 1 e 2	Zonas 3 a 8 ($\alpha \leq 0,6$)	Zonas 3 a 8 ($\alpha > 0,6$)
Simples	NÃO	SIM	NÃO
Sanduíche sem conector	SIM	SIM	SIM
Conector metálico (Fluxo Paralelo)	SIM	SIM	SIM
Conector metálico (Planos Isotérmicos)	SIM	SIM	SIM
Conector metálico (NBR 15220)	SIM	SIM	SIM
Conector FRP (Fluxo Paralelo)	SIM	SIM	SIM
Conector FRP (Planos Isotérmicos)	SIM	SIM	SIM
Conector FRP (NBR 15220)	SIM	SIM	SIM

Fonte: A Autora (2023)

Figura 21 – Valores de capacidade térmica (CT) em (kJ/ m²·K) e limites mínimos normativos por zona bioclimática

Fonte: A Autora (2023)

Tabela 10 – Resultados para o critério de capacidade térmica do método simplificado

Painel	Zonas 1 a 7	Zona 8
Simples	SIM	
Sanduíche sem conector	SIM	
Conector metálico (Fluxo Paralelo)	SIM	
Conector metálico (Planos Isotérmicos)	SIM	
Conector metálico (NBR 15220)	SIM	Sem requisito
Conector FRP (Fluxo Paralelo)	SIM	
Conector FRP (Planos Isotérmicos)	SIM	
Conector FRP (NBR 15220)	SIM	

Fonte: A Autora (2023)

Tabela 11 – Resultados para o atendimento ao nível mínimo de desempenho térmico com as resistências equivalentes

Painel	Zonas 1 e 2	Zonas 3 a 8 ($\alpha \leq 0,6$)	Zonas 3 a 8 ($\alpha > 0,6$)
Simple	NÃO	SIM	NÃO
Sanduíche sem conector	SIM	SIM	SIM
Conector metálico (Fluxo Paralelo)	SIM	SIM	SIM
Conector metálico (Planos Isotérmicos)	SIM	SIM	SIM
Conector metálico (NBR 15220)	SIM	SIM	SIM
Conector FRP (Fluxo Paralelo)	SIM	SIM	SIM
Conector FRP (Planos Isotérmicos)	SIM	SIM	SIM
Conector FRP (NBR 15220)	SIM	SIM	SIM

Fonte: A Autora (2023)

Pela verificação da capacidade térmica mínima de 130 kJ/ m²·K, os 4 tipos de painéis atenderam ao critério, sendo determinante portanto, o cumprimento da transmitância térmica máxima, de acordo com a zona bioclimática.

Nesse sentido, de acordo com o requisito de desempenho térmico mínimo, todos os tipos de parede poderiam ser aplicados em todas as 8 zonas bioclimáticas brasileiras, com exceção da parede de concreto simples para as zonas bioclimáticas 1 e 2, e nas zonas 3 a 8 com as paredes externas escuras (absortância maior que 0,6). Desta forma, apesar da resistência térmica dos painéis com conector metálico e de FRP pelo método da NBR 15220 (ABNT 2005). terem sido 0,557 m²·K/ W e 0,213 m²·K/ W maiores, respectivamente, do que aquele sem conector, e da diferença de 0,599 m²·K/ W entre os tipos de conectores, esses valores não foram significativos o suficiente para impactarem na obtenção do nível mínimo de desempenho térmico da ABNT NBR 15220 (ABNT 2005; 2022). pelo método simplificado.

Apesar da impossibilidade de se aplicar um método estatístico para verificar a significância ou não, diferenças de 0,213 m²·K/ W, 0,557 m²·K/ W e 0,599 m²·K/ W, na proporção de resultados médios em torno de 1,647 m²·K/ W (média de todas as resistências dos painéis sanduíche), representam uma redução em torno de 36% na resistência térmica do sistema e não foram significantes o suficiente para alterar os níveis de desempenho segundo os critérios normativos brasileiros. Nesse sentido, esse cenário fortalece as discussões de Bienvenido-Huertas *et al.* (2019), que apontaram uma maior flexibilidade nos critérios normativos brasileiros.

Por fim, tem-se que os métodos de Fluxo Paralelo e Planos Isotérmicos especificados pela ASHRAE (2001), foram mais rígidos no quesito desempenho térmico dos sistemas de vedação externa analisados, quando comparados a NBR 15220 (ABNT 2022). e, por conseguinte, a NBR 15575-4 (ABNT, 2021b), uma vez que seus resultados excluíram a aplicação do painel sanduíche com conector metálico nas zonas 1 e 2. Pode-se inferir ainda que, mesmo com uma análise simplificada, analisando unicamente os SVVs, o material do conector foi relevante para o desempenho térmico final dos sistemas, embora não tenha sido suficiente para reprovar os sistemas no critério de desempenho térmico mínimo.

4.2 Etapa 2: Simulação numérica dos painéis em 2D por MEF

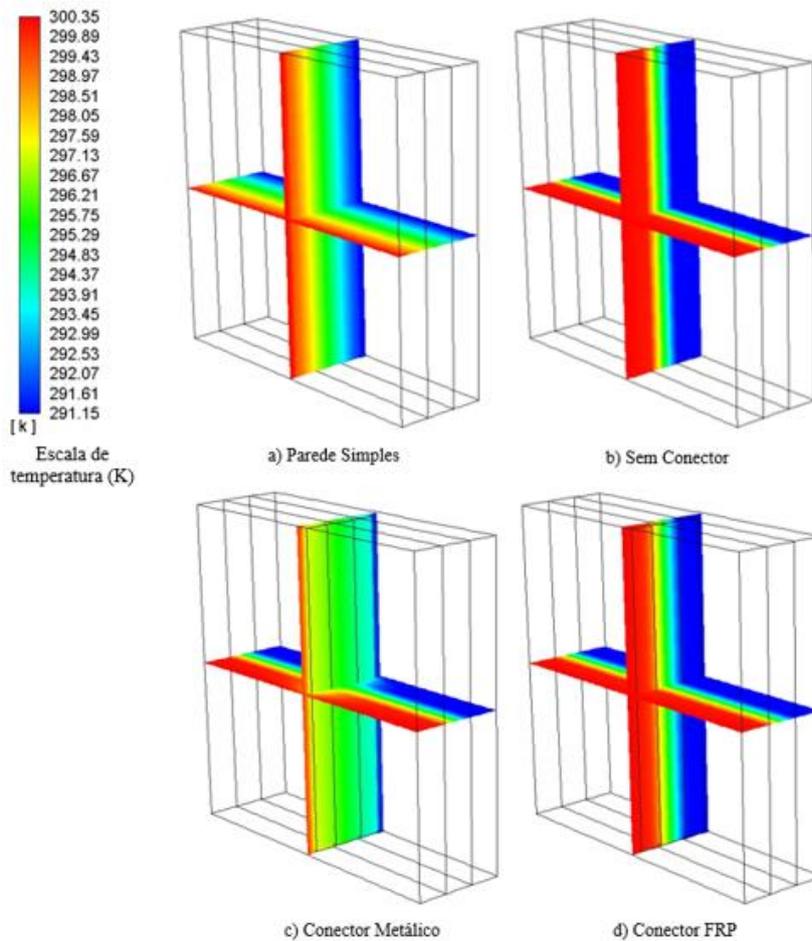
Tendo em vista os métodos descritos na seção 3.2, a Tabela 12 apresenta os resultados obtidos de fluxo de calor pela simulação, e das resistências térmicas equivalentes calculadas para cada tipo de painel. A Figura 22 apresenta graficamente o fluxo de calor do lado externo (maior temperatura) para o lado interno (menor temperatura) para as 4 condições simuladas. As cores mais avermelhadas representam temperaturas mais altas, e as próximas do azul, temperaturas mais frias.

Tabela 12 – Fluxo de calor e resistência térmica para os painéis a partir da simulação numérica

Painel	Fluxo de calor (W)	Resistência térmica R_t ($m^2 \cdot K/W$)
Parede simples	19,943	0,166
Sanduíche sem conector	1,880	1,762
Conector Metálico	5,115	0,647
Conector FRP	1,922	1,723

Fonte: A Autora (2023)

Figura 22 – Mapas de calor das simulações em MEF para os 4 painéis simulados (a) parede simples, (b) sanduíche sem conector, (c) sanduíche com conector metálico e (d) sanduíche com conector FRP



Fonte: A Autora (2023)

Devido às condições de contorno impostas com as temperaturas do de maior temperatura para o de menor temperatura, os 4 sistemas de paredes iniciam a transferência de calor em 300,35 K para 291,15 K. No entanto, pelos mapas de calor, é possível verificar o comportamento de cada um deles.

Comparando-se os resultados de fluxo de calor, a situação com parede simples resultou num valor de aproximadamente 74% maior, se comparado ao painel com conector metálico, e na ordem de 90% para os painéis sem conector e com conector de FRP. Reforça-se assim, a importância das camadas de isolamento nos sistemas de vedações verticais, já enfatizado por vários autores abordados na revisão da literatura, como em Ximei, Yonghui e Xueming (2018) e Kinnane, West e Hegarty (2020).

O comportamento do painel sem conector e com conector de FRP foi semelhante, sendo o conector responsável pelo acréscimo de 0,043 W no fluxo de calor total. Os mapas de calor demonstram uma uniformidade na diminuição de temperatura entre as camadas do painel, cujas mudanças marcantes coincidiram com a entrada e saída de calor na camada do material isolante.

Quanto ao sistema com conector metálico, o fluxo de calor foi em média 62% maior do que com material de FRP. Graficamente nota-se uma transferência de calor rápida entre as camadas do painel, com mudança de temperatura logo nos primeiros centímetros do painel, antes mesmo de ser atingida a camada de isolamento. Pode-se ainda inferir que, na presença do conector metálico, a camada de EPS não marcou a transferência de calor como no conector de FRP, não sendo, portanto, decisiva nessa transmissão de calor.

Quanto aos resultados de resistência térmica, os conectores metálicos apresentaram um valor 266% maior do que nos conectores de FRP, com 0,647 m²·K/ W e 1,723 m²·K/ W respectivamente. Já nos estudos de Lameiras *et al.* (2010) e Santos (2010), essa diferença foi de apenas 11%. Essa diferença expressiva pode estar relacionada ao modelo de simulação considerado, sendo este de geometria 3D e fluxo de calor 2D, e até pela inexistência de repetições das simulações.

Essas descobertas vão de encontro aos estudos de Woltman (2014), que não visualizaram os conectores de FRP nas imagens térmicas, e detectaram regiões preferenciais de fluxo de calor nos conectores metálicos, apesar de terem metade da área da seção transversal do menor conector GFRP, como também ocorreu neste trabalho. Os conectores de FRP aqui simulados, tiveram uma área transversal 4 vezes maior que os conectores metálicos, e ainda assim não proporcionaram regiões preferenciais do fluxo de calor.

Parte-se então para o comparativo entre as resistências obtidas nos diferentes métodos. A Tabela 13 apresenta os valores obtidos.

Tabela 13 – Compilação das resistências térmicas equivalentes (R_t) para os métodos avaliados

Painel	MEF	Fluxo Paralelo	Planos isotérmicos	NBR 15220	Média	Mediana	Desvio-padrão
Parede simples	0,166	-	-	0,172	0,169	0,169	0,00%
Sanduíche sem conector	1,762	-	-	1,829	1,796	1,796	4,74%
Conector Metálico	0,647	1,150	0,934	1,272	1,001	1,042	27,41%
Conector FRP	1,723	1,742	1,795	1,616	1,719	1,732	7,49%

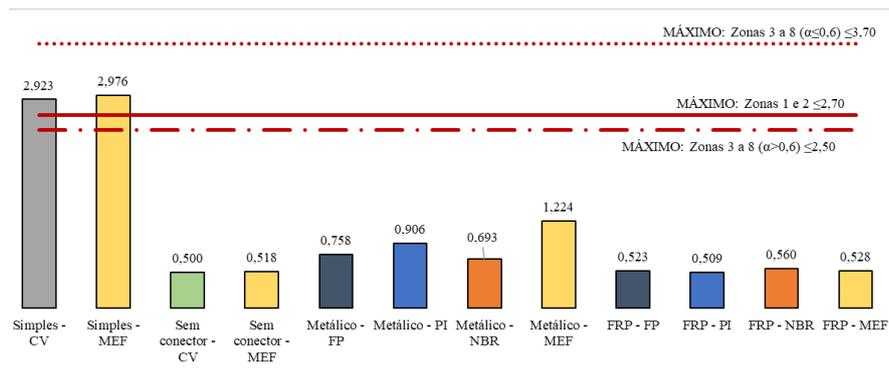
Fonte: A Autora (2023)

A simulação pelo MEF apresentou pequenas variações, quando comparada aos métodos analíticos para os painéis do tipo simples, sanduíche sem conector e conector FRP, com desvio padrão entre eles de 0,00%, 4,74% e 7,49% respectivamente, o que sugere uma possível uniformidade nos resultados, independentemente do método escolhido para o cálculo da R_t .

Já para o conector metálico, quando analisado os resultados dos três métodos analíticos, tem-se um desvio padrão de 17,12% (Tabela 8), porém, ao se acrescentar o resultado da análise por MEF, esse percentual sobe para 27,41%. Tal fato pode ser associado à maior ponte térmica que o conector metálico provoca, e que por sua vez foi captada na simulação. É importante ressaltar que os métodos analíticos foram, no entanto, a favor da segurança, resultando numa menor resistência térmica do conector metálico, e que o padrão de comportamento no *ranking* das resistências térmicas permaneceu.

Com os dados de resistência equivalente dos sistemas apresentados na Tabela 12, calcula-se também as variáveis R_T e U , para fins de comparação com os parâmetros normativos da NBR 15220 (ABNT 2022). , como apresenta a Figura 23. Tendo em vista os resultados, percebe-se que, as análises por MEF indicam que todos os tipos de parede analisados estariam dentro dos padrões normativos de limite de transmitância térmica para todas as zonas bioclimáticas brasileiras, sendo o único método que forneceu essa condição para aquela com conector metálico.

Figura 23 – Valores de transmitância térmica (U) em (W/ m².m².K) incluindo a análise por MEF e limites máximos normativos por zona bioclimática



Fonte: A Autora (2023)

Analisando-se os requisitos do método simplificado para obtenção do nível de desempenho térmico, os resultados incluindo as resistências obtidas nessa etapa mantiveram-se iguais aos da etapa anterior (Tabela 11), com exceção da situação em que o conector seria metálico e a UH estaria nas zonas 3 a 8, com absorvância das paredes externas maior que 0,6 (Tabela 14). Apesar das diferenças encontradas, independentemente do método, seja ele normativo, ASHRAE ou MEF, os sistemas continuaram atendendo ao requisito mínimo de transmitância térmica para o desempenho térmico, em todas as situações com painel sanduíche.

Tabela 14 – Resultados para o atendimento ao nível mínimo de desempenho térmico após simulação numérica

Painel	Zonas 1 e 2	Zonas 3 a 8 ($\alpha \leq 0,6$)	Zonas 3 a 8 ($\alpha > 0,6$)
Simple	NÃO	SIM	NÃO
Simple (MEF)	NÃO	SIM	NÃO
Sanduíche sem conector (MEF)	SIM	SIM	SIM
Sanduíche sem conector	SIM	SIM	SIM
Conector metálico (Fluxo Paralelo)	SIM	SIM	SIM
Conector metálico (Planos Isotérmicos)	SIM	SIM	SIM
Conector metálico (NBR 15220)	SIM	SIM	SIM
Conector metálico (MEF)	SIM	SIM	SIM
Conector FRP (Fluxo Paralelo)	SIM	SIM	SIM
Conector FRP (Planos Isotérmicos)	SIM	SIM	SIM
Conector FRP (NBR 15220)	SIM	SIM	SIM
Conector FRP (MEF)	SIM	SIM	SIM

Fonte: A Autora (2023)

4.3 Etapa 3: Simulação computacional da UH

Os sistemas equivalentes obtidos com base em Weber *et. al.* (2017) para os painéis sanduíche com conector e nos três métodos de obtenção da resistência equivalente a partir dos valores de U e CT da Tabela 7 estão apresentados na Tabela 15 – Sistemas equivalentes utilizados nas simulações computacionais.

