

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Yuri Ventura Pereira de Castro

**ANÁLISE DE SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS DE ENVOLTÓRIAS DE
EDIFICAÇÕES PARA AS ZONAS BIOCLIMÁTICAS BRASILEIRAS QUANTO AO
DESEMPENHO TÉRMICO – ESTUDO PARA UMA HABITAÇÃO DO TIPO LOFT**

Juiz de Fora

2024

Yuri Ventura Pereira de Castro

**ANÁLISE DE SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS DE ENVOLTÓRIAS DE
EDIFICAÇÕES PARA AS ZONAS BIOCLIMÁTICAS BRASILEIRAS QUANTO AO
DESEMPENHO TÉRMICO – ESTUDO PARA UMA HABITAÇÃO DO TIPO LOFT**

Dissertação apresentada ao programa de pós-graduação em engenharia civil da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.
Área de concentração: Estruturas e Materiais.

Orientadora: Thaís Mayra de Oliveira

Coorientador: Pedro Kopschitz Xavier Bastos

Juiz de Fora

2024

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

Castro, Yuri Ventura Pereira de.

Análise de soluções construtivas de envoltórias de edificações para as zonas bioclimáticas brasileiras quanto ao desempenho térmico – Estudo para uma habitação do tipo loft / Yuri Ventura Pereira de Castro. -- 2024.

119 f.

Orientadora: Thaís Mayra de Oliveira

Coorientador: Pedro Kopschitz Xavier Bastos

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2024.

1. Edificação. 2. Envoltória. 3. Desempenho Térmico. 4. Consumo Energético. I. Oliveira, Thaís Mayra de, orient. II. Bastos, Pedro Kopschitz Xavier, coorient. III. Título.

PROGRAMA DE PÓS - GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

YURI VENTURA PEREIRA DE CASTRO

Título: "ANÁLISE DE SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS DE ENVOLTÓRIAS DE EDIFICAÇÕES PARA AS ZONAS BIOCLIMÁTICAS BRASILEIRAS QUANTO AO DESEMPENHO TÉRMICO – ESTUDO PARA UMA HABITAÇÃO DO TIPO LOFT"

Dissertação apresentada ao Programa de Pós - Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas e Materiais

Aprovada em 13 de março de 2024.

BANCA EXAMINADORA

Profa Dra THAÍS MAYRA DE OLIVEIRA - Orientadora e presidente da banca

UFJF

Prof Dr PEDRO KOPSCHITZ XAVIER BASTOS - Coorientador(a)

UFJF

Profa Dra ALINE CALAZANS MARQUES - Membro titular externo

FAU/UFRJ

Prof Dr JOSÉ CARLOS PALIARI - Membro titular externo

UFSCar

Juiz de Fora, 08/03/2024.



Documento assinado eletronicamente por **Pedro Kopschitz Xavier Bastos, Professor(a)**, em 13/03/2024, às 18:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **José Carlos Paliari, Usuário Externo**, em 14/03/2024, às 17:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Thais Mayra de Oliveira, Professor(a)**, em 16/03/2024, às 18:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Aline Calazans Marques, Usuário Externo**, em 18/03/2024, às 14:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Ufjf (www2.ufjf.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **1744265** e o código CRC **AA55F443**.

