

Universidade Federal do Rio de Janeiro

**A influência de vedações verticais opacas
no comportamento termo energético
residencial: uma crítica à padronização
construtiva no Brasil**

Cinthya Neves Rosa



A influência de vedações verticais opacas no comportamento termo energético residencial: uma crítica à padronização construtiva no Brasil

Cinthyá Neves Rosa

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de pós-graduação em arquitetura, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências em Arquitetura, Linha de pesquisa Arquitetura, Projeto e Sustentabilidade.

Orientadores: Thiago Melo Grabois e Alice de Barros Horizonte Brasileiro

Rio de Janeiro

Agosto, 2025

A INFLUÊNCIA DE VEDAÇÕES VERTICAS OPACAS NO COMPORTAMENTO
TERMO ENERGÉTICO RESIDENCIAL: UMA CRÍTICA À PADRONIZAÇÃO
CONSTRUTIVA NO BRASIL

Cinthya Neves Rosa

Thiago Melo Grabois e Alice de Barros Horizonte Brasileiro

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Arquitetura, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências em Arquitetura, Linha de pesquisa Arquitetura, Projeto e Sustentabilidade.

Aprovada por:

Prof. Aline Calazans Marques. PROARQ – UFRJ (Presidente da banca)

Prof. Thiago Grabois. PROARQ – UFRJ (Orientador)

Profa. Alice Barros Horizonte Brasileiro. FAU – UFRJ (Orientadora)

Prof. Marília Ramalho Fontenelle. UFF

Prof. Claudio Oliveira Morgado. FAU - UFRJ

Rio de Janeiro

27, agosto, 2025

DEDICATÓRIA

Para Maria Edna e Erivaldo Mario,

Toda a educação, apoio e oportunidade que me proporcionaram, me fizeram
ser quem sou e trilhar o caminho que estou. Sem vocês, eu não estaria
realizando mais este sonho.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, meu irmão e meu companheiro, agradeço toda a força e apoio. Vocês me apoiaram e deram esperança nos momentos mais difíceis. Vocês são minha base e modelos.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Thiago Grabois, pela orientação valiosa e pelo apoio. Seus conhecimentos e apoio foram indispensáveis para a realização deste trabalho.

Agradeço à minha orientadora, Prof.^a Alice Brasileiro, pelo suporte, orientação e encorajamento nesta longa jornada. Foi fundamental a oportunidade de me encontrar nesta área magnífica junto a sua iniciação científica durante a graduação. Ainda, seu apoio e conhecimentos foram indispensáveis para a realização deste trabalho.

Aos meus amigos, agradeço todo o suporte psicológico e emocional. Em especial, Geiziane Silva e Flaisson da Silva. Os momentos de lazer e palavras de incentivo trouxeram grande alívio, e apoio emocional nos momentos mais difíceis.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES), que me possibilitou minha manutenção e progresso durante o mestrado.

Às agências de financiamento CNPq e FAPERJ, que oferecem suporte à pesquisa científica Brasileira.

Aos membros da banca examinadora, pelo generoso conhecimento e disponibilidade para a leitura, avaliação e contribuição a este trabalho.

Por fim, expresso minha gratidão a todos que contribuíram de forma direta ou indireta no desenvolvimento desta pesquisa.

RESUMO

A INFLUÊNCIA DE VEDAÇÕES VERTICAS OPACAS NO COMPORTAMENTO TERMO ENERGÉTICO RESIDENCIAL: UMA CRÍTICA À PADRONIZAÇÃO CONSTRUTIVA NO BRASIL

Cinthya Neves Rosa

Orientadores: Thiago Melo Grabois e Alice de Barros Horizonte Brasileiro

Resumo da Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Arquitetura, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências em Arquitetura.

Soluções construtivas que consideram as especificidades dos climas locais apresentam desempenho térmico adequado ao conforto e habitabilidade dos usuários, assim como maior eficiência energética às construções. Por outro lado, a norma de desempenho das habitações vigente ainda deixa aberta a interpretação da possibilidade de adoção de padrões construtivos no Brasil, além dos dados de domicílios brasileiros apontarem para um padrão construtivo já existente no território. Neste contexto, esta pesquisa busca analisar a viabilidade de adoção de um padrão construtivo de vedações verticais opacas, onde seja atingida uma classificação de Eficiência Energética intermediária ou superior em todo território nacional, à luz da NBR 15575:2021. O método simplificado da INI-R foi aplicado inicialmente em uma planta-modelo de habitação de interesse social para testar diferentes combinações de parâmetros térmicos das paredes (*i.e.*, entre os limites de capacidade e transmitância térmica). Em seguida, a metodologia proposta buscou detalhar os resultados, testando diferentes composições reais em todas as zonas bioclimáticas do país. Os resultados demonstraram que composições com alta capacidade térmica apresentam maior classificação nas zonas 1, 3 e 4, independentemente da transmitância térmica. As zonas 5 a 8 se beneficiam tanto da maior quanto da menor variação de temperatura interna (*i.e.*, valores extremos de capacidade térmica), com a transmitância térmica variando entre intermediária e baixa. Adicionalmente, foi possível constatar que a zona bioclimática 2 se enquadra com maior facilidade em um eventual padrão construtivo de composições de vedação vertical opaca com baixa transmitância e alta CT como indicado pela norma. Por fim, a presente pesquisa concluiu que adotar uma composição de vedação vertical opaca padrão que apresente alta capacidade térmica e baixa transmitância térmica, embora possível, é contraindicado, pois os elementos construtivos apresentam diferentes comportamentos nas zonas bioclimáticas existentes, sendo possível obter resultados mais apropriados com materialidade diversificada de acordo com o clima e zona bioclimática do projeto.

Palavras-chave: Eficiência energética, Vedações verticais, Desempenho termo energético, Materiais construtivos, Habitação de interesse social.

Rio de Janeiro

Agosto, 2025

ABSTRACT

THE IMPACT OF THE VERTICAL ENVELOPE ON THE THERMO-ENERGETIC PERFORMANCE OF HOUSES: AN ASSESSMENT ON THE CONSTRUCTION PATTERN IN BRAZIL

Cinthya Neves Rosa

Orientadores: Thiago Melo Grabois e Alice de Barros Horizonte Brasileiro

Abstract da Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Arquitetura, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências em Arquitetura.

Constructive solutions that take into account the specificities of local climates provide thermal performance adequate for user comfort and habitability, as well as greater energy efficiency for buildings. On the other hand, the current performance standard for housing still leaves open the interpretation regarding the possibility of adopting constructive standards in Brazil, while data on Brazilian households indicate an already existing construction pattern across the territory. In this context, this research aims to analyze the possibility of adopting a constructive standard for opaque vertical enclosures that achieves an intermediate or higher Energy Efficiency rating throughout the national territory, in light of NBR 15575:2021. The simplified method of INI-R was initially applied to a model floor plan of a social housing unit to test different combinations of wall thermal parameters (i.e., between the limits of thermal capacity and thermal transmittance). Subsequently, the proposed methodology sought to further detail the results by testing different real-world wall compositions across all bioclimatic zones in the country. The results showed that high thermal capacity compositions achieved higher ratings in zones 1, 3, and 4, regardless of thermal transmittance. Zones 5 to 8 benefited from both high and low internal temperature variation (i.e., extreme values of thermal capacity), with thermal transmittance ranging between intermediate and low levels. Additionally, it was found that bioclimatic zone 2 more easily fits a potential constructive standard for opaque vertical enclosures with low transmittance and high thermal capacity, as indicated by the standard. Finally, the research concluded that although it is technically possible to adopt a standard opaque vertical enclosure composition with high thermal capacity and low thermal transmittance, this approach is not recommended. This is because constructive elements exhibit different behaviors in the various bioclimatic zones, and more appropriate results can be obtained through diversified material solutions tailored to the specific climate and bioclimatic zone of the project.

Key-words: Energy Efficiency, Vertical envelope, Thermo-energetic performance, Building materials, Social housing.

Rio de Janeiro

August, 2025

LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

APP	Ambiente de Permanência Prolongada
CgTA	Carga Térmica de Aquecimento
CgTR	Carga Térmica de Refrigeração
CgTT	Carga Térmica Total
CT	Capacidade Térmica
HIS	Habitação de Interesse Social
INI-R	Instrução Normativa Inmetro para Eficiência Energética das Edificações Residenciais
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
NBR	Norma Brasileira
ONU	Organização das Nações Unidas
PHFT	Percentual de Horas de ocupação dentro da Faixa de Temperatura operativa
PNAD	Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios
RedCgTT	Redução do consumo de Carga Térmica Total
RTQ-R	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais
To	Temperatura operativa
U	Transmitância Térmica
UH	Unidade Habitacional
ZB	Zona Bioclimática
α (alfa)	Absortância

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Artigos encontrados na plataforma Scopus pela pesquisa de "eficiência energética e (envoltória ou habitação de interesse social)".	
Fonte: compilado de dados da plataforma Scopus pela autora.....	9
Figura 3: Planta do projeto representativo sem escala.	
Modificado de: Moreno, Morais, Souza, 2017.	23
Figura 4: Fluxograma do método de análise crítica.	
Fonte: autoria própria.	29
Figura 5: CgTT e classificação por ZB.	
Fonte: autoria própria.....	31
Figura 6: Temperaturas internas máximas e mínimas por ZB.	
Fonte: autoria própria.....	32
Figura 7: PHFT e classificação por ZB.	
Fonte: autoria própria.....	33
Figura 8: CgTT e classificação por caso.	
Fonte: autoria própria.....	33
Figura 9: CgTT e classificação, composições usuais. ZB1.	
Fonte: autoria própria.....	34
Figura 10: PHFT e classificação, composições usuais. ZB1.	
Fonte: autoria própria.....	35
Figura 11: Variação de temperatura interna, composições usuais. ZB1.	
Fonte: autoria própria.....	35
Figura 12: RedCgTT e classificação, composições usuais. ZB1.	
Fonte: autoria própria.....	36
Figura 13: CgTT/m ² por APP. ZB1.	
Fonte: autoria própria.....	36
Figura 14: Composições organizadas em CTxU, com manchas de classificação e destaque para RedCgTT $\geq 20\%$ (pontilhado). ZB1.	
Fonte: autoria própria.....	37
Figura 15: RedCgTT e classificação, demais composições. ZB1.	
Fonte: autoria própria.....	38
Figura 16: CgTT e classificação, composições usuais. ZB2.	
Fonte: autoria própria.....	39
Figura 17: PHFT e classificação, composições usuais. ZB2.	
Fonte: autoria própria.....	40
Figura 18: Variação de temperatura interna, composições usuais. ZB2.	
Fonte: autoria própria.....	40
Figura 19: RedCgTT e classificação, composições usuais. ZB2.	
Fonte: autoria própria.....	41
Figura 20: CgTT/m ² por APP. ZB2.	
Fonte: autoria própria.....	41
Figura 21: Composições organizadas em CTxU, com manchas de classificação e destaque para RedCgTT $\geq 20\%$ (pontilhado). ZB2.	
Fonte: autoria própria.....	42

Figura 22: RedCgTT e classificação, demais composições. ZB2.	
Fonte: autoria própria.....	43
Figura 23: CgTT e classificação, composições usuais. ZB3.	
Fonte: autoria própria.....	44
Figura 24: PHFT e classificação, composições usuais. ZB3.	
Fonte: autoria própria.....	45
Figura 25: Variação de temperatura interna, composições usuais. ZB3.	
Fonte: autoria própria.....	45
Figura 26: RedCgTT e classificação, composições usuais. ZB3.	
Fonte: autoria própria.....	45
Figura 27: CgTT/m ² por APP. ZB3.	
Fonte: autoria própria.....	45
Figura 28: Composições organizadas em CTxU, com manchas de classificação e destaque para RedCgTT ≥ 20% (pontilhado). ZB3.	
Fonte: autoria própria.....	46
Figura 29: RedCgTT e classificação, demais composições. ZB3.	
Fonte: autoria própria.....	47
Figura 30: CgTT e classificação, composições usuais. ZB4.	
Fonte: autoria própria.....	48
Figura 31: PHFT e classificação, composições usuais. ZB4.	
Fonte: autoria própria.....	48
Figura 32: Variação de temperatura interna, composições usuais. ZB4.	
Fonte: autoria própria.....	49
Figura 33: RedCgTT e classificação, composições usuais. ZB4.	
Fonte: autoria própria.....	49
Figura 34: CgTT/m ² por APP. ZB4.	
Fonte: autoria própria.....	50
Figura 35: Composições organizadas em CTxU, com manchas de classificação e destaque para RedCgTT ≥ 20% (pontilhado). ZB4.	
Fonte: autoria própria.....	50
Figura 36: RedCgTT e classificação, demais composições. ZB4.	
Fonte: autoria própria.....	51
Figura 37: CgTT e classificação, composições usuais. ZB5.	
Fonte: autoria própria.....	52
Figura 38: PHFT e classificação, composições usuais. ZB5.	
Fonte: autoria própria.....	52
Figura 39: RedCgTT e classificação, composições usuais. ZB5.	
Fonte: autoria própria.....	53
Figura 40: CgTT/m ² por APP. ZB5.	
Fonte: autoria própria.....	53
Figura 41: Composições organizadas em CTxU, com manchas de classificação e destaque para RedCgTT ≥ 5% (pontilhado). ZB5.	
Fonte: autoria própria.....	54

Figura 42: RedCgTT e classificação, demais composições. ZB5.	
Fonte: autoria própria.....	55
Figura 43: CgTT e classificação, composições usuais. ZB6.	
Fonte: autoria própria.....	56
Figura 44: PHFT e classificação, composições usuais. ZB6.	
Fonte: autoria própria.....	56
Figura 45: Variação de temperatura interna, composições usuais. ZB6.	
Fonte: autoria própria.....	57
Figura 46: RedCgTT e classificação, composições usuais. ZB6.	
Fonte: autoria própria.....	57
Figura 47: CgTT/m ² por APP. ZB6.	
Fonte: autoria própria.....	57
Figura 48: Composições organizadas em CTxU, com manchas de classificação e destaque para RedCgTT $\geq 5\%$ (pontilhado). ZB6.	
Fonte: autoria própria.....	58
Figura 49: RedCgTT e classificação, demais composições. ZB6.	
Fonte: autoria própria.....	59
Figura 50: CgTT e classificação, composições usuais. ZB7.	
Fonte: autoria própria.....	60
Figura 51: RedCgTT e classificação, composições usuais. ZB7.	
Fonte: autoria própria.....	60
Figura 52: CgTT/m ² por APP. ZB7.	
Fonte: autoria própria.....	61
Figura 53: PHFT e classificação, composições usuais. ZB7.	
Fonte: autoria própria.....	61
Figura 54: Variação de temperatura interna das composições usuais. ZB7.	
Fonte: autoria própria.....	62
Figura 55: Composições organizadas em CTxU, com manchas de classificação e destaque para RedCgTT $\geq 20\%$ (pontilhado). ZB7.	
Fonte: autoria própria.....	62
Figura 56: RedCgTT e classificação, demais composições. ZB7.	
Fonte: autoria própria.....	63
Figura 57: CgTT e classificação, composições usuais. ZB8.	
Fonte: autoria própria.....	64
Figura 58: RedCgTT e classificação, composições usuais. ZB8.	
Fonte: autoria própria.....	64
Figura 59: PHFT e classificação, composições usuais. ZB8.	
Fonte: autoria própria.....	65
Figura 60: Variação de temperatura interna, composições usuais. ZB8.	
Fonte: autoria própria.....	65
Figura 61: CgTT/m ² por APP. ZB8.	
Fonte: autoria própria.....	65

Figura 62: Composições organizadas em CTxU, com manchas de classificação e destaque para RedCgTT $\geq 20\%$ (pontilhado). ZB8.
Fonte: autoria própria.....66

Figura 63: RedCgTT e classificação, demais composições. ZB8.
Fonte: autoria própria.....67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Requisitos mínimos de Transmitância térmica (U) e Capacidade térmica (CT) para paredes externas. Adaptado de ABNT NBR 15575-4, 2021	3
Tabela 2: Resumo dos conteúdos de trabalhos revisados. Fonte: autoria própria	9
Tabela 3: Propriedades dos arquivos elaborados. Fonte: autoria própria	21
Tabela 4: Especificações dos arquivos testados (I a V) para avaliação dos limites de U e CT para cada ZB, associando-os a composições de parede reais equivalentes. Fonte: autoria própria	24
Tabela 5: Composições mais utilizadas no PMCMV. Fonte: Almeida, 2019, p.83.	25
Tabela 6: Composições estudadas advindas do Manual RAC e site projetEEE. Fonte: Manual RAC e projetEEE.....	25
Tabela 7: Cidades representantes das Zonas Bioclimáticas brasileiras. Fonte: autoria própria	27
Tabela 8: Dados referentes a UH posteriormente inseridos na interface da INI-R. Fonte: autoria própria	28

Sumário

RESUMO	I
ABSTRACT	II
LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS	III
LISTA DE FIGURAS.....	IV
LISTA DE TABELAS	VIII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Contextualização e Justificativa.....	1
1.2. Objetivos	4
1.3. Metodologia	5
1.4. Organização da dissertação	5
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	6
2.1. Propriedades fundamentais das vedações opacas.....	6
2.2. Revisão Sistemática da Literatura	8
2.3. Eficiência Energética no cenário atual	11
2.4. Etiquetagem Inmetro de eficiência energética no Brasil e cenários futuros	17
3. METODOLOGIA DE PESQUISA.....	18
3.1. Ferramenta	19
3.2. Recorte.....	21
3.3. Planta modelo	23
3.4. Ensaio teórico – limites de U e CT	23
3.5. Avaliação das composições de vedação reais.....	24
3.6. Inserção de dados.....	27
3.7. Análise crítica	29
4. RESULTADOS	30
4.1. Ensaio teórico.....	31
4.2. Composições de vedação reais.....	34
4.2.1. ZB1 – Curitiba (PR).....	34
4.2.2. ZB2 – Santa Maria (RS).....	39
4.2.3. ZB3 – São Paulo (SP).....	44
4.2.4. ZB4 – Brasília (DF).....	48
4.2.5. ZB5 – Campos dos Goytacazes (RJ).....	52
4.2.6. ZB6 – Goiânia (GO).....	56
4.2.7. ZB7 – Teresina (PI)	60
4.2.8. ZB8 – Manaus (AM).....	64
4.3. Discussão dos resultados	68
5. CONCLUSÕES.....	71
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	75

1. INTRODUÇÃO

1.1.Contextualização e Justificativa

Em 2015, o relatório publicado pela ONU demonstrou a primeira grande preocupação em evitar um desastre climático que poderia tornar o planeta inabitável por conta do aquecimento global. A partir das restrições listadas no relatório, esperava-se limitar o aumento da temperatura média global a 1,5°C até 2030. Entretanto, mesmo diante das recomendações apontadas, há indícios que demonstram a clara dificuldade para minimizar o aquecimento da Terra.

O Serviço Copernicus de Mudanças Climáticas¹, indica que a temperatura média global vem aumentando a cada ano, atingindo o recorde em 2024, ultrapassando o limite de 1,5°C (Copernicus, 2025). Ainda, o relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas² (IPCC) alerta que ainda é possível evitar os piores cenários (que chegam a um aumento de aproximadamente 5°C em 2100), indicando urgência para a adoção de medidas sustentáveis, dentre elas, a melhoria da eficiência energética (IPCC, 2023).

O presente estudo analisa o desempenho energético da edificação durante sua fase de uso, gerando indicações de decisões que deverão ser tomadas durante a fase de projeto. A análise se dá por meio do estudo de Eficiência Energética, que busca proporcionar as mesmas condições de conforto térmico, com o menor consumo de energia (Lamberts, Dutra e Pereira, 2014).

O conforto pode ser definido como “[...] relação a um acontecimento ou fenômeno quando [o usuário] pode observá-lo sem preocupação ou incômodo” (Corbella e Yannas, 2009, p.32). Quando o indivíduo se encontra em neutralidade térmica com o ambiente, onde as trocas de calor não ultrapassam as respostas naturais do corpo (fechamento dos poros por frio ou aumento da transpiração com o calor), pode-se dizer que ele está em conforto térmico. Ainda, é compreendido que “as condições ambientais capazes de proporcionar sensação de conforto térmico em habitantes de clima quente e úmido não são as mesmas [para] habitantes de clima quente e seco [ou] de clima temperado ou frio” (Frota e Schiffer, 2001, p.23), tendo esses habitantes diferentes tolerâncias aos climas que vivem.

A carta bioclimática indicada na NBR 15220-3:2005 é uma ótima ferramenta para entender a faixa de conforto compreendida para o Brasil. Ele auxilia as escolhas de soluções arquitetônicas a fim de manter o conforto térmico dentro da edificação por meio de uma indicação generalizada, sendo importante ainda a análise das condições climáticas locais e as relações entre os habitantes e as variáveis climáticas locais. A adoção de soluções passivas no projeto arquitetônico auxilia diretamente na Eficiência Energética da edificação, tendo

¹ Do original *Copernicus Climate Change Service*.

² Do original *Intergovernmental Panel on Climate Change*.

em vista que essas soluções aumentam a faixa de conforto térmico do usuário sem necessitar do uso de energia.

De forma a auxiliar os parâmetros de Eficiência Energética, existem Normas Brasileiras que proporcionam diretrizes mínimas de projeto. A NBR 15575 apresenta os requisitos mínimos de desempenho para edificações residenciais, incluindo desempenho térmico. Métodos para calcular o consumo de energia e certificar residências de acordo com classificações de Eficiência Energética vêm sendo desenvolvidos. Em 2010, foi publicado o primeiro Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R), que sofreu uma reformulação publicada em 2022, com a Instrução Normativa Inmetro para Eficiência Energética das Edificações Residenciais (INI-R). Entre as principais atualizações, destaca-se a previsão do consumo da edificação em kWh/ano, a fim de simplificar o entendimento e a quantificação da contribuição das medidas de eficiência energética implementadas frente ao antigo indicador em graus-hora de resfriamento GHR (de difícil compreensão). Além disso, foi alterado o método de cálculo, substituindo uma regressão linear múltipla por cálculo de rede neural e comparação com meta-modelo virtual. Este meta-modelo detém os mesmos parâmetros geométricos da edificação real, porém adota os parâmetros mínimos indicados na NBR 15575:2021, de envoltória, ventilação, elementos transparentes e cobertura e, se adotados os mesmos parâmetros mínimos da NBR de todos estes critérios no projeto, a edificação terá classificação mínima “C” de Eficiência energética.

Dessa forma, a NBR 15575:2021 apresenta intervalos de propriedades térmicas de subsistemas construtivos a serem adotados de acordo com as Zonas Bioclimáticas (ZBs) do Brasil, não indicando valores máximos para CT, ou valores mínimos para U. É possível compreender a existência de um intervalo comum dos valores indicados para alguns subsistemas construtivos, como as vedações verticais opacas (paredes) que são o objeto de estudo do presente trabalho. Ao observar a Tabela 1, modificada da NBR 15575-4:2021, é possível atender aos requisitos mínimos da envoltória de todas as ZBs ao adotar um sistema de bloco cerâmico argamassado (12x19x19 cm), com valores de $U = 2,21 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ e $CT = 155 \text{ kJ/(m}^2\cdot\text{K)}$, independente da absorptância (α). Considerando uma edificação que atenda aos outros parâmetros mínimos da NBR, a classificação da envoltória seria igual ou maior que “C” em todas as ZBs do país.

Tabela 1: Requisitos mínimos de Transmitância térmica (U) e Capacidade térmica (CT) para paredes externas.
Adaptado de ABNT NBR 15575-4, 2021

Transmitância térmica de paredes (U _{par}) W/(m².K)		
Zonas bioclimáticas 1 e 2	Zonas bioclimáticas 3 a 8	
U _{par} ≤ 2,7	α _{par} ≤ 0,6	α _{par} > 0,6
	U _{par} ≤ 3,7	U _{par} ≤ 2,5

Capacidade térmica de paredes (CT _{par}) kJ/(m².K)	
Zonas bioclimáticas 1 a 7	Zona bioclimática 8
CT _{par} ≥ 130	Sem requisito

Mesmo o Brasil sendo considerado um país de tamanho continental, e apresentando oito³ ZBs distintas, a Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua (PNAD contínua) de 2019 levantou que 88,6% dos domicílios brasileiros (64,1 milhões) apresentavam paredes externas de alvenaria com revestimento (IBGE, 2020). O mesmo estudo levantou que no ano de 2018, 88,2% das residências (62,6 milhões) apresentavam a mesma materialidade (IBGE, 2019), sendo possível observar um aumento de 1,5 milhão de residências de 2018 para 2019 com a mesma solução para as paredes externas em um país com alta diversidade climática. Os dados mostram uma tendência de padrão construtivo em um território tão vasto e diverso, ao invés de soluções variadas, ainda que existam algumas especificidades regionais.

Esta questão se agrava ao considerar os programas de habitação de interesse social (HIS), que produzem projetos padronizados para diversas regiões e climas do país, repetindo soluções que muitas vezes desconsideram as características climáticas regionais. Um exemplo é o projeto *Morar bem Paraná*, que foi implementado de forma padronizada nas ZBs 1, 2 e 3, no estado do Paraná, repetindo a mesma planta e os materiais construtivos (Rosa *et al.*, 2024). Ademais, é possível destacar os projetos do Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV), que utilizam majoritariamente paredes de concreto moldadas *in loco*, que são notadamente conhecidas por não apresentar eficiência energética adequada para as zonas mais quentes do país, como a ZB8 (Almeida, Silvano, Brasileiro, 2018).

É possível observar indicações de que arquiteturas que consideram as especificidades das características climáticas locais apresentam melhores desempenhos térmicos (Triana, Lamberts, Sassi, 2018). Ainda assim, a NBR 15575:2021 deixa aberta a interpretação da possibilidade de adoção de padrões construtivos no país, ao indicar parâmetros mínimos que equivalem ao

³ A NBR 15220-3, que define o zoneamento bioclimático brasileiro foi atualizada, alterando a abrangência e a quantidade de zonas bioclimáticas do país de 8 para 12 com sua publicação ao final de 2024. Este trabalho já se encontrava em fase de finalização durante sua publicação, não sendo mais viável retroceder para ajustar à mais nova divisão bioclimática de 12 ZBs. Desta forma, o zoneamento utilizado neste estudo equivale ao anterior, da NBR 15220-3:2005. Porém, a atualização da norma reafirma a pluralidade climática existente do país.

desempenho mínimo “C”. Com o novo método da INI-R, no qual é feita uma comparação do modelo real com o meta-modelo virtual de referência que apresenta as propriedades térmicas indicadas na NBR 15575:2021, é possível interpretar que adotando subsistemas com propriedades térmicas melhores que as da norma, U menor que $2,5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ e CT maior que $130 \text{ kJ}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, já respeitando as diferentes zonas bioclimáticas, o resultado da avaliação de Eficiência Energética seria entre A e C, visto que se adotados os mesmos valores mínimos da norma, a classificação teria resultado C (INMETRO, 2022). Ainda, seguindo o Manual RAC: Catálogo de propriedades térmicas (INMETRO, 2022), é possível perceber que as composições de vedação vertical, que se encaixam no intervalo comum a todas as ZBs, apresentam como principal material a cerâmica para construção de alvenaria de blocos.

Embora a composição das paredes externas influencie diretamente no resultado da classificação de Eficiência Energética, é necessário enfatizar as limitações dos resultados, uma vez que representam apenas parte da envoltória responsável pela troca de temperatura e ventilação entre os ambientes interno e externo. Portanto, a implementação de soluções específicas, que consideram as características climáticas regionais para a definição de coberturas, aberturas e outros parâmetros em conjunto com as composições de paredes, possibilitarão resultados ainda mais adequados do ponto de vista termo energético.

A atualidade das discussões climáticas é inegável, com destaque recente na construção civil por meio da reformulação do RTQ-R para a INI-R. Neste contexto, o presente projeto de pesquisa busca implementar o emprego das metodologias atualizadas – INI-R – na busca por soluções eficientes termo energeticamente. Ademais, busca-se analisar e refletir sobre a viabilidade da adoção de padrões construtivos para vedações verticais opacas no país, buscando composições que apresentem classificação de eficiência energética intermediária (B) ou superior (A), à luz da NBR 15575:2021.

1.2. Objetivos

Esta pesquisa tem como objetivo analisar a viabilidade de adotar um padrão construtivo de vedações verticais opacas, onde seja atingida uma classificação de Eficiência Energética intermediária (B) ou superior (A), em todas as zonas bioclimáticas do Brasil, à luz da NBR 15575 e do método da INI-R.

Como objetivos específicos, destacam-se:

- (I) Identificar o impacto que as características de transmitância térmica (U) e de capacidade térmica (CT) apresentam na classificação de Eficiência Energética da envoltória;
- (II) Identificar e analisar os padrões comportamentais e de classificação das composições analisadas nas oito ZBs do país.

1.3. Metodologia

O “método simplificado da INI-R” foi escolhido por sua facilidade de acesso e manuseio, a fim de estimular o uso da ferramenta e auxiliar a impulsionar a etiquetagem no cenário brasileiro. A ferramenta utilizada está disponível no endereço online do PBE Edifica (<https://pbeedifica.com.br/redes/residencial/>)⁴ e é empregada nesse estudo para testar, nas oito ZBs do Brasil, diferentes composições de vedação vertical opaca em uma planta-modelo de Habitação de Interesse Social. Deste modo, a metodologia de avaliação quantitativa deste trabalho se divide em duas etapas, que serão descritas com maior detalhe no capítulo 3:

Ensaio teóricos: Testar diferentes combinações limites dos parâmetros (U e CT) em todas as ZBs, possibilitando a análise da influência de tais parâmetros. Estes testes também permitirão levantar os melhores resultados possíveis de se obter na classificação energética da envoltória, considerando a influência isolada das paredes em cada ZB.

Avaliação das composições de vedação reais: Avaliar composições usuais de vedações verticais disponíveis no site do projetEEE e no Manual RAC, com o intuito de apontar, dentre as composições usuais, quais apresentam melhor influência no desempenho termoenergético da envoltória nas ZBs analisadas. Esta etapa também possibilitará a identificação de possíveis padrões comportamentais das composições reais aplicáveis à construção civil nas oito ZBs analisadas.

1.4. Organização da dissertação

A presente dissertação se organiza em 5 capítulos. No primeiro capítulo é apresentada a introdução a importância da eficiência energética na questão ambiental, em conjunto com a problemática da existência de um padrão construtivo no Brasil. Em seguida, são abordadas a NBR que aborda eficiência energética e sua interpretação de aceitação de padrões construtivos para vedações verticais opacas. Por fim, são apontados os objetivos e a metodologia é abordada de forma breve.

No segundo capítulo é apresentado o referencial teórico, destacando os principais tópicos que balizam a discussão ao longo desta dissertação. Inicialmente é feita uma breve recapitulação das propriedades das vedações verticais opacas. Em seguida é realizada uma revisão sistemática da literatura, destacando os principais estudos dos últimos 10 anos com foco em eficiência energética, envoltória residencial e habitação de interesse social.

⁴ Com a revisão mais recente da INI-R, publicada em novembro de 2024, quando esta pesquisa já estava entrando em sua fase final, a interface de cálculo e o seu endereço foram alterados. O site atual é <https://pbeedifica.com.br/interface-ini-r/>.

No terceiro capítulo é descrita a metodologia em detalhes, abordando inicialmente seu passo a passo. É feita uma breve justificativa, apresentação e explicação da ferramenta utilizada, do recorte escolhido e da planta modelo utilizada. Posteriormente são explicadas as etapas do trabalho e a inserção dos dados na ferramenta utilizada. Por fim, é explicado o procedimento de análise realizado.

No quarto capítulo são apresentados os resultados obtidos da aplicação do método e as análises dos mesmos. Este capítulo se encontra subdividido em três grandes subcapítulos, os dois primeiros de acordo com as duas grandes etapas de resultados, onde o segundo é organizado em 8 divisões, cada uma abrangendo os resultados detalhados de uma zona bioclimática individualmente. Por fim, é feita uma sintetização dos resultados e os mesmos são discutidos.

No quinto capítulo são feitas as conclusões sobre o estudo, comentando os resultados, as limitações e as indicações de lacunas a serem pesquisadas.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo aborda as fundamentações necessárias para este estudo, se iniciando com as propriedades do elemento estudado, a fim de compreender o funcionamento das trocas térmicas que ocorrem na envoltória pelo mesmo. Após, é realizada uma revisão sistemática da literatura abordando o nível de produções acadêmicas na área de eficiência energética e sustentabilidade, e então são comentados alguns dos trabalhos mais atuais. Por fim, é comentado sobre a ferramenta governamental utilizada para etiquetagem de eficiência energética no Brasil e seu histórico, anteriormente RTQ e atualmente INI, finalizando com uma perspectiva do cenário governamental para a eficiência energética, embasando a escolha e importância do tema abordado.

2.1. Propriedades fundamentais das vedações opacas

As vedações opacas que compõem a envoltória do objeto arquitetônico realizam as trocas térmicas do ambiente interno com o externo. Esta troca é realizada a partir da diferença de temperatura entre os ambientes, onde o fluxo de calor sempre se dará do mais quente para o mais frio (ou menos quente). As trocas térmicas se dão por convecção, radiação e condução.

Frota e Schiffer (2001) definem tais trocas como: convecção é a “troca de calor entre dois corpos, sendo um deles sólido e o outro um fluido (líquido ou gás)” (p.32); radiação é a troca “através da capacidade de emitir e de absorver energia térmica” não necessitando de um meio de propagação, sendo transmitida no vácuo (p.33); condução é a troca “entre dois corpos que se tocam ou mesmo partes do corpo que estejam a temperaturas diferentes” (p.34).