Tabela 15 – Sistemas equivalentes utilizados nas simulações computacionais

Método referência	Camada 1	Camada 2	Camada 3
Conector metálico			
Fluxo Paralelo	Concreto (e = 0,042 m)	EPS (e = 1,272)	Concreto (e = 0,042 m)
Planos Isotérmicos	Concreto (e = 0,042 m)	EPS (e = 1,056)	Concreto (e = 0,042 m)
NBR 15220	Concreto (e = 0,042 m)	EPS (e = 1,394)	Concreto (e = 0,042 m)
Conector FRP			
Fluxo Paralelo	Concreto (e = 0,042 m)	EPS (e = 1,864)	Concreto (e = 0,042 m)
Planos Isotérmicos	Concreto (e = 0,042 m)	EPS (e = 1,917)	Concreto (e = 0,042 m)
NBR 15220	Concreto (e = 0,042 m)	EPS (e = 1,738)	Concreto (e = 0,042 m)

Fonte: A Autora (2023)

Tendo em vista os métodos descritos na seção 3.3, a partir das 144 simulações (9 cidades e 16 simulações para cada uma) realizadas no *software EnergyPlus*, tem-se a Tabela 16 com os resultados de PHFT, CgTT e o nível de desempenho térmico em cada situação analisada.

Dentre as 144 simulações, quanto aos requisitos normativos para nível de desempenho térmico, tem-se:

- 80 reprovações, sendo: 11 em Belo Horizonte (ZB 3), 7 em Duque de Caxias (ZB 5), 12 em Campo Grande (ZB 6), 14 em Cuiabá (ZB 7), 15 em Salvador (ZB 8) e 15 em Belém (ZB 8);
- Dentre as 80 reprovações, 27 delas foram para absorvância igual a 0,7 (paredes escuras);
- As zonas bioclimáticas 1 e 2 não tiveram nenhum cenário reprovado;
- 47 simulações com nível mínimo;
- Apenas 01 situação foi aprovada em Salvador e Belém, ambas da ZB 8, com desempenho mínimo, sendo ela com parede simples e cor clara;
- Nas cidades de Belém/ PA, Salvador/BA, Campo Grande/ MS e Cuiabá/ MT, retirando-se as situações com desempenho reprovado, os demais cenários foram todos com nível mínimo de desempenho e paredes claras, divididas em: parede de concreto simples (todas as 04 cidades) ou com conector metálico (Campo Grande);
- 02 cenários aprovados em Cuiabá, com desempenho mínimo: painel sanduíche com conector metálico (resistência por planos isotérmicos) e cor clara, e parede simples em cores claras;
- O desempenho mínimo foi observado em todas as zonas bioclimáticas de 2 a 8, sendo que na ZB 2, representada pela cidade de Santa Maria, nenhum outro nível foi alcançado;
- Belo Horizonte (ZB 3) só apresentou duas situações: 11 reprovados e 5 mínimos, sendo esses com cores claras nas paredes;
- 04 simulações com nível intermediário: 03 em Curitiba da ZB 1 (parede simples cor clara, parede simples cor escura e conector metálico pelo método de planos isotérmicos em cor escura) e 01 em Brasília da ZB 4 (parede simples e cor clara);
- 13 cenários com nível superior e todos na cidade de Curitiba (ZB 1). As outras 3 simulações resultaram em nível intermediário de desempenho térmico

Comparando-se aos resultados do método simplificado (seção 4.1), as paredes simples foram reprovadas para as zonas bioclimáticas 1 e 2. Já no método de simulação, foram as únicas regiões em que não houve nenhuma reprovação, atingindo pelo menos o nível mínimo. Ainda

nos resultados da seção 4.1, as paredes simples nas zonas 3 a 8 deveriam ter cores claras para alcançar o nível mínimo. Contudo, nas simulações, dentro das 80 reprovações das zonas 3 a 8, 27 delas foram com cores claras. Denota-se, portanto, uma discrepância considerável entre os dois métodos normativos.

Nesse caso, o simplificado demonstrou-se mais maleável, contrapondo os resultados de Oliveira e Alves (2021), que também encontraram divergências entre os métodos ao avaliarem o desempenho térmico de paredes de concreto para HIS, porém, com resultados das simulações mais flexíveis. Apesar de terem se baseado na versão anterior da ABNT NBR 15575: 2013, as disparidades entre os métodos permaneceram, porém foram invertidas quanto à flexibilidade.

As discussões sobre os indicadores PHFT e CgTT serão discutidos na seção 4.3.2 após as análises estatísticas.

Tabela 16 – Resultados de CgTT, PHFT e nível de Desempenho Térmico das simulações

VARIÁVEIS						RESULTADOS		
ID	ZB	Cidade	Absortância	Conector	Método	CgTT (kWh/ ano)	PHFT (%)	desempenho
1	1	Curitiba	ARS 02	FRP	NBR 15220	84,6	644	superior
2	1	Curitiba	ARS 02	FRP	Fluxo Paralelo	85	636	superior
3	1	Curitiba	ARS 02	FRP	Plano	85,1	634	superior
4	1	Curitiba	ARS 02	metalico	NBR 15220	83,6	663	superior
5	1	Curitiba	ARS 02	metalico	Fluxo Paralelo	83,1	675	superior
6	1	Curitiba	ARS 02	metalico	Planos Isotérmicos	82,1	699	superior
7	1	Curitiba	ARS 02	sanduique sem conector	convencional	85,1	633	superior
8	1	Curitiba	ARS 02	parede simples	convencional	76,6	856	intermediario
9	1	Curitiba	ARS 07	FRP	NBR 15220	86	759	superior
10	1	Curitiba	ARS 07	FRP	Fluxo Paralelo	86,2	752	superior
11	1	Curitiba	ARS 07	FRP	Plano	86,2	750	superior
12	1	Curitiba	ARS 07	metalico	NBR 15220	85,4	783	superior
13	1	Curitiba	ARS 07	metalico	Fluxo Paralelo	85	796	superior
14	1	Curitiba	ARS 07	metalico	Planos Isotérmicos	84,3	824	intermediario
15	1	Curitiba	ARS 07	sanduique sem conector	convencional	86,3	749	superior
16	1	Curitiba	ARS 07	parede simples	convencional	81,5	940	intermediario
17	2	Santa Maria	ARS 02	FRP	NBR 15220	59,1	2857	minimo
18	2	Santa Maria	ARS 02	FRP	Fluxo Paralelo	59,3	2854	minimo
19	2	Santa Maria	ARS 02	FRP	Plano	59,3	2857	minimo
20	2	Santa Maria	ARS 02	metalico	NBR 15220	58,7	2862	minimo
21	2	Santa Maria	ARS 02	metalico	Fluxo Paralelo	58,5	2863	minimo
22	2	Santa Maria	ARS 02	metalico	Planos Isotérmicos	58,2	2869	minimo
23	2	Santa Maria	ARS 02	sanduique sem conector	convencional	59,3	2856	minimo
24	2	Santa Maria	ARS 02	parede simples	convencional	56,8	2877	minimo
25	2	Santa Maria	ARS 07	FRP	NBR 15220	59,4	3118	minimo
26	2	Santa Maria	ARS 07	FRP	Fluxo Paralelo	59,5	3110	minimo
27	2	Santa Maria	ARS 07	FRP	Plano	59,5	3108	minimo
28	2	Santa Maria	ARS 07	metalico	NBR 15220	59,1	3155	minimo
29	2	Santa Maria	ARS 07	metalico	Fluxo Paralelo	58,9	3172	minimo
30	2	Santa Maria	ARS 07	metalico	Planos Isotérmicos	58,6	3206	minimo
31	2	Santa Maria	ARS 07	sanduique sem conector	convencional	59,5	3105	minimo
32	2	Santa Maria	ARS 07	parede simples	convencional	56,5	3456	minimo
33	3	Belo Horizonte	ARS 02	FRP	NBR 15220	62,7	3392	minimo
34	3	Belo Horizonte	ARS 02	FRP	Fluxo Paralelo	62,3	3420	reprovado
35	3	Belo Horizonte	ARS 02	FRP	Plano	62,2	3428	reprovado
36	3	Belo Horizonte	ARS 02	metalico	NBR 15220	63,8	3306	minimo
37	3	Belo Horizonte	ARS 02	metalico	Fluxo Paralelo	64,3	3267	minimo
38	3	Belo Horizonte	ARS 02	metalico	Planos Isotérmicos	65,3	3186	minimo
39	3	Belo Horizonte	ARS 02	sanduique sem conector	convencional	62,2	3434	reprovado
40	3	Belo Horizonte	ARS 02	parede simples	convencional	72,8	2494	minimo
41	3	Belo Horizonte	ARS 07	FRP	NBR 15220	57,6	4004	reprovado
42	3	Belo Horizonte	ARS 07	FRP	Fluxo Paralelo	57,5	4005	reprovado
43	3	Belo Horizonte	ARS 07	FRP	Plano	57,5	4004	reprovado
44	3	Belo Horizonte	ARS 07	metalico	NBR 15220	58	4005	reprovado
45	3	Belo Horizonte	ARS 07	metalico	Fluxo Paralelo	58,1	4003	reprovado
46	3	Belo Horizonte	ARS 07	metalico	Planos Isotérmicos	58,5	4004	reprovado
47	3	Belo Horizonte	ARS 07	sanduique sem conector	convencional	57,5	4003	reprovado
48	3	Belo Horizonte	ARS 07	parede simples	convencional	59,4	4021	reprovado
49	4	Brasília	ARS 02	FRP	NBR 15220	80,4	1783	minimo
50	4	Brasília	ARS 02	FRP	Fluxo Paralelo	80,3	1798	minimo

Fonte: A Autora (2023)

Tabela 16 – Resultados de CgTT, PHFT e nível de Desempenho Térmico das simulações (continuação)

VARIÁVEIS						RESULTADOS		
ID	ZB	Cidade	Absortância	Conector	Método	CgTT (kWh/ ano)	PHFT (%)	desempenho
51	4	Brasília	ARS 02	FRP	Plano	80,2	1805	minimo
52	4	Brasília	ARS 02	metalico	NBR 15220	81	1732	minimo
53	4	Brasília	ARS 02	metalico	Fluxo Paralelo	81,3	1706	minimo
54	4	Brasília	ARS 02	metalico	Planos Isotérmicos	81,8	1650	minimo
55	4	Brasília	ARS 02	sanduiचे sem conector	convencional	80,1	1811	minimo
56	4	Brasília	ARS 02	parede simples	convencional	87,1	1128	intermediario
57	4	Brasília	ARS 07	FRP	NBR 15220	74,9	2377	reprovado
58	4	Brasília	ARS 07	FRP	Fluxo Paralelo	74,9	2375	reprovado
59	4	Brasília	ARS 07	FRP	Plano	74,9	2374	reprovado
60	4	Brasília	ARS 07	metalico	NBR 15220	74,9	2389	reprovado
61	4	Brasília	ARS 07	metalico	Fluxo Paralelo	75	2391	reprovado
62	4	Brasília	ARS 07	metalico	Planos Isotérmicos	75,1	2400	minimo
63	4	Brasília	ARS 07	sanduiचे sem conector	convencional	74,9	2373	reprovado
64	4	Brasília	ARS 07	parede simples	convencional	76,2	2346	minimo
65	5	Duque de Caxias	ARS 02	FRP	NBR 15220	49,5	5027	minimo
66	5	Duque de Caxias	ARS 02	FRP	Fluxo Paralelo	49,3	5042	minimo
67	5	Duque de Caxias	ARS 02	FRP	Plano	49,3	5049	minimo
68	5	Duque de Caxias	ARS 02	metalico	NBR 15220	50	4975	minimo
69	5	Duque de Caxias	ARS 02	metalico	Fluxo Paralelo	50,3	4949	minimo
70	5	Duque de Caxias	ARS 02	metalico	Planos Isotérmicos	50,9	4892	minimo
71	5	Duque de Caxias	ARS 02	sanduiचे sem conector	convencional	49,2	5054	minimo
72	5	Duque de Caxias	ARS 02	parede simples	convencional	54,9	4452	minimo
73	5	Duque de Caxias	ARS 07	FRP	NBR 15220	46,2	5594	reprovado
74	5	Duque de Caxias	ARS 07	FRP	Fluxo Paralelo	46,2	5588	reprovado
75	5	Duque de Caxias	ARS 07	FRP	Plano	46,1	5587	reprovado
76	5	Duque de Caxias	ARS 07	metalico	NBR 15220	46,3	5620	reprovado
77	5	Duque de Caxias	ARS 07	metalico	Fluxo Paralelo	46,4	5629	reprovado
78	5	Duque de Caxias	ARS 07	metalico	Planos Isotérmicos	46,5	5659	reprovado
79	5	Duque de Caxias	ARS 07	sanduiचे sem conector	convencional	46,1	5584	reprovado
80	5	Duque de Caxias	ARS 07	parede simples	convencional	47	5863	minimo
81	6	Campo Grande	ARS 02	FRP	NBR 15220	46,5	4767	reprovado
82	6	Campo Grande	ARS 02	FRP	Fluxo Paralelo	46,3	4783	reprovado
83	6	Campo Grande	ARS 02	FRP	Plano	46,3	4789	reprovado
84	6	Campo Grande	ARS 02	metalico	NBR 15220	47,3	4703	minimo
85	6	Campo Grande	ARS 02	metalico	Fluxo Paralelo	47,7	4673	minimo
86	6	Campo Grande	ARS 02	metalico	Planos Isotérmicos	48,5	4612	minimo
87	6	Campo Grande	ARS 02	sanduiचे sem conector	convencional	46,2	4794	reprovado
88	6	Campo Grande	ARS 02	parede simples	convencional	54,5	4076	minimo
89	6	Campo Grande	ARS 07	FRP	NBR 15220	42,7	5357	reprovado
90	6	Campo Grande	ARS 07	FRP	Fluxo Paralelo	42,7	5348	reprovado
91	6	Campo Grande	ARS 07	FRP	Plano	42,7	5347	reprovado
92	6	Campo Grande	ARS 07	metalico	NBR 15220	42,9	5378	reprovado
93	6	Campo Grande	ARS 07	metalico	Fluxo Paralelo	43	5387	reprovado
94	6	Campo Grande	ARS 07	metalico	Planos Isotérmicos	43,1	5411	reprovado
95	6	Campo Grande	ARS 07	sanduiचे sem conector	convencional	42,7	5345	reprovado
96	6	Campo Grande	ARS 07	parede simples	convencional	43,2	5617	reprovado
97	7	Cuiaba	ARS 02	FRP	NBR 15220	29,4	8298	reprovado
98	7	Cuiaba	ARS 02	FRP	Fluxo Paralelo	29,1	8319	reprovado
99	7	Cuiaba	ARS 02	FRP	Plano	29	8327	reprovado
100	7	Cuiaba	ARS 02	metalico	NBR 15220	30,1	8237	reprovado

Fonte: A Autora (2023)