RESUMO

O setor da construção civil é uma das atividades que mais causam impactos negativos no meio ambiente, sobretudo pelo elevado consumo energético durante a fase de uso da edificação. Diante desse contexto, a construção sustentável vem ganhando destaque nas últimas décadas. Este trabalho procura analisar o desempenho térmico de diferentes configurações da envoltória (paredes e coberturas) de um *loft*, além de propor as melhores soluções para cada zona bioclimática brasileira. Em uma primeira etapa foi calculado o valor da transmitância térmica e da capacidade térmica, segundo a norma ABNT NBR 15220:2022, para cada tipo de envoltória, considerando várias combinações, entre argamassa de revestimento normal, isolante e tipos de cobertura e de alvenaria com diferentes propriedades térmicas. Após os cálculos, uma avaliação do desempenho térmico da unidade habitacional foi realizada a partir de um procedimento simplificado, segundo a norma ABNT NBR 15575:2021. Na segunda etapa, em uma simulação computacional calculou-se, pelo programa TRNSYS 17, a energia necessária tanto para resfriamento quanto para aquecimento do ambiente interno da edificação hipotética, ao longo de um ano, composto com as mesmas configurações da envoltória consideradas na primeira etapa. Após as simulações, outro procedimento, estabelecido na norma NBR 15575 permitiu avaliar se a envoltória do *loft* analisado tem desempenho térmico classificado como mínimo, intermediário ou superior. Os resultados demonstraram que, dentre os elementos e componentes construtivos estudados, o tipo de cobertura foi a variável que teve mais impacto no desempenho térmico do *loft*. Constatou-se que a utilização de coberturas com baixos valores de transmitância térmica e o bloco cerâmico são soluções potencialmente mais adequadas para se obter edifícios mais eficientes termicamente para o contexto brasileiro. Combinando-se as melhores soluções construtivas, foi alcançada uma significativa redução no consumo de energia em comparação com o modelo de referência. Em todas as zonas bioclimáticas, as configurações com coberturas de menor valor de U conseguiram reduzir, pelo menos, 30% da carga térmica total anual.

Palavras-chave: Edificação; Envoltória; Desempenho Térmico; Consumo Energético.

ABSTRACT

The civil construction sector is one of the activities that causes the most negative impacts on the environment, especially due to high energy consumption during the building's use phase. Given this context, sustainable construction has been gaining prominence in recent decades. This work seeks to analyze the thermal performance of different configurations of the envelope (walls and roofs) of a loft, in addition to proposing the best solutions for each Brazilian bioclimatic zone. In a first step, the value of thermal transmittance and thermal capacity was calculated, according to the ABNT NBR 15220:2022 standard, for each type of envelope, considering various combinations, between normal coating mortar, insulating mortar and types of coverage with different thermal properties. After the calculations, an assessment of the thermal performance of the housing unit was carried out using a simplified procedure, in accordance with the ABNT NBR 15575:2021 standard. In the second stage, in a computer simulation, using the TRNSYS 17 program, the energy required for both cooling and heating of the internal environment of the hypothetical building was calculated over the course of a year, composed of the same envelope configurations considered in the first stage. After the simulations, another procedure, established in the NBR 15575 standard, made it possible to evaluate whether the analyzed loft envelope has thermal performance classified as minimum, intermediate or superior. The results demonstrated that, among the constructive elements and components studied, the type of roof was the variable that had the most impact on the thermal performance of the loft. Furthermore, it was found that the use of roofs with low thermal transmittance values and ceramic blocks are potentially more suitable solutions to obtain more thermally efficient buildings for the Brazilian context. By combining the best construction solutions, a significant reduction in energy consumption was achieved compared to the reference model. In all bioclimatic zones, configurations with lower U-value roofs were able to reduce at least 30% of the total annual heat load.

Keywords: Building; Envelope; Thermal Performance; Energy Consumption.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Consumo de eletricidade do país em 2020	16
Figura 2 - Evolução do consumo de eletricidade total e do número de aparelhos condicionadores de ar no setor residencial brasileiro.	17
Figura 3 – Fluxo de calor em uma parede.....	25
Figura 4 - Zoneamento bioclimático brasileiro	26
Figura 5 – Telha cerâmica (a) e telha de fibrocimento (b).	34
Figura 6 – Camadas de um telhado verde	34
Figura 7 – Planta baixa do <i>loft</i>	38
Figura 8 - Sequenciamento das etapas e programas utilizados	40
Figura 9 - Procedimentos de avaliação de desempenho térmico (NBR 15575).....	41
Figura 10 - Bloco cerâmico vazado de vedação e bloco de concreto de vedação.....	42
Figura 11– Configurações das paredes estudadas (corte vertical).....	43
Figura 12 – Ábaco e Equações para obtenção do $\Delta PHFT_{\min}$ quando $PHFT_{UH,ref}$ for inferior a 70 %	56
Figura 13 - Comparação da transmitância térmica das paredes	62
Figura 14 - Número de horas dentro da faixa de temperatura operativa em Curitiba (ZB 1)	64
Figura 15 - Número de horas dentro da faixa de temperatura operativa em Piracicaba (ZB 2).....	66
Figura 16 - Número de horas dentro da faixa de temperatura operativa em São Paulo (ZB3).	68
Figura 17 - Número de horas dentro da faixa de temperatura operativa em Brasília (ZB 4).....	70
Figura 18 - Número de horas dentro da faixa de temperatura operativa em Niterói (ZB 5).....	72
Figura 19 - Número de horas dentro da faixa de temperatura operativa em Goiânia (ZB 6).....	74
Figura 20 - Número de horas dentro da faixa de temperatura operativa em Teresina (ZB 7).....	76
Figura 21 - Número de horas dentro da faixa de temperatura operativa em Rio de Janeiro (ZB 8)	78
Figura 22 - Cargas térmicas totais em Curitiba (ZB 1)	90
Figura 23 - Cargas térmicas totais em Piracicaba (ZB 2).....	92
Figura 24 - Cargas térmicas totais em São Paulo (ZB 3)	94