Tais trocas influenciam na temperatura interna do ambiente, sendo reguladas pelos materiais da envoltória. A camada superficial da composição da envoltória (cor) lidará diretamente com a troca por radiação, absorvendo e refletindo parte da energia radiante incidida diretamente. A composição terá suas propriedades definidas de acordo com os diversos materiais que a compõem (podendo também ser um único material maciço), esta lidará com as trocas por convecção e condução.

Cada material apresenta suas propriedades termofísicas, sendo elas a condutividade térmica (λ), densidade (ρ) e calor específico (c). Tais propriedades são definidas por Lamberts Dutra e Pereira (2014) como: condutividade térmica (λ) é a capacidade do material em conduzir maior ou menor quantidade de calor por tempo, dependendo diretamente da densidade do material; densidade (ρ) é o quociente da massa pelo volume de um corpo. Frota e Schiffer (2001) definem calor específico (c) como “a quantidade de calor necessária para [...] elevar uma unidade de temperatura, a sua unidade de massa” (p.48) (1°C ou 1 Kelvin).

Dessa forma, é possível quantificar a influência de cada material que faz parte da composição da vedação utilizada na envoltória. Ainda, o conjunto dessas influências individuais caracterizam outras duas propriedades, vinculadas à composição como um todo, a transmitância térmica (U) e a capacidade térmica (CT). Estas são referenciadas nos parâmetros normativos das NBRs voltadas ao desempenho termo energético das edificações.

A transmitância térmica (U) é a “ [...] capacidade ou incapacidade de um elemento transmitir a radiação solar para o ambiente interno. ” (Lamberts, Dutra e Pereira, 2014, p.215). Também referida como “coeficiente global de transmissão térmica (K) ” por Frota e Schiffer (2001) (p.38), por englobar todas as três trocas de calor, materiais com baixa transmitância apresentam uma alta resistência térmica (R), sendo inversamente proporcionais ($U = \frac{1}{RT}$). A resistência térmica, por sua vez, é diretamente proporcional à espessura do material e inversamente proporcional à condutividade térmica (λ), ou seja, quanto menor a condutividade térmica, maior é a resistência térmica da composição. Podemos então compreender que: quanto menor a condutividade térmica, menor a transmitância térmica e, dessa forma, mais isolante térmica a composição.

A capacidade térmica (CT), por sua vez, é definida como a capacidade de um material em reter calor, ou seja, “um material de grande capacidade térmica necessita de uma grande quantidade de calor para variar em um grau de temperatura seus componentes por unidade de área” (Lamberts, Dutra e Pereira, 2014, p.220). Este parâmetro está diretamente associado aos fenômenos de amortecimento e atraso térmico, de grande significado para o comportamento térmico do edifício. Quando uma parede, por exemplo, que se encontra à mesma temperatura do interior é exposta a um fluxo de calor externo, este fluxo “não atravessa a parede imediatamente, antes aquecendo-a internamente” (Frota e Schiffer, 2001, p.48).

O atraso e o amortecimento térmico são parte da inércia térmica, grandeza diretamente proporcional à capacidade térmica, que varia em função do calor específico, densidade e espessura de cada elemento que compõe a vedação. Ou seja, quanto maior a capacidade térmica, mais “pesada” (densa) é a vedação e maior vai ser sua inércia térmica, dificultando altas variações de temperatura interna das edificações.

2.2.Revisão Sistemática da Literatura

A fim de compreender o atual cenário de pesquisas sobre os materiais e o desempenho energético da envoltória de edificações residenciais no Brasil, foi feito o levantamento de estudos através da plataforma Scopus. Utilizou-se diferentes termos e combinações deles para selecionar os trabalhos mais próximos do tema estudado. A plataforma possibilita ferramentas para melhorar a pesquisa: a restrição de palavras em conjunto através do uso de aspas (implicando que estas devem estar em sequência e juntas no texto); o uso de AND para adicionar novos termos; OR para encontrar um termo ou o outro especificados; e o uso de parênteses para agrupar palavras e deixar clara a pesquisa, como por exemplo: “ (arquitetura OR “projeto arquitetônico”) AND (materiais OR envoltória) ”. Buscando resultados mais atuais, a pesquisa foi restringida para o período entre 2014 e 2024, últimos 10 anos.

Primeiramente foram utilizados os termos “energy efficiency” AND (“building envelope” OR “social housing”), traduzido como “eficiência energética” AND (“envoltória” OR “habitação de interesse social”). Esta pesquisa resultou em 19,983 artigos, onde é possível observar um contínuo aumento de publicações conforme a Figura 1, destacando a importância do tema. Na segunda pesquisa, foi adicionado o termo “brazil” (Brasil), visto que o estudo busca compreender a resposta dos materiais utilizados nas envoltórias aos climas brasileiros, tal pesquisa resultou em 741 artigos. A fim de aproximar os resultados da pesquisa deste trabalho, optou-se por procurar trabalhos que continham todos os termos, “energy efficiency” AND “building envelope” AND “social housing” AND brazil, resultando em 79 artigos.

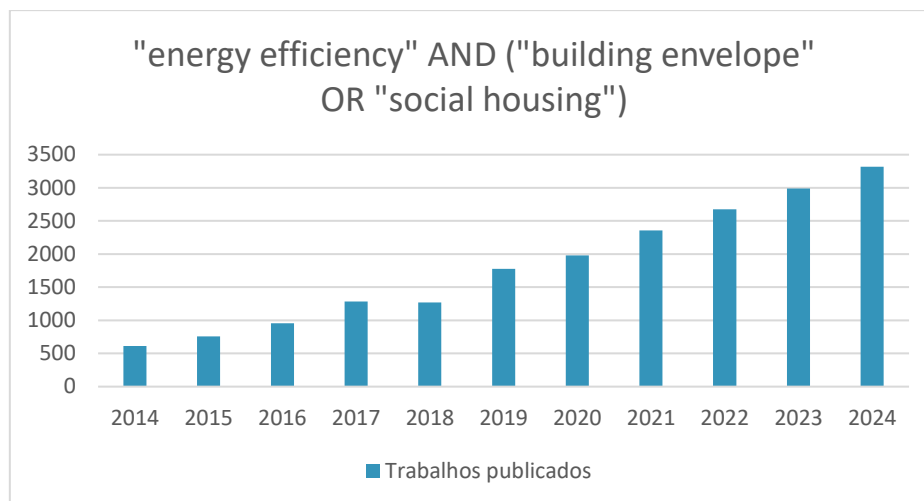


Figura 1: Artigos encontrados na plataforma Scopus pela pesquisa de "eficiência energética e (envoltória ou habitação de interesse social)". Fonte: compilado de dados da plataforma Scopus pela autora.

Leu-se os resumos dos 79 artigos a fim de selecionar os que apresentavam proximidade com o tema e descartar os que estavam mais distantes, resultando em 10 artigos. Estes foram lidos em sua totalidade, gerando a Tabela 2 que resume seus conteúdos.

Tabela 2: Resumo dos conteúdos de trabalhos revisados. Fonte: autoria própria

Título	Autores	Ano	Conteúdo
Concrete walls thermal performance analysis by Brazilian Standards	Raquel Diniz Oliveira, Roberta Vieira Gonçalves de Souza, Ana Júlia Maia Mairink, Magno Tadeu Gomes Rizzi, Roberto Márcio da Silva	2015	Analisar as diferenças entre o método prescritivo e o simulacional do RTQ-R, e avaliar a eficácia do sistema de paredes de concreto aplicadas nas 8 zonas bioclimáticas brasileiras.
Characterisation of representative building typologies for social housing projects in Brazil and its energy performance	Maria Andrea Triana, Roberto Lamberts, Paola Sassi	2015	Definir modelos representativos de novos projetos sendo construídos no Brasil no setor de habitação de interesse social e avaliar a performance térmica e energética destes projetos considerando duas zonas bioclimáticas (ZB3 e ZB8)
Impact of climate change on heating and cooling energy demand in houses in Brazil	Andrea Invidiata, Eneir Ghisi	2016	Avaliar os efeitos futuros das mudanças climáticas na demanda de energia para aquecimento e resfriamento em uma construção residencial unifamiliar brasileira em 3 diferentes cidades (Belém, Curitiba e Florianópolis) e testar diferentes estratégias passivas para mitigar os efeitos das mudanças climáticas na demanda de energia da residência.

Building energy efficiency: An overview of the Brazilian residential labeling scheme	Michele Fossati, Veridiana Atanasio Scalco, Vinícius Cesar Cadena Linczuk, Roberto Lamberts.	2016	Analisar e discutir sistemas de etiquetagem do Brasil e ao redor do mundo.
Thermal performance of social housing - A study based on Brazilian regulations	Ana Cecília Rodrigues Moreno, Ingrid Stephanie de Moraes, Roberta Vieira Gonçalves de Souza	2017	Discutir como a propagação de programas de HIS em diferentes locais e contextos afetam o conforto térmico do usuário
Cost-effective envelope optimisation for social housing in Brazil's moderate climates zones	Renata Tubelo, Lucelia Rodrigues, Mark Gillott, Joana Carla Gonçalves Soares.	2018	Analisar diferentes combinações de envoltória, levando em conta seu custo-benefício nas cidades de Curitiba, São Paulo e Porto Alegre.
Should we consider climate change for Brazilian social housing? Assessment of energy efficiency adaptation measures	Maria Andrea Triana, Roberto Lamberts, Paola Sassi	2018	Testar e analisar diferentes materiais e soluções projetuais no desempenho termo-energético de habitações de interesse social considerando as mudanças climáticas nas cidades de São Paulo e Salvador
Análise da eficiência energética da envoltória de edificações residenciais conforme instrução normativa do inmetro (INI-R)	Letícia Gabriela Eli, Marcelo Salles Olinger, Amanda Fraga Krelling, Ana Paula Melo, Roberto Lamberts	2021	Identificar e quantificar a contribuição à classificação de eficiência energética de diferentes estratégias projetuais em uma edificação unifamiliar térrea
A thermal performance standard for residential buildings in warm climates: Lessons learned in Brazil	A.F. Krelling, L.G. Eli, M.S. Olinger, R.M.E.S. Machado, A.P. Melo, R. Lamberts	2023	Apresentar os desafios e aprendizados ao desenvolver o novo método de performance térmica de construções residenciais para a atualização da NBR 15575
Energy efficiency strategies for Brazilian social housing considering a life cycle perspective: Optimisation between thermal autonomy, energy consumption and costs	Maria Andrea Triana, Rayner Mauricio e Silva Machado, Artur Martins Kamimura, Matheus Körbes Bracht, Ana Paula Melo, Roberto Lamberts	2023	Analisar o custo-benefício considerando o ciclo de vida (50 anos) para diferentes estratégias de eficiência energética em tipologias de habitações de interesse social

2.3. Eficiência Energética no cenário atual

Oliveira, *et al.* (2015) investigaram as diferenças entre o método prescritivo e o método simulacional do antigo RTQ-R e avaliaram a eficácia do sistema de paredes de concreto nas oito Zonas Bioclimáticas brasileiras. O estudo aponta que paredes de concreto têm sido utilizadas em projetos no país, não importando o clima, mesmo que não atendam aos requisitos mínimos da norma brasileira. Para o estudo, utilizaram uma planta de Habitação de Interesse Social multifamiliar construída em diversas cidades brasileiras com paredes de concreto de 10cm, entre outras propriedades detalhadas no estudo. Foram testadas outras materialidades como o concreto com vermiculita e o concreto com EPS como alternativa para a envoltória. O estudo mostrou que o método prescritivo do RTQ-R era mais rígido e apresentava resultados piores de classificação (“C” em geral), enquanto o método simulacional apresentava melhores resultados, onde construções com paredes de concreto só conseguem ser aprovadas com o desempenho médio a superior por este método, sendo elas paredes de concreto com isolamento em EPS. Os autores indicaram a importância de serem realizadas pesquisas relacionadas à performance térmica de paredes de concreto usadas em diferentes partes do país.

Ainda em 2015, Triana, Lamberts e Sassi realizaram um estudo para definir modelos de projetos representativos das construções no Brasil através do setor de Habitação de Interesse Social, em específico o programa Minha Casa Minha Vida (MCMV), aproveitando para avaliar a eficiência termoenergética dos mesmos considerando duas ZBs (ZB3 e ZB8). O estudo foi feito através de uma caracterização de HIS de acordo com o censo de 2010, separando as tipologias por renda. Foram construídos modelos representativos das faixas de renda estudadas e então foi realizada a simulação da sua eficiência energética. O estudo concluiu que casas representam 85% de todas as habitações do Brasil, e apartamentos representam 12,5%. A casa desanexada foi a tipologia mais comum entre famílias com renda até 3 salários-mínimos (35%), enquanto apartamentos em H com 4 a 5 pavimentos representam 29% e casas geminadas térreas e duplex cerca de 10%. O modelo representativo de casas desanexadas construído apresenta pior performance para o verão, embora os outros modelos representativos das outras tipologias apresentem classificações médias a baixas. Apartamentos de cobertura apresentam classificação (D), pior que apartamentos térreos ou intermediários (C), por conta da falta de isolamento na cobertura. Os autores destacam que para a faixa de menor renda, há uma tendência de priorizar os custos financeiros sem considerar benefícios a longo termo. É apontado que os estudos publicados não refletem as construções atuais do MCMV e que, projetos representativos do setor podem beneficiar pesquisas futuras de simulações de eficiência energética e assim informar as políticas públicas.

O orçamento limitado disponível para o significativo número de casas que devem ser construídas normalmente resulta em baixa qualidade construtiva e desempenho térmico, e a falta de medidas de eficiência energética (Triana, Lamberts, Sassi, 2015).

Invidiata e Ghishi (2016) avaliaram os efeitos futuros das mudanças climáticas na demanda de energia para aquecimento e resfriamento em uma construção residencial unifamiliar brasileira em Belém, Curitiba e Florianópolis. Foram testadas diferentes estratégias passivas para mitigar os efeitos das mudanças climáticas na demanda de energia. Dados climáticos futuros foram gerados pelos autores no CCWorldWeatherGen a partir de arquivos de 1961-1990 para 2020, 2050 e 2080, considerando o cenário de média a alta emissão de carbono. Foram feitas simulações no EnergyPlus, considerando o método do RTQ-R com uma casa desanexada unifamiliar, onde foram analisadas as estratégias passivas: baixa absorvância, isolamento térmico e sombreamento. Os arquivos climáticos gerados mostraram um aumento de temperatura, redução da umidade e aumento da radiação horizontal nas três cidades, além de um aumento das horas em desconforto por calor de 219%, 218% e 106% para Curitiba, Florianópolis e Belém respectivamente, o que representa um aumento da demanda de energia para resfriamento em todas as cidades. As estratégias que apresentaram maior aumento de horas de conforto no projeto, foram baixa absorvância da envoltória, sombreamento nas aberturas e isolamento térmico, exceto em Belém. Em 2050 e 2080 as estratégias não vão providenciar conforto necessário por conta do aumento na temperatura externa, necessitando de sistemas de ventilação artificial, embora as estratégias irão permitir menor demanda de energia para resfriamento, sendo 6% ao invés de 112% em Belém, 93% ao invés de 185% em Florianópolis e 45% ao invés de 136% em Curitiba. O estudo conclui que os arquivos climáticos recomendados pela norma brasileira, podem afetar os resultados da performance termoenergética das construções e encoraja a pesquisa por estratégias passivas a fim de melhorar o conforto térmico em residências e minimizar o consumo de energia nos cenários futuros.

Os estudos analisados mostraram que as condições climáticas futuras irão mudar a demanda de energia para aquecimento e resfriamento das construções. A demanda de energia para aquecimento vai diminuir ao longo dos anos e a demanda por energia para resfriamento irá aumentar devido ao aquecimento global. A aplicação de medidas de mitigação em construções serão essenciais para reduzir o impacto das mudanças climáticas. (Invidiata, Ghishi, 2016).

Triana, Lamberts e Sassi (2018) analisaram diferentes materiais e soluções projetuais no desempenho termo energético de HIS considerando as mudanças climáticas nas cidades de São Paulo e Salvador através de simulações utilizando arquivos climáticos gerados no CCWorldWeatherGen para 2020 e

2050 (foi considerado um período de aproximadamente 50 anos, representando o tempo de vida de uma construção) a partir dos arquivos disponíveis de 1961-1990. A simulação foi feita utilizando o EnergyPlus usando a metodologia do sistema de etiquetagem brasileira considerando uma residência desanexada térrea representativa da faixa 1 do programa MCMV. Foram testados materiais para cobertura e paredes que apresentavam maior resistência térmica, diferentes absorptâncias solares e o uso de isolamento, além de sombreamento para as aberturas dos quartos ou todos os ambientes, e aberturas com 45% de ventilação e 90% de ventilação. Os arquivos climáticos gerados mostraram um aumento de 2 °C a 3°C em meses entre maio e setembro em São Paulo, uma queda da umidade de 2,4% e um aumento na radiação horizontal de 3,13 Wh/m², e um aumento médio geral de 2 °C para Salvador, uma queda de 1,3% da umidade e um aumento de 5,24 Wh/m² da radiação horizontal. Os melhores desempenhos térmicos em São Paulo foram devido a mudanças nas paredes, com maior capacidade térmica e isolamento (tijolo e concreto) e baixa absorptância solar para paredes externas. Paredes de madeira e de concreto sem isolamento apresentaram piores resultados. Em Salvador, os projetos que demonstraram melhor performance foram os que apresentavam baixa absorptância solar das paredes externas, cobertura com baixa absorptância solar e/ou isolamento e sombreamento em todas as aberturas. Os autores enfatizam a defasagem dos arquivos climáticos disponíveis e a demanda por mais pesquisas do uso de energia durante o tempo de vida das construções, a fim de ajudar a priorizar a seleção de soluções construtivas para habitações de interesse social.

Devido a longa vida do uso de construções, mudanças no clima podem influenciar a demanda de energia para aquecimento e resfriamento e consequentemente as emissões de gases do efeito estufa por construções (...) os arquivos climáticos utilizados datam de 1961-1990, ou mais recentes, de 1976-2005, o que não refletem as tendências das mudanças climáticas. (Triana, Lamberts, Sassi, 2018).

Fossati *et al.* (2016) analisaram e discutiram sistemas de etiquetagem ao redor do mundo e do Brasil através de uma extensa revisão bibliográfica. Os autores identificaram que o RTQ-R leva em consideração estratégias passivas, evitando o uso de condicionamento artificial para reduzir o consumo energético por conta da cultura e climas brasileiros. Entretanto, o cálculo de regressão linear não é o melhor para lidar com variáveis não lineares. Também foi verificado na época que existiam poucas organizações de inspeção para verificar as construções e seu nível de eficiência energética, e que não havia incentivo governamental para a etiquetagem de residências, nem mesmo programas como o MCMV e o Selo Casa Azul estavam relacionados ao programa de etiquetagem, por esses fatores o selo não havia sido difundido e aplicado de forma extensiva até 2016. Devido à baixa quantidade de etiquetas aplicadas até o estudo, era difícil identificar o impacto da etiquetagem no Brasil

em comparação a outros países. Os autores recomendam que a etiquetagem seja mandatória para projetos de interesse social e financiados pelo governo, mas que para tal é preciso realizar uma revisão para tornar o método mais aceito e viável economicamente.

Moreno, Morais e Souza (2017) discutiram como a propagação de programas de HIS em diferentes locais e contextos afetam o conforto térmico do usuário, utilizando os métodos prescritivo e o simulacional do RTQ-R, NBR 15575 e NBR 15220-3 aplicados em uma planta unifamiliar do PMCMV nas 8 ZBs do Brasil. Foram testadas vedações verticais de bloco de concreto, de bloco cerâmico e paredes de concreto maciço. Os autores identificaram que as paredes com blocos cerâmicos apresentaram maior classificação, sendo as mesmas com argamassa interna e externa as que apresentaram melhores resultados, entretanto, nenhuma combinação de parede-cobertura apresentou desempenho térmico maior que C, nem mesmo no método simulacional. Os autores afirmam que mesmo atendendo os requisitos mínimos da norma, não é levado em consideração a importância dos materiais “em relação ao ambiente nem como o conforto térmico é afetado em cada tipo de clima” (Moreno; Morais; Souza, 2017). Os autores identificaram que mudanças no PMCMV devem considerar impactos em relação ao consumo de energia das edificações devido sua amplitude territorial e financeira. Para tal, sugerem que sejam pesquisadas informações sobre a performance dos sistemas construtivos de paredes e coberturas em todas as ZBs do país e que os dados sejam apresentados de forma prática e didática a fim de serem aplicados aos planos governamentais de HIS, assim como na própria indústria da construção Brasileira.

Está claro que as casas construídas pelo programa social estudado não consideram as particularidades de cada Zona Bioclimática. Cada microclima necessita de tipos específicos de paredes e coberturas para manter um conforto térmico satisfatório e que precisa ser estudado antes de ser reproduzido em larga escala. (Moreno, Morais, Souza, 2017).

Tubelo, *et al.* (2018) analisaram diferentes combinações de envoltória levando em consideração seu custo-benefício nas cidades de Curitiba, São Paulo e Porto Alegre através de simulações em uma planta modelo de casa desanexada (representando a tipologia mais comum mesmo em diferentes faixas de renda no Brasil). Foram levados em conta o custo de construção local do Sul e Sudeste do país. A envoltória mais utilizada no Brasil (vidro simples, blocos cerâmicos sem isolamento e cobertura inclinada com alumínio) apresentou o segundo pior desempenho em todas as regiões estudadas. O melhor desempenho foi de paredes mais isoladas e vidros com baixa transmitância térmica. A melhor combinação custo-benefício para todas as cidades apresentou em comum paredes de bloco cerâmico oco com isolamento térmico com valor de transmitância térmica (U) de 0,34 W/m²K. A adição de isolamento térmico nas paredes de bloco cerâmico oco (mantendo os outros

componentes) apresentou um aumento de 10% no custo inicial e um aumento de 42% no conforto térmico do projeto estudando, tendo uma estimativa de 5, 17 e 11 anos de recuperação dos gastos respectivamente para Curitiba, São Paulo e Porto Alegre. Os autores apontam que poucos estudos consideram o uso de alto isolamento térmico e custo-benefício de propostas de alta performance.

Devido às limitações de custo, estas casas (MCMV) normalmente são construídas usando designs repetitivos, pouca inovação, baixa qualidade de construção e sem considerações com o contexto ou clima local. (Tubelo, *et al.*, 2018).

Eli, *et al.* (2021) identificaram e quantificaram a contribuição à classificação de eficiência energética de diferentes estratégias projetuais em uma edificação unifamiliar térrea, aplicando diferentes estratégias construtivas a uma planta modelo representativa da faixa de baixa renda do PMCMV em simulação no EnergyPlus utilizando o método da INI-R nas cidades de Florianópolis e Palmas, equivalentes às ZBs 3 e 7. Os autores foram capazes de observar a contribuição de cada estratégia de forma isolada, e quando aplicadas em conjunto, foram capazes de reduzir o consumo da edificação em mais da metade da referência, sendo o sombreamento das janelas e a redução da absorvância da envoltória, as estratégias que isoladamente apresentam maior ganho percentual de horas de ocupação dentro da faixa de temperatura de conforto e redução da carga térmica total, obtendo classificação B na ZB3. Os autores apontam que a análise do desempenho térmico anteriormente a determinação da envoltória auxilia na tomada de decisões em relação às medidas de eficiência energética a serem aplicadas no projeto.

As edificações são sujeitas a fenômenos termofísicos complexos, com constantes trocas de calor por convecção, radiação e condução com o meio externo e entre os ambientes internos (...). Essas trocas de calor influenciam no conforto térmico dos ocupantes, portanto, análises que visam o desempenho térmico de edificações podem auxiliar na redução do consumo de energia elétrica voltada à climatização das residências. (Eli, *et al.*, 2021).

Krelling, *et al.* (2023) apresentaram um trabalho mostrando os desafios e aprendizados ao desenvolver o novo método de performance térmica de construções residenciais para a atualização da NBR 15575. Foi realizada uma pesquisa de métodos diversos no mundo a fim de entender e levantar perguntas de como otimizar a NBR 15575. Para responder às perguntas, foram realizadas simulações no EnergyPlus com uma planta modelo de residência unifamiliar desanexada, representativa de baixa-renda, para testar e avaliar os métodos e resultados. Foram estudados também os diferentes modos de ocupação nas classes A e D-E das regiões Nordeste e Sul do Brasil, além de uma ocupação durante a quarentena. Os autores identificaram que o antigo método da norma

não considerava a carga térmica de ocupantes ou eletrodomésticos, e que o comportamento dos ocupantes é de grande importância para o método por sua capacidade de modificar o equilíbrio térmico do edifício. O comportamento dos ocupantes ainda é muito simplificado na simulação de desempenho do projeto na atualização da norma, podendo futuramente disponibilizar diferentes tipos de ocupação de acordo com critérios sociais, mas que o modelo agora adotado é um avanço do método. É aconselhado pelos autores estabelecer uma base de dados padrão de arquivos meteorológicos a fim de ter maior consistência de resultados. Os autores identificaram que são necessários múltiplos indicadores de desempenho a fim de possibilitar uma avaliação minuciosa do comportamento térmico do projeto. Foi identificado que as condições de temperatura máxima e mínima do edifício diminuem significativamente quando atingido o desempenho mínimo (C).

No entanto, mesmo que o projeto de um edifício seja capaz de eliminar as condições térmicas mais perigosas, espera-se que a frequência dos extremos climáticos aumente. Assim, além de promover um bom desempenho térmico em condições típicas, é cada vez mais necessário planejar condições meteorológicas adversas e abordar a resiliência térmica dos edifícios. (Krelling, *et al.*, 2023).

Krelling *et al.* (2023) apontam que a atualização da NBR 15575 ainda não é desenvolvida para analisar a resiliência dos projetos, mas o método pode ser uma base para ser expandido. A nova NBR 15575 agora é aplicada pelo Código de Defesa do Consumidor, tornando sua aplicação obrigatória para novos edifícios residenciais em todo o país. Os autores apontam que a norma ainda pode ser melhorada, considerando climas de contextos urbanos, como ilhas de calor e mudanças na direção dos ventos, além de custo-benefício e mais perfis de ocupação da construção.

Triana, *et al.* (2023) analisaram o custo-benefício considerando o ciclo de vida de uma edificação (50 anos) para diferentes estratégias de eficiência energética em tipologias de HIS. Foram simuladas 43 estratégias de eficiência energética, isoladas e combinadas, de acordo com a NBR 15575:2021 em duas tipologias representativas de HIS, casa unifamiliar desanexada e apartamentos multifamiliares em H, comparando o modelo real com o virtual, que apresentava paredes de concreto 10cm, $U = 4,4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ e $\alpha = 0,6$. Os custos iniciais e de operação foram analisados para identificar o custo-benefício ao longo dos 50 anos delimitados. A estratégia com maior frequência entre os melhores casos nas residências unifamiliares foi a parede dupla de madeira com isolamento, com menor custo no ciclo de vida, seguido de telhado sanduíche de metal com baixa absorvância, isolamento e câmara de ar e teto de madeira. Nas habitações multifamiliares, os melhores resultados de parede foram os que apresentavam de bloco cerâmico de 14cm seguido do bloco de concreto 19cm. Os autores destacam que a aplicação de eficiência energética nas edificações está cada vez mais necessária, especialmente nas HIS, pois, neste setor, significa bem-

estar e conforto para os residentes, resiliência das construções em vista das mudanças climáticas e menor custo e impacto ambiental com as construções a longo termo para o país.

2.4. Etiquetagem Inmetro de eficiência energética no Brasil e cenários futuros

Para compreender a importância e aplicação da eficiência energética no Brasil, é necessário entender seu histórico. Dessa forma, será abordado o sistema de etiquetagem do PBE Edifica, que une o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), que utiliza a Etiqueta Nacional de Conservação da Energia (ENCE), ao Procel Edifica, que busca incentivar a redução do consumo de energia nas edificações brasileiras.

O PBE foi iniciado em 1984, através do INMETRO, em busca de criar um programa de avaliação da conformidade com foco no desempenho, contribuindo com um melhor uso de energia no Brasil por meio da compreensão da eficiência energética dos equipamentos disponibilizados no mercado nacional. Porém, apenas em 2005 foi criada a CT Edificações, uma Comissão Técnica com o objetivo de discutir e definir a obtenção das ENCEs para as edificações, que deu origem ao PBE Edifica.

Em 2009 e 2010 foram desenvolvidos os Regulamentos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética para Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C) e de Edificações Residenciais (RTQ-R), documentos que permitem a obtenção da etiqueta ENCE pelo INMETRO. Os mesmos foram atualizados e complementados em 2012 e 2013, juntamente com o lançamento dos Requisitos de Avaliação da Conformidade para Eficiência Energética de Edificações (RAC) e os manuais de aplicação dos RTQs.

Recentemente, em 2021 e 2022, houve a atualização dos RACs e a reformulação dos RTQs para as Instruções Normativas Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C) e de Edificações Residenciais (INI-R). Esta reformulação do método de cálculo de eficiência energética ocorreu com o Procel Edifica em conjunto ao Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (CB3E) em busca de uma modernização do método e uma clara aproximação do mesmo com a NBR 15575, atualizada em 2021. Ainda, desde novembro de 2024, todas as novas ENCEs de projeto a serem emitidas devem estar de acordo com a portaria de 2022. Tem-se como prazo de que após 2029 todas as ENCEs emitidas para edifícios construídos sejam através das INIs, pois em 2029 os RTQs serão revogados.

Ainda, está em avaliação a resolução nº 3 do Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética (CGIEE) que define classificações mínimas

aceitas para edificações residenciais, comerciais, de serviços e públicas. Sendo aprovada, serão exigidas minimamente ENCEs “A” para edificações públicas e federais a partir de 2027 e, após 8 anos (2035), serão exigidas certificações Energia Quase Zero (NZEB). Para as edificações comerciais, de serviços e residenciais, além de habitações de interesse social (HIS) serão exigidas ENCEs no mínimo “C”, dentro de cinco anos (2030). A resolução ainda está em consulta pública no endereço online (www.gov.br/participamaisbrasil/https-consultas-publicasmmegovbr-home1) e pode sofrer alterações, mas é visível o interesse e pertinência da implantação de exigência da Etiqueta Nacional de Conservação da Energia (ENCE) para edificações públicas, de serviço, comerciais e residenciais.

Portanto, tendo em vista o cenário atual envolvendo eficiência energética no país, estudos que identifiquem estratégias passivas para a envoltória, como visto em muitos dos estudos destacados, e que compreendam o funcionamento e a adequabilidade dos materiais utilizados na envoltória são de grande importância para auxiliar a mitigação e resiliência das edificações brasileiras frente o atual cenário de alto consumo de energia e cenários futuros, onde é esperado aumento significativo da demanda energética e temperatura média global. Além disso, a obrigatoriedade da etiquetagem do Inmetro a partir de 2030 para edifícios residenciais como um todo, enfatiza a importância de uma melhor compreensão do comportamento térmico das materialidades utilizadas nas construções.

Dessa forma, este trabalho irá investigar a influência e adequabilidade do comportamento termo energético que as diversas composições catalogadas apresentam no cálculo e classificação de eficiência energética em todas as zonas bioclimáticas brasileiras.

3. METODOLOGIA DE PESQUISA

Neste capítulo são descritas e apresentadas a ferramenta da INI-R, o método para embasar o recorte abordado, a planta utilizada, as duas fases realizadas no estudo, os dados inseridos na ferramenta utilizada e o processo de análise para a realização dessa pesquisa. O passo a passo geral se dá pelo fluxograma na Figura 2 abaixo. Cada passo está descrito mais detalhadamente nos capítulos e subcapítulos deste trabalho enumerados em cada caixa do fluxograma.

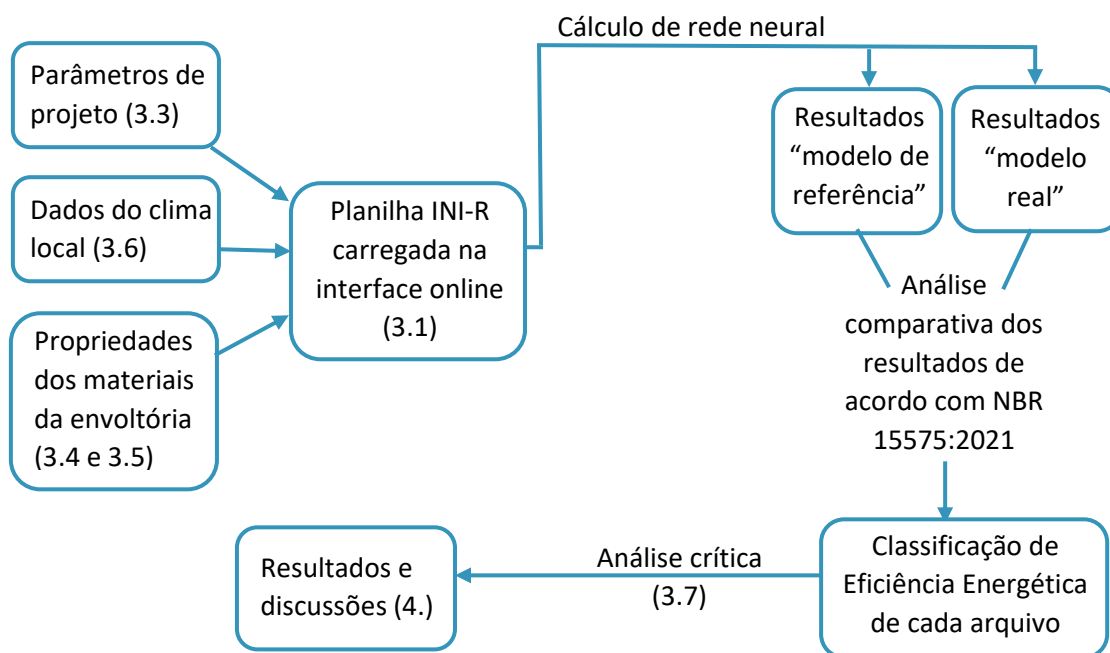


Figura 2: Fluxograma geral de metodologia. Fonte: autoria própria.