Tabela 16 – Resultados de CgTT, PHFT e nível de Desempenho Térmico das simulações (continuação)

ID	ZB	Cidade	VARIÁVEIS			RESULTADOS		
			Absortância	Conector	Método	CgTT (kWh/ ano)	PHFT (%)	desempenho
101	7	Cuiaba	ARS 02	metalico	Fluxo Paralelo	30,4	8209	reprovado
102	7	Cuiaba	ARS 02	metalico	Planos Isotérmicos	31,2	8148	minimo
103	7	Cuiaba	ARS 02	sanduche sem conector	convencional	29	8332	reprovado
104	7	Cuiaba	ARS 02	parede simples	convencional	36,3	7644	minimo
105	7	Cuiaba	ARS 07	FRP	NBR 15220	26	9067	reprovado
106	7	Cuiaba	ARS 07	FRP	Fluxo Paralelo	26	9051	reprovado
107	7	Cuiaba	ARS 07	FRP	Plano	25,9	9046	reprovado
108	7	Cuiaba	ARS 07	metalico	NBR 15220	26,2	9117	reprovado
109	7	Cuiaba	ARS 07	metalico	Fluxo Paralelo	26,3	9140	reprovado
110	7	Cuiaba	ARS 07	metalico	Planos Isotérmicos	26,5	9196	reprovado
111	7	Cuiaba	ARS 07	sanduche sem conector	convencional	25,9	9042	reprovado
112	7	Cuiaba	ARS 07	parede simples	convencional	26,2	9745	reprovado
113	8	Salvador	ARS 02	FRP	NBR 15220	20,4	9267	reprovado
114	8	Salvador	ARS 02	FRP	Fluxo Paralelo	20	9303	reprovado
115	8	Salvador	ARS 02	FRP	Plano	19,9	9319	reprovado
116	8	Salvador	ARS 02	metalico	NBR 15220	21,4	9155	reprovado
117	8	Salvador	ARS 02	metalico	Fluxo Paralelo	22	9093	reprovado
118	8	Salvador	ARS 02	metalico	Planos Isotérmicos	23,1	8980	reprovado
119	8	Salvador	ARS 02	sanduche sem conector	convencional	19,8	9326	reprovado
120	8	Salvador	ARS 02	parede simples	convencional	31,4	8009	minimo
121	8	Salvador	ARS 07	FRP	NBR 15220	15,2	10223	reprovado
122	8	Salvador	ARS 07	FRP	Fluxo Paralelo	15,1	10219	reprovado
123	8	Salvador	ARS 07	FRP	Plano	15,1	10215	reprovado
124	8	Salvador	ARS 07	metalico	NBR 15220	15,7	10237	reprovado
125	8	Salvador	ARS 07	metalico	Fluxo Paralelo	15,9	10247	reprovado
126	8	Salvador	ARS 07	metalico	Planos Isotérmicos	16,5	10258	reprovado
127	8	Salvador	ARS 07	sanduche sem conector	convencional	15,1	10213	reprovado
128	8	Salvador	ARS 07	parede simples	convencional	17,6	10601	reprovado
129	8	Belem	ARS 02	FRP	NBR 15220	40,6	8597	reprovado
130	8	Belem	ARS 02	FRP	Fluxo Paralelo	39,9	8653	reprovado
131	8	Belem	ARS 02	FRP	Plano	39,6	8677	reprovado
132	8	Belem	ARS 02	metalico	NBR 15220	42,6	8420	reprovado
133	8	Belem	ARS 02	metalico	Fluxo Paralelo	43,5	8345	reprovado
134	8	Belem	ARS 02	metalico	Planos Isotérmicos	45,3	8184	reprovado
135	8	Belem	ARS 02	sanduche sem conector	convencional	39,5	8687	reprovado
136	8	Belem	ARS 02	parede simples	convencional	57,3	6865	minimo
137	8	Belem	ARS 07	FRP	NBR 15220	31,3	9850	reprovado
138	8	Belem	ARS 07	FRP	Fluxo Paralelo	31	9854	reprovado
139	8	Belem	ARS 07	FRP	Plano	30,9	9854	reprovado
140	8	Belem	ARS 07	metalico	NBR 15220	32,4	9837	reprovado
141	8	Belem	ARS 07	metalico	Fluxo Paralelo	32,8	9834	reprovado
142	8	Belem	ARS 07	metalico	Planos Isotérmicos	33,8	9823	reprovado
143	8	Belem	ARS 07	sanduche sem conector	convencional	30,9	9854	reprovado
144	8	Belem	ARS 07	parede simples	convencional	34,6	10227	reprovado

Fonte: A Autora (2023)

4.3.1 Análises estatísticas

Após aplicação do tratamento estatístico para a verificação de significância das variáveis absortância, tipos de conector e método de resistência equivalente, tem-se a apresentação dos resultados a seguir. Não foi possível a aplicação dos testes isoladamente para cada cidade,

devido ao número de amostras insuficiente. Desse modo, foram analisadas todas as simulações em conjunto, e comparados a influência das três variáveis nos resultados de CgTT, PHFT e Desempenho.

a) Absortância

Foi constatada a não normalidade dos dados a partir do teste de Shapiro-Wilk em relação ao CgTT e PHFT, realizando-se então, o teste não paramétrico de Mann Whitney, para duas amostras independentes, conforme os resultados na Tabela 17 e na Tabela 18, e nas Figuras 24 e 25.

	Média ± Dp	Mediana ± IA	Normalidade	Man Whitney
ARS 02	4843,14 ± 2918,29	4688 ± 5376	<0,01	0,04
ARS 07	5637,79 ± 3273,34	5367,5 ± 6074	<0,01	

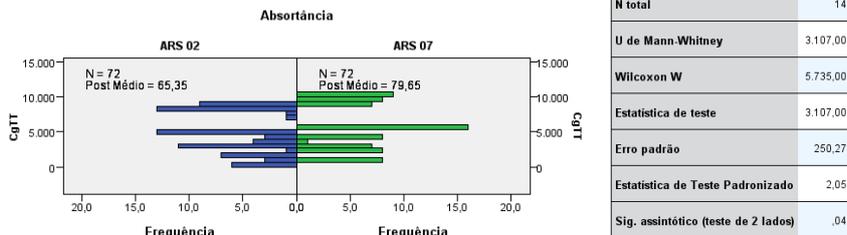
Fonte: A Autora (2023)

	Média ± Dp	Mediana ± IA	Normalidade	Man Whitney
ARS 02	53,6 ± 19,96	50,6 ± 25,4	<0,01	0,15
ARS 07	48,94 ± 21,56	46,25 ± 28,6	<0,01	

Fonte: A Autora (2023)

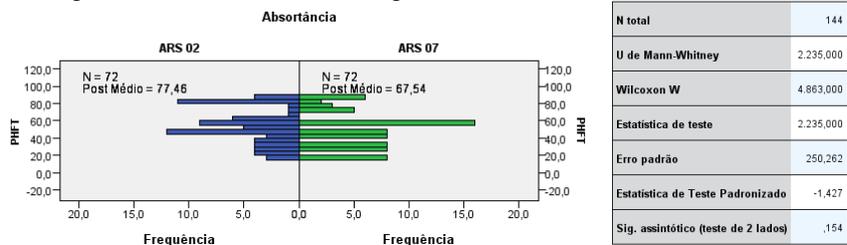
Observa-se que para a CgTT, há diferença significativa entre as duas absortâncias, onde o valor mediano da absortância ARS 07 foi maior do que o valor mediano da ARS 02, retornando um p-valor de 0,04, menor que o nível de significância de 5%. No entanto, o mesmo não ocorreu com PHFT, resultando num p-valor de 0,15, onde conclui-se que não há diferença significativa entre os valores medianos de PHFT em relação à absortância, ou seja, ambas pertencem à mesma população, com 5% de significância. Em outras palavras, a absortância exerce influência sobre os resultados de CgTT e não impacta os valores do PHFT sob as condições simuladas para a UH em questão.

Figura 24 – Gráfico da análise de significância da absorção na variável CgTT



Fonte: A Autora (2023)

Figura 25 – Gráfico da análise de significância da absorção na variável PHFT



Fonte: A Autora (2023)

Quanto ao nível de desempenho térmico, verificou-se significância estatística com a absorção ($p < 0,05$), demonstrando a sua influência sobre essa variável, conforme mostra a Tabela 19. Essa significância já era esperada, visto que, mesmo no método simplificado, a cor das paredes é determinante para os limites de transmitância térmica permitidos. Reforça-se, portanto, a importância dessa escolha nas decisões projetuais.

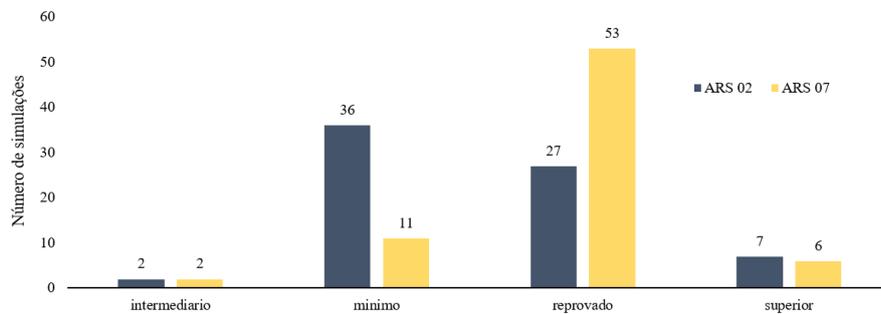
Observa-se que, a absorção 0,2 apresentou mais casos do que o esperado de desempenhos mínimo e menos casos do que o esperado do desempenho reprovado. Em contrapartida, a absorção 0,7 apresentou mais casos do que o esperado de desempenho reprovado. Logo, conclui-se que a absorção 0,7 tende a ter mais desempenho reprovado do que a 0,2, e menos casos no desempenho intermediário e mínimo. Tais resultados também podem ser visualizados na Figura 25.

Tabela 19 – Resultado da significância da absorção no nível de Desempenho Térmico

Desempenho		Absorção		Totais	P
		ARS 02	ARS 07		
intermediário	Contagem	2 (2,8%)	2 (2,8%)	4	<0,01
	Contagem Esperada	2,0	2,0	4	
mínimo	Contagem	36 (50%)	11 (15,3%)	47	
	Contagem Esperada	23,5	23,5	47	
reprovado	Contagem	27 (37,5%)	53 (73,6%)	80	
	Contagem Esperada	40,0	40,0	80	
superior	Contagem	7 (9,7%)	6 (8,3%)	13	
	Contagem Esperada	6,5	6,5	13	
Total	Contagem	72 (100%)	72 (100%)	144	

Fonte: A Autora (2023)

Figura 26 – Gráfico da análise de significância da absorção no nível de Desempenho Térmico



Fonte: A Autora (2023)

b) Tipo de conector/ parede

Foi constatada a não normalidade dos dados a partir do teste de Shapiro-Wilk em relação ao CgTT e PHFT, realizando-se então, o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis, conforme os resultados na Tabela 20 e na Tabela 21, e nas Figura 27 e Figura 28.

Tabela 20 – Resultado da significância dos 4 tipos de parede na variável CgTT

	Média ± Dp	Mediana ± IA	Normalidade	Kruskal-Wallis
FRP	5333,61 ± 3146,53	4908 ± 5803	<0,01	0,99
metalico	5239,89 ± 3116,15	4797,5 ± 5501	<0,01	
parede simples	5067,67 ± 3187,75	4264 ± 5278	0,24	
sanduique sem conector	5288,61 ± 3211,54	4924 ± 6041	0,14	

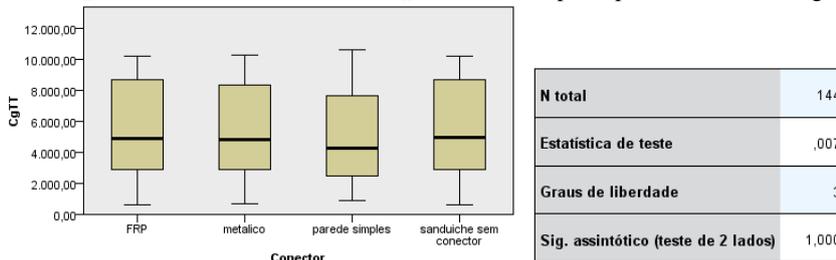
Fonte: A Autora (2023)

Tabela 21 – Resultado da significância dos 4 tipos de parede na variável PHFT
Resultados PHFT em relação ao conector

	Média ± Dp	Mediana ± IA	Normalidade	Kruskal-Wallis
FRP	50,6 ± 21,41	47,9 ± 31,4	0,02	0,95
metalico	51,32 ± 20,7	49,25 ± 31,9	0,02	
parede simples	53,88 ± 19,89	55,7 ± 37,8	0,73	
sanduique sem conector	50,52 ± 21,91	47,7 ± 35	0,6	

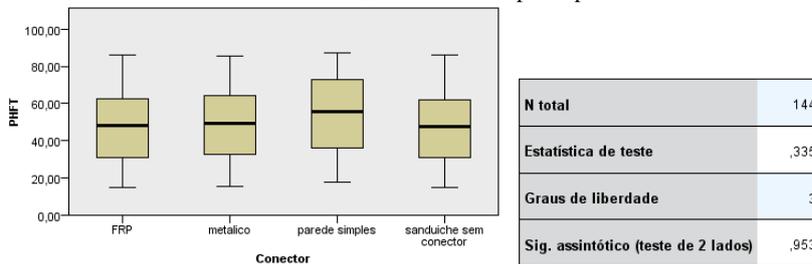
Fonte: A Autora (2023)

Figura 27 – Gráfico da análise de significância do tipo de parede na variável CgTT



Fonte: A Autora (2023)

Figura 28 – Gráfico da análise de significância do tipo de parede na variável PHFT



Fonte: A Autora (2023)

Os testes estatísticos não detectaram diferença significativa entre os tipos de paredes em relação aos resultados de CgTT (p-valor 0,99) e PHFT (p-valor 0,95) dentro das 144 simulações. Quanto ao nível de desempenho térmico, observou-se associação significativa entre os diferentes níveis de desempenho conforme mostra a Tabela 22, retornando um p-valor de 0,01, e, portanto, menor que o nível de significância de 5%.

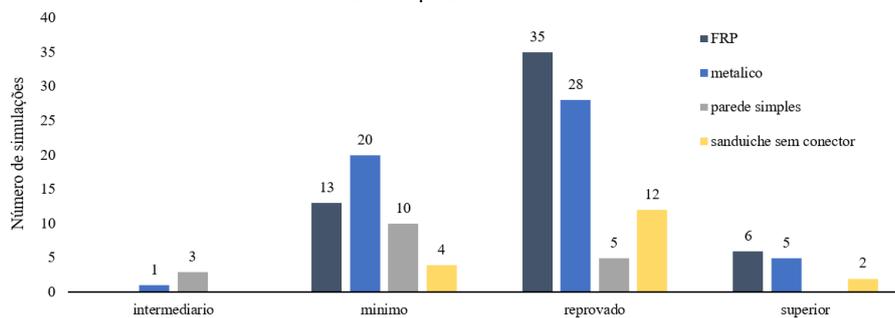
Analisando isoladamente cada nível, tem-se a Figura 29, que demonstra o número de ocorrências de cada nível de desempenho de acordo com o tipo de conector/ parede simulado.