Figura 25 - Cargas térmicas totais em Brasília (ZB 4).....	96
Figura 26 - Cargas térmicas totais em Niterói (ZB 5).....	98
Figura 27 - Cargas térmicas totais em Goiânia (ZB 6).....	100
Figura 28 - Cargas térmicas totais em Teresina (ZB 7).....	102
Figura 29 - Cargas térmicas totais em Rio de Janeiro (ZB 8)	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Transmitância térmica, atraso térmico e fator de calor solar admissíveis para cada tipo de vedação externa	29
Tabela 2 - Cidades escolhidas para cada zona bioclimática e suas respectivas populações	41
Tabela 3 - Coberturas e propriedades térmicas	44
Tabela 4 - Transmitância térmica de referência para coberturas	45
Tabela 5 - Transmitância térmica de referência para paredes externas - NBR 15575:2021	46
Tabela 6 - Capacidade térmica de referência para paredes externas	47
Tabela 7 - Intervalos de temperaturas externas de bulbo seco	48
Tabela 8 – Cidades escolhidas e seus respectivos intervalos de temperaturas externas.....	49
Tabela 9 – Diretrizes construtivas quanto às aberturas de ventilação	49
Tabela 10 - Percentual de abertura de referência para ventilação	50
Tabela 11 - Proporção de referência dos elementos transparentes	50
Tabela 12 - Propriedades térmicas dos componentes construtivos do modelo de referência.....	51
Tabela 13 - Características dos elementos transparentes para o modelo de referência	52
Tabela 14 - Características dos perfis das esquadrias para o modelo de referência	52
Tabela 15 – Padrões de ocupação da UH	53
Tabela 16 - Taxa metabólica e fração radiante para os usuários	53
Tabela 17 - Padrões de uso do sistema de iluminação artificial dos APP	54
Tabela 18 - Densidade de potência instalada, fração radiante e fração visível para o sistema de iluminação.....	54
Tabela 19 - Período de uso, densidade de carga interna e fração radiante para equipamentos dos APP	54
Tabela 20 – Faixas de temperatura operativa do APP	55
Tabela 21 - Critério de avaliação de desempenho térmico da envoltória quanto ao $PHFT_{UH}$	56