3.1.Ferramenta

O presente trabalho utiliza de uma metodologia de avaliação quantitativa, baseada na ferramenta de avaliação de Eficiência Energética do Inmetro, a Instrução Normativa Inmetro para Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (INI-R).

Publicada pela primeira vez no final de 2022⁵, a INI-R apresenta três métodos de estimativa do consumo de energia, podendo utilizar o prescritivo, o simplificado e o de simulação. O prescritivo obtém a classificação da envoltória por meio da comparação das propriedades térmicas dos sistemas construtivos e das características geométricas dos ambientes de permanência prolongada (APPs) em relação aos valores de referência do procedimento simplificado descrito na ABNT NBR 15575:2021, sendo possível assim obter classificação no máximo C. Para uma classificação mais elevada, é necessário avaliar a edificação pelo método simplificado ou o de simulação. Em ambos os métodos, a classificação é obtida com base no percentual de redução do consumo de energia primária, porcentagem de horas em conforto e temperaturas de operação dos ambientes, que se dão através da comparação do consumo do “modelo real” (projeto ou edificação existente a ser avaliada) com a mesma edificação, porém com dados e características conforme definidos na referência da ABNT NBR 15575-1:2021, chamado de “modelo de referência” (INMETRO, 2023).

⁵ Desde sua publicação inicial, em 2022, a INI-R já passou por duas revisões, a primeira em dezembro de 2023 e a segunda em novembro de 2024. Esta dissertação utilizou, em seu desenvolvimento, a versão de dezembro de 2023.

A diferença para o uso dos métodos está principalmente na complexidade da geometria do projeto, sendo o método simplificado sugerido para edificações com geometrias mais comuns e simples, que “abrange boa parte das soluções arquitetônicas mais difundidas em edificações residenciais” (INMETRO, 2022). Em um estudo publicado em 2023, Rosa *et. al* identificam que o método simplificado não é capaz de identificar recuos em um mesmo APP, tendo classificações diferentes por conta da nova variável que considera o sombreamento das fachadas. O estudo aponta que o método simplificado não apresenta a possibilidade de sombreamento de uma porção específica da fachada, limitando as geometrias que podem ser utilizadas neste método.

Ainda assim, o método simplificado apresenta facilidade de acesso e manuseio, sendo possível utilizar a interface online direta da página do PBE Edifica (<https://pbeedifica.com.br/redes/residencial/>)⁶ ou realizar o *download* de um arquivo de planilha disponibilizado no mesmo endereço online para a inserção dos dados exigidos para a avaliação, para posteriormente fazer *upload* no site. A planilha disponibilizada permite a permanência do arquivo com os dados inseridos e facilita alterações e correções posteriores. A planilha apresenta descrições claras e diretas dos dados necessários a serem inseridos em cada célula, possibilitando uma fácil compreensão e levantamento dos mesmos. No site do PBE Edifica estão também disponibilizados manuais para auxiliar o manuseio e compreensão da ferramenta (<https://pbeedifica.com.br/inirmanuais>).

O cálculo é feito através da página na web, por meio de rede neural, devolvendo dados como o percentual de horas de ocupação dentro da faixa de temperatura operativa (PHFT), consumo de carga térmica por ambiente de permanência prolongada (APP) para refrigeração (CgTR), aquecimento (CgTA) e a carga térmica total (CgTT) em kWh/ano, temperaturas operativas (To) máxima e mínima em °C, gerando a classificação de envoltória. Também é possível avaliar o sistema de aquecimento de água pela inserção desses dados, possibilitando a classificação final de eficiência energética da unidade habitacional (UH), além de todos os consumos (para resfriamento, aquecimento e aquecimento de água) do modelo de referência e suas reduções percentuais da condição de referência para a condição real. Se não forem inseridos os dados de aquecimento de água, não é possível obter a classificação final da UH, porém a classificação da envoltória permanece sendo disponibilizada.

As classificações obtidas dependem da análise de todos os dados devolvidos pela interface, analisando em conjunto o PHFT, a CgTT e as Tomáx e Tomin, em relação ao meta-modelo de referência. As condições para as classificações variam de acordo com as ZBs, a tipologia analisada e os

⁶ A interface online passou por uma alteração em 2024, retirando a possibilidade de preenchimento diretamente na página da web, mantendo apenas o meio de cálculo por download de planilha disponibilizada. Devido as mudanças, a planilha preenchida neste estudo não segue o modelo atualmente disponível no site, pois o estudo já estava em fase de finalização quando feita a alteração. Ainda assim, alguns ensaios empíricos (não publicados), realizados academicamente, sobre outras unidades habitacionais, utilizando ambas as versões, não apresentaram variações significativas nos resultados.

resultados, sendo descritas com maior clareza e detalhes no item 8.2.1 da portaria INI-R (2022). Desta forma, este trabalho utilizará o método simplificado da INI-R, devido ao seu fácil acesso, manuseio e abrangência, além de contribuir na validação da ferramenta.

3.2. Recorte

O recorte do trabalho se iniciou a partir da compreensão da existência de um padrão construtivo no setor residencial brasileiro, onde quase 90% dos domicílios apresentam a mesma solução construtiva de paredes (IBGE, 2020), em um país de tamanho continental com uma vasta diversidade climática. A padronização por si já é de grande interesse à pesquisa, pois vai contra o indicado pelas pesquisas existentes na área de conforto térmico em arquitetura, como os trabalhos apontados no item 2.2 deste trabalho.

Entretanto, devido ao questionamento de se a cobertura não apresentaria maior potencial de redução de carga térmica e de melhora de classificação de eficiência energética da envoltória, devido à sua exposição mais direta e duradoura ao sol, foi realizado um ensaio preliminar para compreender o impacto que as paredes e a cobertura apresentam na envoltória estudada.

Foram testados separadamente a envoltória alterando apenas as paredes, e apenas a cobertura. Nestes testes, foram elaborados 5 arquivos para cada elemento variado (paredes (par) e cobertura (cob)), sendo estes detalhados na Tabela 3:

Tabela 3: Propriedades dos arquivos elaborados Fonte: autoria própria.

Identificação do arquivo	Detalhes	Parede		Cobertura	
		U (W/m ² K)	CT (KJ/m ² K)	U (W/m ² K)	CT (KJ/m ² K)
I- Controle	Arquivo que segue os padrões de envoltória da NBR 15575:2021, sendo utilizado como a edificação de referência nos cálculos comparativos	4,4	220	ZBs 1 a 7	
				2,06	228,6
				ZB 8	
				0,86	229,74
II- U alto e CT alto	Arquivo igual ao I, excetuando a U e CT, onde são adotados os valores limites do método simplificado da INI-R e indicados nesta tabela	4,4	440	3,8	550
III- U alto e CT baixo		4,4	26	3,8	25
IV- U baixo e CT baixo		0,45	26	0,45	25
V- U baixo e CT alto		0,45	440	0,45	550

Os arquivos foram testados nas oito zonas bioclimáticas de acordo com o item 3.6. A planta utilizada está detalhada no item 3.3. Após realizados os testes, foram comparados cada arquivo com seu respectivo arquivo de controle

(arquivos II, III, IV e V de parede com o arquivo I de parede, e arquivos II, III, IV, e V de cobertura com o arquivo I de cobertura).

Os resultados obtidos na Figura 3 mostram o percentual de redução de consumo de carga térmica total (RedCgTT) ao se adotarem valores limites do método para a cobertura e paredes, testados isoladamente. É possível perceber que a alteração na composição das paredes apresenta maior potencial de redução de consumo na maioria dos casos e ZBs (excetuando-se apenas o caso IV nas zonas 3, 5, 6 e 7, onde a cobertura apresenta uma RedCgTT de até 4,9 pontos percentuais a mais que a parede). Isto se deve ao modelo de referência utilizado para a paredes, a parede de concreto maciço (10cm), conhecidamente por sua baixa adequabilidade, em especial nas zonas mais quentes (ZB8).

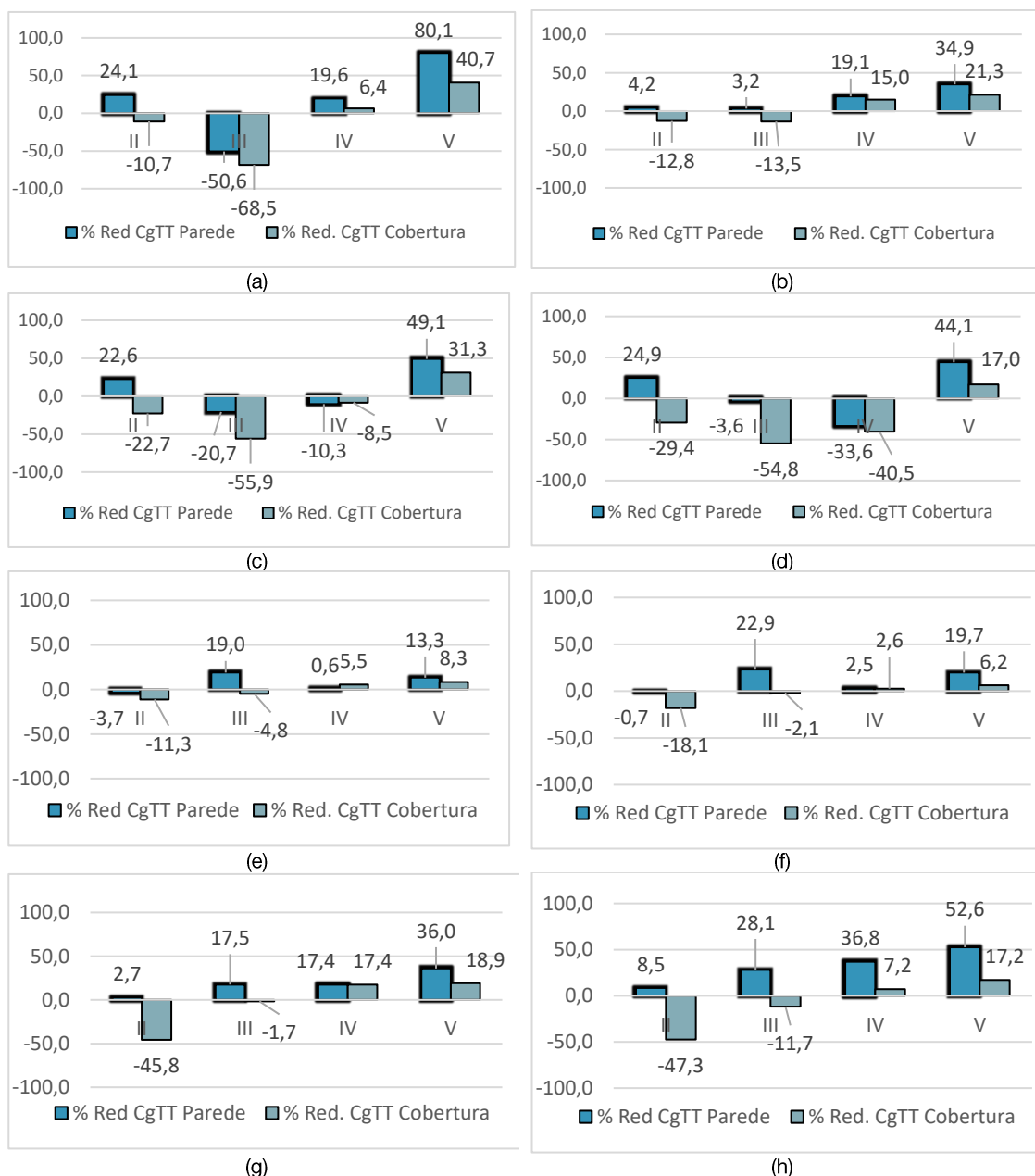


Figura 3: Comparação de potencial de RedCgTT entre paredes e coberturas para as 8 ZBs: (a) ZB1; (b) ZB2; (c) ZB3; (d) ZB4; (e) ZB5; (f) ZB6; (g) ZB7; (h) ZB8. Fonte: autoria própria.

Desta forma, é possível compreender que as paredes apresentam um potencial de RedCgTT maior do que a cobertura, considerando os valores limites adotados. Portanto, definiu-se de forma substancial o recorte deste trabalho: as vedações verticais opacas (paredes).

3.3. Planta modelo

Foi adotada para o cálculo uma planta da tipologia de maior representatividade, a casa desanexada unifamiliar (85% de todas as habitações do Brasil e 35% entre famílias com renda até 3 salários-mínimos), com dois quartos, um banheiro, uma sala e cozinha integradas (Triana, Lamberts, Sassi, 2015). Foi adotada a planta do estudo de Moreno, Morais e Souza (2017), devido à disponibilidade das dimensões dos ambientes e aberturas conforme ilustrado na Figura 4. O pé direito é de 2,5m e a altura da câmara de ar do telhado é igual a 0,50m (Triana, Lamberts e Sassi, 2015).

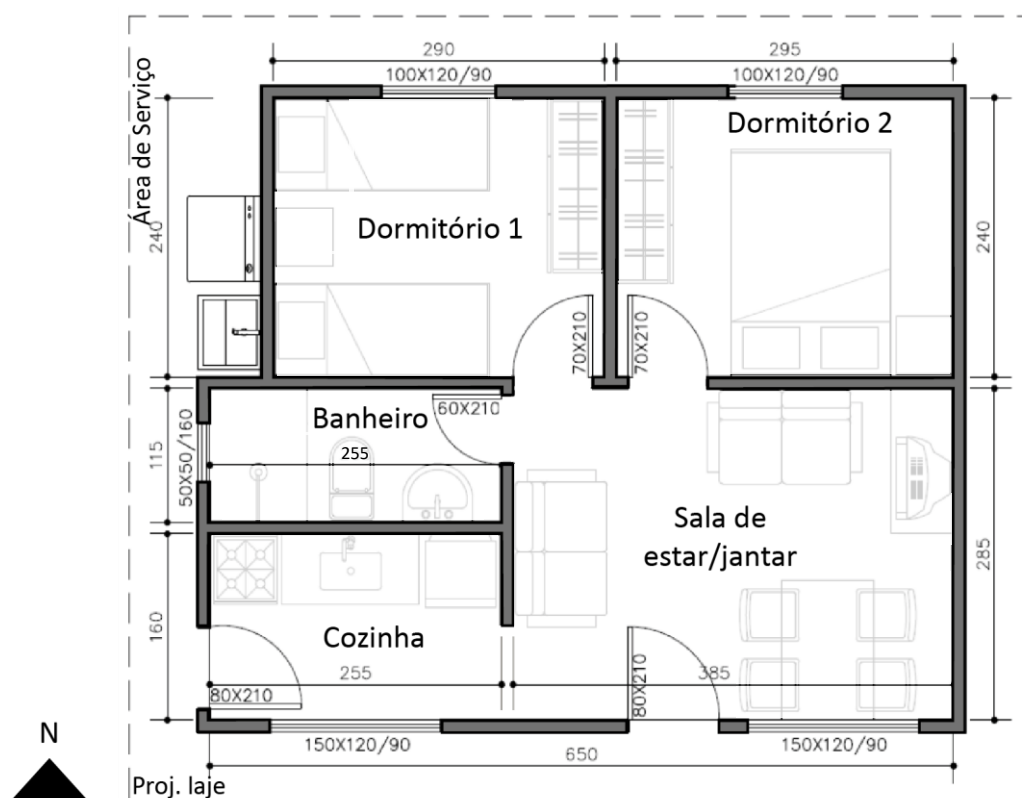


Figura 4: Planta do projeto representativo sem escala. Modificado de: Moreno, Morais, Souza, 2017.

3.4. Ensaaios teóricos – limites de U e CT

Nesta etapa foram testadas quatro combinações entre os limites (inferiores e superiores) dos parâmetros transmitância térmica (U) e capacidade térmica (CT) aceitos pelo método simplificado da INI-R⁷. Deste modo, foi possível

⁷ Os ensaios adotam valores máximos e mínimos permitidos pela ferramenta e não são atrelados a uma composição específica existente.

interpretar preliminarmente as respostas das composições de vedação referentes aos extremos de U e CT diante das diferentes ZBs brasileiras.

A partir da planilha disponibilizada na interface da INI-R foram elaborados cinco arquivos para cada ZB (ver detalhamento na Tabela 4). Em todos os arquivos, foram adotados os valores e parâmetros de referência estipulados na NBR 15575:2021. Da mesma maneira, o tamanho das aberturas (ventilação e iluminação) e o valor de absorvância (α) (estipulado em 0,58) seguiram as determinações da norma citada, permanecendo inalterados em todos os arquivos e permitindo a leitura da influência dos parâmetros ligados às composições materiais, isto é, U e CT apenas. Em particular, somente os arquivos relacionados à ZB8 foram elaborados com valores referentes à cobertura diferentes dos demais, conforme estipulado no modelo de referência..

Tabela 4: Especificações dos arquivos testados (I a V) para avaliação dos limites de U e CT para cada ZB, associando-os a composições de parede reais equivalentes. Fonte: autoria própria.

Arquivo	U (W/m ² K)	CT (kJ/m ² K)	Composição de vedação vertical real equivalente	U (W/m ² K)	CT (kJ/m ² K)
I Controle*	4,4	220	Parede de concreto maciço de 10cm	4,4	220
II U alto / CT alto**	4,4	440	Parede de concreto maciço 16cm	3,8	384
III U alto / CT baixo**	4,4	26	Parede de <i>steel frame</i> com placas cimentícias (interna e externa de 1cm) e câmara de ar $\leq$ 5cm	2,8	32
IV U baixo / CT baixo**	0,45	26	Parede de <i>steel frame</i> com placa de gesso interna (1,25cm), lâ de vidro (7,5cm), placa cimentícia externa (1cm)	0,48	31,4
V U baixo / CT alto**	0,45	440	Parede dupla de bloco de concreto (14x19x39) com revestimento interno e externo em argamassa de 2,5cm, lâ de rocha 4cm	0,7	387

* Arquivo com valores da envoltória estipulados para o modelo de referência da NBR 15575:2021.

** Arquivos II a V variando apenas os parâmetros U e CT das paredes externas nos limites máximos e mínimos da INI-R conforme indicado.

Por fim, os resultados passam pelo cálculo de verificação de classificação da envoltória conforme determinado na PORTARIA INMETRO 309/2022 item 8.2.1. Desta forma, é possível analisar os resultados por seus valores reais e as classificações obtidas. Ainda, de acordo com as indicações do método prescritivo da NBR 15575:2021, o arquivo V apresenta o melhor dos casos possíveis de ser adotado em todas as ZBs do país.

3.5.Avaliação das composições de vedação reais

Nesta etapa metodológica propôs-se a investigação das composições mais usuais de vedações verticais utilizadas pelo Programa Minha Casa Minha Vida

(PMCMV)⁸. Foram elas: alvenaria estrutural em blocos de concreto, alvenaria estrutural em blocos cerâmicos, alvenaria de vedação com tijolo cerâmico e paredes maciças de concreto (Vasquez, 2017, pgs. 47 a 49), conforme

Tabela 5. Cabe ressaltar que o sistema de paredes maciças de concreto equivale ao arquivo de controle, portanto, não apresenta contribuição extra na classificação de eficiência energética.

Adicionalmente, foram avaliados os comportamentos e contribuições na classificação de eficiência energética de composições disponíveis no Manual RAC e no site do projetEEE (

Tabela 6), dentro dos limites máximos e mínimos da ferramenta, a fim de identificar qual composição apresenta melhor contribuição em cada zona além da identificada nos ensaios teóricos. Desta forma, foram avaliadas as composições descritas em detalhe a seguir em todas as oito ZBs do país.

Tabela 5: Composições mais utilizadas no PMCMV. Fonte: Almeida, 2019, p.83.

Sistema	Dimensões	Características	U (W/m²K)	CT (kJ/m²K)
Bloco de concreto estrutural	(14x19x39)	Argamassa de revestimento interno e externo 2,5cm	2,68	245
Bloco cerâmico estrutural	(14x19x29)	Argamassa de revestimento interno e externo 2,5cm	1,83	161
Bloco cerâmico de vedação	(12x19x19)	Argamassa de revestimento interno e externo 2,5cm	2,13	155
Parede maciça de concreto	(10cm)	Moldadas <i>in loco</i>	4,4	220

Tabela 6: Composições estudadas advindas do Manual RAC e site projetEEE. Fonte: Manual RAC e projetEEE.

Sistema	Dimensões	Características	U (W/m²K)	CT (kJ/m²K)
Steelframe	7,25cm	Placa de gesso interna (1,25cm), câmara de ar (>5cm), placa cimentícia externa (1cm)	2,56	26
	9,75cm	Placa de gesso interna (1,25cm), lã de vidro (7,5cm), placa cimentícia externa (1cm)	0,48	31,4
Bloco de concreto	(9x19x39)	Gesso interno (1,25cm), poliestireno expandido (EPS) (3cm), argamassa de revestimento interno e externo 2,5cm	0,9	220,7
		Gesso interno (0,2cm) e argamassa de revestimento externo 2,5cm	2,83	159
		Argamassa de revestimento interno e externo 2,5cm	2,72	209

⁸ Programa de habitação de interesse social com o maior orçamento do governo, com o histórico de entrega de mais de 6 milhões de habitações (BRASIL, 2023).

Continuação da Tabela 6.

Sistema	Dimensões	Características	U (W/m²K)	CT (kJ/m²K)
Bloco de concreto estrutural	(14x19x39)	Gesso interno (0,2cm) e argamassa de revestimento interno e externo 2,5cm	2,57	222
		Argamassa de revestimento interno e externo 2,5cm, câmara de ar (5cm) e placa de alumínio composto	0,79	196
		Argamassa de revestimento interno e externo 2,5cm, câmara de ar (5cm), placa melaminica	1,75	214
		Argamassa de revestimento interno e externo 2,5cm, poliestireno expandido (EPS) (8cm), placa melaminica	0,45	218
		Argamassa de revestimento interno e externo 2,5cm, granito 2,5cm	2,62	302
		Gesso interno (1,25cm), poliestireno expandido (EPS) (3cm), argamassa de revestimento interno e externo 2,5cm	0,9	269,6
		Parede dupla, câmara de ar (4cm), argamassa de revestimento interno e externo 2,5cm	1,4	383
		Parede dupla, lâ de rocha (4cm), argamassa de revestimento interno e externo 2,5cm	0,7	387
Bloco cerâmico	(9x9x24)	Sem revestimento	2,93	42
	(9x14x24)	Argamassa de revestimento externo 2,5cm	2,72	98
		Gesso interno (0,2cm) e argamassa de revestimento interno e externo 2,5cm	2,21	115
		argamassa de revestimento interno e externo 2,5cm	2,39	152
		Argamassa de revestimento interno e externo 2,5cm, câmara de ar (5cm) e placa de alumínio composto	0,75	122
		Argamassa de revestimento interno e externo 2,5cm, câmara de ar (5cm), placa melaminica	1,61	121
		Gesso interno (1,25cm), poliestireno expandido (EPS) (3cm), argamassa de revestimento interno e externo 2,5cm	0,8	151,5
		Argamassa de revestimento interno e externo 2,5cm, poliestireno expandido (EPS) (8cm), placa melaminica	0,45	125
		Argamassa de revestimento interno e externo 2,5cm, granito 2,5cm	2,39	210
		Parede dupla, câmara de ar (4cm), argamassa de revestimento interno e externo 2,5cm	1,27	195
		Parede dupla, lâ de rocha (4cm), argamassa de revestimento interno e externo 2,5cm	0,68	199
	(14x9x24)	Bloco deitado sem revestimento	2,35	56
Bloco cerâmico estrutural	(14x19x29)	Argamassa de revestimento externo 2,5cm	2,02	106
		Gesso interno (0,2cm) e argamassa de revestimento externo 2,5cm	1,68	123
		Gesso interno (1,25cm), poliestireno expandido (EPS) (3cm), argamassa de revestimento interno e externo 2,5cm	0,8	160

3.6. Inserção de dados

A INI-R adota dados climáticos de cidades específicas, deste modo, foram selecionadas as capitais representantes das ZBs de diferentes regiões (especificadas na Tabela 7), a fim de representar a pluralidade climática do país⁹. Os dados utilizados para cada ambiente da unidade habitacional (UH) analisada foram descritos na Tabela 8.

Tabela 7: Cidades representantes das Zonas Bioclimáticas brasileiras. Fonte: autoria própria.

Zona Bioclimática	Cidade representante
1	Curitiba (PR)
2	Santa Maria (RS)
3	São Paulo (SP)
4	Brasília (DF)
5	Campos dos Goytacazes (RJ)
6	Goiânia (GO)
7	Teresina (PI)
8	Manaus (AM)

Os coeficientes de eficiência energética do sistema de condicionamento de ar (CA) para refrigeração e para aquecimento foram os mesmos em todos os ambientes e iguais ao modelo de referência, respectivamente 3,5 e 3,47. Como a residência é unifamiliar e térrea, todos os ambientes foram considerados com piso em contato com o solo e cobertura exposta ao sol e ao vento. Assim como no modelo de referência, não foram consideradas venezianas nos ambientes e ângulos de sombreamento. O único ângulo de sombreamento considerado foi o ângulo horizontal de sombreamento esquerdo do Dormitório 1 (15,43°) devido à geometria da parede do banheiro avançada em relação ao Dorm.1. A orientação utilizada é a indicada na Figura 4 no item 3.3.

⁹ Mesmo não sendo viável alterar as zonas analisadas neste estudo de acordo com a atualização da NBR 15220-3 ao final de 2024 devido ao mesmo já estar em fase de finalização, as cidades adotadas permanecem representando a pluralidade climática do país, onde cada cidade escolhida permanece representando uma zona específica nova (dentre as 12), excetuando-se Teresina e Manaus, que, com a atualização da norma, pertencem ambas a zona 6A.

Tabela 8: Dados referentes a UH posteriormente inseridos na interface da INI-R. Fonte: autoria própria.

Dados	Sala/coz	Dorm. 1	Dorm. 2
Área do APP (m ²)	15,15	6,96	7,08
Área efetiva de ventilação (m ²)	1,16	0,53	0,54
Pé-direito (m)	2,5		
Ângulo de desvio em relação ao norte verdadeiro (°)	0		
Transmitância térmica do elemento transparente (W/m ² K)	5,7		
Fator solar do elemento transparente (FS)	0,87		
Transmitância térmica do piso (W/m ² K)	4		
Capacidade térmica do piso (kJ/m ² K)	220		
Absortância da parede externa	0,58		
Transmitância térmica das paredes externas (W/m ² K)	Variável de acordo com os ensaios teóricos e avaliação das composições reais		
Capacidade térmica das paredes externas (kJ/m ² K)	Variável de acordo com os ensaios teóricos e avaliação das composições reais		
Absortância da cobertura	0,65		
Transmitância térmica da cobertura (W/m ² K)	2,06 (Para ZBs 1 a 7)		
	0,86 (Para ZB 8)		
Capacidade térmica da cobertura	228,6 (Para ZBs 1 a 7)		
	229,74 (Para ZB 8)		
Dim. horizontal de paredes em contato com o APT (m)	3,9	2,05	0
Dim. horizontal de paredes em contato com o dormitório (m)	3,85	2,4	2,4
Dim. horizontal de paredes em contato com a sala (m)	0	0,85	2,95
Dim. horizontal parede externa Norte (m)	0	2,9	2,95
Dim. horizontal parede interna Norte (m)	6,5	0	0
Área de superfície dos elementos transparentes Norte (m ²)	0	1,18	1,2
Dim. horizontal parede externa Sul (m)	6,5	0	0
Dim. horizontal parede interna Sul (m)	0	2,9	2,95
Área de superfície dos elementos transparentes Sul (m ²)	2,58	0	0
Dim. horizontal parede externa Leste (m)	2,85	0	2,4
Dim. horizontal parede interna Leste (m)	0	2,4	0
Área de superfície dos elementos transparentes Leste (m ²)	0	0	0
Dim. horizontal parede externa Oeste (m)	1,6	2,4	0
Dim. horizontal parede interna Oeste (m)	1,25	0	2,4
Área de superfície dos elementos transparentes Oeste (m ²)	0	0	0
Porta interna Norte	SIM	NÃO	NÃO
Porta interna Sul	NÃO	SIM	SIM
Porta interna Leste	NÃO	NÃO	NÃO
Porta interna Oeste	NÃO	NÃO	NÃO

3.7. Análise crítica

A seguir, é descrito o método e procedimento de análise realizada neste estudo. A Figura 5 ilustra o fluxo de análise de forma esquemática, que é descrito em detalhes em seguida. Entende-se que este fluxograma acontece a partir do resultado da Análise comparativa dos resultados de acordo com a NBR e INI-R, até os Resultados e discussões apontados no fluxograma do item 3 deste estudo (Figura 2). Esta sequência de análise se deu primeiramente para as composições dos ensaios teóricos, permitindo traçar uma compreensão prévia dos resultados reais. O passo a passo da análise foi repetido na avaliação das composições reais, com o adicional nesta última de comparação com os resultados encontrados para as composições dos ensaios teóricos.

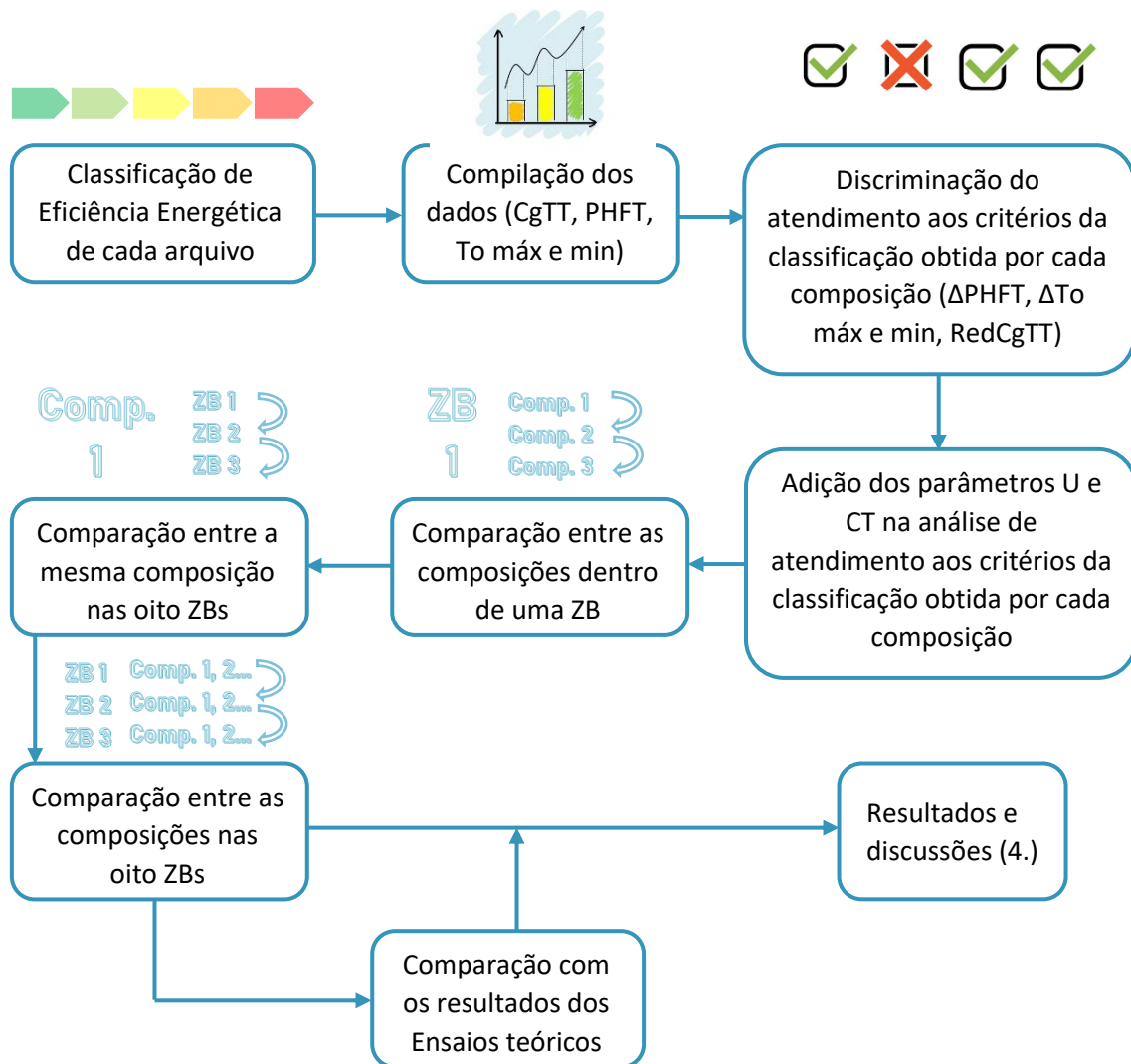


Figura 5: Fluxograma do método de análise crítica. Fonte: autoria própria.

Após o procedimento de cálculo da INI-R na plataforma online do pbeedifica comentado no item 3.1, foi realizada a verificação dos resultados para a determinação da classificação de eficiência energética da envoltória analisada, seguindo a metodologia da NBR 15575-1:2021, a mesma indicada na portaria da INI-R (INMETRO, 2023). Para fins de organização, os resultados foram

tabulados em uma planilha de forma a facilitar o procedimento e o acesso aos requisitos determinados pela norma.