Tabela 22 – Resultado da significância do tipo de parede e conector no nível de Desempenho Térmico

Desempenho		Conector				Totais	P
		FRP	Metálico	parede simples	sanduíche sem conector		
intermediário	Contagem	0 (0%)	1 (1,9%)	3 (16,7%)	0 (0%)	4	0,01
	Contagem Esperada	1,5	1,5	0,5	0,5	4	
mínimo	Contagem	13 (24,1%)	20 (37%)	10 (55,6%)	4 (22,2%)	47	
	Contagem Esperada	17,6	17,6	5,9	5,9	47	
reprovado	Contagem	35 (64,8%)	28 (51,9%)	5 (27,8%)	12 (66,7%)	80	
	Contagem Esperada	30	30	10	10	80	
superior	Contagem	6 (11,1%)	5 (0%)	0 (0%)	2 (0%)	13	
	Contagem Esperada	4,9	4,9	1,6	1,6	13	
Total	Contagem	54 (100%)	54 (100%)	18 (100%)	18 (100%)	144	

Fonte: A Autora (2023)

Figura 29 – Gráfico da análise da significância do tipo de parede e conector no nível de Desempenho Térmico



Fonte: A Autora (2023)

c) Método

Foi constatada a não normalidade dos dados a partir do teste de Shapiro-Wilk em relação ao CgTT, realizando-se então, o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis, e a normalidade em relação ao PHFT, aplicando-se a ANOVA. Não foi observado significância estatística para ambas as situações, com p-valor de 0,99 (maior que o nível de significância de 5%). Os resultados estão apresentados na Tabela 23 e na Tabela 24, e na Figura 30 e Figura 31.

Tabela 23 – Resultado da significância dos métodos de resistência equivalente na variável CgTT

	Média ± Dp	Mediana ± IA	Normalidade	Kruskal-Wallis
NBR 15220	5265,42 ± 3148,78	4871 ± 5695	0,01	0,99
Convencional	5178,11 ± 3155,62	4623 ± 5667	0,03	
Fluxo Paralelo	5263,58 ± 3148,12	4866 ± 5720	0,01	
Planos Isotermicos	5254,75 ± 3142,07	4840,5 ± 5730	0,01	

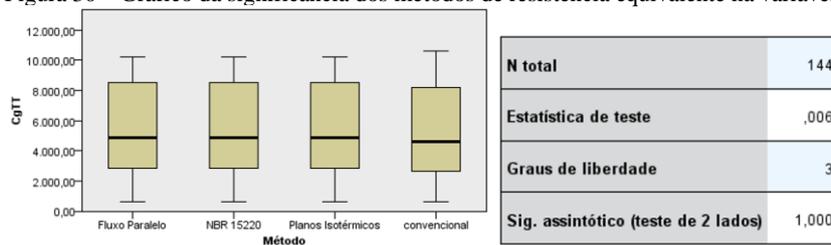
Fonte: A Autora (2023)

Tabela 24 – Resultado da significância dos métodos de resistência equivalente na variável PHFT

	Média ± Dp	Mediana ± IA	Normalidade	Anova
NBR 15220	50,89 ± 21,23	48,4 ± 32	0,12	0,99
Convencional	52,2 ± 20,7	54,7 ± 35,1	0,26	
Fluxo Paralelo	50,92 ± 21,21	48,5 ± 32,3	0,13	
Planos Isotermicos	51,08 ± 21,05	48,9 ± 32,7	0,15	

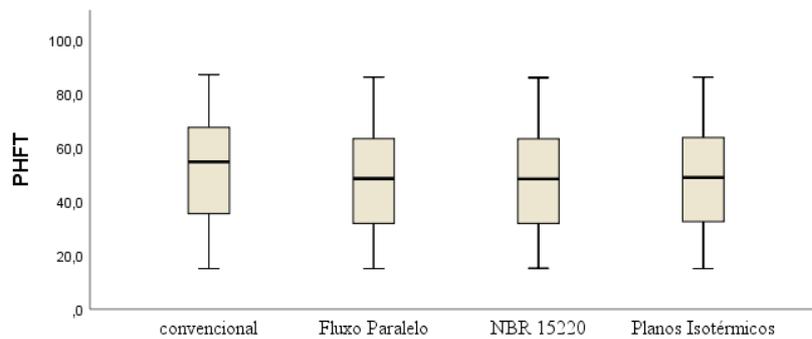
Fonte: A Autora (2023)

Figura 30 – Gráfico da significância dos métodos de resistência equivalente na variável CgTT



Fonte: A Autora (2023)

Figura 31 – Gráfico da significância dos métodos de resistência equivalente na variável PHFT



Fonte: A Autora (2023)

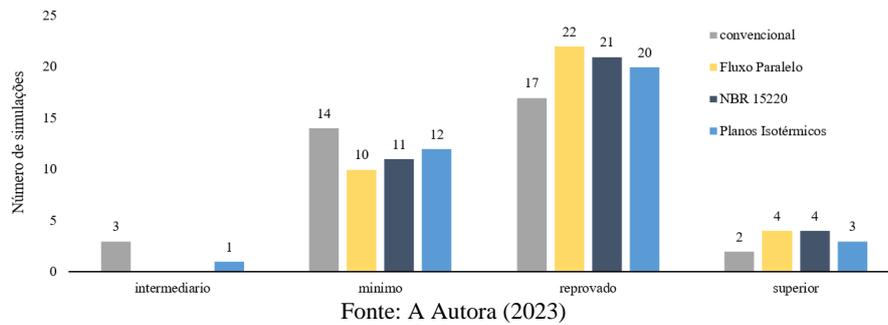
Os diferentes métodos de cálculo usados também não apresentaram significância estatística nos níveis de desempenho obtidos nas simulações, como apresentado na Tabela 25 e Figura 32.

Tabela 25 – Resultado da significância dos métodos de resistência equivalente no nível de Desempenho Térmico

Desempenho		Método				Totais	P
		NBR 15220	Convencional	Fluxo paralelo	Planos isotérmicos		
intermediário	Contagem	0 (0%)	3 (8,3%)	0 (0%)	1 (5,6%)	0 (0%)	4
	Contagem Esperada	1	1	1	0,5	0,5	4
mínimo	Contagem	11 (30,6%)	14 (38,9%)	10 (27,8%)	8 (44,4%)	4 (22,22%)	47
	Contagem Esperada	11,8	11,8	11,8	5,9	5,9	47
reprovado	Contagem	21 (58,3%)	17 (47,2%)	22 (61,1%) ^a	8 (44,4%)	8(44,44%)	80
	Contagem Esperada	20	20	20	10	10	80
superior	Contagem	4 (11,1%)	2 (5,6%)	4 (11,1%)	1 (5,6%)	1(5,6%)	13
	Contagem Esperada	3,3	3,3	3,3	1,6	1,6	13
Total	Contagem	36 (100%)	36 (100%)	36 (100%)	18 (100%)	18 (100%)	144

Fonte: A Autora (2023)

Figura 32 – Gráfico da análise da significância dos métodos de resistência equivalente no nível de Desempenho Térmico



A Tabela 26 contém o resumo dos resultados das análises estatísticas realizadas para a verificação de significância. Nenhuma das três variáveis analisadas exerceu influência sobre os valores de PHFT, e no cálculo da CgTT, apenas a absorvância teve peso. O método usado para o cálculo da Req não foi relevante estatisticamente para nenhum dos três resultados das simulações. Já a absorvância e o tipo de parede demonstraram influência no resultado do nível de desempenho térmico.

Tabela 26 – Resumo dos resultados das análises de significância estatísticas

Variável	CgTT	PHFT	Desempenho
Absorvância	Sim	Não	Sim
Tipo de parede/ conector	Não	Não	Sim
Método de Req	Não	Não	Não

Fonte: A Autora (2023)

Afirma-se então que, estatisticamente, sob as condições de simulação deste trabalho, nenhuma das três variáveis analisadas afetou o PHFT da UH. Em outras palavras, não foram significativas para alterar o comportamento da edificação sob condições de ventilação natural. Entretanto, Schlichting *et. al* (2023) detectaram variações no PHFT suficientes para alterar o desempenho da edificação, ao serem considerados os elementos estruturais das fachadas.

4.3.2 Discussões

Apesar de não ter sido detectada significância dos tipos de parede em relação às variáveis Cg_{TT} e PHFT, como já comentado, analisando cada cidade isoladamente (sem teste estatístico), é possível a constatação do impacto no comportamento da UH, ainda que não tenha se mostrado significativo no cenário global, o que refletiu consequentemente na determinação dos níveis de desempenho térmico.

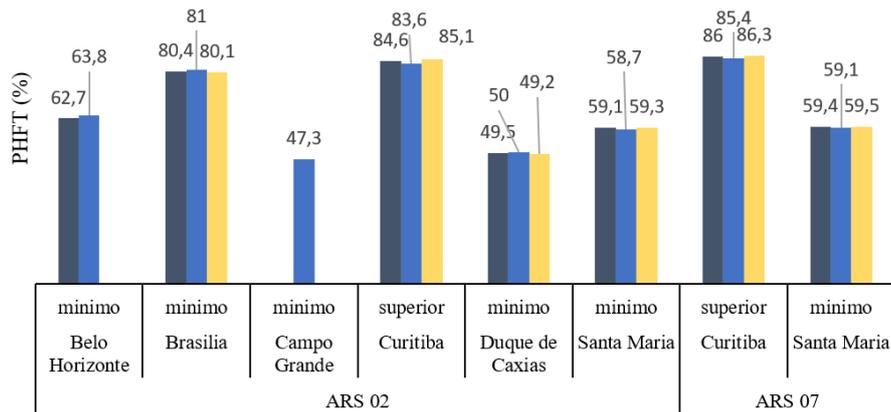
Os Apêndices A e B contém os resultados de Cg_{TT} , PHFT e nível de desempenho térmico resumidos graficamente para cada cidade, respectivamente, para os 4 tipos de parede e os 4 métodos.

Verifica-se que os painéis sanduíche nem sempre forneceram um melhor desempenho térmico quando comparados às paredes de concreto simples, fato que está diretamente ligado às características bioclimáticas de cada cidade, em que uma exige maior inércia térmica da envoltória que outra, por exemplo. Nas cidades de Belém/ PA (ZB 8), Salvador/BA (ZB 8), Campo Grande/ MS (ZB 6) e Cuiabá/ MT (ZB 7), os sistemas de parede de concreto simples ou sanduíche com conector metálico se sobressaíram. Já em Belo Horizonte/ MG e Brasília/DF, foi ampliado o número de situações com desempenho mínimo para os 4 tipos de paredes, porém, todas elas ainda com desempenho térmico mínimo.

O fator absorvância foi decisivo para as cidades de Belém/ PA, Salvador/BA, Campo Grande/ MS e Cuiabá/ MT, onde todos os cenários aprovados possuíam a absorvância de 0,2. Tal fato reforça ainda mais a significância dessa variável, em detrimento inclusive dos tipos de parede e conectores utilizados, já discutido em vários estudos como em Oliveira e Alves (2021).

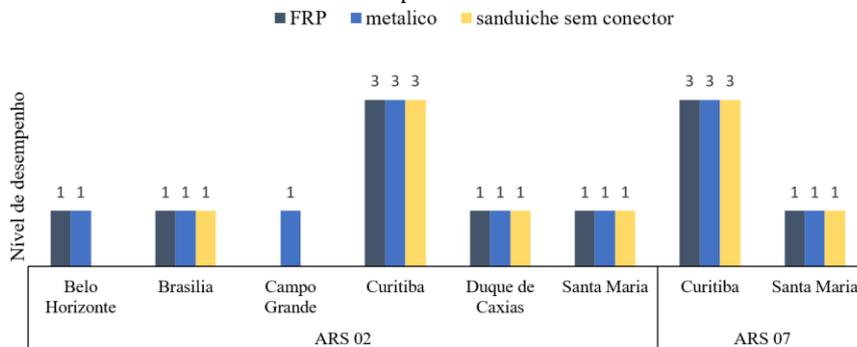
O fato da cidade de Curitiba/ PR ter apresentado apenas desempenho intermediário (parede de concreto simples independentemente da cor, e painel com conector metálico e cores escuras pelo método de planos isotérmicos) e em todos os demais, desempenho superior, denota que os sistemas construtivos analisados são mais indicados para regiões de clima mais frio, como na ZB 1, e que nesse caso, o tipo de conector não influenciou nos níveis de desempenho.

Figura 34 – Resultado do cálculo do PHFT (%) da UH por cidade, comparando o cenário sem conector com os dois conectores, excluindo os casos de reprovação no desempenho térmico



Fonte: A Autora (2023)

Figura 35 – Resultado do nível de desempenho térmico da UH por cidade, comparando o cenário sem conector com os dois conectores, excluindo os casos de reprovação no desempenho térmico



Fonte: A Autora (2023)

Analisando-se ainda os valores de C_{gTT} apresentados na Tabela 16, dentro do método da NBR 15220 (ABNT 2005; 2022), e excluindo-se os “reprovados”, em ordem decrescente, tem-se os dados da Tabela 27, que denotam uma não uniformidade nos resultados, não permitindo uma associação direta sobre qual conector ocasionaria um maior consumo anual de energia. Como informação adicional para fins de comparações com outras UHs, calculou-se os dados de C_{gTT} por área exposta nas 4 fachadas em m^2 ($70,15 m^2$).

Tabela 27 – Ordem decrescente de CgTT entre os dois conectores, e os cenários sem conector, excluindo os casos de reprovação no desempenho térmico

ZB	Cidade	Absortância	Conector	CgTT (kWh/ ano)	CgTT/ área fachada (kWh/ ano/ m ²)
5	Duque de Caxias	ARS 02	sanduiche sem conector	5054	72,046
5	Duque de Caxias	ARS 02	FRP	5027	71,661
5	Duque de Caxias	ARS 02	metálico	4975	70,919
6	Campo Grande	ARS 02	metálico	4703	67,042
3	Belo Horizonte	ARS 02	FRP	3392	48,354
3	Belo Horizonte	ARS 02	metálico	3306	47,128
2	Santa Maria	ARS 07	metálico	3155	44,975
2	Santa Maria	ARS 07	FRP	3118	44,448
2	Santa Maria	ARS 07	sanduiche sem conector	3105	44,262
2	Santa Maria	ARS 02	metálico	2862	40,798
2	Santa Maria	ARS 02	FRP	2857	40,727
2	Santa Maria	ARS 02	sanduiche sem conector	2856	40,713
4	Brasília	ARS 02	sanduiche sem conector	1811	25,816
4	Brasília	ARS 02	FRP	1783	25,417
4	Brasília	ARS 02	metálico	1732	24,690
1	Curitiba	ARS 07	metálico	783	11,162
1	Curitiba	ARS 07	FRP	759	10,820
1	Curitiba	ARS 07	sanduiche sem conector	749	10,677
1	Curitiba	ARS 02	metálico	663	9,451
1	Curitiba	ARS 02	FRP	644	9,180
1	Curitiba	ARS 02	sanduiche sem conector	633	9,024

Fonte: A Autora (2023)

A Tabela 28 apresenta a melhor e a pior situação para os resultados de CgTT e PHFT em cada cidade analisada, e também os níveis de desempenho atingidos, comparando-se os dois tipos de conectores pelo método da NBR 15220 (ABNT 2005; 2022).