Tabela 22 - Valores de temperatura operativa para o cálculo da $CgTR_{APP}$ e da $CgTA_{APP}$.	58
Tabela 23 - Critério de avaliação de desempenho térmico da envoltória quanto à $CgTT_{UH}$	58
Tabela 24 – Resultados da $R_{tot,lower}$ das paredes	60
Tabela 25 - Resultados da $R_{tot,upper}$ das paredes.....	60
Tabela 26 - Resultados da R_{tot} das paredes.....	60
Tabela 27 - Resultados de U das paredes	61
Tabela 28 - Variação normalizada de U das paredes.....	61
Tabela 29 - Resultados de Ct das paredes	62
Tabela 30 - Variação normalizada da Ct das paredes estudadas	63
Tabela 31 – PHFT e nível de desempenho de cada configuração em Curitiba (ZB 1)	65
Tabela 32 - PHFT e nível de desempenho de cada configuração em Piracicaba (ZB 2)	67
Tabela 33 - PHFT e nível de desempenho de cada configuração em São Paulo (ZB 3).....	69
Tabela 34 - PHFT e nível de desempenho de cada configuração em Brasília (ZB 4).....	71
Tabela 35 - PHFT e nível de desempenho de cada configuração em Niterói (ZB 5).....	73
Tabela 36 - PHFT e nível de desempenho de cada configuração em Goiânia (ZB 6)	75
Tabela 37 - PHFT e nível de desempenho de cada configuração em Teresina (ZB 7)	77
Tabela 38 - PHFT e nível de desempenho de cada configuração em Rio de Janeiro (ZB 8).....	79
Tabela 39 – Temperaturas operativas anuais máxima e mínima em Curitiba (ZB 1).....	81
Tabela 40 – Temperaturas operativas anuais máxima e mínima em Piracicaba (ZB 2)	82
Tabela 41 – Temperaturas operativas anuais máxima e mínima em São Paulo (ZB 3).....	83
Tabela 42 – Temperaturas operativas anuais máxima e mínima em Brasília (ZB 4).....	84
Tabela 43 – Temperaturas operativas anuais máxima em Niterói (ZB5).....	85
Tabela 44 – Temperaturas operativas anuais máxima em Goiânia (ZB 6)	86
Tabela 45 – Temperaturas operativas anuais máxima em Teresina (ZB 7)	87
Tabela 46 – Temperaturas operativas anuais máxima no Rio de Janeiro (ZB 8).....	88

Tabela 47 – Cargas térmicas e desempenho de cada configuração em Curitiba (ZB 1)	91
Tabela 48 – Cargas térmicas e desempenho de cada configuração em Piracicaba (ZB 2)..	93
Tabela 49 – Cargas térmicas e desempenho de cada configuração em São Paulo (ZB 3)..	95
Tabela 50 – Cargas térmicas e desempenho de cada configuração em Brasília (ZB 4).....	97
Tabela 51 – Cargas térmicas e desempenho de cada configuração em Niterói (ZB 5).....	99
Tabela 52 – Cargas térmicas e desempenho de cada configuração em Goiânia (ZB 6)....	101
Tabela 53 – Cargas térmicas e desempenho de cada configuração em Teresina (ZB 7) ..	103
Tabela 54 – Cargas térmicas e desempenho de cada configuração no Rio de Janeiro (ZB 8)	105

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Fontes bibliográficas relevantes para a pesquisa, em ordem cronológica (continua).....	22
Quadro 2 – Estratégias e diretrizes de cada Zona Bioclimática	28
Quadro 3 – Resumo de desempenho térmico do loft estudado nas zonas bioclimáticas...	107
Quadro 4 – Resumo das diretrizes para cada zona bioclimática	112

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
1.1 - Contextualização	16
1.2 - Justificativa.....	18
1.3 - Objetivo.....	19
1.4 - Estrutura do texto	20
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
Fonte: Autor (2024)	23
2.1 - Propriedades térmicas dos materiais.....	24
2.2 - Normas e regulamentos de desempenho térmico de edificações no Brasil	25
2.3 - Soluções construtivas, comportamento do usuário e o impacto no desempenho térmico	30
3. METODOLOGIA.....	37
3.1 - Parâmetros estudados	42
3.2 - Procedimento simplificado de avaliação do desempenho térmico de edificações da norma ABNT NBR 15575:2021.....	46
3.2.1 - Critérios de desempenho da ABNT NBR 15575:2021	46
3.3 - Procedimento de simulação computacional	47
3.3.1 - Características do modelo real	49
3.3.2 - Características do modelo de referência.....	51
3.3.3 - Modelagem da ocupação e das cargas internas	53
3.3.4 - Critérios de desempenho da NBR 15575 – Simulação computacional	55
4. RESULTADOS E análises	60
4.1 - Procedimento simplificado.....	60
4.1.1 - Transmitância térmica.....	60