Em seguida, os dados obtidos nos 296 testes (40 dos ensaios teóricos e 256 da avaliação das composições de vedações reais) foram compilados de modo a permitir uma leitura sistemática dos resultados de CgTT, PHFT, Tomáx e Tomin. Desta forma, iniciou-se a análise com a discriminação do atendimento aos critérios de classificação de eficiência energética (Δ PHFT, Δ To máx e min, RedCgTT) obtida para cada composição testada, incluindo as composições dos ensaios teóricos. Com tal discernimento, foi possível observar quais critérios permitiram ou impediram uma classificação de maior eficiência. Finalmente, a associação das características dos materiais (U e CT) permitiu analisar a sua influência nos resultados e nos critérios analisados.

Desta forma, foi feita uma análise comparativa dentro de cada ZB entre as composições testadas em cada etapa, considerando suas características e dados. Isto permitiu compreender o comportamento das composições em cada zona analisada. Após, foi realizada uma análise comparativa da mesma composição nas oito ZBs, observando a diferença de comportamento dos dados e classificação, permitindo identificar e compreender a diferença do comportamento das características dos mesmos materiais em diferentes climas.

Por fim, foi realizada uma análise comparativa das diversas composições nas oito ZBs analisadas, observando o comportamento geral (RedCgTT e classificação) em relação às características da composição material, seguindo para os pormenores do comportamento. Esta última análise permitiu identificar o comportamento de cada composição em cada zona, além de confirmar a resposta e o comportamento que as características proporcionam em cada ZB. Dessa forma, foi possível apontar as composições que apresentaram os melhores resultados gerais (RedCgTT e classificação) e melhores comportamentos (PHFT, Tomáx e Tomin) em cada zona analisada neste estudo.

4. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir das determinações realizadas com base na INI-R para os diferentes cenários descritos nos Capítulos 3.2 e 3.3. Inicialmente, é realizada uma abordagem geral entre todas as zonas bioclimáticas, de modo a esclarecer o impacto das propriedades de transmitância e capacidade térmica, com valores teóricos máximos e mínimos, na classificação de eficiência energética da envoltória. Em seguida, são analisados os resultados das composições descritas no capítulo 3.3 em cada zona bioclimática, sendo possível aprofundar a análise e compreender as nuances do comportamento e o impacto dos parâmetros (U e CT) das composições materiais frente as características climáticas de cada ZB.

4.1. Ensaios teóricos

A seguir, os resultados de carga térmica, variação de temperatura interna e percentual de horas de ocupação dentro da faixa de temperatura operativa, permitem esclarecer os possíveis limites de classificação de eficiência energética da envoltória a serem obtidos nas atuais oito ZBs do país, a partir da adoção dos extremos de CT e U permitido nos testes.

A Figura 6 apresenta o consumo total de carga térmica, juntamente da classificação de eficiência energética dos casos testados (I, II, III, IV e V). É possível notar que os menores consumos de carga térmica nas oito ZBs pertencem majoritariamente ao caso V, com baixa transmitância térmica e alta capacidade térmica, excetuando-se apenas nas ZBs 5 e 6, onde este caso apresenta o segundo menor consumo de carga térmica. É essencial apontar que as melhores classificações de eficiência energética, em geral, foram atingidas pelo caso V, fazendo juz ao melhor caso possível do intervalo sugerido pela NBR 15575, e mesmo nas zonas onde não foi possível obter classificação maior que “C”, apresentou os menores consumos, exceto nas ZBs 5 e 6.

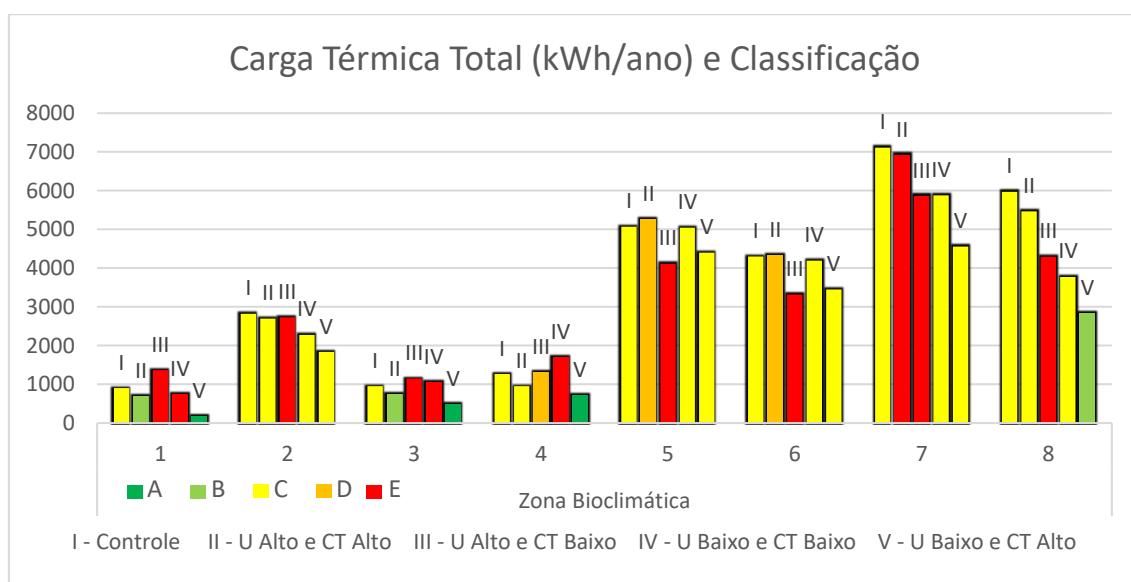


Figura 6: CgTT e classificação por ZB. Fonte: autoria própria.

De maneira geral, é possível apontar que há maior ocorrência de classificações de baixa eficiência energética (D e E) no caso III, com alta transmitância térmica e baixa capacidade térmica. Em particular, à exceção da ZB 4 (onde a classificação foi D), em todas as ZBs este caso foi classificado com E. Adicionalmente, observa-se que a alta capacidade térmica (casos II e V) auxiliou o desempenho em todas as zonas, apresentando menor consumo em relação ao caso I (controle), excetuando-se nas ZBs 5 e 6, que apresentaram leve aumento no consumo de carga térmica no caso II, onde a transmitância também é alta. Em síntese, pode-se afirmar que a alta capacidade térmica apresentou redução no consumo de carga térmica associada às classificações A e B nas zonas 1 e 3, e, quando aliada à baixa transmitância térmica, também foi responsável pelas classificações A e B nas zonas 4 e 8, além do menor

consumo e manutenção da classificação C nas zonas 2, 5, 6 e 7. A classificação está associada também à variação de temperatura interna da edificação e ao PHFT, que serão discutidos em detalhes a seguir.

Ao avaliar a variação de temperatura interna obtida para cada caso em cada ZB na Figura 7, notou-se que dos onze resultados que apresentaram classificação “E” (ver Figura 6), nove deles resultaram do não atendimento ao limite de temperatura máxima ou mínima da UH (destacada pela faixa cinza na Figura 7), demonstrando alta amplitude térmica na residência e ultrapassando a tolerância do método. Isto é, o caso III (U alto e CT baixo) com em todas as zonas à exceção da ZB 4 e o caso IV (U baixo e CT baixo) nas zonas 1 e 3. Isso indica a importância da alta capacidade térmica para todas as zonas, em especial nas zonas 1 a 4, enquanto nas demais, 5 a 8, a baixa transmitância térmica é mais impactante, impedindo que as temperaturas atinjam picos muito altos que ultrapassem o limite do método, sendo o ideal quando aliada à alta CT.

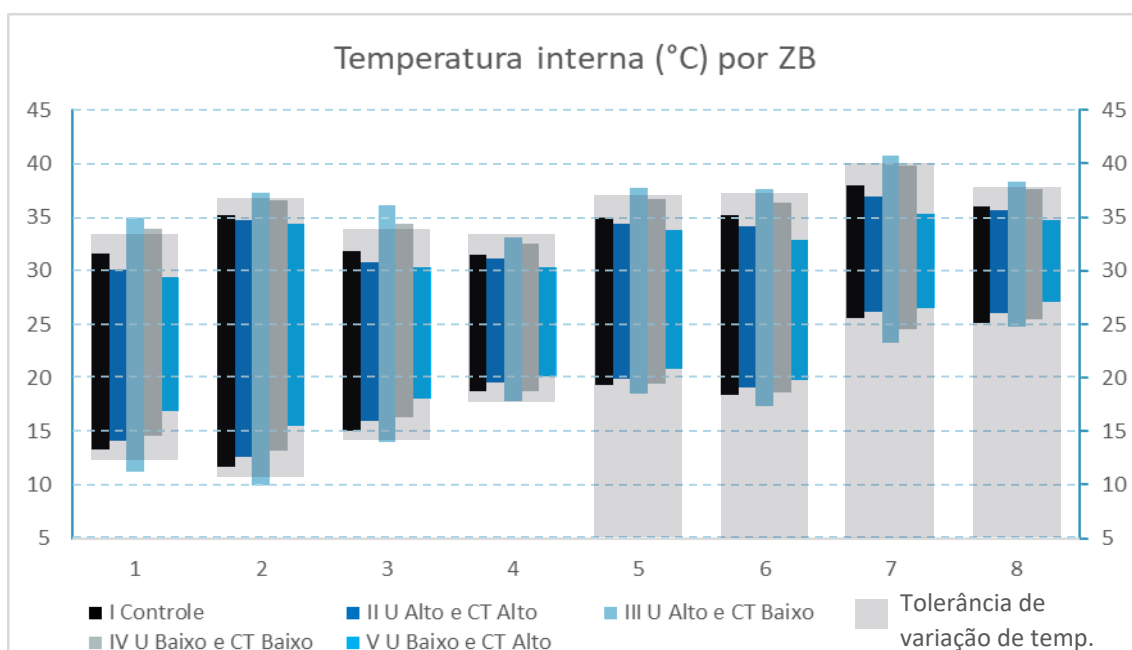


Figura 7: Temperaturas internas máximas e mínimas por ZB. Fonte: autoria própria.

A Figura 8 apresenta o Percentual de Horas de ocupação dentro da Faixa de Temperatura operativa associado à classificação de eficiência energética por ZB. De interesse particular, o caso III, que apresentou os piores indicadores de classificação determinados (E em sete ZBs e D na ZB 4), não obteve aumento de PHFT em relação ao caso de controle (I) apenas nas zonas 1 e 3. Portanto, mesmo apresentando maior percentual de horas dentro da temperatura operativa, a alta amplitude térmica e os picos de temperaturas na UH, devido à baixa capacidade térmica da envoltória, impossibilitaram uma melhor classificação.

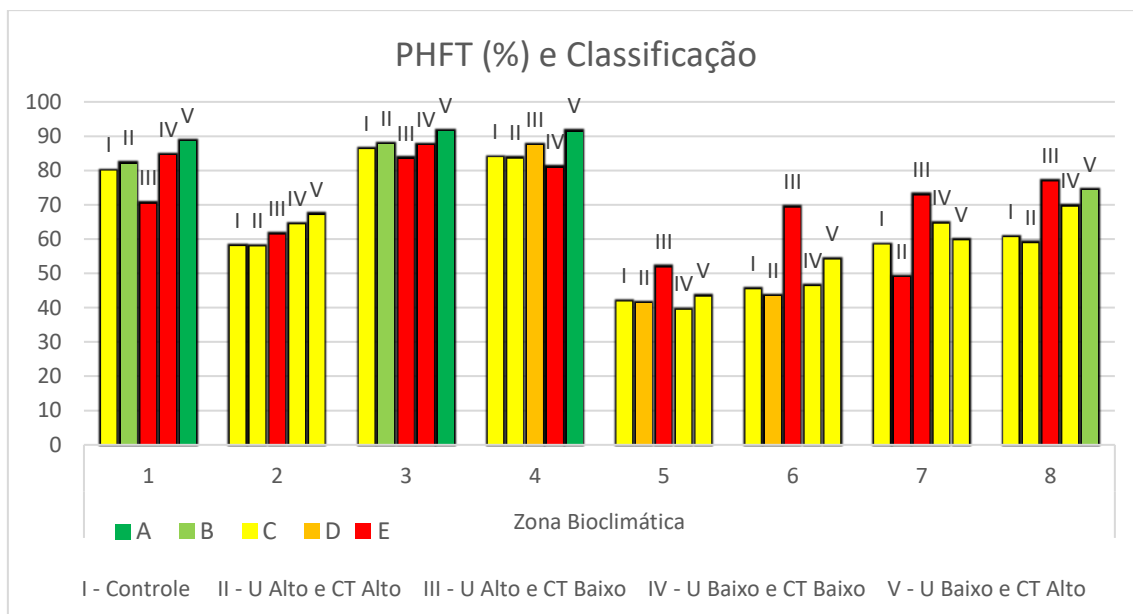


Figura 8: PHFT e classificação por ZB. Fonte: autoria própria.

A partir dos resultados apresentados acima e reorganizados por ZB em cada caso na Figura 9, observou-se a maior influência da carga térmica nas zonas 1 a 4, e da transmitância térmica nas zonas 5 a 8. Ainda, a baixa transmitância térmica combinada com alta capacidade térmica, apresenta grande influência na redução do consumo em todas as ZBs, concentrando os melhores resultados (caso V). Esta combinação está de acordo com a recomendação da NBR 15575:2021, entretanto, os resultados mostraram também maior diversidade, sendo possível adotar envoltórias com alta transmitância e capacidade térmica nas zonas 1 e 3, além de, mesmo com classificação inferior (E), o caso III se mostrou promissor nas zonas 5 e 6, com maior PHFT e menor consumo. Neste contexto, esta análise permitiu uma compreensão dos limites e comportamentos gerais e esperados para a avaliação das composições de vedações reais a seguir.

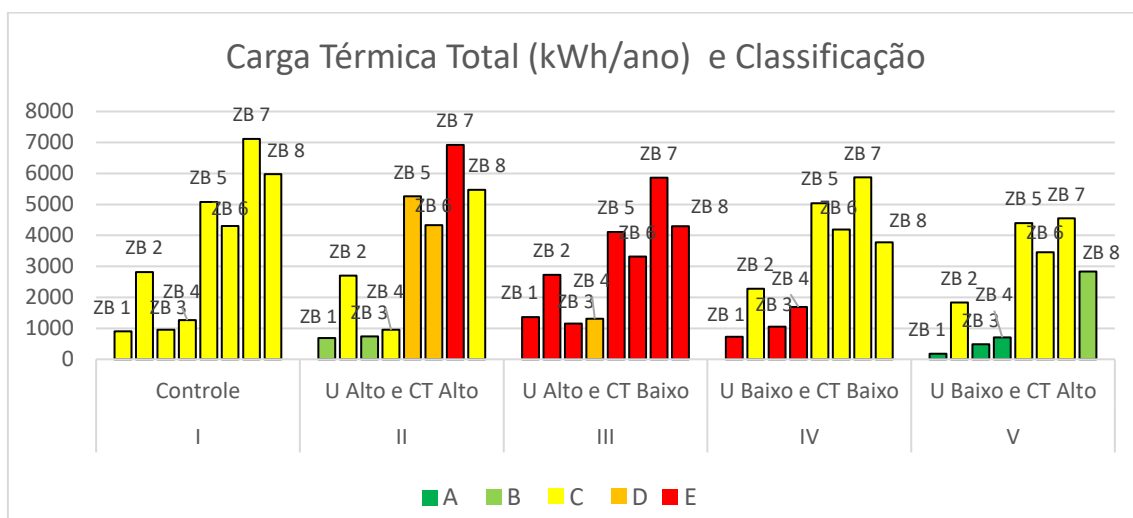


Figura 9: CgTT e classificação por caso. Fonte: autoria própria.

4.2. Composições de vedações reais

Com uma melhor compreensão dos resultados limites encontrados na etapa anterior, deu-se prosseguimento à pesquisa, realizando testes de diferentes composições reais, a fim de compreender onde os resultados do comportamento de uma edificação real se localizariam em relação aos extremos testados anteriormente. Os resultados se encontram descritos por zona bioclimática, possibilitando a compreensão das nuances do comportamento e impacto dos parâmetros das composições estudadas frente as características climáticas de cada local.

4.2.1. ZB1 – Curitiba (PR)

A Figura 10 apresenta a carga térmica total para o arquivo de controle e as para as composições mais usuais em projetos de HIS. Iniciando a análise com os resultados do comportamento termo energético cabe lembrar que a parede maciça de concreto de 10cm - arquivo de controle - sempre apresenta classificação C. As demais composições usuais, paredes de bloco estrutural, tanto de bloco de concreto quanto de bloco cerâmico, apresentaram classificações B ou superior.

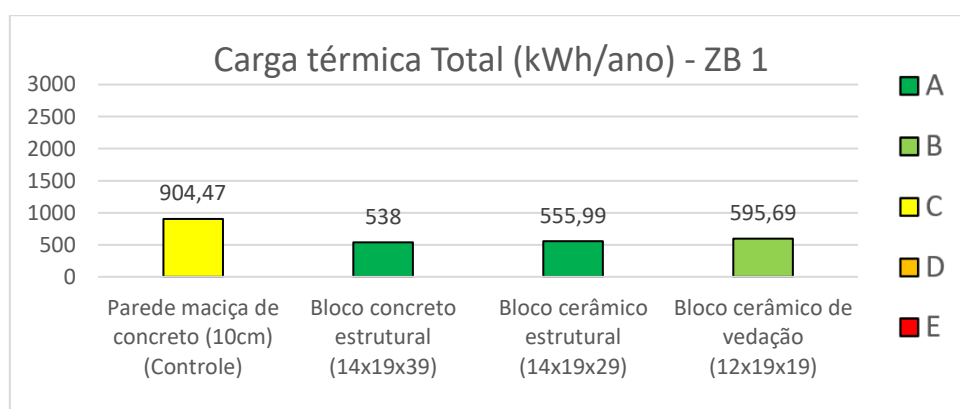


Figura 10: CgTT e classificação, composições usuais. ZB1. Fonte: autoria própria.

A parede de bloco cerâmico de vedação apresentou um resultado intermediário (B), sendo um resultado não observado nos ensaios teóricos, devido aos seus parâmetros também intermediários ($U = 2,13 \text{ (W/m}^2\text{K)}$ e $CT = 155 \text{ (kJ/m}^2\text{K)}$). A parede de bloco cerâmico estrutural apresenta uma transmitância inferior às demais ($U = 1,83 \text{ (W/m}^2\text{K)}$), se aproximando do resultado do arquivo V visto na etapa anterior, porém com capacidade térmica intermediária ($CT = 161 \text{ (kJ/m}^2\text{K)}$), não se encaixando totalmente no comportamento observado do arquivo na etapa anterior. O bloco de concreto estrutural, apesar de apresentar a maior transmitância térmica entre os demais ($U = 2,68 \text{ (W/m}^2\text{K)}$), detém a maior capacidade térmica ($CT = 245 \text{ (kJ/m}^2\text{K)}$) e o menor consumo observado nesta zona (Figura 10), reforçando o que foi observado na etapa anterior, onde a alta capacidade térmica apresenta maior benefício na zona 1 se comparada à transmitância térmica (U).

Analisando o percentual de horas de ocupação dentro da faixa de temperatura operativa (PHFT), é possível perceber que as quatro composições usuais apresentam percentual alto (maior que 70%), sendo todas próximas de 80%. As três paredes compostas por blocos apresentam percentual maior que 80%, com uma diferença de até 1,22 pontos percentuais entre a melhor (bloco de concreto estrutural) e a “pior” (bloco cerâmico de vedação) (Figura 11). Esse comportamento é refletido na variação de temperatura interna da residência, onde as três composições apresentam variação de temperatura próxima, onde a menor variação pertence à composição de maior capacidade térmica (CT), a de bloco de concreto estrutural (Figura 12).

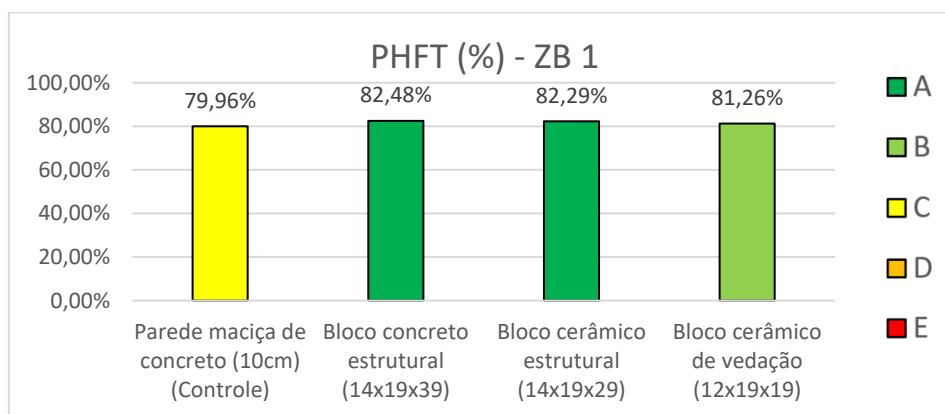


Figura 11: PHFT e classificação, composições usuais. ZB1. Fonte: autoria própria.

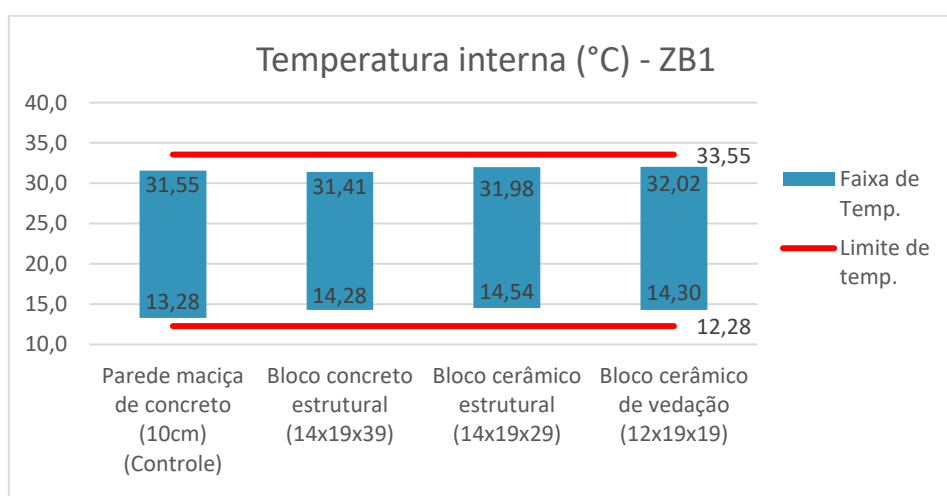


Figura 12: Variação de temperatura interna, composições usuais. ZB1. Fonte: autoria própria.

Desta forma, as três composições usuais compostas por blocos, apresentam bons comportamentos na zona bioclimática 1 (Curitiba). Ainda assim, a composição que apresenta a maior redução de consumo de carga térmica é a de bloco de concreto estrutural (Figura 13), sendo a composição mais indicada para esta localidade entre as composições usuais estudadas nesta pesquisa, ainda que as demais possam ser adotadas. Paredes compostas por este material se destacam nesta zona principalmente por sua alta capacidade térmica ($CT = 245 \text{ (kJ/m}^2\text{K)}$) dentre as demais, mantendo uma baixa

variação de temperatura interna, dentro da faixa de conforto térmico, em uma zona de clima frio.

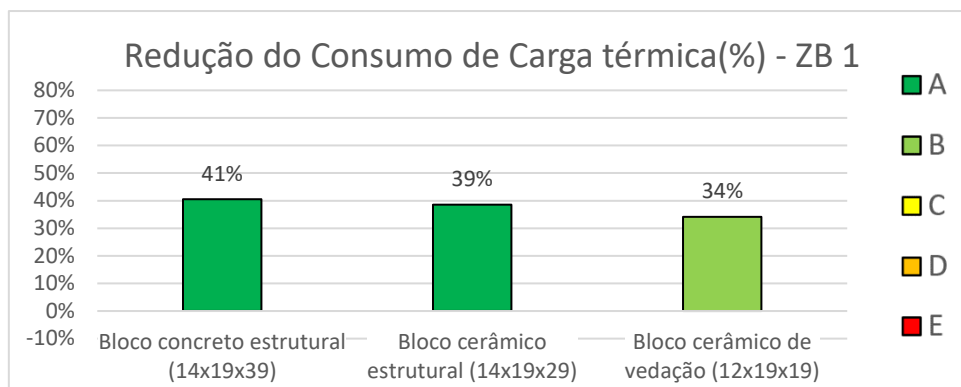


Figura 13: RedCgTT e classificação, composições usuais. ZB1. Fonte: autoria própria.

Ainda, ao analisar o consumo de carga térmica total por m² em cada APP, é possível observar na Figura 14 que, ambos os casos cujas paredes são compostas por bloco cerâmico, apresentam maior consumo por m² na sala. Isso demonstra que os blocos cerâmicos apresentam maior sensibilidade para a alteração de orientação Sul, devido a sua baixa CT nesta ZB de clima frio.

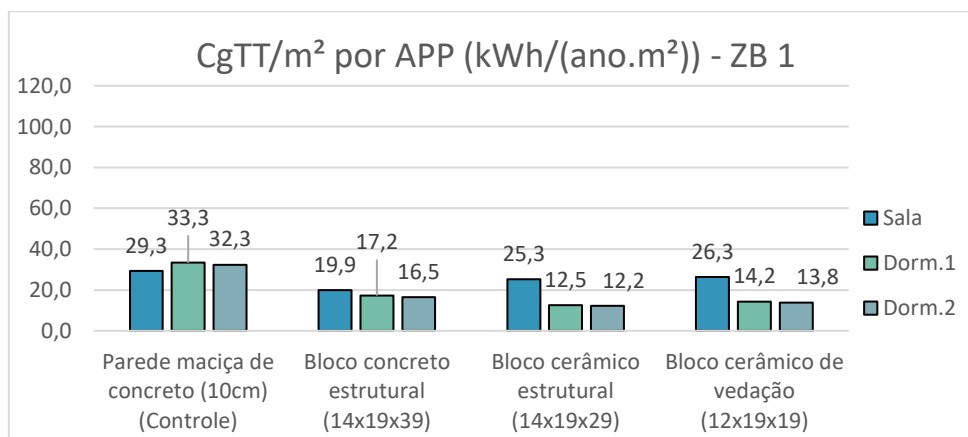


Figura 14: CgTT/m² por APP. ZB1. Fonte: autoria própria.

Ao investigar as demais composições propostas neste trabalho (Figura 16), constatou-se que a maioria apresenta classificação intermediária (B) a superior (A) em Curitiba (ZB1). Isto demonstra que, apesar de as composições usuais já apresentarem bons resultados, as demais composições estudadas também representam boas soluções, permitindo, conforme as demais variáveis envolvidas na escolha, que sejam adotadas e ainda assim que seja obtido um bom desempenho termo energético apenas com a devida escolha da composição das paredes do projeto. Ainda, é importante lembrar que estes testes consideram o impacto apenas da variação da composição das paredes, sendo possível melhorar ainda mais os resultados já obtidos com a adoção de outras soluções de eficiência energética no projeto.

É possível perceber uma melhoria no desempenho da composição de bloco de concreto estrutural ao se adicionar uma placa de EPS (3cm) e uma

placa de gesso (1,25cm) internamente, diminuindo expressivamente a transmitância térmica (U) de 2,68 (W/m²K) para 0,9 (W/m²K), e não alterando significativamente a capacidade térmica (CT) (de 245 (kJ/m²K) para 269,6 (kJ/m²K)). Desta forma, com uma simples alteração em uma das composições mais usuais, tem-se uma melhora na redução do consumo de 18 pontos percentuais, sendo uma das melhores soluções para ZB1.

Ainda, com a Figura 15 é possível perceber que os melhores comportamentos das composições se concentram naquelas que apresentam CT média a alta. O comportamento mais horizontal das manchas mostra que, nesta ZB, o aumento da CT apresenta maior benefício à envoltória em comparação a U. Com o destaque em pontilhado, é possível observar que a baixa U também apresenta algum benefício na RedCgTT, onde a composição apresenta uma RedCgTT considerável ($\geq 20\%$), mesmo com uma classificação inferior (E), porém, por ser uma zona muito fria e com alta amplitude térmica, a baixa CT permite temperaturas muito altas e muito baixas no interior da residência, piorando o conforto térmico do usuário, gerando assim a classificação E nesta composição de baixa U e baixa CT.

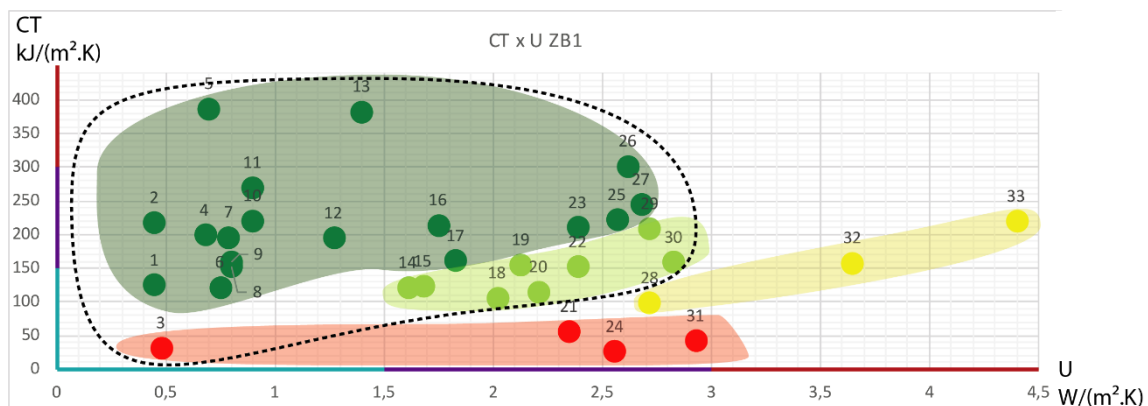


Figura 15: Composições organizadas em CTxU, com manchas de classificação e destaque para RedCgTT $\geq 20\%$ (pontilhado). ZB1. Fonte: autoria própria.

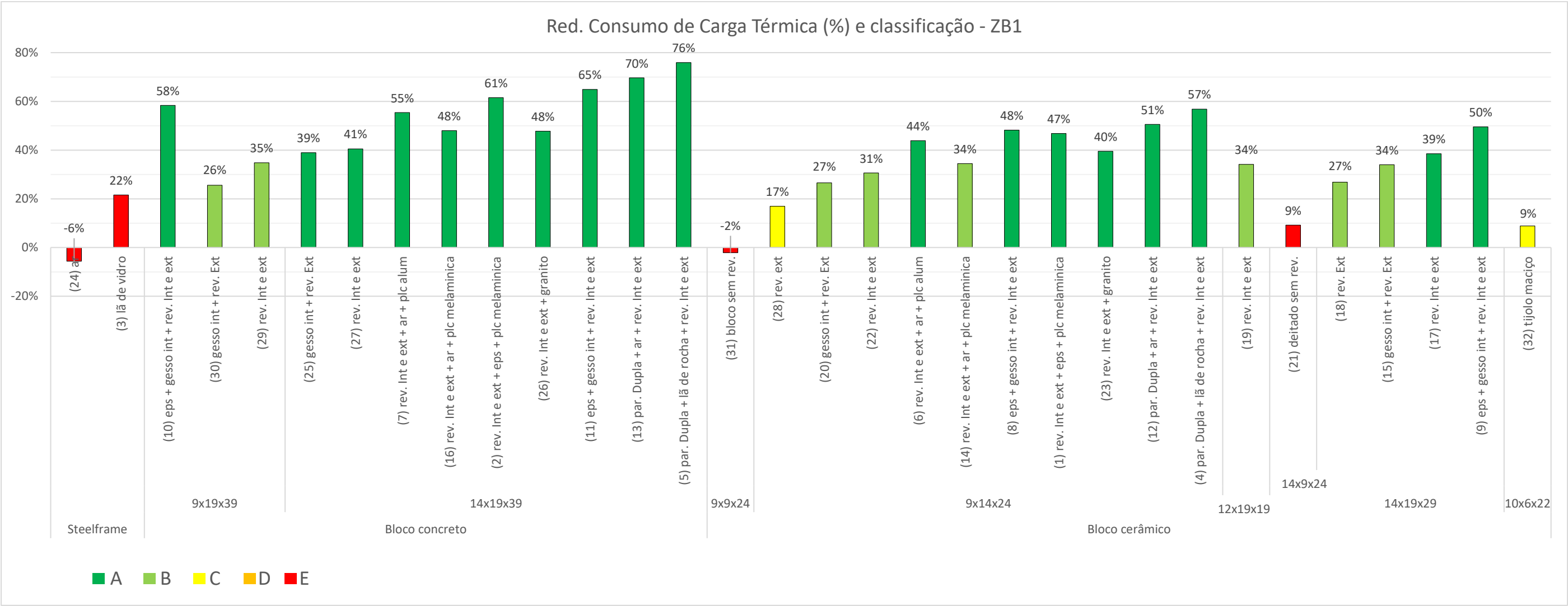


Figura 16: RedCgTT e classificação, demais composições. ZB1. Fonte: autoria própria.

4.2.2. ZB2 – Santa Maria (RS)

As composições mais usuais em projetos de HIS apresentam um comportamento mínimo (C) na zona bioclimática (ZB) 2, não apresentando classificações melhores em nenhuma das três composições, como observado na Figura 17. Entretanto, mesmo que não haja uma melhora na classificação de eficiência energética da envoltória, as três composições apresentaram redução do consumo de carga térmica em relação à parede maciça de concreto (10cm), sendo as de bloco cerâmico as com o menor consumo de carga térmica, com uma diferença pouco expressiva, máxima de 99,84 (kWh/ano) entre o bloco cerâmico estrutural e o bloco de concreto estrutural.