Tabela 28 – Simulações que forneceram as maiores e menores CgTTs dentre os painéis com conectores, não reprovados pela NBR 15575

Maior CgTT						
ZB	Cidade	Absortância	Conector	CgTT (kWh/ano)	PHFT (%)	Desempenho
1	Curitiba	ARS 07	metálico	783	85,4	superior
2	Santa Maria	ARS 07	metálico	3155	59,1	mínimo
3	Belo Horizonte	ARS 02	FRP	3392	62,7	mínimo
4	Brasília	ARS 02	FRP	1783	80,4	mínimo
5	Duque de Caxias	ARS 02	FRP	5027	49,5	mínimo
6	Campo Grande	ARS 02	metálico	4703	47,3	mínimo
7	Cuiabá	*Desempenho mínimo não atingido para os painéis com conector FRP ou metálico				
8	Belém					
8	Salvador					
Menor CgTT						
ZB	Cidade	Absortância	Conector	CgTT (kWh/ano)	PHFT (%)	Desempenho
1	Curitiba	ARS 02	FRP	644	84,6	superior
2	Santa Maria	ARS 02	FRP	2857	59,1	mínimo
3	Belo Horizonte	ARS 02	metálico	3306	63,8	mínimo
4	Brasília	ARS 02	metálico	1732	81	mínimo
5	Duque de Caxias	ARS 02	metálico	4975	50	mínimo
6	Campo Grande	**Apenas um resultado aprovado entre os painéis com conectores				
7	Cuiabá	*Desempenho mínimo não atingido para os painéis com conector FRP ou metálico				
8	Belém					
8	Salvador					

Fonte: A Autora (2023)

As paredes com conector FRP foram responsáveis pelo maior número de reprovações quanto ao nível de desempenho térmico como mostra a Figura 32, apresentando casos em todas as cidades com exceção de Curitiba (ZB 1) e Santa Maria (ZB 2). A reprovação está relacionada ao não atingir do percentual mínimo de PHFT como mostrado na Figura 5, uma vez que a CgTT só é levada em consideração para os níveis intermediário e superior, que por sua vez está ligada às condições climáticas e de conforto de cada cidade (Tabela 6).

Para os cenários onde os dois tipos de conectores atingiram pelo menos o nível mínimo de desempenho térmico, o conector metálico proporcionou uma menor CgTT nas cidades de Belo Horizonte (ZB 3), Brasília (ZB 4) e Duque de Caxias (ZB 5), e o conector de FRP uma menor CgTT em Curitiba (ZB 1) e Santa Maria (ZB 2). Dessas 11 simulações, da Tabela 28, 9 delas foram com paredes externas na cor clara (ARS 02), e apenas duas com ARS 07, nas ZBs 1 (Curitiba) e 2 (Santa Maria). Na cidade de Curitiba inclusive, os dois casos tiveram

desempenho superior, sendo que o conector de FRP nessas condições proporcionou um menor consumo de energia em 139 kWh/ano, comparado com o conector metálico, também com desempenho superior.

Para a zona bioclimática 2, analisando-se o PHFT da UH, portanto, sob condições de ventilação natural, dentro da mesma absorvância, os painéis sanduíche sem considerar o conector, apresentaram maior PHFT e menor CgTT. Logo, os casos em que foram simuladas as pontes térmicas dos conectores, as temperaturas internas variaram mais, conferindo um menor PHFT. Caetano, Souza e Gomes (2018) apresentaram conclusões semelhantes.

Quanto à carga térmica total da UH, para ARS 07, observa-se um aumento menor que 1% na CgTT com conector metálico comparando com o painel sem conector nas zonas bioclimáticas 2 a 7, e 8 para a cidade de Salvador. Para a ZB1, esse aumento foi de 5%, e na cidade de Belém (ZB 8) houve um comportamento inverso, onde o painel sem conector apresentou 1% a mais de CgTT comparando com os conectores metálico e FRP. Esses dados já contrapõem alguns resultados de Caetano, Souza e Gomes (2018), no qual a consideração dos perfis metálicos das estruturas em aço ocasionou um aumento no consumo energético para todas as ZBs brasileiras. Tal fato pode estar relacionado à proporção de estrutura metálica na fachada, comparada aos conectores dos painéis.

Infere-se a partir destes resultados, que os painéis com conectores (metálico e FRP) demonstraram-se mais eficientes na região com clima mais frio, e que neste cenário, o conector FRP conferiu um nível superior inclusive, se com cores claras as paredes externas. Naquelas em que o clima é mais quente, como percentual anual de desconforto por calor é maior, os painéis sanduíche não conferiram um bom desempenho térmico, mas nem mesmo a parede sem conector, o que sugere que o sistema construtivo em si não foi o melhor, e não necessariamente o material do conector.

Tendo por base os resultados e discussões apresentados, é importante salientar a necessidade de se avaliar cada situação separadamente, levando em conta a localização da UH, a cor das paredes, orientação das fachadas, e não somente os indicadores de PHFT ou CgTT, uma vez que ao se olhar esses valores isoladamente, poderiam ser selecionados diferentes sistemas construtivos como sendo “eficientes”. Eli *et al.* (2021) concluíram justamente que, embora

tenha sido identificada uma forte correlação entre estes indicadores, considerá-los independentemente pode levar à escolha de sistemas de construção menos apropriados.

Por fim, vale ressaltar que o comportamento do usuário é um ponto relevante nas discussões sobre uso de ar condicionado, como já mencionado em Greici *et al.* (2021). Desse modo, apesar de existirem requisitos e critérios normatizados que norteiem os níveis de desempenho, os resultados podem ser divergentes na prática, a depender das subjetividades relacionadas aos hábitos e à realidade de cada ocupante.

5 CONCLUSÕES

Comentado [RB1]: Sugestões Helenice

Este trabalho se propôs a comparar o desempenho térmico de uma edificação construída com quatro tipos de paredes, envolvendo o cálculo da carga térmica anual de uma UH para 9 cidades brasileiras, situadas nas 8 zonas bioclimáticas (ZB) distintas. Para atingir este objetivo, a dissertação foi dividida em três etapas e cinco objetivos específicos, cujos resultados de cada um estão sumarizados a seguir.

Na Etapa 1 foi verificado o nível de desempenho térmico dos painéis pelo método simplificado da ABNT NBR 15575-4 (ABNT, 2021b), comparando-se os resultados de transmitância e capacidade térmicas dos 04 tipos de parede analisados com os requisitos normativos. Essas variáveis foram calculadas analiticamente por quatro métodos de obtenção da resistência equivalente (Req): convencional (para parede simples de concreto e painel sanduíche sem conector, por apresentarem apenas camadas em série); fluxo paralelo e planos isotérmicos da ASHRAE (2001), baseados em analogias de circuitos elétricos; e o prescrito na NBR 15220 (ABNT 2005; 2022).

Os resultados demonstraram em resumo que, para o nível mínimo de desempenho térmico dos sistemas, todos painéis simulados atenderam aos requisitos para todas as cidades, com exceção das paredes de concreto simples para as ZBs 1 e 2, ou 3 a 8 com as paredes externas na cor escura (absortância maior que 0,6).

Os valores de resistência térmica obtidos apontaram diferenças de 0,213 m²·K/ W, 0,557 m²·K/ W e 0,599 m²·K/ W, na proporção de resultados médios em torno de 1,647 m²·K/ W,

representando uma redução em torno de 36% na resistência térmica do sistema. Contudo, não foram significantes o suficiente para reprová-los nos critérios normativos brasileiros.

A Etapa 2 incluiu uma outra forma de determinação da resistência equivalente: a análise por Método dos Elementos Finitos (MEF). As resistências obtidas numericamente foram então comparadas com os valores da Etapa 1. A simulação numérica apresentou desvios-padrão de 0,00%, 0,57% e 8,13%, para os painéis do tipo simples, sanduíche sem conector e conector FRP, respectivamente. Para o conector metálico, observou-se um desvio-padrão de 26,47% nas comparações, fornecendo uma Req ainda menor que aquela determinada pelo método da NBR 15220 (2005; 2022), o que configurou um cenário ainda mais flexível e o atendimento ao nível mínimo de desempenho térmico para todas as ZBs em todas as cores de paredes.

Na Etapa 3 foram realizadas 144 simulações no *software EnergyPlus* aplicando-se o método de simulação computacional da ABNT NBR 15575-1 (ABNT, 2021a), para a determinação dos níveis de desempenho térmico da UH selecionada a partir dos indicadores CgTT e PHFT de cada uma.

Analisou-se estatisticamente a existência ou não de significância entre as variáveis absorptância, tipo de parede/ conector e método usado na Req, sobre os resultados de CgTT, PHFT e desempenho térmico. O método não foi decisivo para a alteração de nenhum resultado, o tipo de parede/ conector foi relevante na determinação do nível de desempenho térmico apenas, e a absorptância apresentou influência significativa sobre os resultados de CgTT e nível de desempenho.

Apesar dos métodos de resistência equivalente terem fornecidos níveis de desempenho térmico diferentes na análise simplificada, nas simulações computacionais, estatisticamente não foi comprovada uma influência. Desse modo, analisou-se graficamente e numericamente os valores primordialmente obtidos pelo método normativo vigente a fim de serem encontradas tendências ou comportamentos semelhantes.

No entanto, os resultados foram distintos, a depender sobretudo da ZB analisada. A absorptância 0,2 (paredes claras) mostrou-se determinante na obtenção de pelo menos o desempenho térmico mínimo como esperado.

As paredes com conector FRP foram responsáveis pelo maior número de reprovações quanto ao nível de desempenho térmico, relacionadas por sua vez ao não atingimento do percentual mínimo de PHFT, que está diretamente ligado à zona de conforto de temperatura de cada cidade. Nas demais ocasiões em que os cenários com conectores não foram reprovados, não foi possível estabelecer um padrão de redução ou aumento de CgTT, reforçando a ideia de que esse indicador não pode ser analisado isoladamente para a tomada de decisão projetual.

Contudo, foi possível verificar que para regiões de climas mais frios, como Curitiba (ZB 1), os sistemas construtivos analisados como um todo, conferiram melhores níveis de desempenho térmico para a cidade: intermediário e superior. Nesse caso, até mesmo a parede de concreto simples, independentemente da cor, conferiu um desempenho intermediário. Em contrapartida, nas cidades de clima quente, os painéis sanduíche no geral, com ou sem conector, não conferiram um bom desempenho térmico, levando-se à conclusão de que o sistema construtivo em si não foi o melhor, e não necessariamente o material do conector.

Alguns trabalhos na literatura encontraram relevância na consideração das pontes térmicas para alterar o PHFT, CgTT e o nível de desempenho nas ZBs brasileiras, o que não ocorreu neste trabalho. Apesar do cálculo de transferência térmica considerar a necessidade de ser modelado o conector metálico, os resultados não foram impactados por ele de acordo com as análises estatísticas.

Por fim, um cenário de 80 reprovações nas simulações, e nenhuma no método simplificado, sugere uma não uniformidade nos parâmetros da ABNT NBR 15575: 2021, que já foi discutida por outros autores na sua versão anterior, mas que ainda permanece. Tal fato pode ocasionar resultados completamente diferentes, nos quais o usuário poderia adotar o mais conveniente em cada situação, o que não é o adequado. Caso não seja possível uma correlação e equidade entre eles, sugere-se que o método simplificado seja indicado apenas como consulta, sem um peso de validação ainda que do desempenho mínimo, sobretudo porque já se tem a consolidação da importância das características da UH, da orientação solar e da zona bioclimática ao qual está inserida.

Os resultados endossam ainda mais a necessidade de serem aplicadas estratégias bioclimáticas nos projetos, desaconselhando totalmente a replicação de plantas em várias regiões do país, nem mesmo dos painéis sanduíche. Além da correta escolha do SVVE para cada cidade, devem também ser analisados os diferentes posicionamentos quanto à orientação solar, a fim de minimizar os impactos da radiação, e proporcionar um maior desempenho térmico para UH, e um conforto e economia para o usuário. Cumpre-se assim os objetivos propostos neste trabalho.

Trabalhos futuros

Como trabalhos futuros, sugere-se aumentar o número de amostras na simulação computacional a fim de ser aplicada a análise de sensibilidade individualmente em cada cidade, para a verificação de quais variáveis apresentaram maior peso nos resultados, além da inclusão de outros cenários com alteração da orientação solar e outras estratégias bioclimáticas em conjunto. A modelagem dos conectores também pode ser testada de outras formas no *EnergyPlus* e até em outros *softwares* a fim de serem comparadas com as deste trabalho.

Além disso, diversas são as análises possíveis de serem exploradas a partir dos resultados apresentados da etapa de simulação computacional, proporcionando mais correlações entre os indicadores e os tipos de paredes analisados.

Sugere-se ainda que possam ser verificadas diferentes espessuras de isolamento para as paredes, e até mesmo na cobertura, para que seja detectado seu impacto diante dos diferentes materiais dos conectores. Ensaios em laboratório também podem enriquecer as análises e propiciar uma amostragem maior para avaliar estatisticamente os resultados.

REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15220-3**: Desempenho térmico de edificações - Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. 1. Ed. Rio de Janeiro: 2005, 2005.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **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. 1. Ed. Rio de Janeiro: 2022.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15575-1**: Edificações habitacionais – Desempenho - Parte 1: Requisitos gerais. 1. Ed. Rio de Janeiro: 2021, 2021a.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15575-4**: Edificações habitacionais – Desempenho (Parte 4: Sistemas de vedações verticais internas e externas - SVVIE). 1. Ed. Rio de Janeiro: 2021, 2021b.
- ALJUNDI, K.; PINTO, A.; RODRIGUES, F. Energy analysis using cooperation between BIM tools (Revit and Green Building Studio) and Energy Plus. In: 10 CONGRESSO PORTUGUÊS DE BUILDING INFORMATION MODELLING. **Anais...**Guimarães, Portugal: Universidade do Minho, 2016.
- ARANTES, L. de S. *et al.* Avaliação de painéis sanduíche produzidos com núcleo de caixas de ovos e lâminas de paricá. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 23, n. 2, p. 121-130, abr./jun. 2023. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212023000200666>
- ASHRAE. **ASHRAE Handbook**: Fundamentals, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Atlanta, GA: [s.n.]. 2001.
- ASHRAE. AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **ASHRAE STANDARD 90-1**: Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings. Atlanta, GA: 2016, 2016.
- ASTM. ASTM C1363-11 (2011). **Standard test method for thermal performance of building materials and envelope assemblies by means of a hot box apparatus**. West Conshohocken: [s.n.].
- BENEDETTI, M. *et al.* Point Thermal Transmittance of Rib Intersections in Concrete Sandwich Wall Panels. **Heat Transfer Engineering**, v. 40, n. 13–14, p. 1075–1084, 2019. <https://doi.org/10.1080/01457632.2018.1457208>.
- BIENVENIDO-HUERTAS, D. *et al.* A comparative analysis of the international regulation of thermal properties in building envelope. **Sustainability**, v. 11, n. 20, 2019. <https://doi.org/10.3390/su11205574>.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética.** Nota Técnica EPE 030/2018 -, p. 43, 2018.

BRASIL. Secretaria Nacional de Habitação/ Ministério do Desenvolvimento Regional. **Análise de custo/benefício de parâmetros de eficiência energética em Habitações de Interesse Social: Produto 2 - Tarefa II – Definição de 3 Unidades Bases Habitacionais, e Tarefa III – Linhas de Bases Simuladas de Desempenho Térmico.** 25 p. 2020.

BRASIL. **Relatório Síntese. BEN 2022 Ano Base 2021.** Disponível em <www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-631/BEN_Síntese_2022_PT.pdf>, 2022a. Acesso em: 17 abr. 2023.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. **Portaria nº 532, de 23 de fevereiro de 2022.** 25 p. 2022.

BRASIL. Anexo II da Portaria INMETRO No 309/2022. **Instruções Normativas e os Requisitos de Avaliação da Conformidade para a Eficiência Energética das Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas e Residenciais.** Disponível em: <www.pbeedifica.com.br/sites/default/files/ANEXO%20II_INI-R_Portaria%20309_2022.pdf>, 2022b. Acesso em: 17 abr. 2023.