4.1.2 - Capacidade térmica	62
4.2 - Procedimento de simulação computacional	63
4.2.1 - Percentual de horas de ocupação da UH dentro da faixa de temperatura operativa (PHFT _{APP}) 63	
4.2.2 - Temperaturas operativas anuais máxima e mínima da UH (TO _{máx} e TO _{mín}).....	80
4.2.3 - Conclusões gerais dos resultados com ventilação natural	88
4.2.4 - Carga térmica total da UH (CgTT _{UH}).....	90
4.2.5 - Conclusões gerais dos resultados sem ventilação natural	105
4.3 - Análise dos resultados	106
4.3.1 - Curitiba (ZB 1).....	107
4.3.2 - Piracicaba (ZB 2)	108
4.3.3 - São Paulo (ZB 3).....	108
4.3.4 - Brasília (ZB 4)	109
4.3.5 - Niterói (ZB 5).....	110
4.3.6 - Goiânia (ZB 6)	110
4.3.7 - Teresina (ZB 7).....	111
4.3.8 - Rio de Janeiro (ZB 8).....	111
4.3.9 - Resumo:	112
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	113
REFERÊNCIAS	116

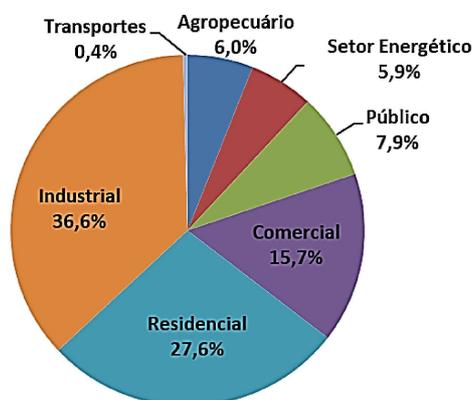
1. INTRODUÇÃO

1.1 - Contextualização

O uso de energia no planeta tem aumentado bastante nas últimas décadas, nos mais diversos setores de atividades humanas. Muitos são os fatores que podem levar a esse aumento, como o desenvolvimento tecnológico e o crescimento industrial, acompanhados pelo consumo de recursos energéticos (SIMABUKULO *et al.*, 2006). Segundo Braga (2016), a busca por um melhor padrão de vida também afeta diretamente o consumo de energia nas habitações.

O subsetor de edificações, composto por construções de diversas naturezas como habitações, edifícios comerciais e edifícios públicos, foi responsável por aproximadamente metade do consumo total de energia elétrica no Brasil em 2020, de acordo com o Ministério de Minas e Energia (BRASIL, 2021). Desse consumo, a classe residencial representa pouco mais da metade, o que equivale a 27,6% do consumo total de eletricidade no país, como pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 – Consumo de eletricidade do país em 2020

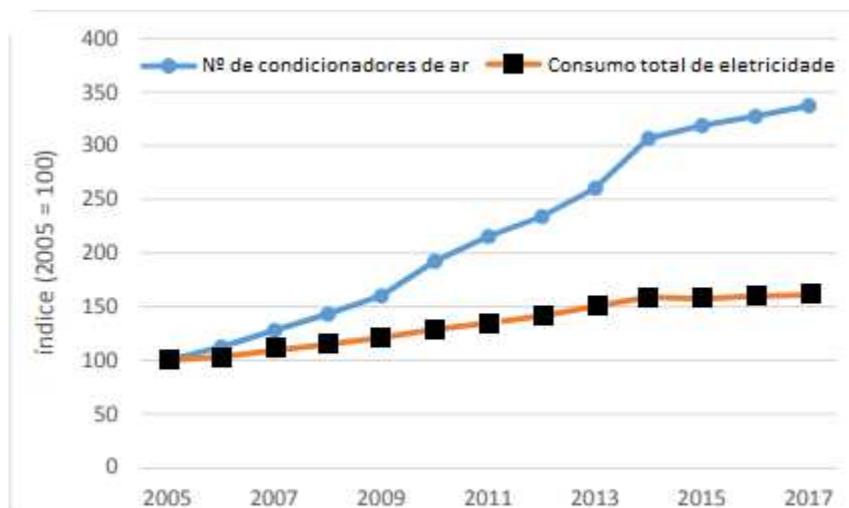


Fonte: Adaptado de Brasil (2021)