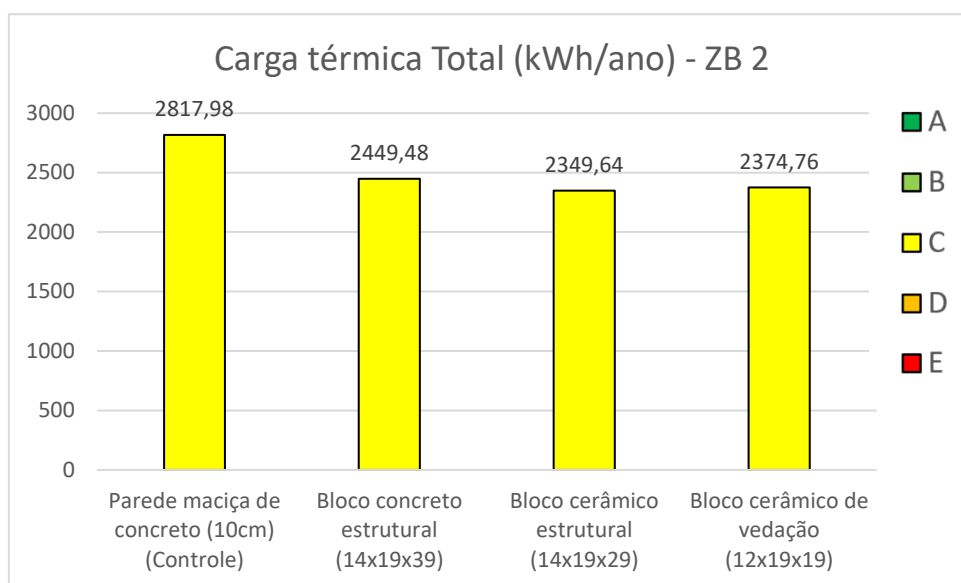


Figura 17: CgTT e classificação, composições usuais. ZB2. Fonte: autoria própria.

Ao observarmos o PHFT (Figura 18) e a variação de temperatura interna da edificação (Figura 19), temos comportamentos muito similares entre as três composições usuais, com resultados intermediários aos arquivos IV (baixa transmitância e baixa capacidade térmica) e V (baixa transmitância e alta capacidade térmica) dos ensaios teóricos. Isso se deve aos valores de U e CT destas composições serem intermediários aos valores extremos testados anteriormente. Ainda assim, é possível compreender que as composições apresentam possibilidade de melhoria, a fim de aproximar mais ao resultado do arquivo V da etapa anterior. Mesmo que apenas a alteração na composição das paredes não seja capaz de melhorar a classificação de eficiência energética da envoltória da edificação, otimizar seu comportamento facilitaria a melhora da classificação ao se adotarem outras soluções de eficiência energética.

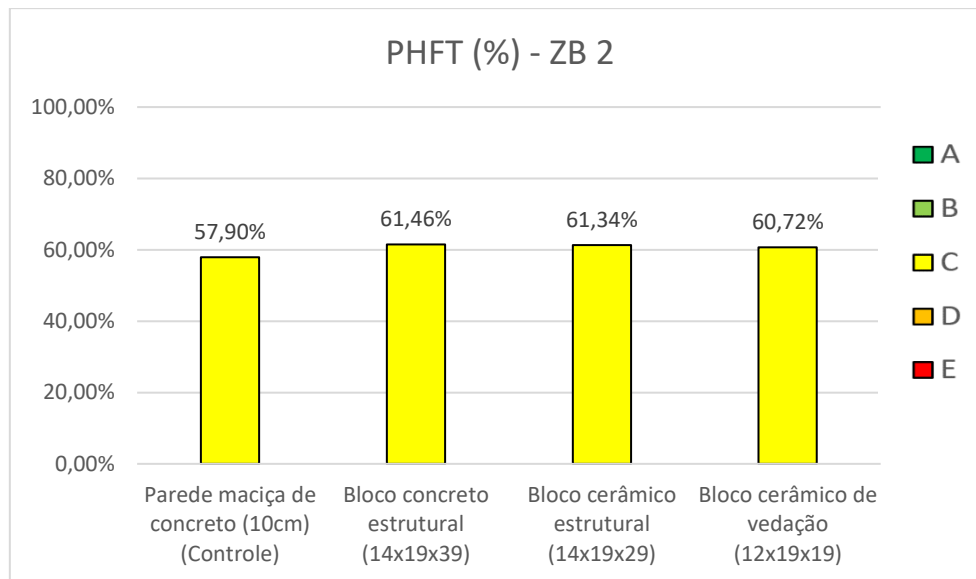


Figura 18: PHFT e classificação, composições usuais. ZB2. Fonte: autoria própria.

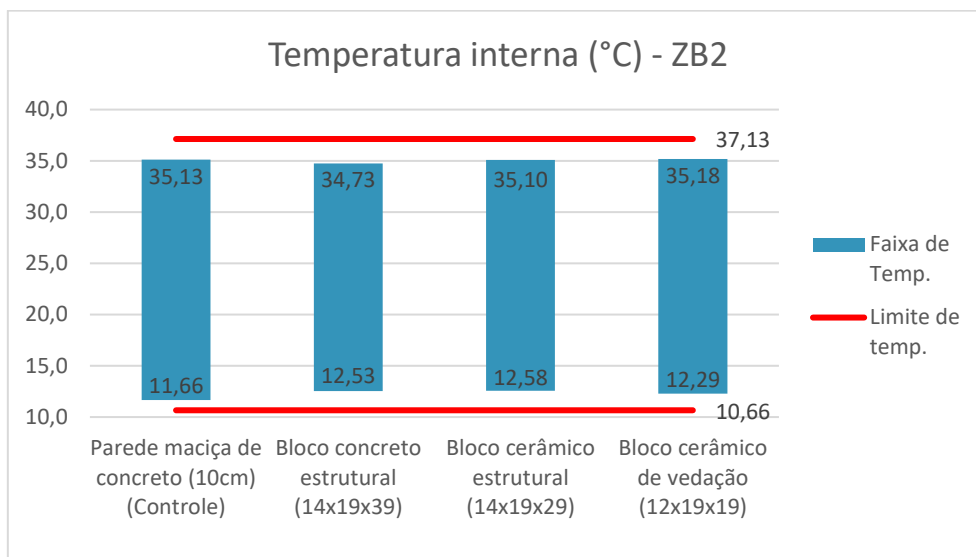


Figura 19: Variação de temperatura interna, composições usuais. ZB2. Fonte: autoria própria.

Ao observar a redução de consumo em relação a parede de concreto (equivalente ao modelo de comparação), é possível perceber que o bloco cerâmico auxilia na redução, ainda que de uma forma sutil em comparação com o bloco estrutural de concreto (Figura 20). Entretanto, ao observarmos o consumo por m² em cada APP (Figura 21), é possível perceber que os blocos de cerâmica apresentam um menor consumo nos quartos, que apresentam orientações norte e leste, e norte e oeste (espelhados, lado a lado), enquanto que a sala apresenta três fachadas com orientações sul, leste e oeste e um consumo grande por m².

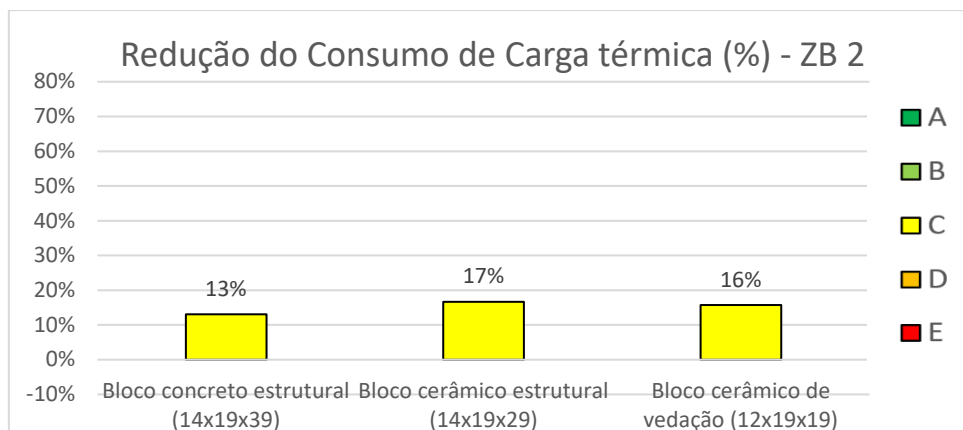


Figura 20: RedCgTT e classificação, composições usuais. ZB2. Fonte: autoria própria.

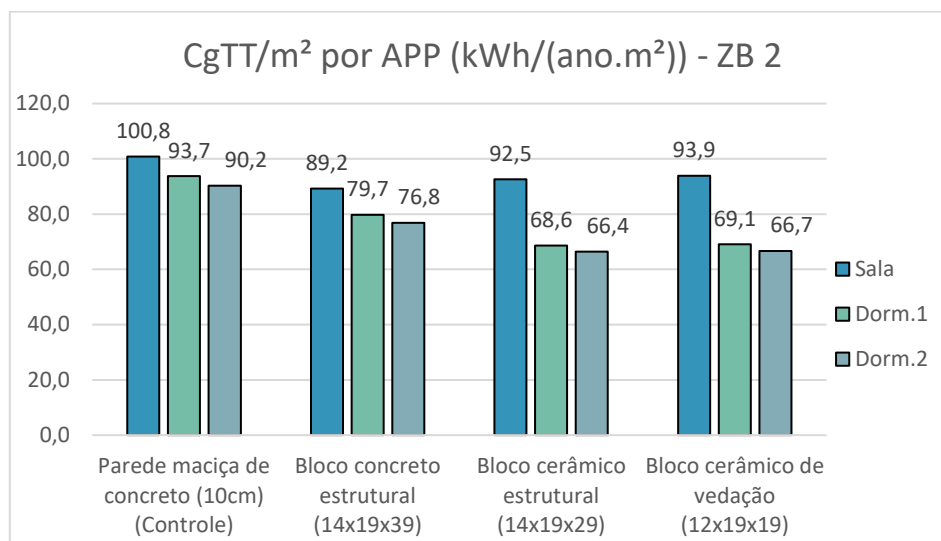


Figura 21: CgTT/m² por APP. ZB2. Fonte: autoria própria.

Ao comparar o desempenho das paredes de bloco de concreto e as de bloco cerâmico estrutural por APP, há um aumento de 5,4 (kWh/(ano.m²)) no consumo de carga térmica/m² na sala ao utilizar o bloco cerâmico estrutural, devido a maior área de fachada sul, além da capacidade térmica (CT) mais baixa, de grande importância nas zonas 1 a 4. Ainda, é importante ressaltar que o método da INI-R e da NBR 15220:2021 consideram a influência de carga térmica dos equipamentos eletrodomésticos apenas na sala, possibilitando o aumento da diferença de comportamento entre sala e dormitórios. Seria necessário avaliar a mesma situação considerando a sala como dormitório para avaliar a real influência deste dado. Enquanto nos dormitórios, há uma redução no consumo de carga térmica no caso dos blocos cerâmicos comparados ao bloco de concreto, onde a composição de parede de bloco cerâmico estrutural apresenta um consumo de até 9,8 (kWh/(ano.m²)) menor.

Conforme esperado, vistos os resultados dos ensaios teóricos, ao investigarmos os demais materiais testados, nenhum deles melhorou a classificação de eficiência energética da envoltória, permanecendo na classificação mínima (C). Ainda assim, dentre essa mesma classificação, tem-

se resultados que apresentam melhor desempenho do que outros (Figura 23). Excluindo-se as paredes duplas, por uma questão de viabilidade construtiva, as composições que apresentam maior RedCgTT são duas de bloco de concreto estrutural: revestimento interno e externo, EPS (8cm) e placa melamínica, e a com gesso interno (1,25cm), EPS (3cm) e revestimento interno e externo, com reduções de 23% e 22% respectivamente; e uma de bloco cerâmico (9x14x24), composta por revestimento interno e externo, EPS (8cm) e placa melamínica, com redução do consumo de 22%.

Ainda, ao observar a Figura 22, o comportamento geral das composições nessa ZB se mantém com classificação mínima como dito anteriormente, porém, ao destacarmos as composições que apresentam uma RedCgTT de no mínimo 20%, é possível destacar que elas apresentam U como a característica de maior peso, com U baixo favorecendo essa redução, diferentemente da ZB1, onde a CT média a alta apresentava melhores resultados. Entretanto, é importante destacar que é necessário ter cuidado com CTs muito baixas, sendo os melhores resultados com CTs intermediárias a altas aliadas às baixas U.

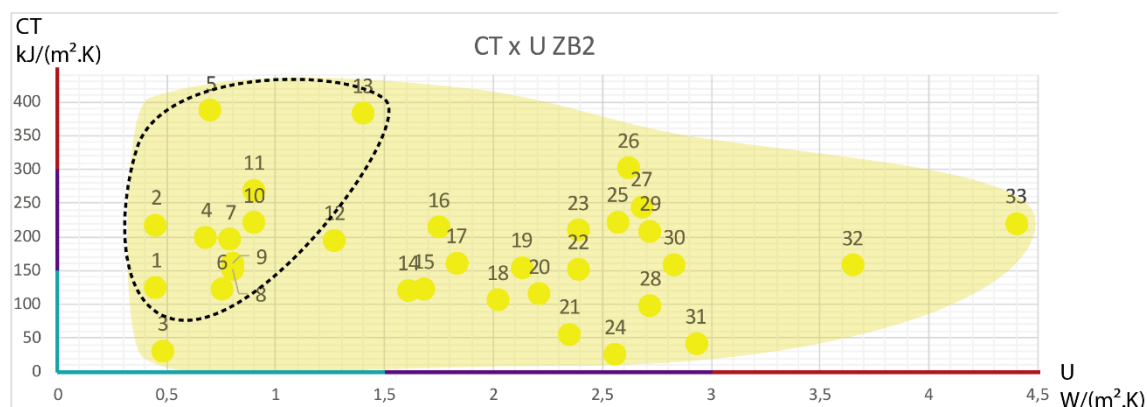


Figura 22: Composições organizadas em CTxU, com manchas de classificação e destaque para RedCgTT $\geq 20\%$ (pontilhado). ZB2. Fonte: autoria própria.

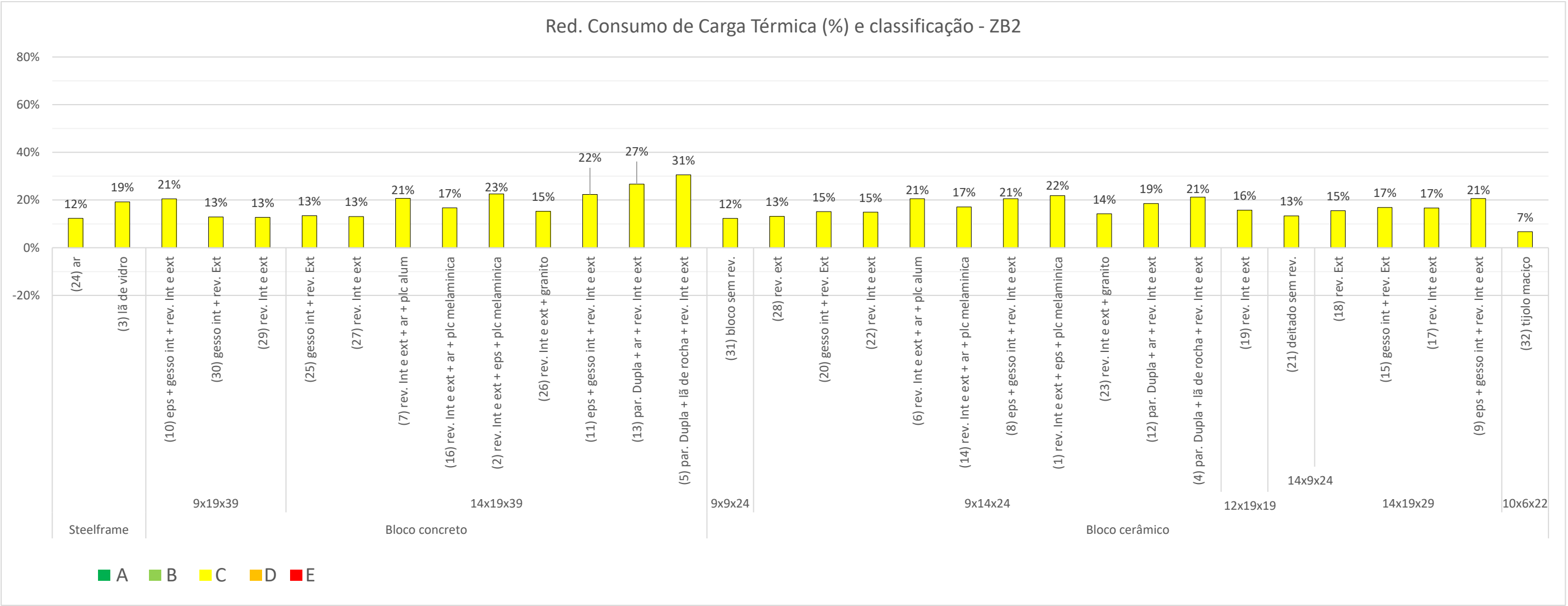


Figura 23: RedCgTT e classificação, demais composições. ZB2. Fonte: autoria própria.

4.2.3. ZB3 – São Paulo (SP)

Na zona bioclimática 3, as composições usuais apresentam resultados próximos, sendo a composição de bloco de concreto estrutural a que apresenta menor consumo. Ainda assim, três composições apresentam consumos próximos, e todos menores que a parede maciça de concreto, equivalente ao arquivo de controle (Figura 24). O comportamento do bloco de concreto estrutural, com características $U = 2,68$ ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$) e $CT = 245$ ($\text{kJ}/\text{m}^2\text{K}$), mesmo que intermediárias em relação aos valores máximos utilizados nos ensaios teóricos ($U = 4,4$ ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$) e $CT = 440$ ($\text{kJ}/\text{m}^2\text{K}$)), apresenta um comportamento intermediário aos arquivos “controle” e “V - U baixo e CT alto”, se aproximando mais do arquivo de controle. A diminuição do consumo em relação a parede maciça de concreto se dá devido a diminuição expressiva da transmitância (de $4,4$ ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$) para $2,68$ ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$), e um leve aumento da capacidade térmica (de 220 ($\text{kJ}/\text{m}^2\text{K}$) para 245 ($\text{kJ}/\text{m}^2\text{K}$)).

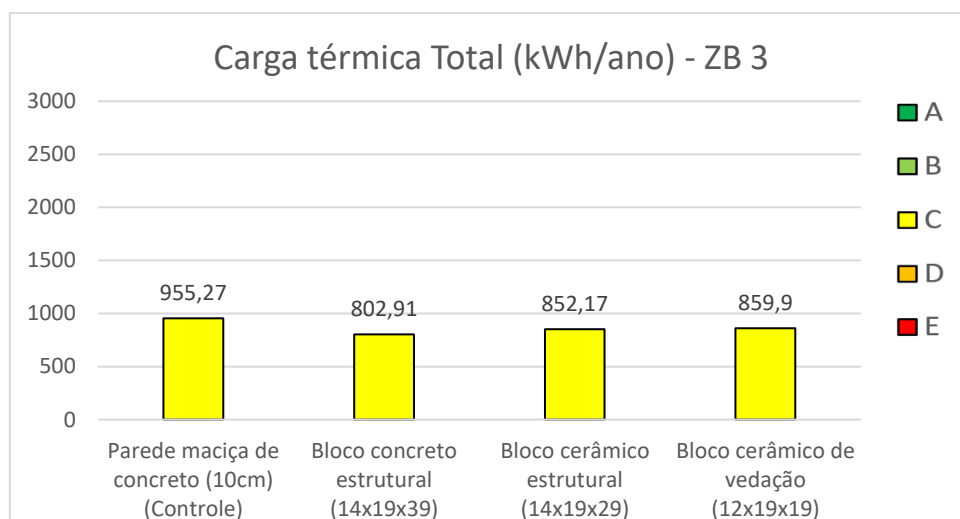


Figura 24: CgTT e classificação, composições usuais. ZB3. Fonte: autoria própria

Entretanto, tal benefício não é expressivo no comportamento geral do material. Mesmo com o melhor PHFT (Figura 25), os outros materiais apresentam valores semelhantes de horas em conforto, além de variações de temperatura interna próximas (Figura 26). Ainda assim, com uma maior redução de consumo, a composição de bloco de concreto estrutural se destaca na zona bioclimática 3 (Figura 27). Ainda, ao observar a distribuição de consumo de carga térmica por m^2 em cada APP (Figura 28), é importante destacar o menor consumo desta composição na sala, em relação às demais composições. Mesmo estando em uma orientação menos exposta à radiação solar direta (sul), a sala possui maior densidade de carga térmica do que os dormitórios, e devido à sua alta capacidade térmica, a composição auxilia na manutenção da temperatura interna, não atingindo temperaturas muito altas durante o ano.

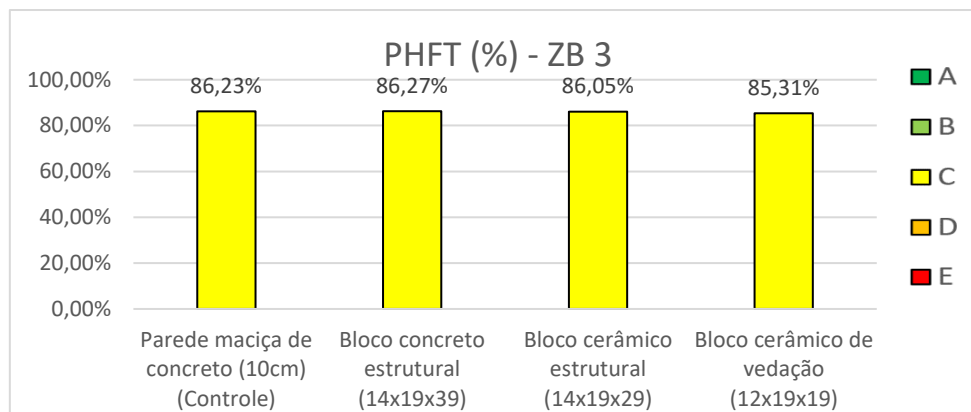


Figura 25: PHFT e classificação, composições usuais. ZB3. Fonte: autoria própria.

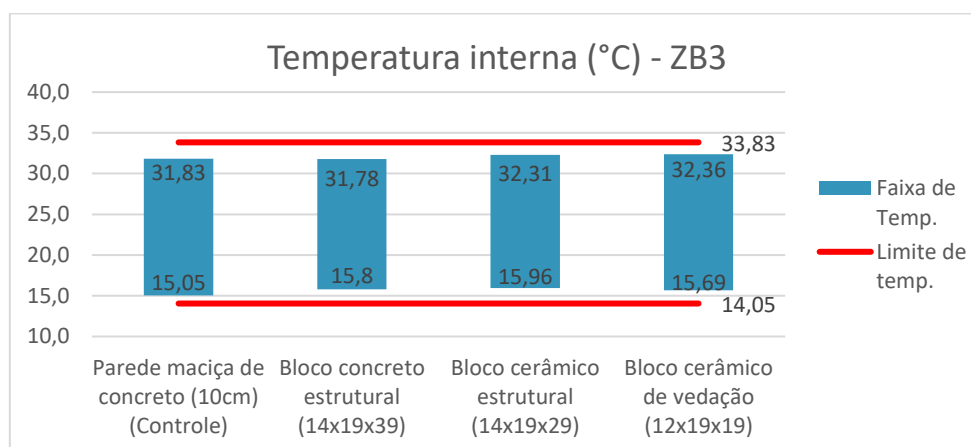


Figura 26: Variação de temperatura interna, composições usuais. ZB3. Fonte: autoria própria.

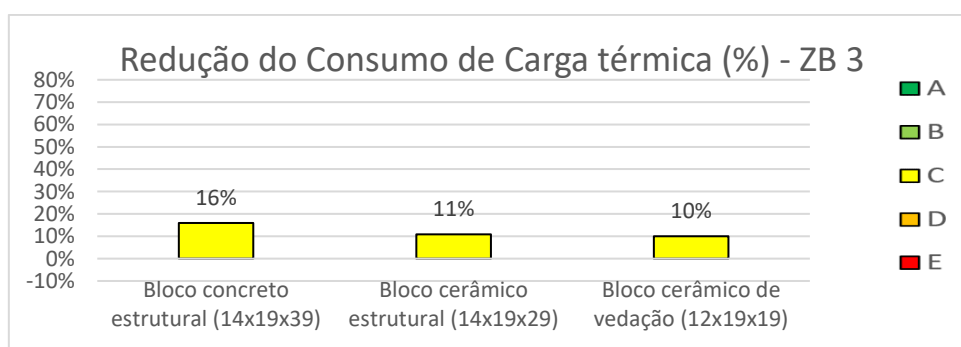


Figura 27: RedCgTT e classificação, composições usuais. ZB3. Fonte: autoria própria

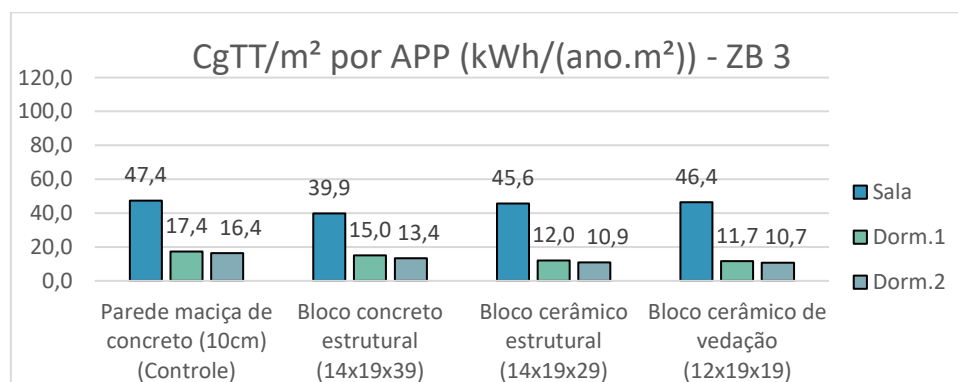


Figura 28: CgTT/m² por APP. ZB3. Fonte: autoria própria.

Estudando as composições do manual RAC e do projetEEE (Figura 30), percebe-se que as composições que utilizam bloco de concreto apresentam comportamento melhor que as de bloco cerâmico ou steelframe. As composições de steelframe apresentam um aumento de quase 10% no consumo, devido a sua baixa capacidade térmica ($31,4 \text{ kJ/m}^2\text{K}$). Nesta zona, apenas as composições com paredes duplas, equivalentes ao arquivo V dos ensaios teóricos, foram capazes de atingir a classificação A, porém, ao adicionar uma camada de 3cm de EPS e 1,25cm de gesso à composição usual de bloco de concreto estrutural, obtém-se um aumento de 11 pontos percentuais em sua redução de consumo e atingindo classificação intermediária (B), sendo a melhor composição com viabilidade construtiva para esta zona.

Como segunda opção, temos a adição de granito à composição usual de bloco de concreto, aumentando em 9 pontos percentuais sua redução de consumo e também elevando a classificação de eficiência para B. Isso se deve ao aumento considerável da CT das paredes, indo de $245 \text{ (kJ/m}^2\text{K)}$ para $302 \text{ (kJ/m}^2\text{K)}$, sem grande alteração na transmitância térmica (U), de $2,68 \text{ (W/m}^2\text{K)}$ para $2,62 \text{ (W/m}^2\text{K)}$.

Ainda, ao observar a Figura 29, é possível perceber, com o comportamento horizontal das manchas de classificação, a importância da CT média a alta, mais do que alta ou baixa U. A importância da alta CT nesta ZB fica ainda mais destacada, onde as composições que apresentam redução $\geq 20\%$ apresentam CT média a alta aliadas à baixa ou média U.

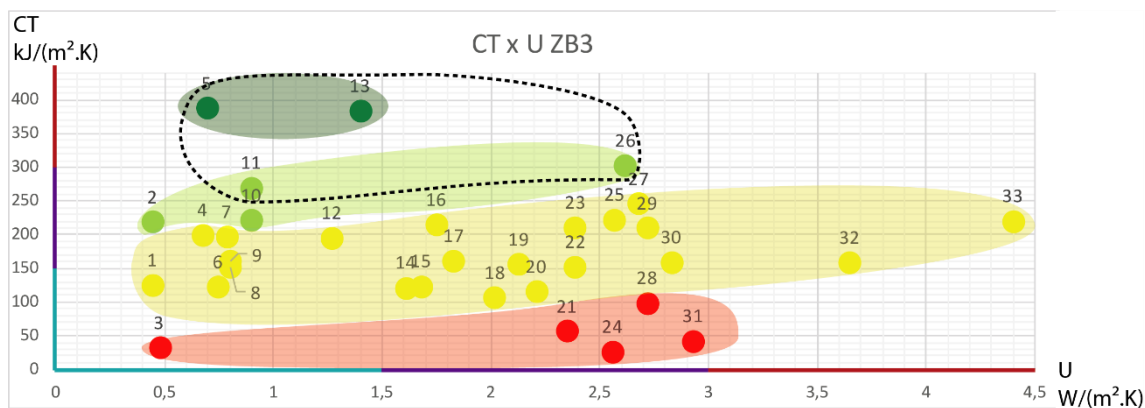


Figura 29: Composições organizadas em CTxU, com manchas de classificação e destaque para RedCgTT $\geq 20\%$ (pontilhado). ZB3. Fonte: autoria própria.

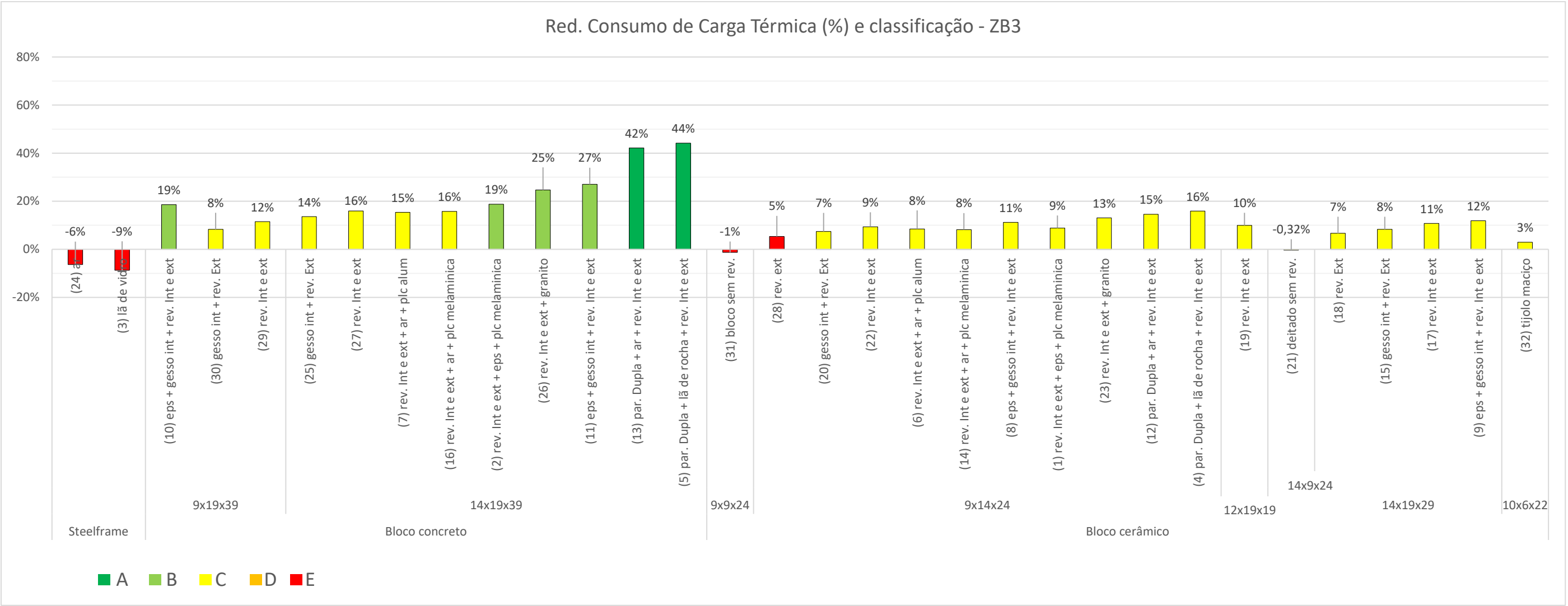


Figura 30: RedCgTT e classificação, demais composições. ZB3. Fonte: autoria própria.

4.2.4. ZB4 – Brasília (DF)

Na zona bioclimática 4, as composições usuais não apresentam melhora na classificação energética. Na Figura 31, é possível observar que a composição de bloco de concreto estrutural é a única que apresenta diminuição no consumo e manutenção da classificação, enquanto que com os blocos cerâmicos, a envoltória da residência apresenta pior classificação de eficiência energética e aumento do consumo. É possível comparar o comportamento do bloco de concreto estrutural com o arquivo II (U alto e CT alto) dos ensaios teóricos, mesmo que esta composição apresente valores médios de transmitância e capacidade térmica.