CAETANO, L.; SOUZA, H.; GOMES, A. Influência da área de estrutura em aço exposta no desempenho térmico de edificações. In: XVII ENTAC - ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. **Anais...**Porto Alegre: ANTAC, 2018.

CEF. Caixa Econômica Federal. **Sumário de Publicações do SINAPI.** Disponível em: <<https://www.caixa.gov.br/poder-publico/modernizacao-gestao/sinapi/Paginas/default.aspx>>. Acesso em: 17 abr. 2023.

CAPOZZOLI, A.; GORRINO, A.; CORRADO, V. A building thermal bridges sensitivity analysis. **Applied Energy**, v. 107, p. 229–243, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.02.045>.

COLLING, A. H. K.; KORF, E. P.; VANZETTO, S. C.; TOCHETTO, G. A. Incorporação de PRFV em pavimentos intertravados: uma solução ecológica para resíduos industriais. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 23, n. 1, p. 157-169, jan./mar. 2023. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212023000100655>

CORNELIS, E. History and prospect of voluntary agreements on industrial energy efficiency in Europe. **Energy Policy**, v. 132, n. June, p. 567–582, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.06.003>.

CÔRTEZ, F. L. DOS S.; MACIEL, A. C. F. Estudo de interoperabilidade entre software BIM e softwares de análise energética de edificações (BES). Simpósio Brasileiro De Tecnologia Da Informação E Comunicação Na Construção. **Anais...**2021.

DORNELLES, K. A. **Absortância solar de superfícies opacas: métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e PVA**. 2008. 160p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

ECHARRI-IRIBARREN, V. *et al.* The Passivhaus standard in the Spanish Mediterranean: Evaluation of a house's thermal behaviour of enclosures and airtightness. **Sustainability**, v. 11, n. 13, 2019. <https://doi.org/10.3390/su11133732>.

Eli, L.G *et al.* Thermal performance of residential buildings with mixed-mode and passive cooling strategies: The Brazilian context, **Energy and Buildings**, 244, 111047, 2021. Brazil,. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111047>

FAVRETTO, A. P. O. **Regression Models to Assess the Thermal Performance of Brazilian Low-Cost Houses : consideration of opaque envelope**. Dissertação (Mestrado) – Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia, Universidade de São Paulo, São Carlos, p. 132, 2016.

FERREIRA, C. C.; PEREIRA, I. M. Avaliação de desempenho térmico de habitação de interesse social de acordo com a NBR 15.575, para as diversas zonas bioclimáticas. In: XIV ENTAC - ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. **Anais...**Juiz de Fora: ANTAC, 2012.

FJP. Fundação João Pinheiro. **Deficit habitacional no Brasil – 2016-2019 / Fundação João Pinheiro**. Belo Horizonte, 469 p. 2021. Disponível em: < <https://fjp.mg.gov.br/deficit-habitacional-no-brasil/>>. Acesso em: 17 abr. 2023.

FREITAS, J. M. R. *et al.* Análise da influência das pontes térmicas na simulação de eficiência energética nas paredes de edificações residenciais. **Revista de Arquitetura IMED**, v. 5, n. 2, p. 24–41, 2016. <https://doi.org/10.18256/2318-1109/arqimed.v5n2p24-41>.

FREITAS, J. M. R. *et al.* Modelagem de pontes térmicas na zona bioclimática 2: cinco diferentes abordagens. **Arquitetura Revista**. 2020, 16(2), 315-343. <https://doi.org/10.4013/arq.2020.162.08>

GALVIN, R. Thermal upgrades of existing homes in Germany: The building code, subsidies, and economic efficiency. **Energy and Buildings**, v. 42, p. 834–844, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.12.004>.

GIOIELLI, B. E.; CUNHA, E. G. Estudo do efeito de pontes térmicas em estruturas de concreto armado no desempenho energético de edifício hoteleiro para 6 zonas bioclimáticas brasileiras. In: XV ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. v. 1, n. October 2015, p. 439–448, 2014. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2014.

GOMES, A. P.; SOUZA, H. A. A influência da estrutura metálica aparente no consumo de energia e na carga térmica para resfriamento em ambientes escolares. **Revista Sul-americana de Engenharia Estrutural**, v. 10, n. 3, p. 5–23, 2013.

GREICI, R. *et al.* Adaptive behaviour and air conditioning use in Brazilian residential Buildings. **Building Research & Information**, v. 49, n.5, p. 496-511, 2021. <https://doi.org/10.1080/09613218.2020.1804314>

HALAWA, E. *et al.* A review on energy conscious designs of building façades in hot and humid climates: Lessons for (and from) Kuala Lumpur and Darwin. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, n. August 2017, p. 2147–2161, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.061>.

HUANG, J. Q.; DAL, J. G. Direct shear tests of glass fiber reinforced polymer connectors for use in precast concrete sandwich panels. **Composite Structures**, v. 207, n. May 2018, p. 136–147, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.09.017>.

IPEF. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**. Disponível em: <https://www2.ipef.br/geodatabase/>. Acesso em: 17 abr. 2023.

ISO. INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 14683**. Thermal bridges in building construction - Linear thermal transmittance - Simplified methods and default values. Brussels: European committee for standardization (CEN) and International Organization for Standardization (ISO), 2007.

ISO. INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 17772-1**. Energy performance of buildings – Indoor environmental quality – Part 1: Indoor environmental input parameters for the design and assessment of energy performance of buildings. Geneva, Switzerland: ISO copyright office, 2017a.

ISO. INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 52000-1**. Energy performance of buildings - Overarching EPB assessment - Part 1: General framework and procedures. Geneva, Switzerland: ISO copyright office, 2017b.

KEENEHAN, J. *et al.* Numerical Assessment of The Thermal Performance of Structural Precast Panels. Numerical Modeling Strategies for Sustainable Concrete Structures. **Anais...Aix-en-Provence, France**: 2012.

KIM, Y. J.; ALLARD, A. Thermal response of precast concrete sandwich walls with various steel connectors for architectural buildings in cold regions. **Energy and Buildings**, v. 80, p. 137–148, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.022>.

KINNANE, O.; WEST, R.; HEGARTY, R. O. Structural shear performance of insulated precast concrete sandwich panels with steel plate connectors. **Engineering Structures**, v. 215, n. April, p. 110691, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110691>.

KNÖNER, N. Análise experimental da ligação entre placas de painéis sanduíche unidas com treliça metálica. Tese (Doutorado) – Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de São Carlos, p. 179, 2019.

KOTTEK, M. *et al.* World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 15, n. 3, p. 259–263, 2006. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>.

LABESEE. **Laboratório de Eficiência Energética em Edificações**. 2022. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/NBR15575-2020>. Acesso em: 17 abr. 2023.

LAMEIRAS, R. M. *et al.* **Comportamento térmico de painéis sanduíche constituídos por lâminas em betão e conectores de compósito de polímero reforçado com fibras.** Pré-fabricação Modular de Edifícios de Custos Controlados. Projecto LEGOUSE. Universidade do Minho: Portugal, 2010.

LAMEIRAS, R. M. **Sandwich structural panels comprising thin-walled SFRSCC and GFRP connectors : from material features to structural behaviour.** n. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, p. 446, 2015.

LEE, B. J.; PESSIKI, S. Analytical investigation of thermal performance of precast concrete three-wythe sandwich wall panels. **PCI Journal**, v. 49, n. 4, p. 88–101, 2004.

LEE, B. J.; PESSIKI, S. Thermal performance evaluation of precast concrete three-wythe sandwich wall panels. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 8, p. 1006–1014, 2006.

LOURENSINI, L. **Desenvolvimento de painel pré-fabricado em concreto armado para vedação, com núcleo composto por material para isolamento térmico.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação), Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade do Vale do Taquari – Univates, p. 93, 2017.

MACIEL, A. C. F. **Análise da Demanda Energética para Climatização de Fachadas Ventiladas para Regiões Climáticas Brasileiras.** Tese (Doutorado) – Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, p. 264, 2018.

MARTINS, K. H. **Análise do desempenho térmico e energético de painéis CLT nacionais para o clima de Foz do Iguaçu–PR.** Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal da Integração Latino-Americana. 239 p. 2022.

MAYER, R. *et al.* Finite element thermal modeling and correlation of various building wall assembly systems. **Energy and Buildings**, v. 75, p. 410–418, 2014.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.034>.

MCCALL, W. C. Thermal Properties of Sandwich Panels. **Concrete Internacional: Design and Construction**, v. 7, p. 35–41, 1985.

MORGADO, T. *et al.* Resistência ao fogo de perfis pultrudidos de polímero reforçado com fibras de vidro (GFRP) para aplicações em reabilitação: Estudo experimental, numérico e analítico. **Revista ALCONPAT**, v. 6, p. 157–172, 2016.
<http://dx.doi.org/10.21041/ra.v6i2.136>

MUZZI, T. A.; SOUZA, H. A.; GOMES, A. P. Heat transfer analysis of the vertical closing system in light steel framing using the isothermal planes method and–finite element method. **REM - International Engineering Journal**, v. 74, n. 4, p. 425–431, 2021.
<https://doi.org/10.1590/0370-44672021740024>

NAITO, C. J. *et al.* **Precast/prestressed concrete experiments performance on non-load bearing sandwich wall panels.** Air Force Research Laboratory Materials and Manufacturing Directorate. p. 160, 2011.

O'HEGARTY, R. *et al.* Thermal investigation of thin precast concrete sandwich panels. **Journal of Building Engineering**, v. 27, n. March 2019, p. 100937, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100937>.

O'HEGARTY, R.; KINNANE, O. Review of precast concrete sandwich panels and their innovations. **Construction and Building Materials**, v. 233, p. 117145, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117145>.

OLIVEIRA, R. B.; ALVES, C. R. Desempenho térmico de uma HIS com paredes de concreto em Uberlândia - MG: uma comparação entre resultados obtidos e requisitos existentes. In: 20 WORKSHOP DE TECNOLOGIA DE PROCESSOS E SISTEMAS CONSTRUTIVOS. **Anais...**São Paulo: TECSIC, 2019.

OLIVEIRA, R. B. de; ALVES, C. dos R. Análise do desempenho térmico de habitação de interesse social com paredes de concreto em Uberlândia-MG. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 12, p. e021006, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.20396/parc.v12i00.8661094>

OLIVEIRA, R. B.; SALOMÃO, M. C. F. Avaliação do dia típico da ABNT NBR 15575:2013 para a análise de desempenho térmico de edificações. In: V Mostra Científica da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade de Uberlândia. **Anais...**Uberlândia: UFU, 2018.

OLIVEIRA, R.; LAMEIRAS, R.; CARVALHO, M. A Aplicação do BIM nas Simulações Térmicas de Edificações: Uma Revisão Sistemática da Literatura. 3o Congresso Português de Building Information Modelling. **Anais...**Porto, Portugal: Universidade do Porto, 2020.

PAPADOPOULOS, A. M. Forty years of regulations on the thermal performance of the building envelope in Europe: Achievements, perspectives and challenges. **Energy and Buildings**, v. 127, n. 2016, p. 942–952, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.051>.

PROJETEEE. **Projetando Edificações Energeticamente Eficientes**. 2022. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/projeteee>>. Acesso em: 17 abr. 2023.

REZENDE, J. C.; CARRASCO, E. V. M.; MAGALHÃES, M. C. Avaliação de pontes térmicas em paredes de Light Steel Framing com placas de vermiculita por meio de análise numérica. **Conjecturas**, v. 22, n. 14, p.1-12. <https://doi.org/10.53660/CONJ-1751-2K13>

SALA, J. M. *et al.* Static and dynamic thermal characterisation of a hollow brick wall: Tests and numerical analysis. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 8, p. 1513–1520, 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.02.011>.

SANTOS, E. N. M. **Análise de desempenho energético em edificações durante a fase de projeto com o uso da plataforma BIM**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, p. 26, 2020.

SANTOS, T. **Avaliação das Vantagens Económicas e Tecnológicas da Utilização do Conceito de Sistema Modular para Edifícios**. Dissertação (Mestrado) - Estruturas e Geotecnia, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, p. 215, 2010.

SASSINE, E. A practical method for in-situ thermal characterization of walls. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 8, p. 84–93, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.csite.2016.03.006>.

SCHLICHTING, I. S. *et al.* Influência no desempenho termo energético de edificações ao considerar a estrutura como ponte térmica na envoltória em simulações. VII Congresso Latino Americano de Simulação de Edifícios. **Anais...** Florianópolis: IBPSA LATAM, 2023.

SILVA, A. S. *et al.* Incerteza do Método de Simulação da NBR 15575-1 Para a Avaliação do Desempenho Térmico de Habitações. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 4, p. 103–117, 2014.

SILVA, J. K. F. **Avaliação experimental sobre o comportamento mecânico de conectores de cisalhamento do tipo PERFOFRP em paredes pré-moldadas de concreto com isolamento incorporado**. Dissertação (Mestrado) – Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, p. 99, 2020.

SILVA JUNIOR, M. A. **Parâmetros de desempenho incorporados em projetos de arquitetura com o uso de aplicativo de modelagem BIM**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, p. 130, 2016.

SILVA JUNIOR, M. A.; MITIDIERI FILHO, C. V. Verificação de critérios de desempenho em projetos de arquitetura com a modelagem BIM. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 9, n. 4, p. 334–343, 2018. <http://dx.doi.org/10.20396/parc.v9i4.8650453>.

SILVA, L. O. *et al.* Tijolo solo-cimento: fabricação e utilização em construções que visam o equilíbrio ambiental. **Revista Conexão Eletrônica Três Lagoas**, v. 15, n. 1, p. 446-5455, 2018.

SMEDS, J. Energy Aspects in Swedish Building Legislation th of the 20 Century Concerning Dwellings. **Lund Institute of Technology**, [s.n.], p. 1-7, 2004.

SOARES, M. M.; SILVA, A. C. S. B. Avaliação dos Parâmetros de Desempenho Térmico da NBR 15575 Para as Zonas Bioclimáticas 1, 2 e 3 Para Habitações Térreas de Interesse Social no Método Simplificado. Encontro de Pós-graduação da Universidade Federal de Pelotas. **Anais...**Pelotas: 2013.

SOARES, N. *et al.* Laboratory and in-situ non-destructive methods to evaluate the thermal transmittance and behavior of walls, windows, and construction elements with innovative materials: A review. **Energy and Buildings**, v. 182, p. 88–110, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.10.021>.

SONG, J. H.; LIM, J. H.; SONG, S. Y. Evaluation of alternatives for reducing thermal bridges in metal panel curtain wall systems. **Energy and Buildings**, v. 127, p. 138–158, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.078>.

SORGATO, M. J. *et al.* **Nota técnica referente à avaliação para a norma de desempenho NBR 15575 em consulta pública**. Florianópolis: LABEEE, 2012.

SORGATO, M. J.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. Análise do método de simulação de desempenho térmico da norma NBR 15575. In: XII ENCONTRO NACIONAL E VIII

LATINOAMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO.
Anais...Brasília: ANTAC, 2013.

SUŠNIK, M. **Interoperability between BIM and CVE for energy and acoustic analysis**. Dissertação (European Master in Building Information Modelling BIM A+), Erasmus Mundus Joint Master Degree Programme – ERASMUS+, p. 78, 2020.

TENI, M.; KRSTIĆ, H.; KOSIŃSKI, P. Review and comparison of current experimental approaches for in-situ measurements of building walls thermal transmittance. **Energy and Buildings**, v. 203, 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109417>.