O uso de aparelhos de ar condicionado é bastante intenso no país, como opção para encontrar condições de conforto térmico em ambientes internos. De acordo com Brasil (2018), o consumo de energia elétrica relacionado ao uso desses aparelhos no setor residencial teve um aumento de 237% no período entre 2005 e 2017, atingindo 18,7 TWh em 2017. Além disso, a posse de aparelhos de ar condicionado nas residências aumentou a uma taxa de 9,0% ao ano entre 2005 e 2017. Estima-se que a aquisição de condicionadores

de ar pelas famílias tenha mais que duplicado nesse período. A Figura 2 ilustra esse crescimento, além do crescimento do consumo total de eletricidade no Brasil.

Figura 2 - Evolução do consumo de eletricidade total e do número de aparelhos condicionadores de ar no setor residencial brasileiro



Fonte: Brasil (2018)

Diante desse cenário, avaliar o desempenho térmico dos edifícios é extremamente importante, visando reduzir o consumo energético no setor. De acordo com Yilmaz (2007), as propriedades térmicas e físicas da envoltória dos edifícios são os parâmetros mais importantes da edificação para a melhoria de seu desempenho térmico. A envoltória do edifício – paredes, vãos, portas, janelas, vidros e cobertura - é responsável pela troca de calor entre os ambientes internos e externos, determinante para o conforto térmico dos ocupantes.

Segundo Obaidi (2014), o resfriamento passivo é uma das técnicas que proporcionam aos edifícios condições de conforto por meios naturais. Isso indica que a redução do consumo energético pode ser obtida a partir de soluções construtivas que permitem melhor desempenho térmico da edificação. Uma das técnicas mais estudadas de resfriamento ou aquecimento passivo, objetivando atingir o conforto térmico interior, é a interferência na envoltória das edificações, através de soluções construtivas e utilização de materiais mais eficientes energeticamente. Essa interferência é uma ferramenta importante que integra os campos de atuação da engenharia e da arquitetura.

1.2 - Justificativa

Grande parcela do mercado de construção civil brasileiro, especialmente no que tange a escritórios de projeto e a empresas construtoras, não se destaca pela prioridade em buscar sustentabilidade nas edificações, em seus aspectos mais diversos. É um mercado ainda muito tradicional no uso de técnicas construtivas e de baixo grau de inovação, no sentido de não acompanhar necessidades e tendências atuais de adaptação em tempos de escassez e esgotamento de recursos naturais, de muita geração de resíduos, de energia cara e poluidora e, principalmente, de mudanças climáticas.

No setor acadêmico, a maioria das pesquisas voltadas à sustentabilidade é recente, muitas das quais nas áreas de projeto e de técnicas construtivas. O presente trabalho se situa entre essas duas áreas, uma vez que as escolhas de soluções construtivas ambientalmente vantajosas passam por esse percurso, em que são importantes o conhecimento de propriedades físicas e a especificação dos materiais, cuja adoção e uso corretos podem trazer benefícios ambientais durante um longo período.

As normas técnicas de desempenho ambiental de edificações dão diretrizes e estabelecem parâmetros de projeto para obras mais eficientes. No entanto, simulações e verificações de parâmetros como as que o presente trabalho se propõe a fazer, podem trazer contribuições para melhorar a compreensão dos modelos propostos nas normas e na evolução do conhecimento na área.

Uma busca no Google Acadêmico¹ com os termos "desempenho térmico zona bioclimática estudo de caso", encontrou 8.200 resultados, praticamente a totalidade a partir do ano 2000. Muitos estudos objetivam analisar o impacto que determinado componente da envoltória pode causar no desempenho térmico da edificação. Entretanto, observa-se, de um modo geral, que são escassos os estudos que avaliam vários componentes da envoltória simultaneamente, e o impacto dessas variações em cada zona bioclimática brasileira. Apesar de a norma ABNT NBR 15220 - *Desempenho térmico de edificações* (ABNT, 2005) sugerir estratégias e diretrizes construtivas para cada ZB, é bastante enriquecedor aprofundar estudos de soluções construtivas para todas elas.