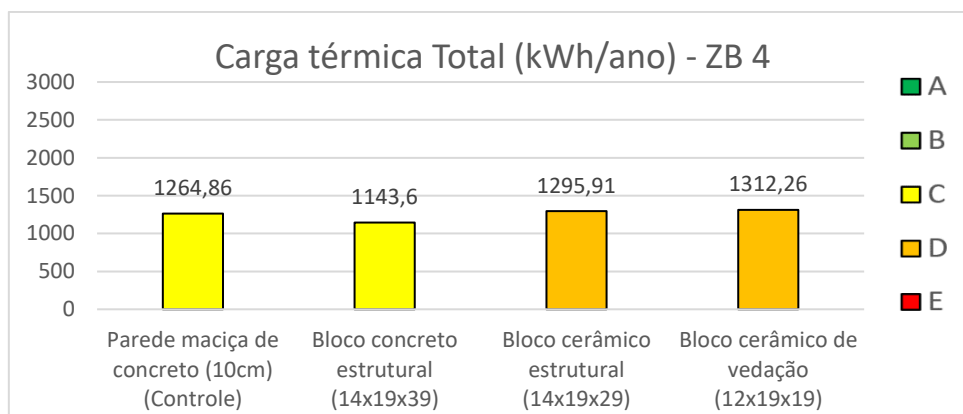


Figura 31: CgTT e classificação, composições usuais. ZB4. Fonte: autoria própria.

Já as composições de bloco cerâmico apresentam um comportamento próximo do arquivo III (U alto e CT baixo), embora, por seus valores intermediários de transmitância e capacidade térmica em relação aos valores da etapa anterior (bloco de vedação $U = 2,13 \text{ W/m}^2\text{K}$ e $CT = 155 \text{ kJ/m}^2\text{K}$, e bloco estrutural $U = 1,83 \text{ W/m}^2\text{K}$ e $CT = 161 \text{ kJ/m}^2\text{K}$), não apresentam melhora no PHFT como visto no arquivo III na etapa anterior (ver Figura 8), e sim uma queda (Figura 32). A CT intermediária também detém a alta amplitude térmica observada no mesmo arquivo na etapa anterior (Figura 33).

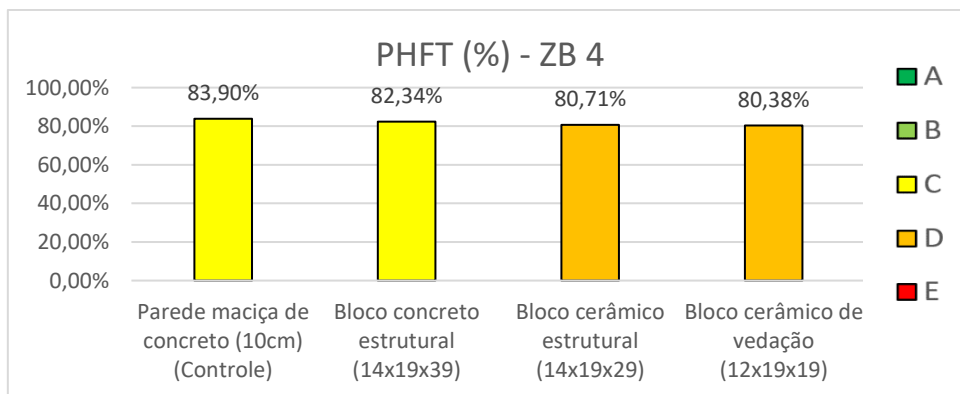


Figura 32: PHFT e classificação, composições usuais. ZB4. Fonte: autoria própria.

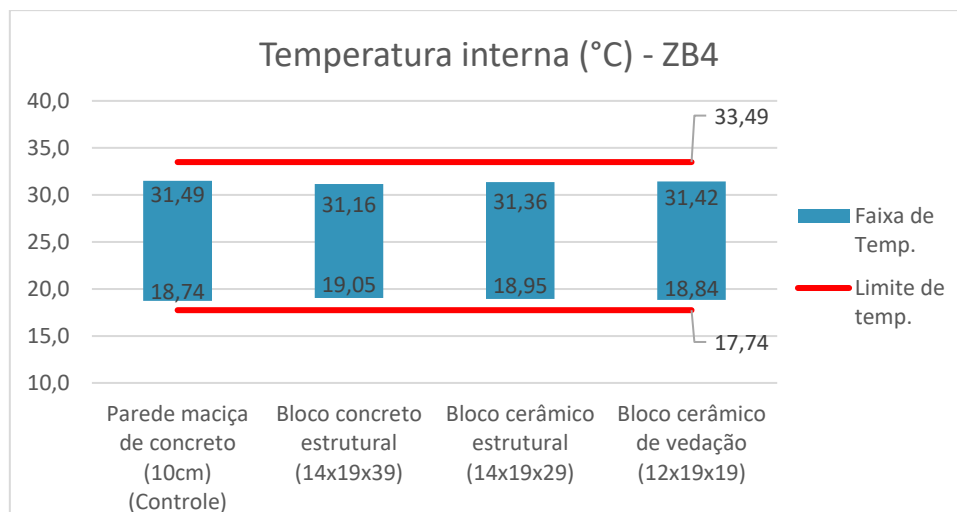


Figura 33: Variação de temperatura interna, composições usuais. ZB4. Fonte: autoria própria.

A importância para o cuidado na escolha de materiais nesta zona se destaca ao observarmos a redução de consumo que cada composição usual impacta na envoltória (Figura 34). O bloco de concreto estrutural apresenta uma redução de 10% do consumo em relação à parede de concreto maciço (10cm). Isto se deve ao leve aumento na capacidade térmica (parede de concreto $CT = 220 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ e bloco de concreto $CT = 245 \text{ kJ/m}^2\text{K}$) e à redução expressiva da transmitância térmica (parede de concreto $U = 4,4 \text{ W/m}^2\text{K}$, bloco de concreto $U = 2,68 \text{ W/m}^2\text{K}$).

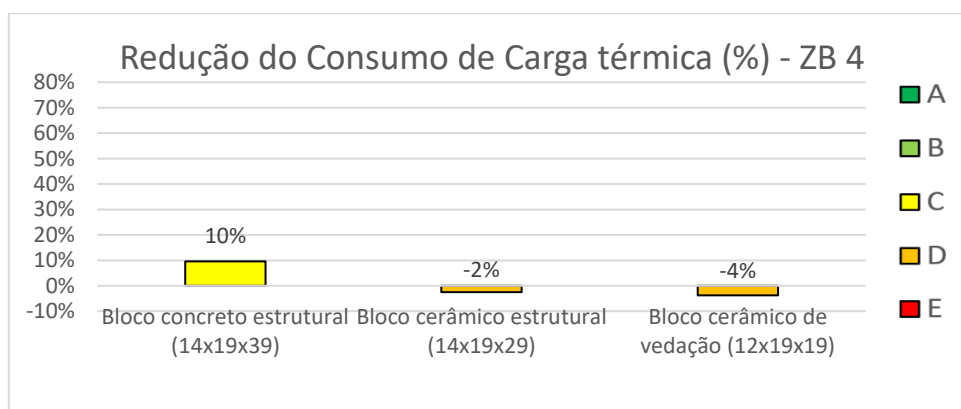


Figura 34: RedCgTT e classificação, composições usuais. ZB4. Fonte: autoria própria.

As composições de bloco cerâmico, mesmo com transmitâncias térmicas relativamente baixas (bloco estrutural $U = 1,83 \text{ W/m}^2\text{K}$ e bloco de vedação $U = 2,13 \text{ W/m}^2\text{K}$), acabam apresentando um aumento no consumo de 2% e 4% respectivamente, devido às suas baixas CT s ($161 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ e $155 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ respectivamente). Esse comportamento é refletido no consumo por APP (Figura 35), onde o bloco de concreto, orientado para o sul, apresenta menor consumo por m^2 , como visto nas zonas 1 a 3.

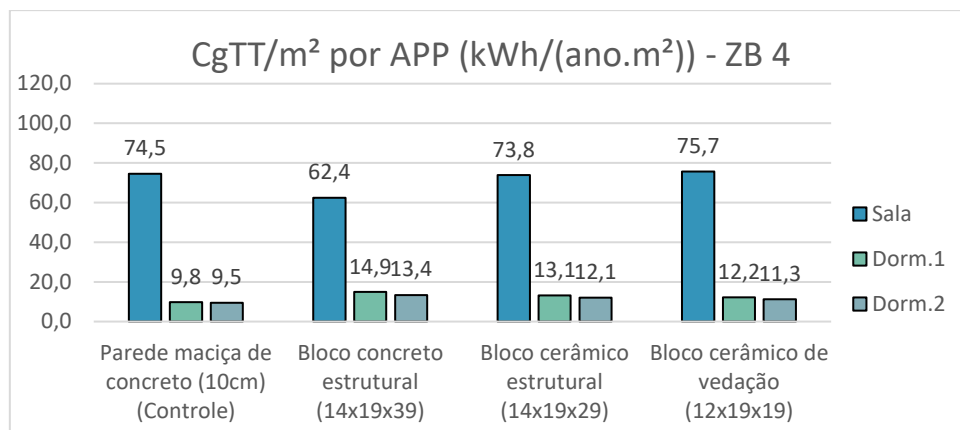


Figura 35: CgTT/m² por APP. ZB4. Fonte: autoria própria.

Ao observar o comportamento dos demais materiais (Figura 37), fica claro que para a ZB 4 é importante tomar o devido cuidado ao escolher os materiais das paredes, não sendo recomendados os blocos cerâmicos, pois a grande maioria das composições deles apresentam aumento no consumo de carga térmica, assim como as de steelframe. Porém, ao se adicionar granito ou 3cm de EPS e 1,25cm de gesso à composição usual de bloco de concreto estrutural, é possível não só aumentar a redução do consumo em 10 e 11 pontos percentuais, respectivamente, como também melhorar a classificação de eficiência energética da envoltória de mínima (C) para intermediária (B), devido à alta CT (302 kJ/m²K) do granito, mesmo que com alta U (2,62 W/m²K), e à aliança da baixa U (0,9 W/m²K) com alta CT (269,6 kJ/m²K) da composição com EPS e gesso.

Ao observar a Figura 36, podemos observar um comportamento mais horizontal das manchas de classificação, similar à ZB3, que indica a importância da alta CT na ZB4. A importância da alta CT fica mais evidente ainda ao destacar as composições que apresentaram RedCgTT $\geq 20\%$, que apresentam CTs médias a altas e Us baixas a médias.

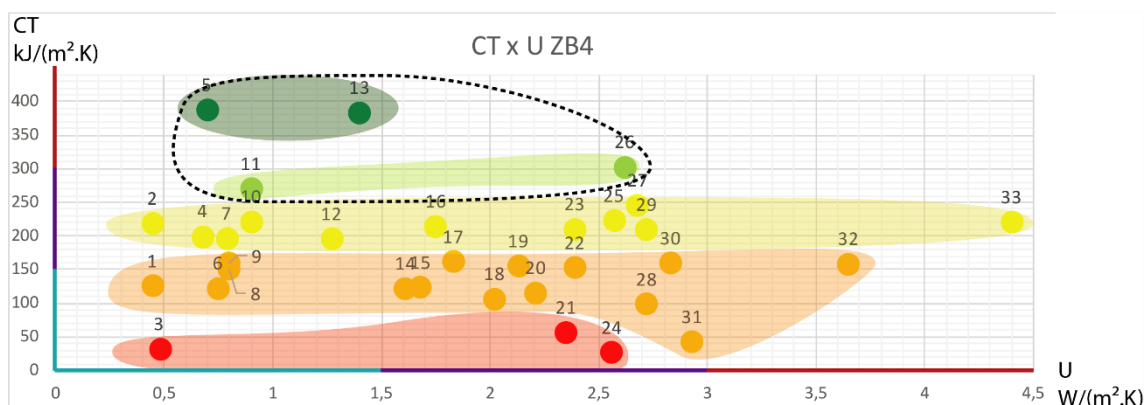


Figura 36: Composições organizadas em CTxU, com manchas de classificação e destaque para RedCgTT $\geq 20\%$ (pontilhado). ZB4. Fonte: autoria própria.

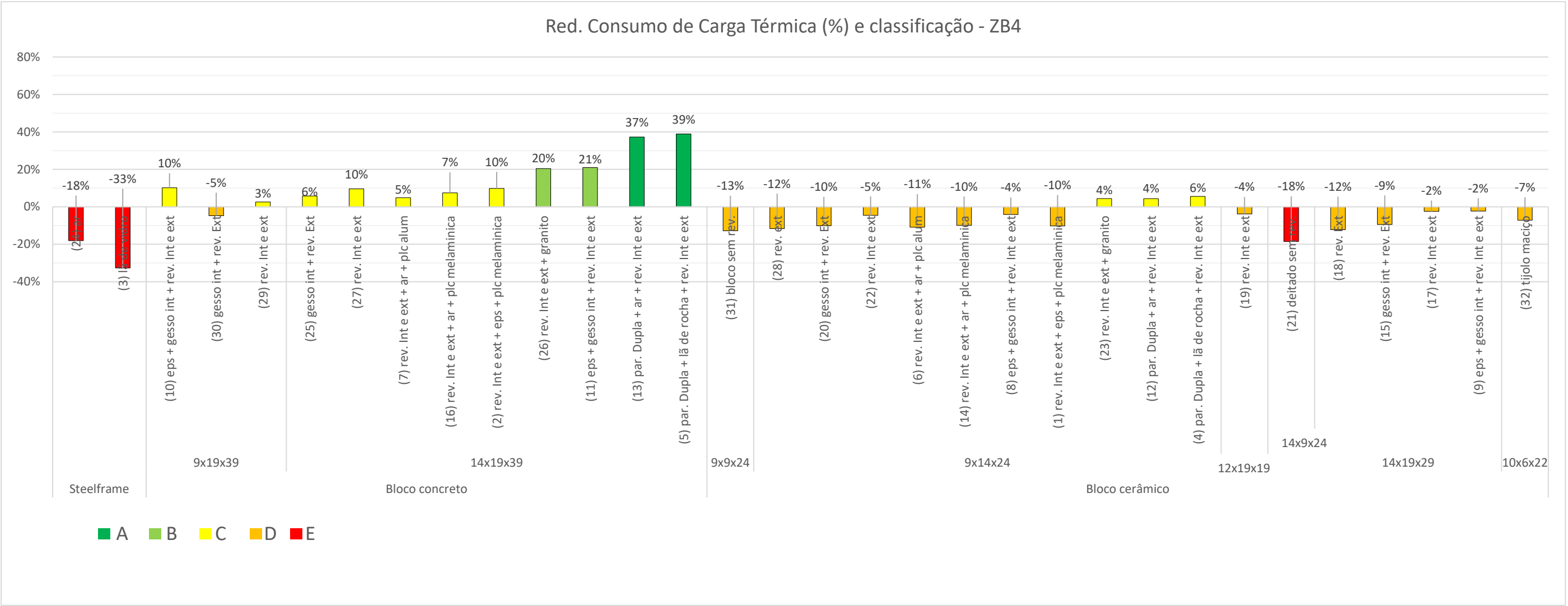


Figura 37: RedCgTT e classificação, demais composições. ZB4. Fonte: autoria própria.

4.2.5. ZB5 – Campos dos Goytacazes (RJ)

Na zona Bioclimática 5, os materiais usuais apresentam um comportamento generalizadamente pior do que a composição de controle, parede maciça de 10cm de concreto. Os blocos não demonstraram comportamentos discrepantes como nas demais zonas vistas (ZBs 1 a 4), mas muito próximos, onde todos eles apresentaram aumento no consumo de carga térmica total e um decaimento na classificação de C para D (Figura 38). O PHFT dos materiais também apresentou piora, onde o bloco cerâmico de vedação apresentou o pior deles, com uma diferença de quase 3 pontos percentuais (Figura 39). Como visto nas outras zonas, o bloco de concreto estrutural apresenta um comportamento próximo ao arquivo II (U alto e CT alto) visto nos ensaios teóricos, os blocos cerâmicos, porém, estão entre o comportamento do arquivo II e do arquivo IV (U baixo e CT baixo), não devido à baixa transmitância, pois a desses materiais se encontra próximo da média, mas sim devido a uma CT mais baixa.

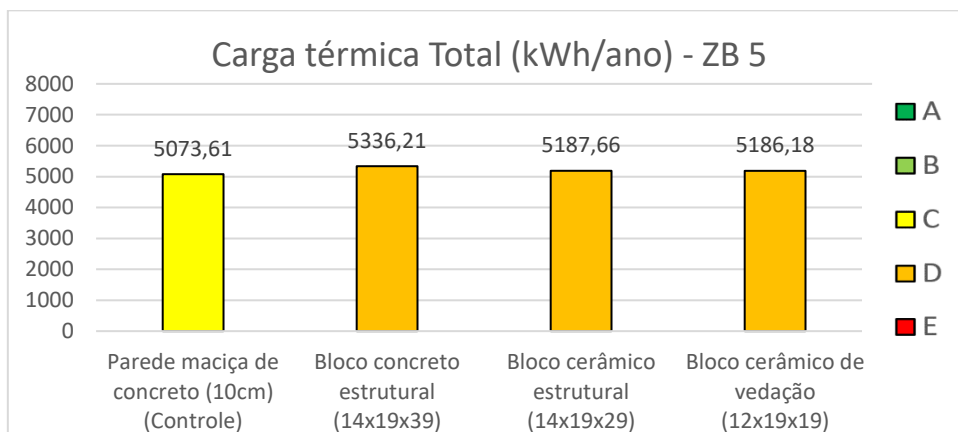


Figura 38: CgTT e classificação, composições usuais. ZB5. Fonte: autoria própria.

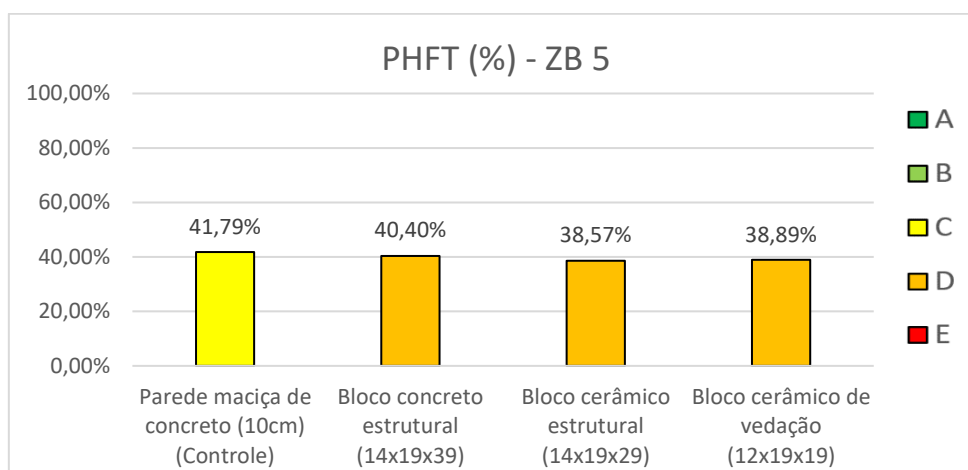


Figura 39: PHFT e classificação, composições usuais. ZB5. Fonte: autoria própria.

Devido ao comportamento das composições e o aumento do consumo dos blocos (Figura 40), nesta zona é mais indicado a escolha, dentre as

composições usuais, das paredes de concreto moldadas in loco (10cm), garantindo a eficiência mínima (C) e o consumo mínimo, não gerando aumento do mesmo. Ao analisar o consumo por m² por APP (Figura 41), mantém-se a falta de diferenças expressivas entre as composições usuais.

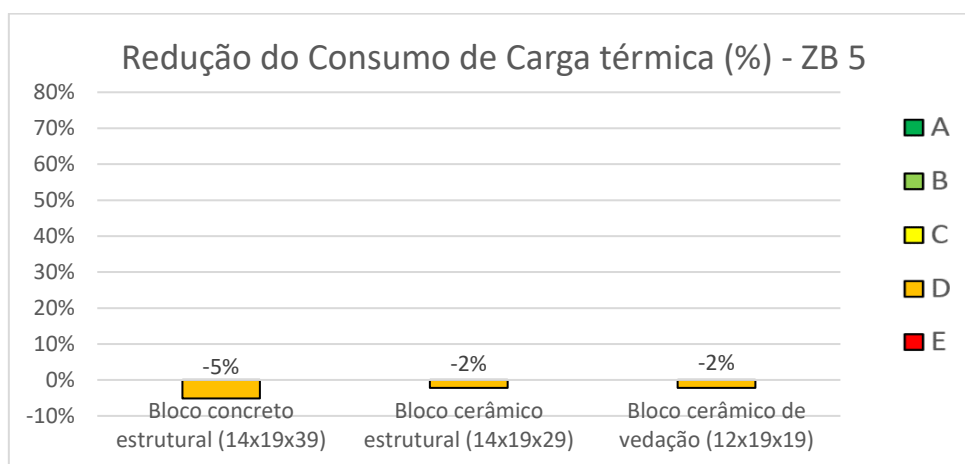


Figura 40: RedCgTT e classificação, composições usuais. ZB5. Fonte: autoria própria.

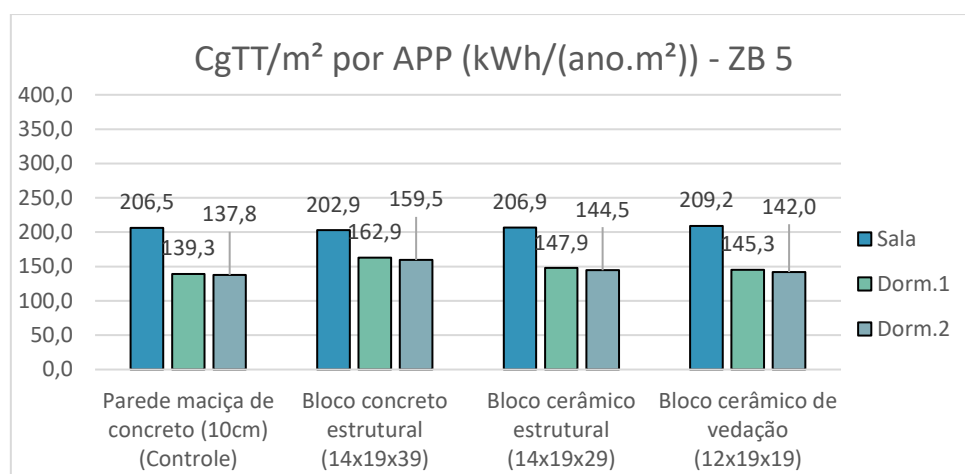


Figura 41: CgTT/m² por APP. ZB5. Fonte: autoria própria.

Ao observar os demais materiais (Figura 43) fica clara a dificuldade e importância da escolha dos materiais das composições das paredes externas, onde a grande maioria dos materiais apresenta aumento do consumo, podendo piorar em até 5% do consumo mínimo gerado pelo comportamento das paredes maciças (10cm) de concreto. Observando a Figura 42, é possível destacar que a aliança de baixa U e alta CT apresenta os melhores resultados de classificação de eficiência energética da envoltória, porém, alguns casos de baixa CT e baixa e média U também apresentaram classificação mínima (C) (casos: 3 e 28). Ainda, com o destaque em pontilhado, é perceptível que as composições que apresentam RedCgTT $\geq$ 5% se dividem em baixa U e alta CT, e U média e baixa CT (casos: 24 e 31).

Estas composições, steelframe com ar e bloco cerâmico sem revestimento, apresentaram reduções de 7%, mesmo com uma classificação inferior/insuficiente (E). Isso se deve a suas Us médias e suas CTs baixas (U=

2,56 W/m²K e CT= 26 kJ/m²K; U= 2,93 W/m²K e CT= 42 kJ/m²K, respectivamente), pois tais características se aproximam do comportamento do arquivo III nos ensaios teóricos (U alto e CT baixo), onde atinge-se uma alta amplitude térmica no interior da residência, com temperaturas máximas ultrapassando o limite de 2°C da maior temperatura registrada pelo arquivo de controle. Entretanto, nesses casos também se atingem temperaturas baixas, que auxiliam no menor consumo de carga térmica nos períodos mais frios do dia e nas épocas mais frias do ano. Isto acaba “beneficiando” o consumo e até mesmo o PHFT das zonas 5 a 8, em que não há limite de temperaturas mínimas, além de que o atual método de simulação contabiliza uma estadia majoritariamente noturna na residência (NBR 15575, 2021).

A única composição dentro da característica do arquivo III (U alto e CT baixo) que não apresenta piora da classificação energética, com características próximas das composições descritas no parágrafo anterior (U= 2,72 W/m²K e CT= 98 kJ/m²K) é a de bloco cerâmico (9x14x24) com revestimento externo (2,5cm). Mesmo com uma U média, sua CT não é baixa o suficiente para permitir um aumento tão grande da temperatura interna da residência, não ultrapassando o limite máximo de 2°C. Dessa forma, essa composição é capaz de apresentar uma ligeira redução do consumo de carga térmica (1%), sem decair a classificação de eficiência energética da envoltória.

É importante lembrar que este estudo considera apenas a influência dos materiais das paredes, sendo possível que outras soluções apresentem maior influência no comportamento da envoltória. Ainda, para futuros estudos, seria de interesse maior investigação de formas de melhorar o comportamento térmico da envoltória nesta zona bioclimática.

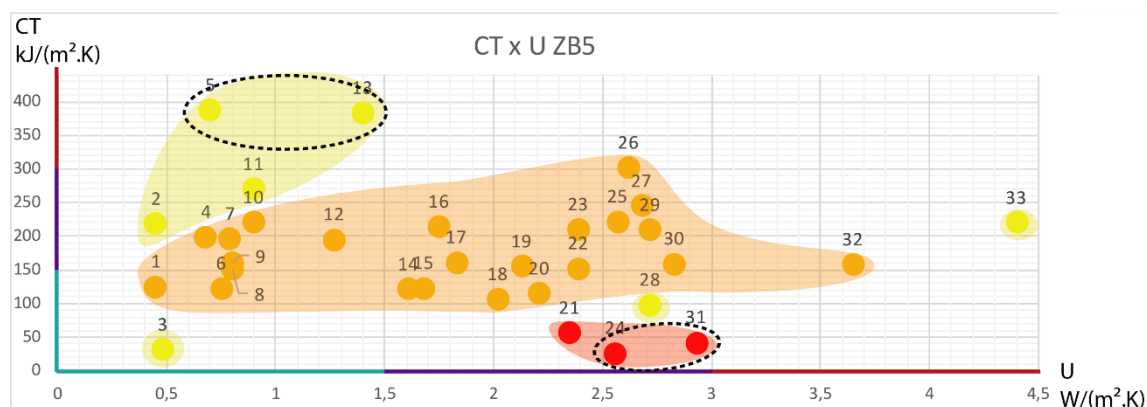


Figura 42: Composições organizadas em CTxU, com manchas de classificação e destaque para RedCgTT ≥ 5% (pontilhado). ZB5. Fonte: autoria própria.

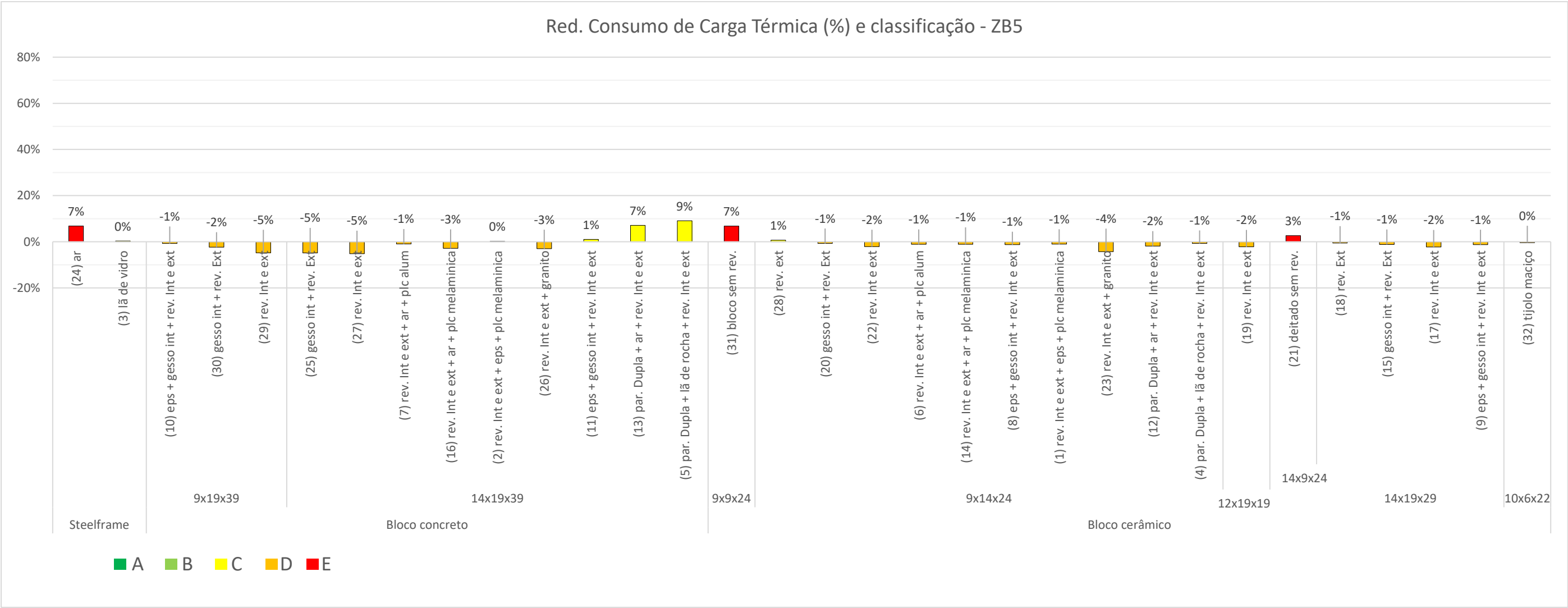


Figura 43: RedCgTT e classificação, demais composições. ZB5. Fonte: autoria própria.

4.2.6. ZB6 – Goiânia (GO)

Na zona bioclimática 6, observa-se um comportamento muito similar entre as composições usuais, com um consumo muito próximo (Figura 44). Dentre as quatro composições, a de bloco de concreto estrutural é a que apresenta pior classificação de eficiência energética (E). Isto se deve à redução expressiva do PHFT em relação à composição de parede maciça de concreto, sendo menor que 90% que o PHFT do modelo de referência (controle) (Figura 45). Quando comparado ao resultado da etapa anterior, por mais que a classificação do bloco de concreto (E) se aproxime do arquivo III (U alto e CT baixo), seu comportamento em relação ao consumo, PHFT e variação de temperatura interna (Figura 46), se aproximam muito mais do arquivo II (U alto e CT alto). Por ser uma composição com características mais moderadas, não é possível igualar seu comportamento aos resultados dos ensaios teóricos, porém, é de interesse compreender as nuances do comportamento dos materiais e suas características frente a diversidade climática do país.

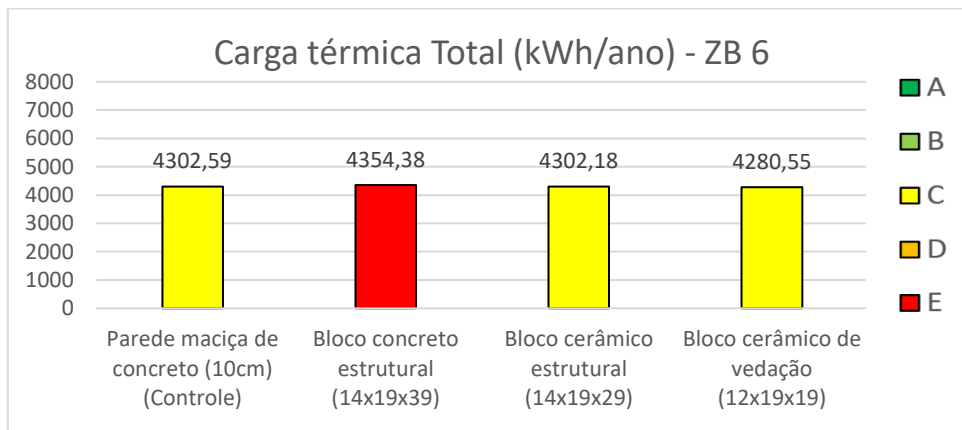


Figura 44: CgTT e classificação, composições usuais. ZB6. Fonte: autoria própria.

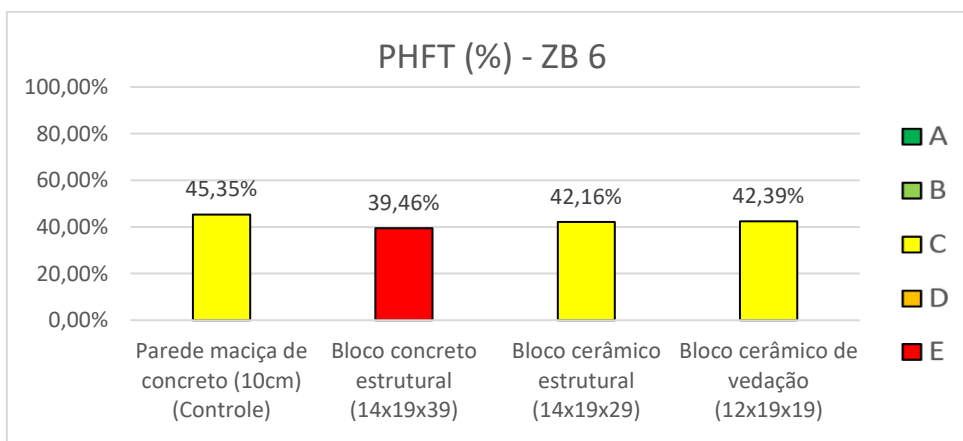


Figura 45: PHFT e classificação, composições usuais. ZB6. Fonte: autoria própria.