THEODOSIOU, T. G. *et al.* Thermal bridging analysis on cladding systems for building facades. **Energy and Buildings**, v. 109, p. 377–384, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.10.037>.

THEODOSIOU, T. G.; PAPADOPOULOS, A. M. The impact of thermal bridges on the energy demand of buildings with double brick wall constructions. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 11, p. 2083–2089, 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.06.006>.

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, n. December 2014, p. 524–541, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2015.08.041>.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics**. 2 v. 1 ed. Essex, England: Pearson Education Limited, 2007.

VETTORAZZI, E. **Contribuições das estratégias do conceito Passive House para edificações energeticamente mais eficientes na Região Sul-Brasileira**. Tese (Doutorado em Arquitetura) – Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 371, 2019.

WALPOLE, Ronald E.; MYERS, Raymond H.; MYERS, Sharon L. e YE, Keying. **Probabilidade & Estatística para engenharia e ciências**. Pearson, 8ª edição, 2009.

WALSH, A.; CÓSTOLA, D.; LABAKI, L. **Proposta de zoneamento climático brasileiro para edificações residenciais**. São Paulo: Angélica Walsh, 2023, 1º ed. Disponível em: <<https://drive.google.com/file/d/1nY2Vj2lph08mAc7cFliDf4Pyox25VSIR/view>> Acesso em: 17 abr. 2023.

WEBER, F. da S.; MELO, A. P.; MARINOSKI, D. L.; GUTHS, S.; LAMBERTS, R. **Desenvolvimento de um modelo equivalente de avaliação de propriedades térmicas para a elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos brasileiro para uso no programa EnergyPlus**. Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2017. Disponível em: https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/relatorios_pesquisa/Biblioteca_ComponentesConstrutivos_0.pdf.

WEBER, F. DA S. **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**. Trabalho de Conclusão de

Curso (Graduação) - Departamento de Engenharia Civil , Universidade Federal de Santa Catarina, p. 103, 2018.

WOLTMAN, G. **Structural and Steady-State Thermal Experimental Investigations of an Insulated Sandwich Panel**. Mestrado em Ciências Aplicadas, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada, p. 252, 2014.

WOLTMAN, G.; NOEL, M.; FAM, A. Experimental and numerical investigations of thermal properties of insulated concrete sandwich panels with fiberglass shear connectors. **Energy and Buildings**, v. 145, p. 22–31, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.007>.

XIMEI, Z.. YONGHUI, W.; XUEMING, W. Thermal performance of precast concrete sandwich walls with a novel hybrid conector. **Energy and Buildings**, v. 166, 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.01.070>.

YOUNG, H.D. FREEDMAN, R. A. **Física II: Termodinâmica e Ondas**. 12. ed. São Paulo: Addison Wesley, 2008.

YU, S. *et al.* Theoretical, experimental and numerical study on the influence of connectors on the thermal performance of precast concrete sandwich walls. **Journal of Building Engineering**, v. 57, n. 13, p. 104886, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104886>.

ZANONI, V. A. G.; SANCHEZ, J. M.; BAUER, E. Estudo comparativo entre os dias típicos e a série 2001-2013 de dados horários climáticos. In: 10 WORKSHOP DE TECNOLOGIA DE PROCESSOS E SISTEMAS CONSTRUTIVOS. **Anais...**Campinas: TECSIC, 2017.

A. APÊNDICE A – CÁLCULO DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA TÉRMICA PARA OS CONECTORES

A Tabela A.1 apresenta as variáveis utilizadas para o cálculo dos coeficientes de transferência térmica para os dois tipos de conectores. A Tabela A.2 mostra os resultados das análises, nas quais pelos critérios normativos, os conectores metálicos precisam ser considerados na modelagem e os de FRP não são necessários.

Tabela A-1 – Variáveis para o cálculo do coeficiente de transferência térmica

Área exposta conector metálico (m ²)	0,0003
Rt conector metálico (m ² .K/ W)	0,0033
U conector metálico (W/ m ² .K)	300,0000
Área exposta FRP(m ²)	0,0014
Rt conector FRP (m ² .K/ W)	0,4286
U conector FRP (W/ m ² .K)	2,3333
Rt parede (m ² .K/ W)	1,8290
U parede (W/ m ² .K)	0,5467
U conector metálico + cobertura (W/ m ² .K)	272,7273
U conector FRP + cobertura (W/ m ² .K)	2,1212

Tabela A-2 – Cálculo do coeficiente de transferência térmica para os dois conectores

Conector metálico com cobertura nominal									
Fachada	Área total (m ²)	Área conectores (m ²)	H conectores	Área esquadrias	Área parede (m ²)	H paredes	H total	Hconector/H total	Resultado
N	19,708	0,011	3,087	1,5	18,197	9,949	13,036	0,24	considerar
S	19,708	0,011	3,087	2,1025	17,594	9,620	12,706	0,24	considerar
L	15,366	0,008	2,315	3,18	12,178	6,658	8,973	0,26	considerar
O	15,366	0,008	2,315	3	12,358	6,756	9,072	0,26	considerar
Conector FRP com cobertura nominal									
Fachada	Área total (m ²)	Área conectores (m ²)	H conectores	Área esquadrias	Área parede (m ²)	H paredes	H total	Hconector/H total	Resultado
N	19,708	0,050	0,105	1,5	18,158	9,928	10,033	0,01	não considerar
S	19,708	0,050	0,105	2,1025	17,556	9,599	9,704	0,01	não considerar
L	15,366	0,037	0,079	3,18	12,149	6,642	6,721	0,01	não considerar
O	15,366	0,037	0,079	3	12,329	6,741	6,820	0,01	não considerar

B. APÊNDICE B – RESULTADOS DE CGTT DA UH PARA CADA CIDADE ANALISADA

Figura B.1 - Resultados para CgTT das 16 simulações para a cidade de Belém/ PA

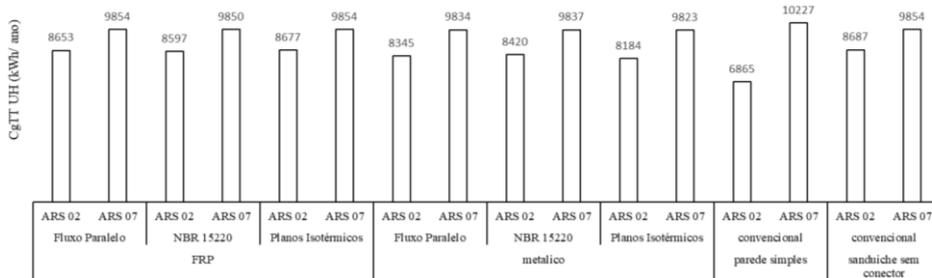


Figura B.2 - Resultados para CgTT das 16 simulações para a cidade de Belo Horizonte/ MG

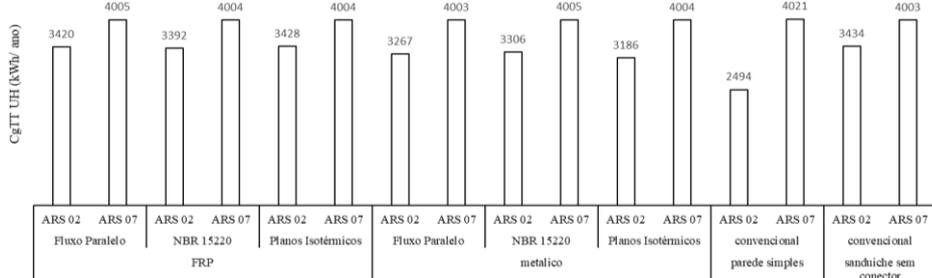


Figura B.3 - Resultados para CgTT das 16 simulações para a cidade de Brasília/ DF

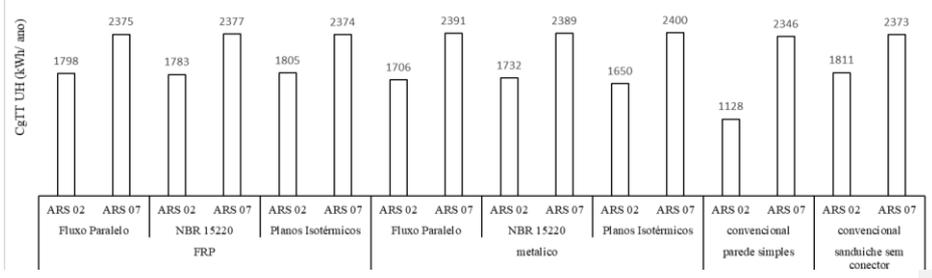


Figura B.4 - Resultados para CgTT das 16 simulações para a cidade de Campo Grande/ MS

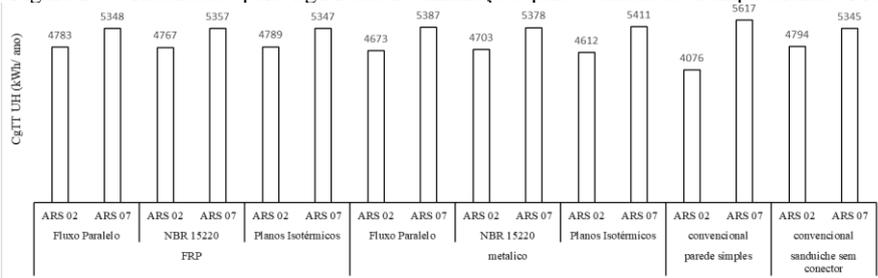


Figura B.5 - Resultados para CgTT das 16 simulações para a cidade de Cuiabá/ MT

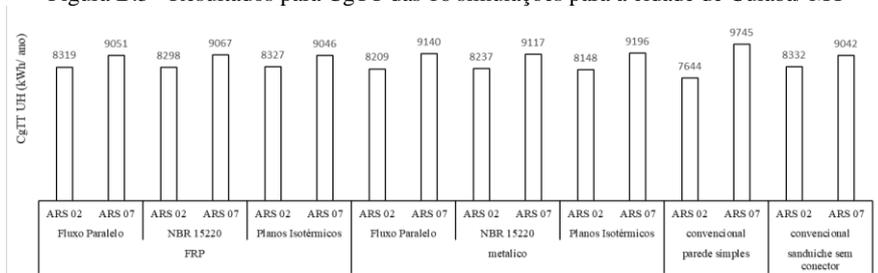


Figura B.6 - Resultados para CgTT das 16 simulações para a cidade de Curitiba/ PR

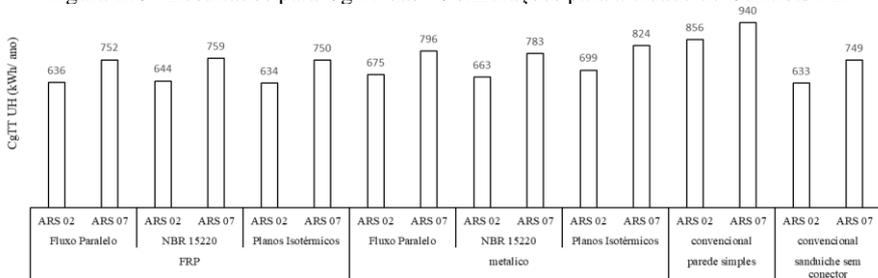


Figura B.7 - Resultados para CgTT das 16 simulações para a cidade de Duque de Caxias/ RJ

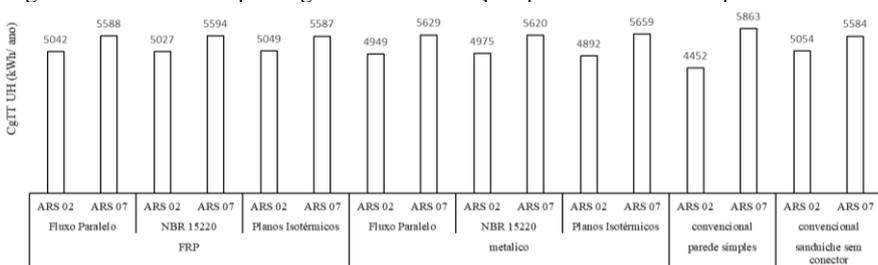


Figura B.8 - Resultados para CgTT das 16 simulações para a cidade de Salvador/ BA

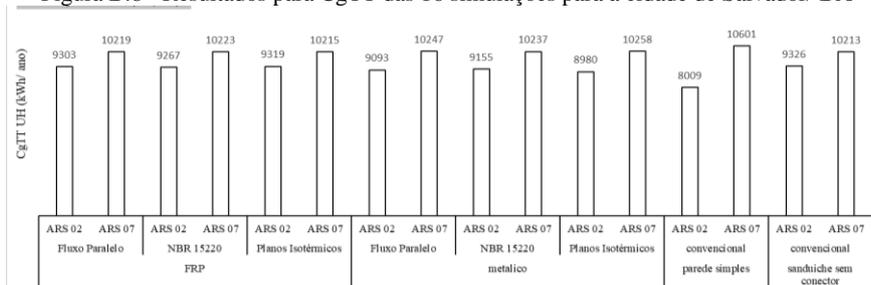
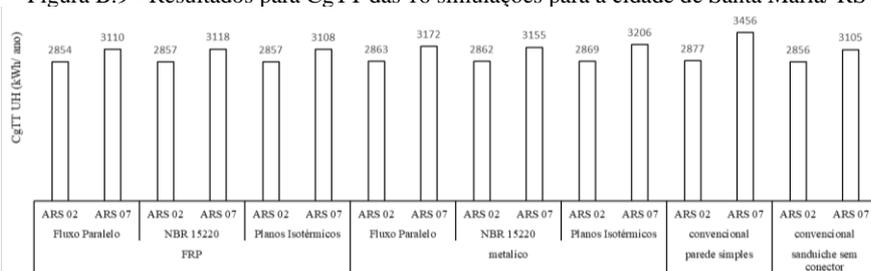


Figura B.9 - Resultados para CgTT das 16 simulações para a cidade de Santa Maria/ RS



C. APÊNDICE C – RESULTADOS DE PHFT DA UH PARA CADA CIDADE ANALISADA

Figura C.1 - Resultados para PHFT das 16 simulações para a cidade de Belém/ PA

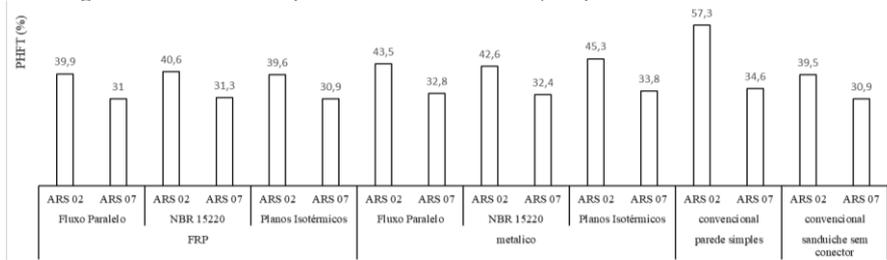


Figura C.2 - Resultados para PHFT das 16 simulações para a cidade de Belo Horizonte/MG

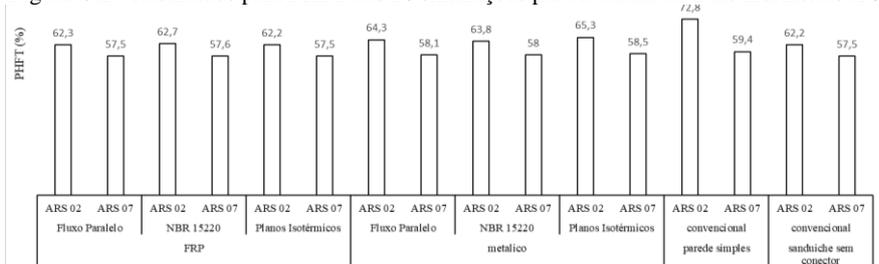


Figura C.3 - Resultados para PHFT das 16 simulações para a cidade de Brasília/ DF