¹<https://scholar.google.com.br/?hl=pt>

Assim, surgem as seguintes perguntas de pesquisa para a presente dissertação:

a) Determinadas configurações de envoltórias de edificações, muito comuns no cenário da construção de habitações brasileiras, especialmente alvenarias, revestimentos e coberturas, são realmente adequadas quanto ao desempenho térmico, no sentido de proporcionar boas condições de conforto aos usuários?

b) Quais dessas soluções construtivas atendem aos parâmetros normativos brasileiros em vigor, quanto aos valores de propriedades térmicas?

c) Dentre as soluções construtivas estudadas, qual o enquadramento proporcionado por cada uma na classificação de desempenho térmico de uma edificação - mínimo, intermediário ou superior – para cada zona bioclimática brasileira?

d) Para as combinações propostas de componentes construtivos, quais são os valores de parâmetros de conforto térmico atingidos para a habitação estudada, como temperaturas máximas, mínimas e percentual de horas anuais dentro de níveis de desempenho propostos pela norma técnica vigente?

e) Qual é a economia de energia possível de se obter (ou não) para a habitação estudada, calculada a partir de simulações computacionais, combinando-se as melhores soluções construtivas, para as zonas bioclimáticas brasileiras?

1.3 - Objetivo

O objetivo principal deste trabalho é avaliar, quanto ao desempenho térmico, diferentes combinações de componentes da envoltória de edificações, comuns no cenário de construção de habitações brasileiras, adotando-se, para isso, uma configuração de habitação do tipo *loft*.

Os objetivos específicos são:

- Identificar combinações que atendam aos parâmetros de desempenho térmico estabelecidos nas normas técnicas;
- Apresentar o desempenho da habitação estudada, a partir de escolhas de soluções construtivas;

- Apresentar a quantidade de energia eventualmente utilizada com o uso de aparelhos condicionadores de ar, para as diversas combinações construtivas adotadas;
- Contribuir para a melhoria do processo de escolha de soluções construtivas em projetos de edificações em cada zona bioclimática brasileira.

1.4 - Estrutura do texto

A presente dissertação foi dividida em cinco capítulos. O primeiro é reservado à introdução do trabalho, com informações pertinentes à contextualização do conteúdo, seguido da justificativa, dos objetivos e da estruturação do trabalho.

No Capítulo 2, é apresentada uma revisão bibliográfica, visando trazer conceitos e dados importantes para o desenvolvimento do trabalho. Nele é elencada, de forma detalhada, a produção bibliográfica nacional e internacional mais importante sobre o tema da pesquisa e o contexto em que se encontra o país quanto ao assunto abordado, as definições do conteúdo estudado e a relação da construção civil e a sustentabilidade. Além disso, também é estabelecido um embasamento relacionado às normas e regulamentos, voltados ao desempenho térmico em edificações, em vigor no Brasil, a fim de trazer informações importantes para o desenvolvimento do trabalho e apresentando as normas de referência utilizadas nessa pesquisa.

No terceiro capítulo é apresentada a metodologia. Primeiramente é feita uma análise da transmitância e da capacidade térmica dos dois principais tipos de alvenaria usados nacionalmente, o bloco de concreto e o bloco de tijolo cerâmico. Após realizados os cálculos da etapa acima, procedimentos (simplificado e de simulação) serão realizados para avaliar o nível de desempenho da envoltória da habitação modelo considerada.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos e, posteriormente, é realizada uma análise quanto ao desempenho térmico das combinações. Elabora-se aqui uma comparação entre os tipos de envoltória do ponto de vista do desempenho térmico, além de uma análise em relação às diretrizes e orientações da NBR 15220.