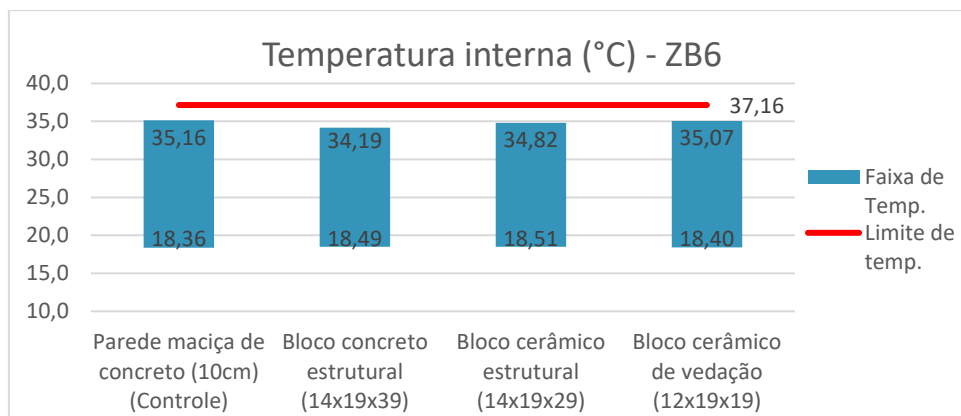


Figura 46: Variação de temperatura interna, composições usuais. ZB6. Fonte: autoria própria.

A proximidade dos resultados de consumo de carga térmica entre as composições usuais fica mais claro ao se observar o percentual de redução em relação a composição referente ao arquivo de controle (modelo de referência, parede de concreto maciço 10cm) (Figura 47). As composições não apresentam diferença no consumo, tendo todas um comportamento muito próximo. Isto pode ser observado também no consumo por m^2 por APP (Figura 48), onde quase não há diferença expressiva entre as composições. Por mais que o bloco de concreto estrutural apresente a maior redução no consumo por m^2 na sala, ele apresenta também um aumento no consumo dos quartos, devido à diferença de orientação sul (sala) e norte (dormitórios).

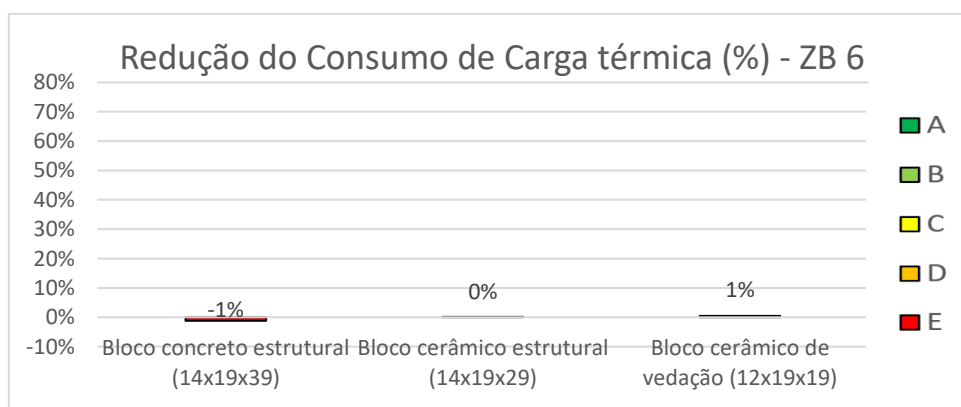


Figura 47: RedCgTT e classificação, composições usuais. ZB6. Fonte: autoria própria.

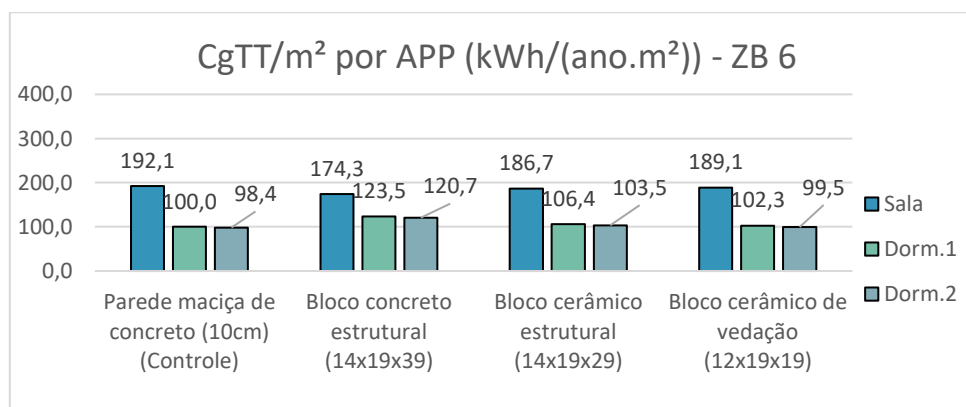


Figura 48: CgTT/ m^2 por APP. ZB6. Fonte: autoria própria.

Ao observar o comportamento dos demais materiais (Figura 50), percebe-se um resultado próximo ao da ZB5, onde a maioria das composições não apresenta redução no consumo de carga térmica. Nesta zona, porém, não há aumento expressivo no consumo. A maioria das composições estudadas apresentam um consumo muito próximo, com reduções majoritariamente próximas a 1% e -1% (22 de 32 composições).

Com a Figura 49, é possível apontar que a CT média apresenta as piores classificações, e com o destaque em pontilhado é possível observar um comportamento similar à ZB5, onde composições com alta CT e baixa U e composições com baixa CT e U média apresentam uma RedCgTT de ao menos 5%.

As composições que se destacam são: steelframe com preenchimento de ar ($U = 2,56 \text{ W/m}^2\text{K}$ e $CT = 26 \text{ kJ/m}^2\text{K}$), as duas paredes duplas de bloco de concreto, sendo a com lã de rocha a com melhor redução de consumo ($U = 0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ e $CT = 387 \text{ kJ/m}^2\text{K}$), bloco cerâmico $9 \times 9 \times 24$ sem revestimento ($U = 2,93 \text{ W/m}^2\text{K}$ e $CT = 42 \text{ kJ/m}^2\text{K}$) e o bloco cerâmico deitado $14 \times 9 \times 24$ ($U = 2,35 \text{ W/m}^2\text{K}$ e $CT = 56 \text{ kJ/m}^2\text{K}$). Apenas as paredes duplas de bloco de concreto apresentam a aliança entre baixa transmitância e alta capacidade térmica, porém devido à sua espessura, sua viabilidade construtiva fica comprometida. Dentre as outras composições destacadas, todas apresentam uma transmitância térmica média a alta e CT baixa. Como visto na ZB5, esta combinação apresenta uma maior redução do consumo devido a uma alta amplitude térmica que o material proporciona e a consideração de uma ocupação majoritariamente noturna pelo método.

É possível apontar que nesta zona, é necessário a combinação de outras soluções de eficiência energética para se conseguir um melhor desempenho térmico da edificação, sendo apenas a alteração da composição das paredes insuficiente para se conseguir maior redução do consumo e melhor classificação de eficiência energética, mantendo-se a viabilidade construtiva.

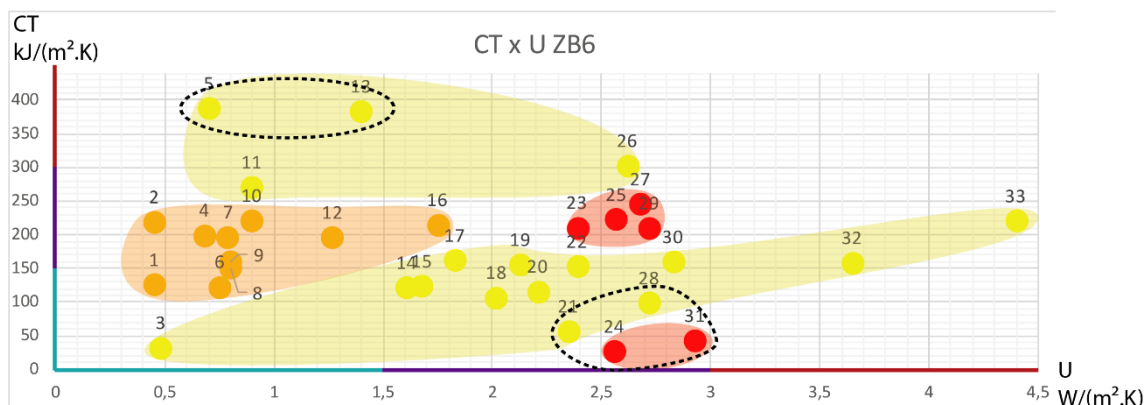


Figura 49: Composições organizadas em CTxU, com manchas de classificação e destaque para RedCgTT $\geq 5\%$ (pontilhado). ZB6. Fonte: autoria própria.

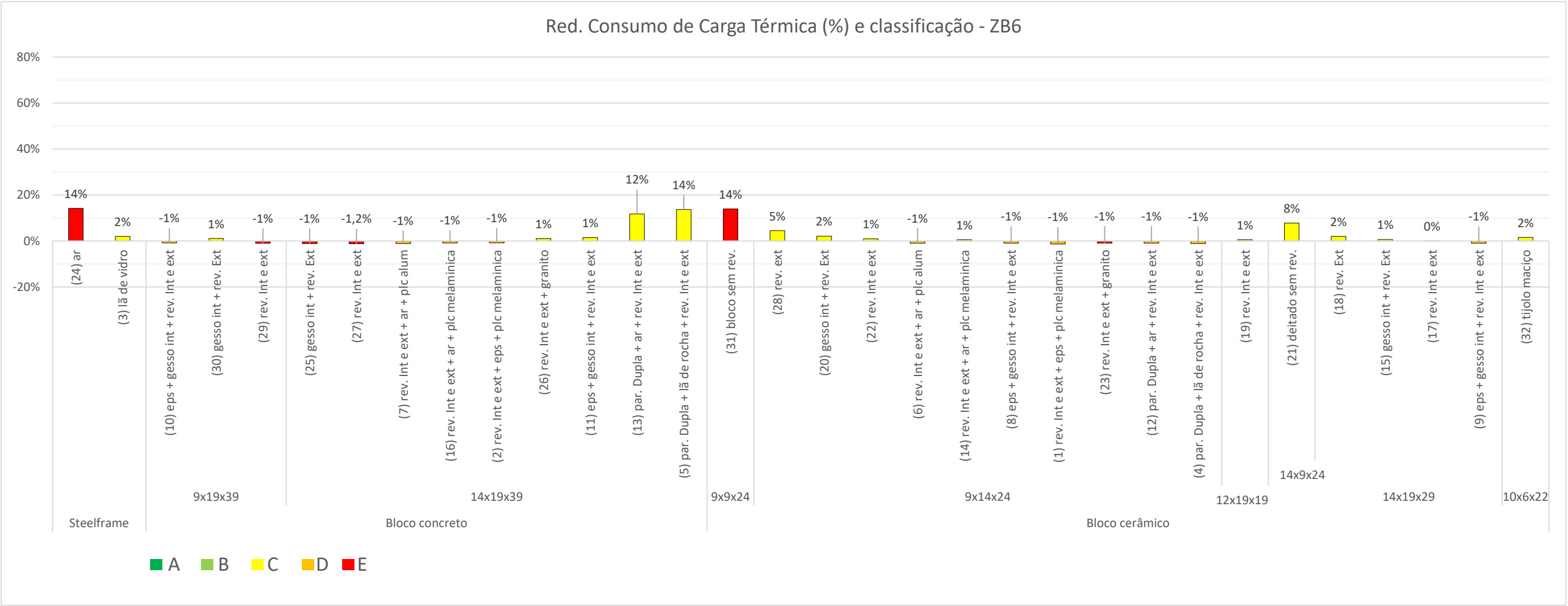


Figura 50: RedCgTT e classificação, demais composições. ZB6. Fonte: autoria própria.

4.2.7. ZB7 – Teresina (PI)

As composições usuais em projetos de HIS apresentam um comportamento variado, onde a composição de bloco de concreto estrutural se destaca com o menor consumo de carga térmica (Figura 51). Diferente dos resultados do arquivo II (U alto e CT alto) e III (U alto e CT baixo) dos ensaios teóricos, a composição de bloco de concreto não apresenta redução da classificação de eficiência energética (em comparação à Figura 6), e apresenta a maior redução de consumo dentre as composições usuais (14%, Figura 52). Isso se deve ao fato de que tanto sua transmitância térmica quanto sua capacidade térmica são intermediárias ($U = 2,68 \text{ W/m}^2\text{K}$ e $CT = 245 \text{ kJ/m}^2\text{K}$) aos valores utilizados nos ensaios teóricos ($U \text{ alto} = 4,4 \text{ W/m}^2\text{K}$; $CT \text{ alto} = 440 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ e $CT \text{ baixo} = 26 \text{ kJ/m}^2\text{K}$), por outro lado, sua CT se aproxima da parede maciça de concreto (arquivo de controle, equivalente ao modelo de referência comparativo) ($CT = 220 \text{ kJ/m}^2\text{K}$). Sendo assim, devido a sua capacidade térmica próxima ao arquivo de controle e sua transmitância térmica intermediária aos valores limites, a composição de bloco de concreto estrutural se aproxima do comportamento visto nos ensaios teóricos do arquivo I (controle) ($U = 4,4 \text{ W/m}^2\text{K}$ e $CT = 220 \text{ kJ/m}^2\text{K}$), porém, com o benefício (para esta zona) de uma transmitância térmica menor.

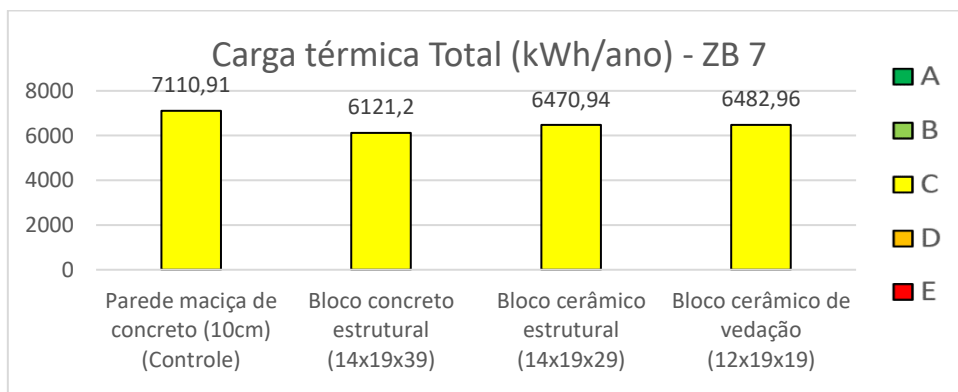


Figura 51: CgTT e classificação, composições usuais. ZB7. Fonte: autoria própria.

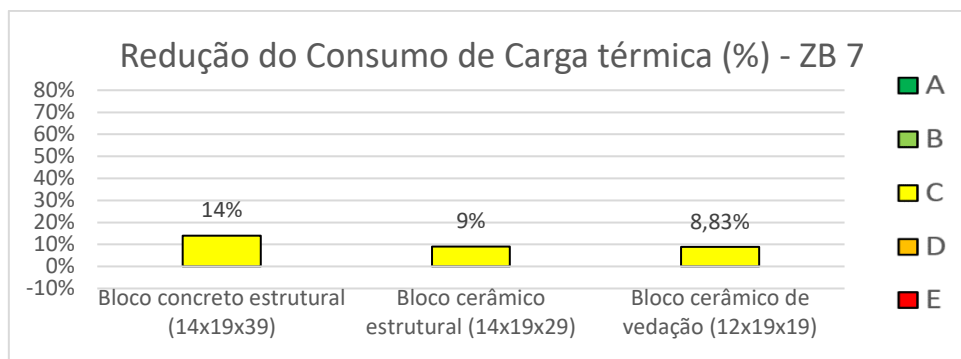


Figura 52: RedCgTT e classificação, composições usuais. ZB7. Fonte: autoria própria.

Este benefício pode ser observado no consumo por m^2 por APP (Figura 53), onde a composição de bloco de concreto, em comparação às demais

composições, apresenta um consumo por m² consideravelmente menor na sala, orientada majoritariamente para o Sul. O consumo dos dormitórios não apresenta diferença significativa ao variar as composições, podendo afirmar assim, que a orientação Norte não se beneficia da alteração dos materiais.

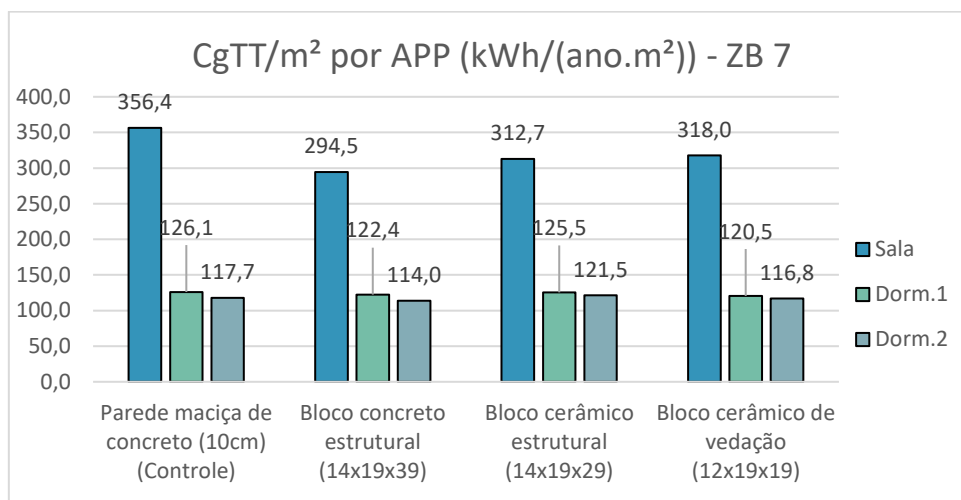


Figura 53: CgTT/m² por APP. ZB7. Fonte: autoria própria.

Entretanto, mesmo proporcionando um menor consumo de carga térmica, a composição de bloco de concreto estrutural apresenta o pior PHFT entre as composições usuais, sendo todas elas menores do que a referência (parede de concreto maciça) (Figura 54). Isto possivelmente se deve à menor variação de temperatura interna e à maior temperatura mínima entre as composições (Figura 55), visto que esta é uma zona quente e atingir temperaturas mais baixas é algo benéfico, ao invés de variar pouco a temperatura dentro de uma faixa mais quente.

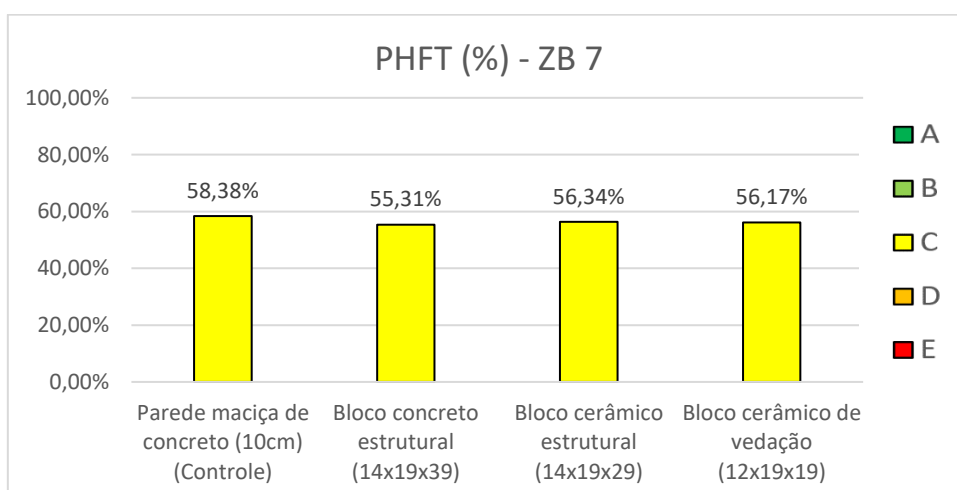


Figura 54: PHFT e classificação, composições usuais. ZB7. Fonte: autoria própria.

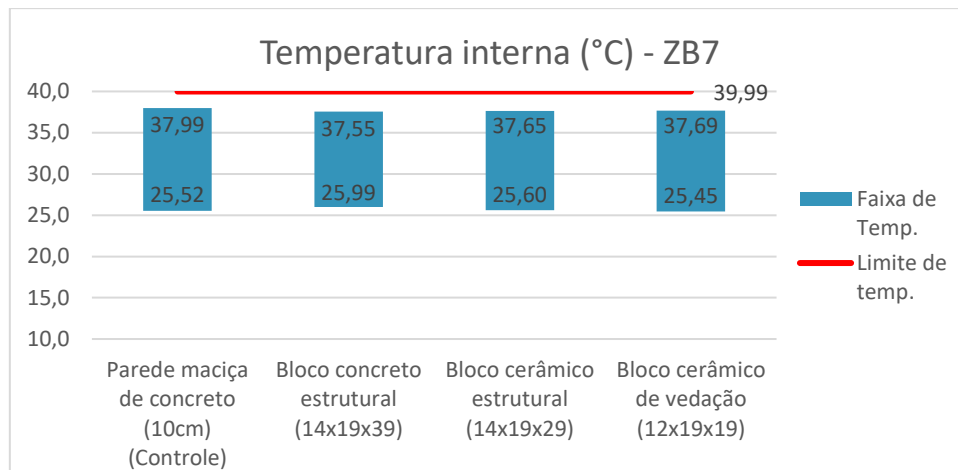


Figura 55: Variação de temperatura interna das composições usuais. ZB7. Fonte: autoria própria.

Ainda, ao se analisar o comportamento das demais composições nesta zona (Figura 57), mesmo com classificações majoritariamente mínimas (C), é possível compreender que composições que tenham CTs mais altas com U s médias a baixas apresentam RedCgTT razoável ($\geq 20\%$) (Figura 56); e composições com U média e CT muito baixa podem apresentar RedCgTT razoável. Esse comportamento é similar ao comportamento da mesma composição na ZB6 e 5, devido ao padrão de ocupação utilizado pelo método.

Porém, a composição com U intermediária e baixa CT (steelframe com ar) apresenta classificação inferior (E) devido à sua alta amplitude térmica, ultrapassando o limite de temperatura máxima aceito pelo método, devendo ser levado em conta para a construção. É possível que ao combinar soluções de eficiência energética, atinja-se melhor classificação da envoltória, sendo necessários estudos mais específicos.

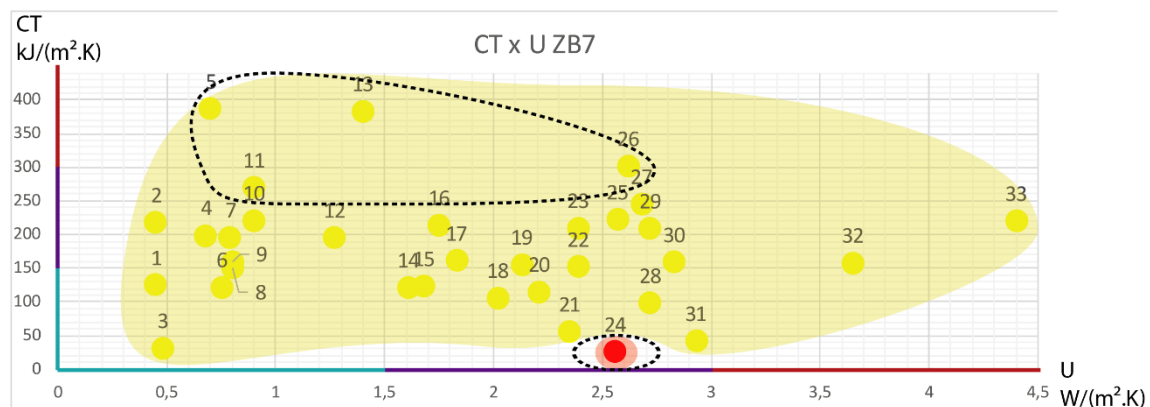


Figura 56: Composições organizadas em CTxU, com manchas de classificação e destaque para RedCgTT $\geq 20\%$ (pontilhado). ZB7. Fonte: autoria própria.

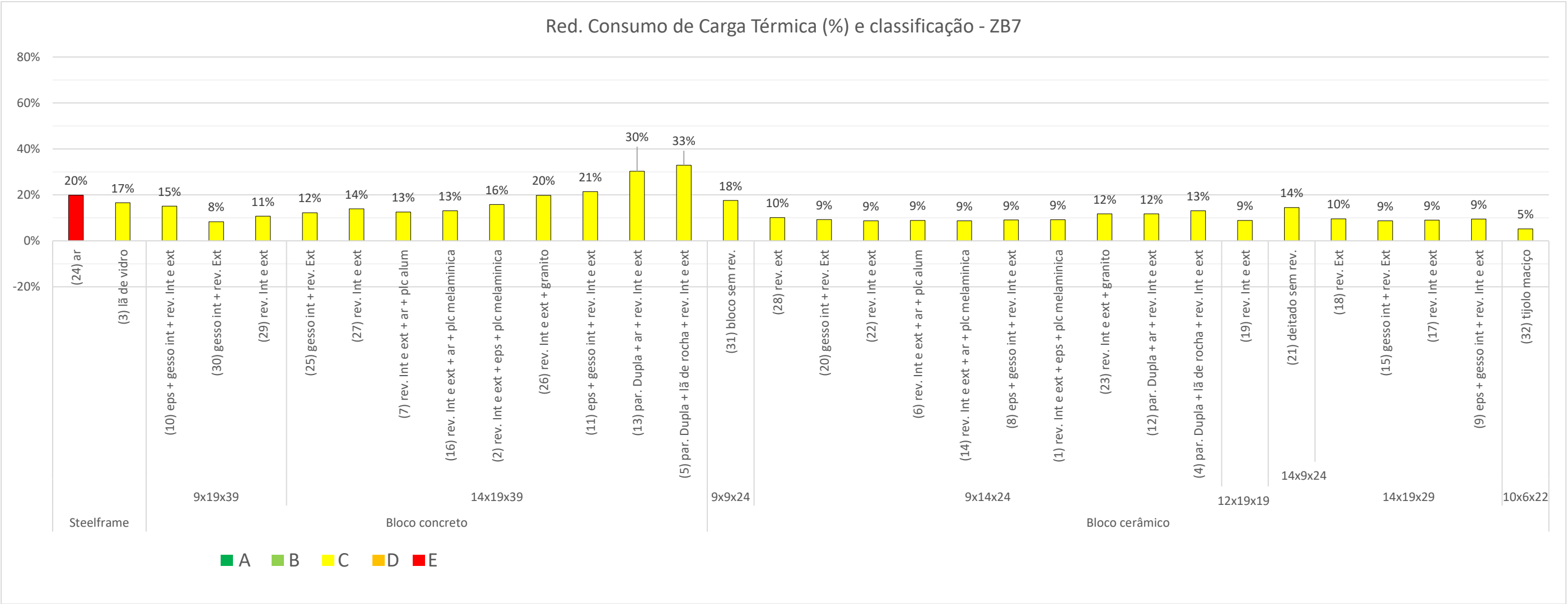


Figura 57: RedCgTT e classificação, demais composições. ZB7. Fonte: autoria própria.

4.2.8. ZB8 – Manaus (AM)

Observando o comportamento das composições usuais em HIS na Figura 58, percebe-se que as composições de blocos apresentam similaridade em seu comportamento relacionado ao consumo, onde também nenhuma apresenta mudança na classificação de eficiência energética, mas todas apresentam redução significativa do consumo. Dentre as composições de blocos, o bloco cerâmico estrutural apresenta o menor consumo, e as composições de bloco cerâmico e de concreto apresentam resultados próximos entre si, com reduções de 19% e 18% em relação ao consumo da parede maciça de concreto (10cm) (Figura 59). Ainda, mesmo que a composição de bloco de concreto estrutural apresente o menor consumo, sua redução do consumo se diferencia em 1 e 2 pontos percentuais das demais.

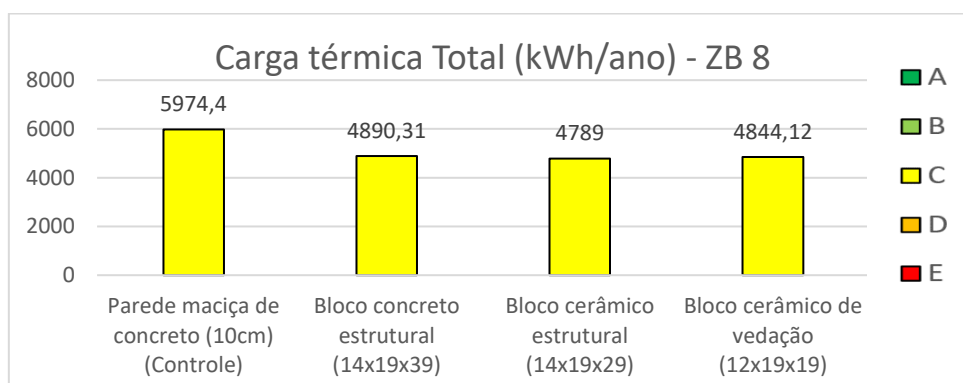


Figura 58: CgTT e classificação, composições usuais. ZB8. Fonte: autoria própria.

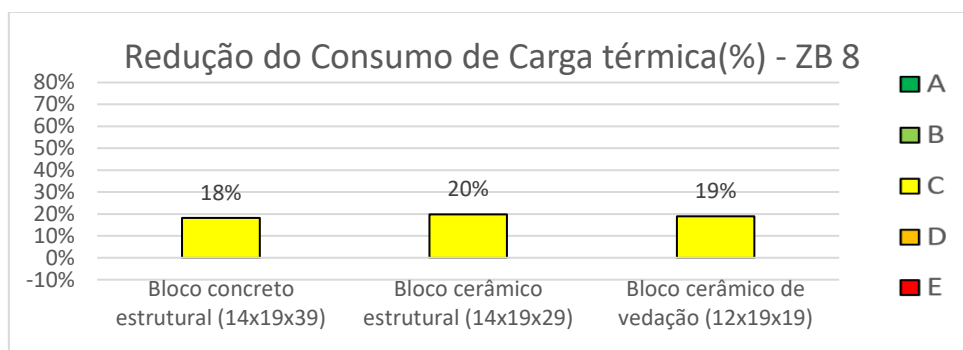


Figura 59: RedCgTT e classificação, composições usuais. ZB8. Fonte: autoria própria.

Mesmo com uma transmitância térmica maior que as demais, o bloco de concreto estrutural apresenta uma capacidade térmica mais alta entre as composições, apresentando assim um consumo próximo. Entretanto, o PHFT desta composição é o mais baixo dentre as composições mais usuais, onde as composições de bloco cerâmico possuem os PHFT mais altos, dentre eles, destaque para o de bloco cerâmico estrutural (Figura 60). Isto possivelmente ocorre devido à baixa capacidade térmica, que possibilita maior variação térmica no interior da residência e, com a transmitância térmica intermediária, a temperatura máxima não ultrapassa o limite de 2°C estipulado pelo método para

este tipo de residência, enquanto permite atingir temperaturas mínimas mais baixas (Figura 61).

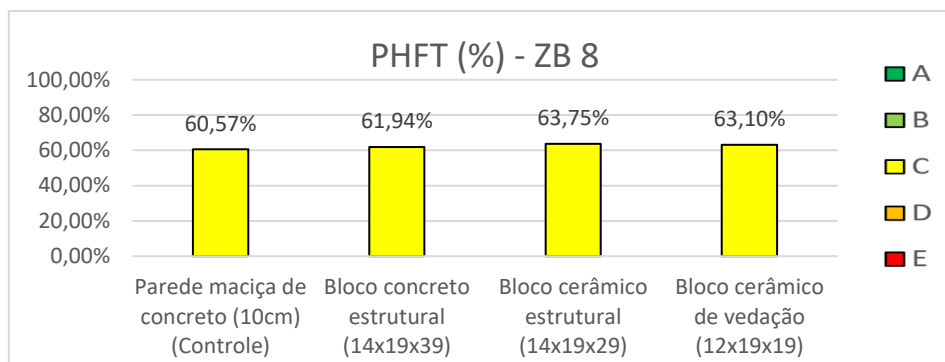


Figura 60: PHFT e classificação, composições usuais. ZB8. Fonte: autoria própria.

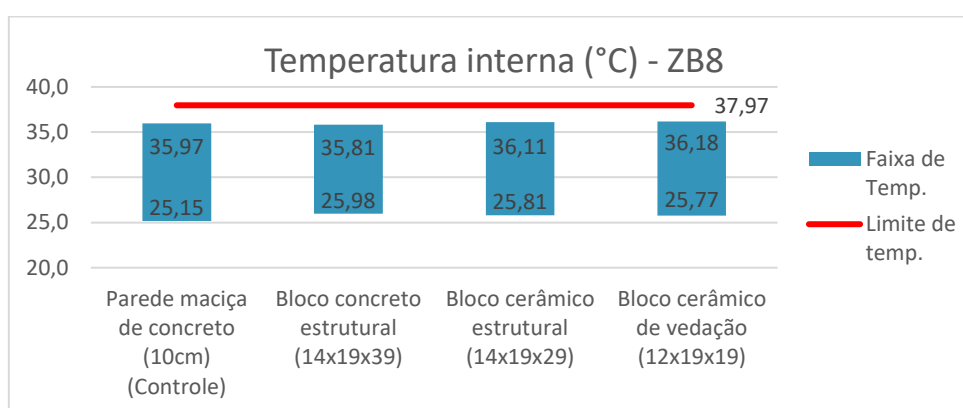


Figura 61: Variação de temperatura interna, composições usuais. ZB8. Fonte: autoria própria.

Os resultados do consumo por m^2 em cada ambiente de permanência prolongada (APP) mostram que os quartos se beneficiam levemente desta variação térmica, com menor consumo nas composições de bloco cerâmico. Isto se deve pelo período de ocupação definido na NBR 15575:2021, onde os quartos são ocupados apenas no período da noite (22h às 7:59h), onde o patamar inferior de temperatura diária acontece. O bloco de concreto, por sua vez, apresenta um pequeno aumento no consumo por m^2 nos dormitórios, entretanto, a sala tem um consumo consideravelmente menor de carga térmica em relação às demais composições (Figura 62).