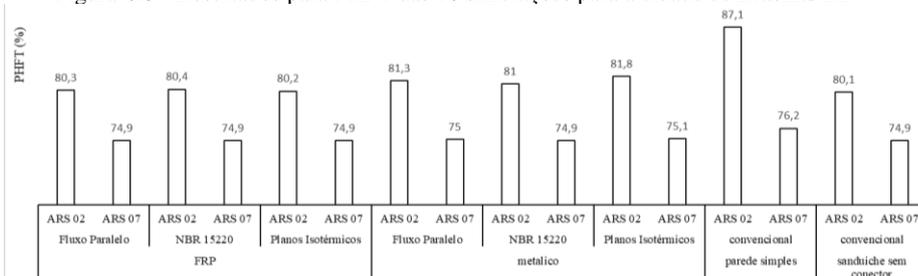


Figura C.4 - Resultados para PHFT das 16 simulações para a cidade de Campo Grande/MS

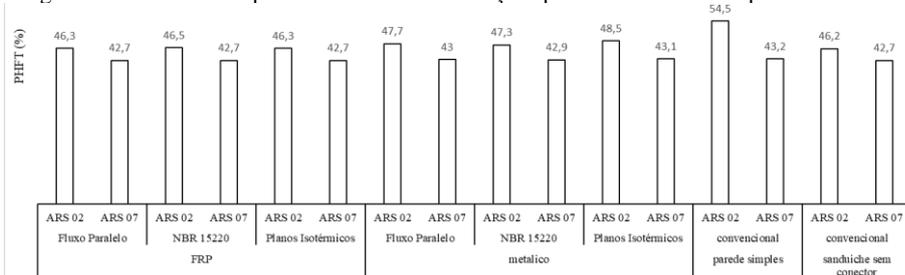


Figura C.5 - Resultados para PHFT das 16 simulações para a cidade de Cuiabá/ MT

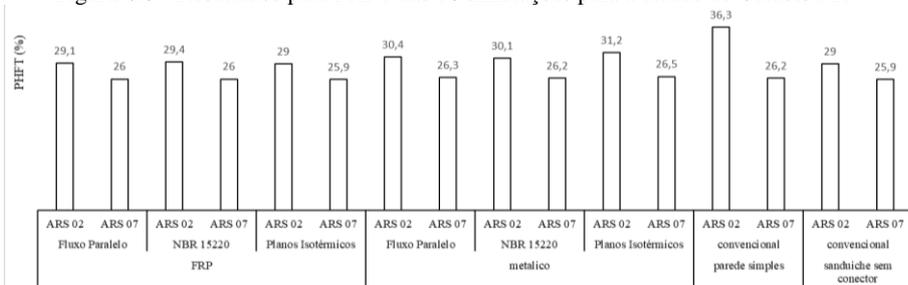


Figura C.6 - Resultados para PHFT das 16 simulações para a cidade de Curitiba/ PR

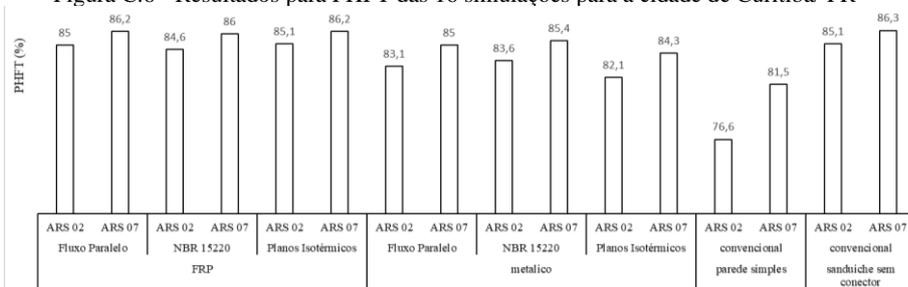


Figura C.7 - Resultados para PHFT das 16 simulações para a cidade de Duque de Caxias/ RJ

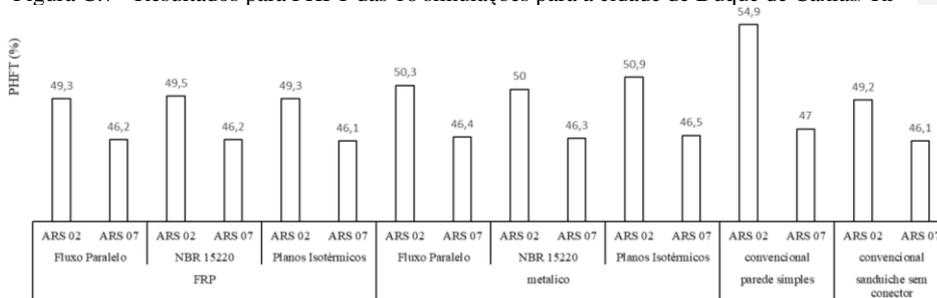


Figura C.8 - Resultados para PHFT das 16 simulações para a cidade de Salvador/ BA

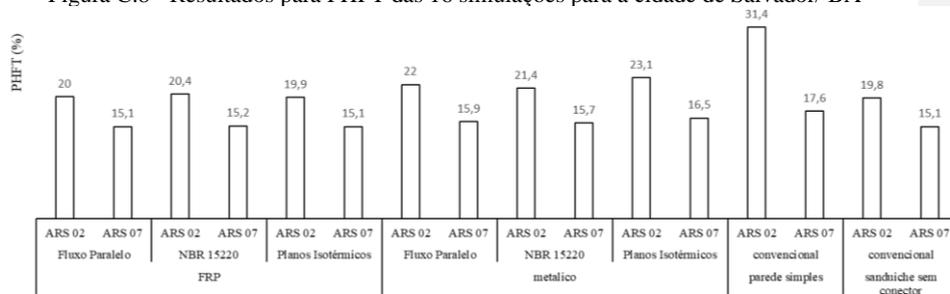
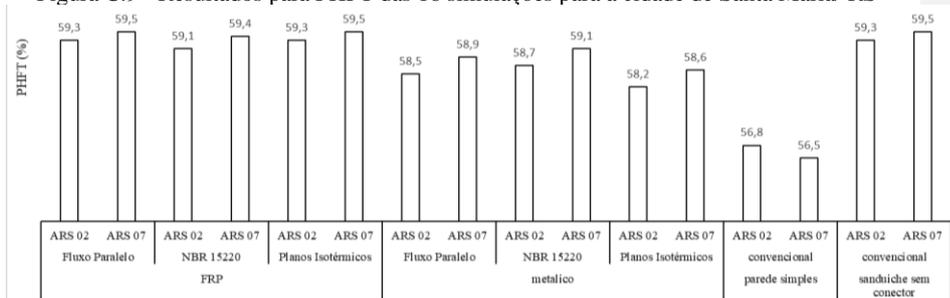


Figura C.9 - Resultados para PHFT das 16 simulações para a cidade de Santa Maria/ RS



D. APÊNDICE D – RESULTADOS DE DESEMPENHO DA UH PARA CADA CIDADE ANALISADA

Os níveis de desempenho para cada cidade foram analisados e estão apresentados a seguir. Os índices numéricos do eixo vertical equivalem a: (0) reprovado; (1) desempenho térmico mínimo; (2) desempenho térmico intermediário; (3) desempenho térmico superior.

Figura D.1 - Resultados para nível de desempenho térmico das 16 simulações para a cidade de Belém/PA

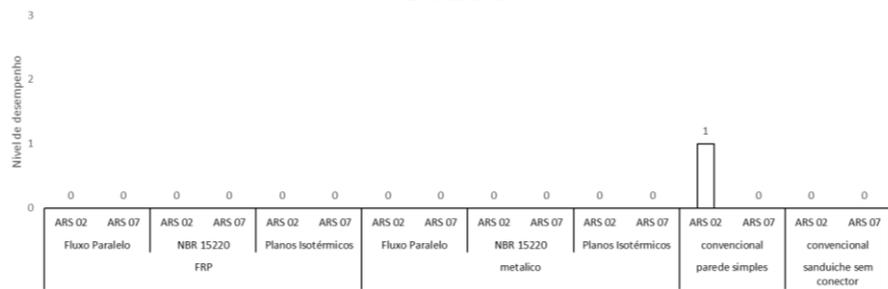


Figura D.2 - Resultados para nível de desempenho térmico das 16 simulações para a cidade de Belo Horizonte/MG

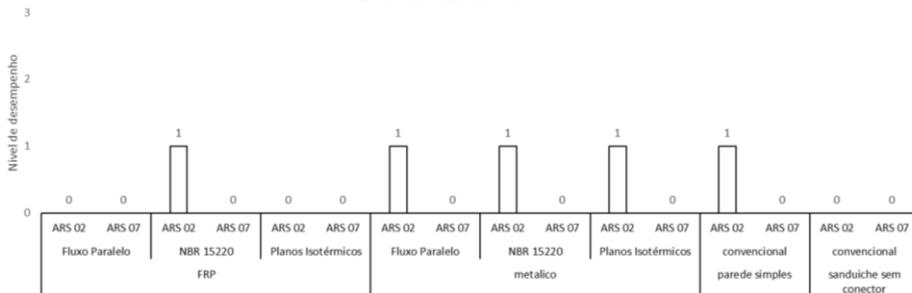


Figura D.3 - Resultados para nível de desempenho térmico das 16 simulações para a cidade de Brasília/ DF

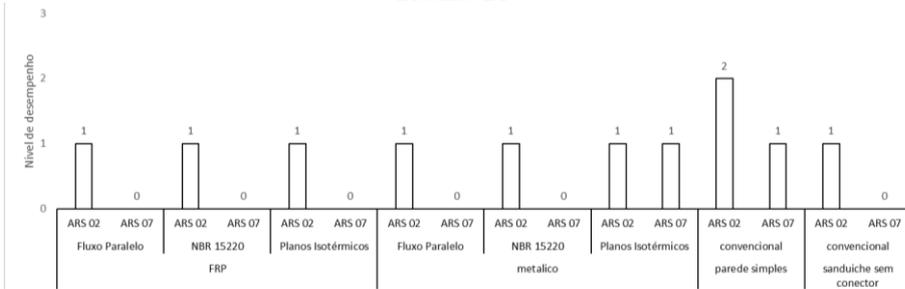


Figura D.4 - Resultados para nível de desempenho térmico das 16 simulações para a cidade de Campo Grande/ MS

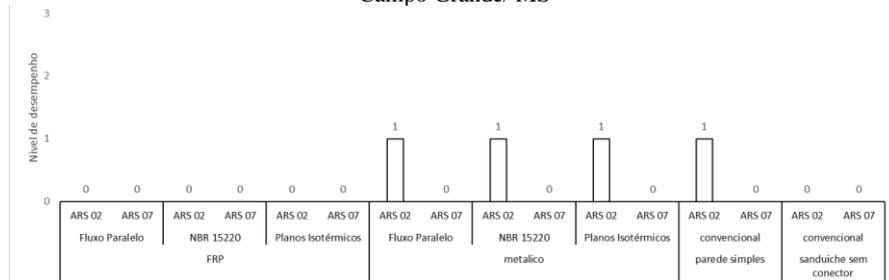


Figura D.5 - Resultados para nível de desempenho térmico das 16 simulações para a cidade de Cuiabá/MT

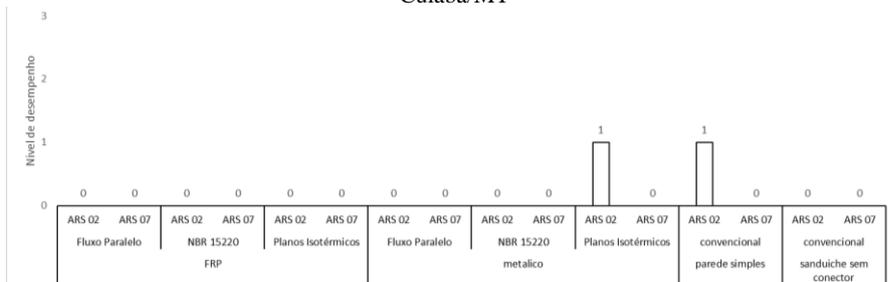


Figura D.6 - Resultados para nível de desempenho térmico das 16 simulações para a cidade de Curitiba/ PR

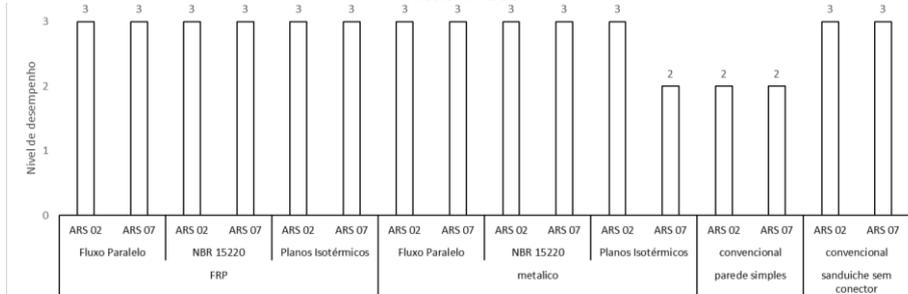


Figura D.7 - Resultados para nível de desempenho térmico das 16 simulações para a cidade de Duque de Caxias/ RJ

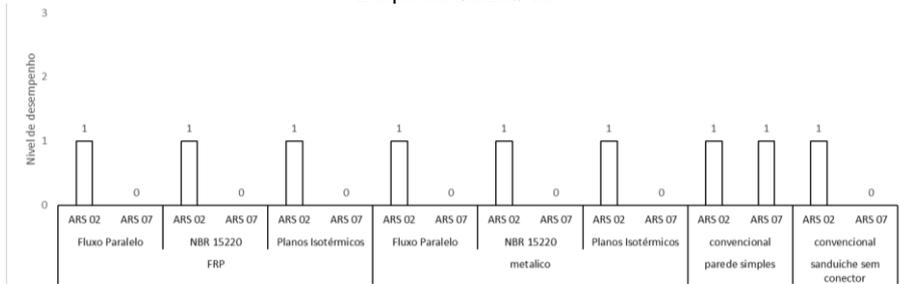


Figura D.8 - Resultados para nível de desempenho térmico das 16 simulações para a cidade de Salvador/ BA

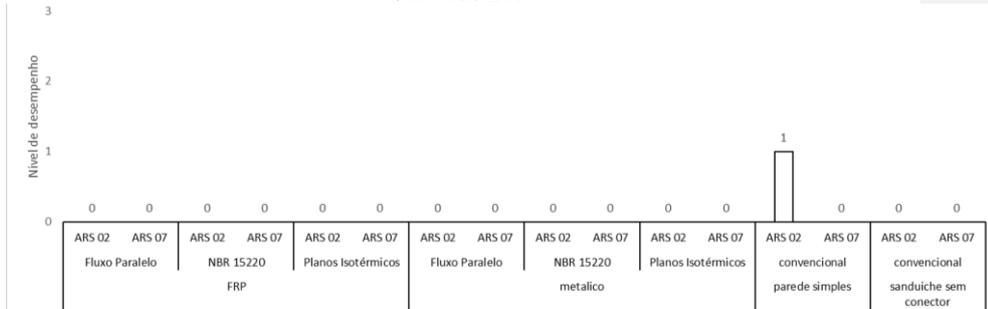


Figura D.9 - Resultados para nível de desempenho térmico das 16 simulações para a cidade de Santa Maria/ RS