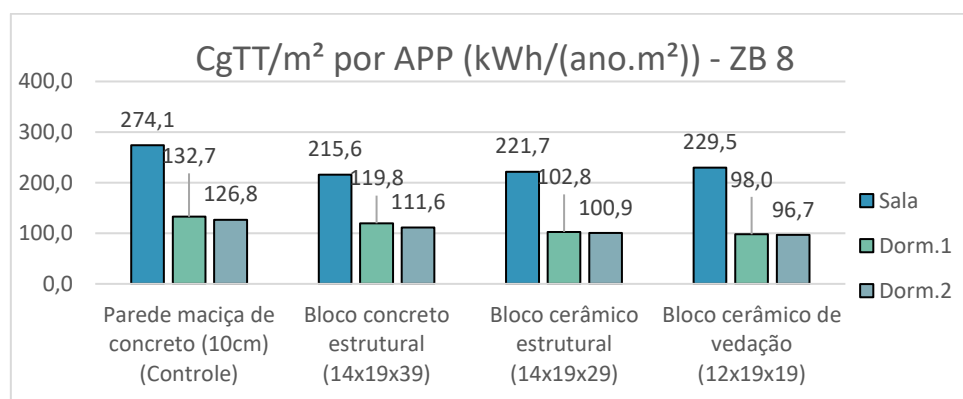


Figura 62: CgTT/ m^2 por APP. ZB8. Fonte: autoria própria.

Diante das demais composições (Figura 64), é possível observar que este comportamento se repete. As composições com transmitância térmica intermediária e baixa CT (steelframe com ar), apresentam até mesmo uma classificação intermediária (B). Isto acontece pelo aumento do PHFT, que é beneficiado pelo padrão de ocupação, e quando a temperatura máxima não ultrapassa o aumento de 2°C, mesmo que, neste caso, apresente um aumento de 1,8°C.

Ao observar a Figura 63 é possível apontar que as composições com alta CT e baixa U, e baixa CT e U média apresentam as melhores classificações, porém, ao observar o destaque pontilhado, as composições que apresentam $\text{RedCgTT} \geq 20\%$ tendem a se concentrar nas baixas Us, especialmente se aliadas à alta CT, apresentando as maiores $\text{RedCgTT} (\geq 35\%)$.

Entretanto, é possível observar que a composição de steelframe com lã de vidro também apresenta uma das maiores reduções de consumo, mesmo sem melhora de classificação, por não atingir o PHFT mínimo exigido pelo método. Esta composição apresenta não apenas baixa transmitância, mas também baixa capacidade térmica ($U = 0,48 \text{ W/m}^2\text{K}$, $CT = 31,4 \text{ kJ/m}^2\text{K}$), apresentando um comportamento similar ao arquivo IV visto nos ensaios teóricos. Isto demonstra que há uma possibilidade de adoção de uma certa variedade de composições nesta zona bioclimática. Ainda, é possível que os resultados apresentem melhora ao aliar outras soluções de eficiência energética à edificação.

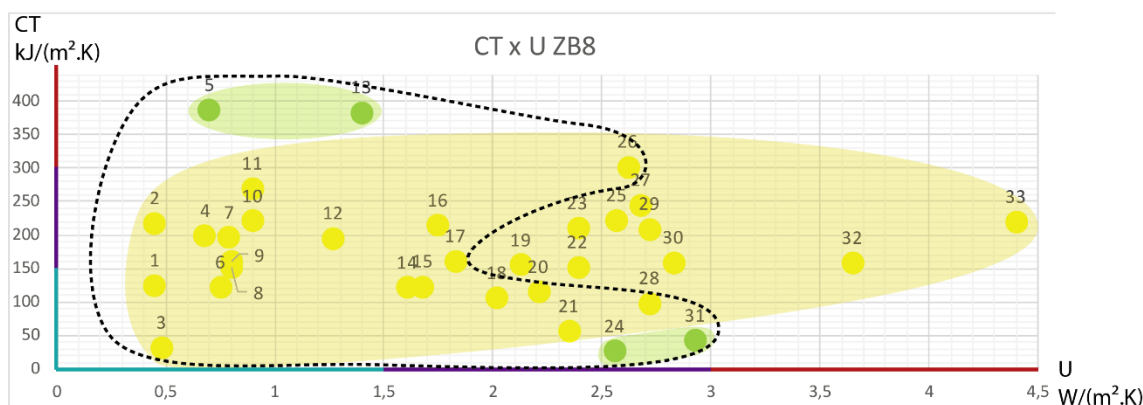


Figura 63: Composições organizadas em CTxU, com manchas de classificação e destaque para $\text{RedCgTT} \geq 20\%$ (pontilhado). ZB8. Fonte: autoria própria.

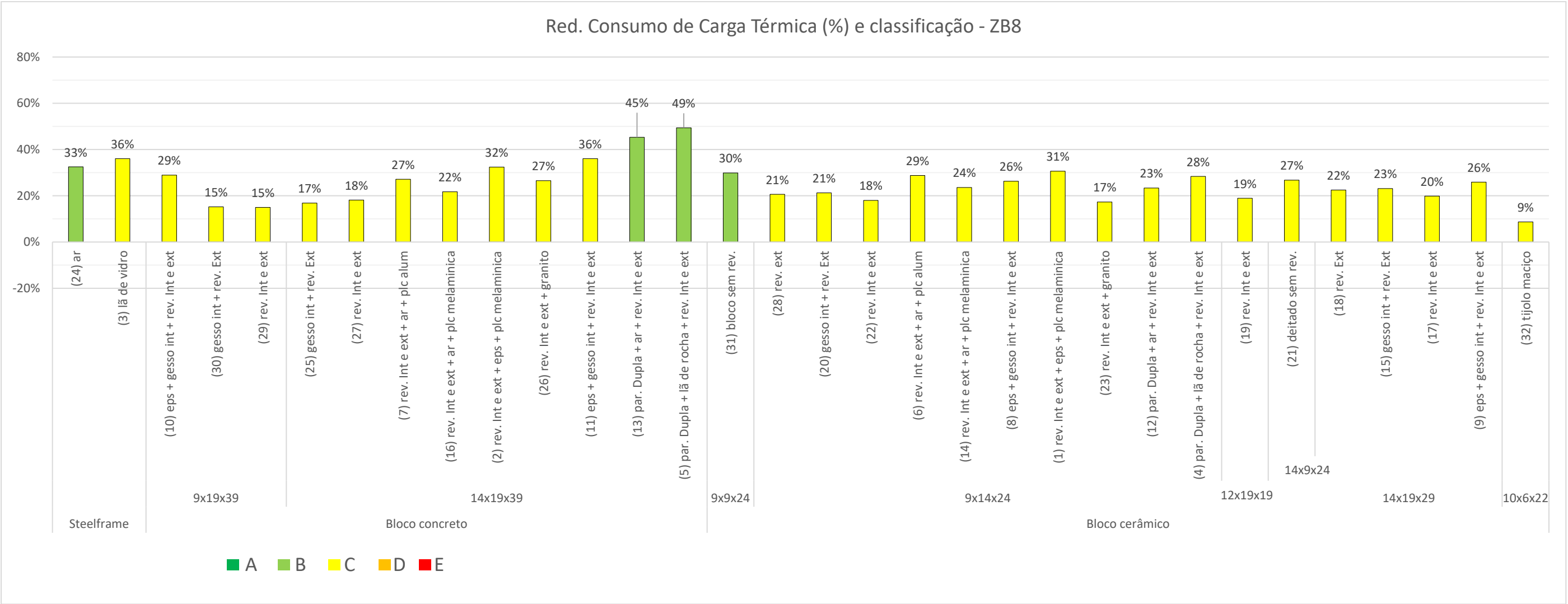


Figura 64: RedCgTT e classificação, demais composições. ZB8. Fonte: autoria própria.

4.3. Discussão dos resultados

Embora os resultados do caso V (U baixa e CT alta) dos ensaios teóricos corroborem com a interpretação da NBRR 15575:2021 (requisitos mínimos para paredes externas), indicando a possibilidade de adoção de um padrão construtivo para vedações verticais opacas nas oito zonas bioclimáticas do país, concentrando as melhores classificações e redução de consumo, os resultados da avaliação das composições de vedações reais apresentam maior complexidade à discussão. A seguir, apresenta-se brevemente a interpretação dos principais resultados obtidos para cada ZB.

A ZB1 certamente se apresentou como a mais flexível, permitindo a adoção de composições diversas e, em associação às demais variáveis envolvidas no projeto, de modo a obter desempenho termo energético de elevada classificação. A adoção de composições com CT média à alta se mostrou a mais indicada. O isolamento térmico (baixa U) também contribuiu para um comportamento eficiente, em conformidade com o estudo de Invidiata e Ghishi (2016), que demonstraram como o isolamento térmico em Curitiba (ZB1) auxiliaria na menor demanda de energia para resfriamento nos anos de 2050 e 2080.

Em relação a ZB2, cabe destacar que diversas composições de vedação vertical opaca apresentaram redução de consumo próxima a 20%. No entanto, este fato não foi suficiente para a melhoria da classificação termo energética apenas com a alteração da composição das paredes. Isso se deve ao fato de que o modelo de referência não apresentou $PHFT \geq 70\%$, exigindo assim uma variação mínima de 11,42% para que apresentasse melhora na classificação. Adicionalmente, foi constatado que composições que apresentam baixa transmitância térmica demonstraram maior benefício nesta zona, devido ao clima quente e temperado.

No que diz respeito à ZB3, composições com alta CT apresentam maiores benefícios à classificação de eficiência e à redução de consumo. Ainda, composições que aliam as duas características (U baixa e CT alta) apresentaram melhores reduções de consumo, conforme observado nos ensaios teóricos, fundamental para a qualidade dos resultados. Da mesma maneira, Triana, Lamberts e Sassi (2018) observaram que para São Paulo (ZB3), os melhores desempenhos térmicos foram obtidos a partir do emprego de paredes de elevada CT e isolamento (menor U). Além disso, Invidiata e Ghishi (2016), também apontaram para uma menor demanda energética futura em residências que apresentem isolamento térmico (U baixa) nesta ZB (Florianópolis).

Em relação a ZB4, foi percebido a contraindicação de adoção de blocos cerâmicos nas vedações verticais. Estas composições apresentaram aumento no consumo de energia, devido à sua baixa CT. Ainda, os resultados demonstraram que esta é uma zona mais restrita em relação aos materiais das vedações verticais externas. Foi constatado que composições com alta inércia

térmica (alta CT) apresentam maior benefício ao comportamento térmico da edificação em comparação com o aumento do isolamento térmico (baixa U). Isto ocorre devido ao clima tropical de altitude que caracteriza esta zona, com alta amplitude térmica.

A ZB5 apresenta alta restrição em relação à escolha de materialidade das paredes externas. A maioria das composições apresenta aumento do consumo, aumentando a importância da escolha dos materiais mais apropriados para esta zona. A aliança da baixa U e alta CT auxilia na melhora do comportamento da envoltória, mas seus resultados mais expressivos são apenas com as paredes duplas, o que dificulta sua aplicabilidade devido à espessura necessária. Já as composições com baixa CT e U intermediária demonstraram redução de consumo semelhante às paredes duplas, mas apresentaram eficiência inferior (E) devido à alta amplitude térmica no interior da residência, ultrapassando os 2°C máximos de tolerância. Dessa forma, é de interesse a adoção de outras soluções de eficiência energética para buscar melhores desempenhos térmicos da edificação, sendo apenas a alteração da composição das paredes insuficiente para se conseguir maior redução do consumo e melhor classificação de eficiência energética, mantendo-se a viabilidade construtiva.

A ZB6 apresenta resultados similares à ZB5, onde, seguindo a combinação de baixa U e alta CT, apenas as paredes duplas se destacam, entretanto, as composições de baixa CT e U intermediária apresentam redução de carga térmica similar às paredes duplas, porém com classificação inferior (E) (composições como *steelframe* com preenchimento de ar e bloco cerâmico 9x9x24 sem revestimento). Desta forma, seria de interesse haver maior investigação nas zonas 5 e 6, considerando outras soluções de eficiência energética aplicadas à arquitetura, a fim de compreender se as mesmas composições apresentariam melhores resultados e classificações do comportamento térmico da envoltória.

No que diz respeito à ZB7, tanto composições com alta inércia térmica (alta CT) quanto as de baixa inércia térmica (baixa CT) e U intermediária apresentam as maiores reduções de consumo de carga térmica (com destaque para a composição de *steelframe* com preenchimento de ar). Isto ocorre devido as altas temperaturas desta zona, onde a inércia térmica auxilia no controle da temperatura interna, enquanto que a combinação de baixa inércia térmica e U intermediária, facilita o resfriamento dos ambientes durante os períodos de temperaturas mais baixas. Entretanto, deve-se tomar cuidado ao adotar a última combinação na composição das paredes externas, devido a sua alta amplitude térmica, sendo necessário estudos que considerem outras soluções de eficiência energética na edificação aliadas à composição, para que se atinja melhor classificação da envoltória.

Em relação a ZB8, composições com baixa a média U apresentam reduções de carga térmica acima de 20%. Em relação a CT, nesta zona é possível observar que as maiores reduções (paredes duplas e *steelframe* com lâ de vidro) apresentam os extremos da CT (alta ou baixa). As altas temperaturas ao longo

de todo o ano podem explicar este comportamento, sendo ideal ou alta inércia térmica, dificultando altas temperaturas internas, ou baixa inércia térmica, onde é possível atingir temperaturas mais baixas nos períodos mais frios do ano. Este comportamento é similar ao observado na ZB7, porém, melhorado, pois as composições com baixa CT e U intermediária não apresentam queda da classificação. Isto ocorre devido as temperaturas internas não terem ultrapassado o limite de 2°C do método, mesmo que por uma diferença de 0,2°C abaixo do limite. Desta forma, mesmo atingindo altas temperaturas internas, não ultrapassar o limite permite a melhora da classificação, devido ao aumento do PHFT pelas horas em que a temperatura interna decai mais do que com paredes mais pesadas. Mesmo com a melhora da classificação da composição de steelframe com ar (baixa CT e U intermediária), a composição de steelframe com lã de vidro (baixa CT e baixa U) apresenta maior redução de carga térmica, porém mantendo a classificação C. Isto demonstra que a adoção de isolamento térmico pode beneficiar na menor demanda energética, mas não nas horas de conforto. Tal comportamento também é observado no estudo de Invidiata e Ghishi (2016), onde em Salvador (ZB8) a residência não se beneficia de isolamento térmico nas paredes para o conforto do usuário, mas auxilia na menor demanda energética devido às altas temperaturas externas futuras. Ainda, é possível adotar outras soluções para melhorar o resultado desta última composição.

Desta forma, é possível compreender que a adoção de um padrão construtivo, respeitando a aliança de baixa transmitância térmica e alta capacidade térmica, embora possível, deve ser contraindicada. Moreno, Moraes e Souza (2017) apresentaram um estudo com três composições de vedações verticais aplicadas em todo o país, onde nenhuma delas resultou em classificação além da mínima (C). No presente estudo foi possível observar que as zonas apresentam resultados variados, onde nas zonas 1, 3 e 4, a alta CT é traz mais benefícios em comparação com a U, e nas zonas 5 a 8 o benefício da maior variação de temperatura interna se mostrou relevante. Isto ocorre não apenas pelo clima, mas também pelo padrão de ocupação adotado pela NBR 15575:2021, que prioriza uma ocupação majoritariamente noturna na residência. A zona que melhor se enquadra no possível padrão construtivo de composições de vedação vertical opaca com baixa U e alta CT é a 2.

5. CONCLUSÕES

O presente estudo investigou de maneira crítica a possibilidade de adoção de uma composição única de vedação vertical opaca em todas as zonas bioclimáticas do Brasil, desde que apresentasse classificação de eficiência energética intermediária (B) a superior (A). A partir do emprego do método simplificado da INI-R, na página do PBE Edifica, foram realizados 296 testes em uma planta modelo de HIS que permitiram compreender de maneira detalhada a influência dos limites dos parâmetros CT e U, além do impacto da adoção de diferentes composições construtivas de vedação (variando CT e U para além dos limites) na resposta de eficiência termo energética. De maneira geral, ficou evidente que não é recomendável empregar um padrão de vedação, embora a classificação entre B e A tenha sido observada para uma das oito zonas bioclimáticas. As principais conclusões deste estudo são apresentadas a seguir.

Inicialmente, os resultados obtidos a partir da variação das características das vedações verticais opacas possibilitaram a compreensão do impacto que cada uma apresenta no desempenho da envoltória. A alta capacidade térmica é altamente benéfica em todas as zonas bioclimáticas, possibilitando classificações intermediárias (B) nas zonas 1 e 3, independente da transmitância térmica. Enquanto a combinação já indicada na NBR 15575:2021, de baixa U e alta CT, apresenta os melhores resultados nas zonas em geral, excetuando-se nas zonas 5 e 6, que apresentaram menor consumo, porém pior classificação devido à alta variação térmica na composição III (alta transmitância e baixa capacidade térmica). Isto se deve ao modelo de ocupação utilizado para calcular o PHFT, que favorece a ocupação em horários noturnos, fora do pico de temperatura, favorecendo composições mais leves, que apresentam grande variação térmica nas zonas 5 a 8. No entanto, como o método não aceita variações acima de 2°C em relação ao modelo de referência, a classificação desta composição foi dada como inferior (E).

Nas zonas bioclimáticas 2, 5, 6 e 7, não foi possível obter classificação além do mínimo (C). Isto ocorreu devido ao modelo de referência não ter atingido um $\text{PHFT} \geq 70\%$, exigindo uma melhora considerável do PHFT dos modelos reais em relação ao da referência para subir a classificação, o que não foi atingido. De todo modo, os resultados indicaram a possibilidade de atingir classificações intermediárias (B) ou superiores (A) se for adotado maior CT (e possivelmente menor U) do que as avaliadas neste trabalho. Cabe lembrar que a ferramenta empregada não permite análises com valores de capacidade térmica maiores que o já testado (440 kJ/(m².K)). Em relação aos valores de transmitância térmica, a portaria do método indica como valor mínimo 0,24 (W/(m².K)), entretanto a planilha disponibilizada pelo método para os testes na interface não permite valores menores que o utilizado neste trabalho (0,45 (W/(m².K))). Adicionalmente, os resultados e classificações dessas zonas foram obtidos em função da alteração da materialidade das paredes, sendo possível melhorar o desempenho térmico da edificação ao se combinar, eventualmente,

outras soluções como orientação mais adequada, sombreamento das aberturas, melhora da ventilação natural, alteração da cor externa, entre outros.

Com os ensaios teóricos, foi possível compreender que ao seguir a indicação da NBR 15575:2021 é possível obter classificações entre C e A, somente com a escolha correta dos materiais das paredes, porém não em todas as zonas bioclimáticas. Ainda, foi constatado maior complexidade nos resultados do que os limites descritos na norma, sendo possível obter melhora no desempenho térmico mesmo com alta transmitância térmica (U), desde que aliada à alta capacidade térmica (CT) nas zonas 1 e 3.

Posteriormente, com a análise do comportamento e classificação de composições reais, foi possível avaliar de maneira mais detalhada e aproximada da realidade o comportamento dos materiais em cada zona bioclimática. Foi perceptível que, em geral, a composição de bloco de concreto estrutural (14x19x39) com revestimento interno e externo com placa de EPS (3cm) e placa de gesso (1,25cm) internos apresentou os melhores resultados nas zonas 1, 3, 4, 7 e 8. O comportamento desta composição condiz com o resultado dos ensaios teóricos, tendo como características transmitância térmica baixa (0,9 W/(m².K)) e capacidade térmica alta (269,6 kJ/(m².K)), sendo ainda uma composição de fácil execução e de fácil adaptação da composição usual já adotada pelo mercado, a de bloco de concreto estrutural com revestimento interno e externo.

Ademais, foi identificada a contraindicação da utilização de composições de bloco cerâmico e sistemas de *steelframe* na ZB4, pois apresentaram aumento significativo na carga térmica. Para esta zona, notou-se mais indicado o uso de composições com alta capacidade térmica (CT), como as de bloco de concreto estrutural, em especial, a composição indicada anteriormente, que atinge classificação intermediária (B) e redução de consumo de carga térmica (RedCgTT) de 21%. Nas zonas 5 e 6, os resultados mostram baixo impacto na classificação de eficiência energética da envoltória e no consumo da edificação, tornando a escolha do material das paredes minimamente cauteloso, apenas para não aumentar o consumo. Nessas zonas, devem ser adotadas diferentes soluções de eficiência energética a fim de melhorar o consumo, sendo necessário maiores estudos de quais seriam mais apropriadas. Já a zona bioclimática 2 apresentou resultados similares entre bloco cerâmico e bloco estrutural com revestimento interno e externo, sendo possível a adoção de ambos, preferencialmente com EPS (8cm) e placa melamínica externos, ou mesmo EPS (3cm) e placa de gesso (1,25cm) internos, que apresenta uma diferença de 1 ponto percentual em relação à anterior.

Também foi possível identificar os padrões comportamentais e de classificação das composições, aprofundando a compreensão do impacto que as características de transmitância (U) e capacidade térmica (CT) apresentam em cada ZB. Nas zonas 3 e 4 a alteração da CT apresenta maior influência na classificação, sendo indicadas CTs altas. Isto vai a favor dos estudos de Triana, Lamberts e Sassi (2018), que identificaram que paredes de elevada CT e menor

U apresentaram melhores resultados na ZB3. Invidiata e Ghishi (2016) também apontam para menor demanda energética futura em residências com isolamento térmico (baixa U) na ZB3 (Florianópolis). Na ZB1 a CT e a U influenciam a classificação, sendo os melhores resultados com CTs médias a altas e U baixa a intermediária, indo a favor dos resultados de Invidiata e Ghishi (2016), que afirmam que maior isolamento (menor U) contribui para uma menor demanda energética. Na ZB2 é possível destacar a influência da U, onde, mesmo sem apresentar variação na classificação, os melhores resultados se concentram em composições com baixa U e CT média a alta. As Zonas 5 e 6 apresentam comportamento similar, com um conjunto específico entre CT e U, onde os extremos da CT apresentam melhores resultados, sendo indicadas composições com alta CT e baixa U ou baixa CT e U intermediária. A ZB7, por mais que apresente um comportamento similar às zbs 5 e 6, aparenta apresentar maior impacto da CT se for alta, enquanto que, se for baixa, apresenta melhor redução do consumo com U intermediária. Por fim, a ZB8 primeiramente apresenta um comportamento regido majoritariamente pela U, sendo indicado a adoção de baixa U, porém, a CT apresenta impacto significativo na classificação, sendo preferencialmente CT alta, se aliada a baixa U, e CT baixa se aliada a U intermediária. O estudo de Invidiata e Ghishi (2016) aponta para uma possibilidade de adoção de isolamento térmico nas vedações verticais opacas (baixa U), porém não para o conforto do usuário, mas sim para auxiliar na menor demanda energética para aparelhos de resfriamento ativo.

Desta forma, é possível concluir que, por mais que haja convergências de resultados em algumas zonas, não é indicado a adoção de um padrão construtivo no país, observando unicamente pela questão do desempenho termo energético. As composições das paredes apresentam comportamentos diversos a depender da zona bioclimática em que estão inseridas, apresentando classificações mais discrepantes (ZBs 1, 3 e 4) ou mais homogêneas (2, 7, 8). Ainda, foi possível identificar duas zonas (5 e 6) nas quais as composições das vedações verticais opacas não apresentaram contribuições significativas na redução do consumo de carga térmica.

Vale ressaltar que os resultados obtidos neste estudo são focados apenas na alteração da composição das vedações verticais opacas, meramente uma parte das variáveis que compõem a classificação de eficiência energética da envoltória de uma edificação. Tais resultados podem ser melhorados se aliados a outras soluções de eficiência energética, potencialmente atingindo classificações intermediárias (B) ou superiores (A) nas zonas em que não foi possível obtê-las (2, 5, 6 e 7) ou aumentar a ocorrência das mesmas nas demais zonas. Com a possibilidade do isolamento das variáveis com a nova INI-R, é de interesse haver estudos que avaliem quais soluções de eficiência energética apresentam maior contribuição em cada zona bioclimática do país, além de trabalhos que avaliem se a adoção conjunta dessas soluções gera resultados aditivos, multiplicativos ou ainda se relacionam por alguma função de maior complexidade.

Portanto, a fim de se obter os melhores resultados na eficiência energética de um projeto, é de grande importância a avaliação dos materiais utilizados. Ainda, foi possível perceber que a combinação de baixa U e alta CT indicada pela NBR 15575:2021, por mais que se encaixe dentro os padrões encontrados nas ZBs, não necessariamente define o padrão comportamental das mesmas, que se mostrou mais complexo e diverso. Dessa forma, foi possível perceber maiores nuances e possibilidades de adoção de materiais na composição de vedações verticais nos climas no Brasil. Este estudo mostra que, embora tecnicamente possível, a adoção de um padrão construtivo em todas as zonas bioclimáticas do Brasil é contraindicada, pois é possível obter melhores resultados com soluções específicas ao clima a qual a construção está inserida, aproveitando-se do padrão comportamental local.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ALMEIDA, Tatiane Pilar de. **A Influência Dos Materiais De Sistemas De Vedações Verticais No Desempenho Termo-Energético De Edificações: Habitações De Interesse Social No Rio De Janeiro**. 2019. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Universidade Federal Do Rio De Janeiro, UFRJ, Rio de Janeiro, 2019.

ALMEIDA, Tatiane Pilar de; SILVOSO, Marcos Martinez; BRASILEIRO, Alice de Barros Horizonte. **Simulações de desempenho termo-energético para sistemas de vedações verticais em habitações de interesse social**. 2020. Arquitetura, materialidade e tecnologias digitais: aplicações na construção e conservação do ambiente construído. Rio de Janeiro: PROARQ-FAU/UFRJ, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR15575-4: Edificações habitacionais – Desempenho – Parte 4: Sistemas de vedações verticais internas e externas** - SVVIE. Rio de Janeiro, 2021.

BARBIERI, José Carlos. **Desenvolvimento sustentável: das origens à agenda 2030**. Petrópolis: Editora Vozes, 2020.

BRASIL. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). **Instruções Normativas e os Requisitos de Avaliação da Conformidade para a Eficiência Energética das Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas e Residenciais (INI-C, INI-R e RAC) - Portaria nº309, de 06 de setembro de 2022, com as alterações da NT-01, de 17 de dezembro de 2023**. Brasília, 2023.

BRASIL. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). **INI RESIDENCIAL – Instrução Normativa do Inmetro para Edificações Residenciais**. 2022.

BRASIL. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). **MANUAL RAC – Catálogo de propriedades térmicas**. 2022.

BRASIL. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). **Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais**. Brasília, 2010.

BRASIL. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). **Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais**. Brasília, 2012.

BRASIL. Ministério das cidades. **Conheça o programa Minha Casa, Minha Vida**. Brasília, 2023.

BRASILEIRO, Ailce; MORGADO, Claudio Oliveira; TORRES, Thiago Coutinho. **Eficiência energética da envoltória de habitações no Rio de Janeiro: o impacto das esquadrias pela INI-R**. 2023. Artigo aceito para publicação XVII ENCAC 2023.

COPERNICUS CLIMATE CHANGE SERVICE. **Global Climate Highlights 2024**. Disponível em: <https://climate.copernicus.eu/global-climate-highlights-2024?utm_source=socialmedia&utm_medium=tw&utm_campaign=global-climate-highlights-2024>. Acesso em: 28 jan 2025.

CORBELLA, Oscar; YANNAS, Simos (2009). **Em busca de uma Arquitetura Sustentável para os trópicos**. Revan, Rio de Janeiro. 2ª Edição. 2009.

DOMINGUES, Gabriella; ABREU-HARBICH, Loyde. **Avaliação do desempenho térmico da envoltória de um módulo de habitação temporária em diferentes cidades brasileiras**. XIX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Canela, 2022. In: Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2022.

ELI, Gabriela; OLINGER, Marcelo; KRELLING, Amanda; MELO, Ana Paula; LAMBERTS, Roberto. **Análise da eficiência energética da envoltória de edificações residenciais conforme Instrução Normativa do Inmetro (INI-R)**. XVI ENCAC e XII ELACAC, Palmas, 2021, In: Anais... Palmas, 2021.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Ações para promoção da eficiência energética nas edificações brasileiras: no caminho da transição energética**. Rio de Janeiro: EPE/MME, 2020.

FOSSATI, Michele; SCALCO, Veridiana Atanasio; LINCZUK, Vinícios Cesar Cadena; LAMBERTS, Roberto. **Building energy efficiency: An overview of the Brazilian residential labeling scheme**. Renewable and sustainable energy reviews v. 65, p. 1216-1231. 2016.

FROTA, Anésia Barros; SCHIFFER, Sueli Ramos. (2001). **Manual de Conforto Térmico**. Studio Nobel, São Paulo. 5ª Edição. 2001.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua: Características gerais dos domicílios e dos moradores 2018**. Brasil: IBGE, 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua: Características gerais dos domicílios e dos moradores 2019**. Brasil: IBGE, 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua: Características gerais dos domicílios e dos moradores 2022**. Brasil: IBGE, 2023.

INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Climate change 2023: Synthesis report**. 2023.

INVIDIATA, Andrea; GHISI, Eneidir. **Impact of climate change on heating and cooling energy demand in houses in Brazil**. Energy and Buildings, v.130, p. 20-32. 2016

KAMIMURA, ARTUR; GNECCO, VERONICA; FOSSATI, MICHELE; VECCHI, RENATA DE; LAMBERTS, ROBERTO. **DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA À NZEB: AVALIAÇÃO DE UMA EDIFICAÇÃO EDUCACIONAL PELO MÉTODO SIMPLIFICADO DA INI-C**. 2021. In: XVI ENCAC XII ELACAC, 2021, Palmas, Brasil.

KRELLING, A.F; ELI, L.G.; OLINGER, M.S.; MACHADO, R.M.E.S.; MELO, A.P.; LAMBERTS, R. **A thermal performance standard for residential buildings in warm climates: lessons learned in Brazil**. Energy & Buildings v.281. 2023

LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando O. R.. (2014). **Eficiência Energética na Arquitetura**. ELETROBRAS/PROCEL, Rio de Janeiro. 3ª Edição. 2014.

MARTINS, Fernanda Gonçalves. **Avaliação da Eficiência Energética de uma residência unifamiliar em diferentes zonas climáticas do Brasil por meio de um método simplificado**. 2022. Trabalho de conclusão do curso de graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC. 2022.

MORENO, Ana Cecília Rodrigues; MORAIS, Ingrid Stephanie de; SOUZA, Roberta Vieira Gonçalves de. **Thermal performance of social housing - A study based on Brazilian regulations**. Energy Procedia, v.111, p. 111-120. 2017

OLIVEIRA, Raquel Diniz; SOUZA, Roberta Vieira Gonçalves de; MAIRINK, Ana Júlia Maia; RIZZI, Magno Tadeu Gomes; SILVA, Roberto Márcio da. **Concrete walls thermal performance analysis by Brazilian Standards**. Energy Procedia v.78 p. 213-218. 2015

ONU BR – NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL. **Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. 2015

PASSOS, Paulo Martins dos; CARASEK, Helena; AMARAL, Gabriel Martins. **AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE ISOLANTE TÉRMICA DE REVESTIMENTOS DE ARGAMASSA**. 2016. ENTAC2016, São Paulo, Brasil, 2016.

ROSA, C. N.; TRAPANO, P. D.; BRASILEIRO, A. de B. H.; GRABOIS, T. M. **Eficiência energética na arquitetura: estudo comparativo entre RTQ-R e INI-R**. In: ENCONTRO LATINO AMERICANO E EUROPEU SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS, 5., 2023. Anais [...]. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/euroelecs/article/view/3568>. Acesso em: 29 fev. 2024.

TRIANA, Maria Andrea; LAMBERTS, Roberto; SASSI, Paola. **Should we consider climate change for Brazilian social housing? Assessment of energy efficiency adaptation measures**. Energy and Buildings, v.158, p. 1379-1392. 2018.

TRIANA, Maria Andrea; LAMBERTS, Roberto; SASSI, Paola. **Characterisation of representative building typologies for social housing projects in Brasil and its energy performance**. Energy Policy, v.87, p. 524-541. Agosto 2015.

TRIANA, Maria Andrea; MACHADO, Rayner Mauricio e Silva; KAMIMURA, Artur Martins; BRACHT, Matheus Körbes; MELO, Ana Paula; LAMBERTS, Roberto. **Energy efficiency strategies for Brazilian social housing considering a life cycle perspective: Optimisation between thermal autonomy, energy consumption and costs**. Energy & Buildings, v. 295. Junho 2023.

TUBELO, Renata; RODRIGUES, Lucelia; GILLOTT, Mark; SOARES, Joana Carla Gonçalves. **Cost-effective envelope optimisation for social housing in Brazil's moderate climates zones**. Building and Environment, v. 133, p. 213-227. Fevereiro 2018.

VASQUEZ, Elizabeth Maceira Antelo. **Análise do conforto ambiental em projetos de habitações de interesse social segundo a NBR 15.575:2013**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental), PUC. Rio de Janeiro, 2017.

VELASCO, R. V. ; REIS, L. F. ; SILVOSO, M. M.. **DOSAGEM E ANÁLISE EXPERIMENTAL DE CONCRETOS LEVES ESTRUTURAIS PARA PRODUÇÃO DE PAINÉIS PRÉ-FABRICADOS**. 2018. In: XXXVIII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, 2018, Lima / Peru. Anais do XXXVIII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería - La Ingeniería Estructural: Puente para el Desarrollo e Integración de América y el Mundo, 2018. v. 1.