Por último, no Capítulo 5, são apresentadas as conclusões e as considerações finais a respeito do trabalho realizado.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os cenários nacional e mundial de aumento do consumo de energia tem feito com que as áreas acadêmica e produtiva do setor da construção desenvolvam estudos que visam o desenvolvimento de materiais e técnicas para melhor desempenho das edificações no campo da eficiência energética. O presente capítulo traz uma revisão bibliográfica a respeito desse tema, baseada em um mapeamento da literatura. Primeiramente, a busca se deu na base Scopus², via Portal de periódicos da CAPES³, com as seguintes palavras-chave e critérios: (“thermal transmittance” AND “thermal performance” AND “energy efficiency” AND (building OR envelope OR “Building envelope”). Por meio da função “título/resumo/palavra-chave” da base de dados, foram encontrados 62 artigos relacionados ao tema. Observou-se, por esse tipo de pesquisa, um número expressivo de trabalhos internacionais e poucos trabalhos nacionais. Dos 62 artigos, apenas três eram brasileiros.

Na mesma base, foi feita uma segunda busca com um novo conjunto de palavras-chave: (“passive cooling” OR “passive strategies”) AND “thermal performance” AND “energy efficiency” AND (building OR envelope OR “building envelope”). Novamente, pela funcionalidade “título/resumo/palavra-chave”, foram gerados 81 resultados. A maioria dos artigos, mais uma vez, de origem internacional. Dos 81 artigos, apenas cinco eram brasileiros.

Finalmente, para um melhor mapeamento nacional, foram lançados, no Google Acadêmico, os seguintes termos em português: “desempenho térmico de edificações e eficiência energética”, com 16.100 resultados.

Todas as buscas mencionadas foram realizadas sem especificação de intervalos de tempo. A partir dos resultados encontrados, foram selecionados, para leitura, aqueles artigos considerados mais estreitamente ligados ao tema da dissertação. O Quadro 1 apresenta os artigos selecionados como de maior interesse para o presente trabalho.

²<https://www.scopus.com/search/form.uri?display=basic#basic>

³Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – Portal de periódicos: <https://www-periodicos-capes-gov-br.ez1.periodicos.capes.gov.br/>

Quadro 1 - Fontes bibliográficas relevantes para a pesquisa, em ordem cronológica (continua)

Referência	Materiais/Componentes avaliados	Propriedades avaliadas	Objetivo
Machado <i>et al.</i> (2003)	Coberturas	Temperatura, umidade relativa e fluxo de calor	Análise comparativa entre coberturas
Da Silva (2007)	Paredes exteriores	Transmitância térmica, condutividade térmica, capacidade térmica e amortecimento térmico	Análise comparativa de alvenarias
Spala <i>et al.</i> (2008)	Sistemas de coberturas verdes	Carga de aquecimento e refrigeração	Análise de sistemas de coberturas verdes
Pereira (2009)	Coberturas e paredes	Transmitância e capacidade térmica	Investigar a influência das propriedades térmicas do envelope
Tsang e Jim (2011)	Coberturas	Calor latente e armazenamento de calor	Eficiência energética
Socaciu (2012)	Materiais de mudança de fase (PCM)	Calor latente e condutividade térmica	Conforto térmico
Brito <i>et al.</i> (2014)	Paredes	Capacidade térmica	Isolamento térmico
Pennacchia <i>et al.</i> (2016)	Papelão, pneus de automóveis, paletes de madeira e garrafas plásticas e de vidro	Transmitância térmica	Reutilização e reciclagem de resíduos
Pimenta <i>et al.</i> (2016)	Telhados (fibra de celulose e betume, fibrocimento e cerâmica)	Temperatura do ar, temperatura radiante média e umidade relativa do ar	Análise comparativa entre coberturas
Schiavoni <i>et al.</i> (2016)	Materiais convencionais (celulose, poliestirenos etc.) e materiais não convencionais (fibra de coco, borracha reciclada, aerogel, painel de isolamento a vácuo)	Condutividade térmica e Calor específico	Revisão de materiais visando melhor desempenho térmico

Quadro 1 - Fontes bibliográficas relevantes para a pesquisa, em ordem cronológica (conclusão)

Mourid e El Alami (2017)	Materiais de mudança de fase (PCM)	Temperaturas internas e de ambiente, e transferência de calor	Conforto térmico
Kadiri et al. (2018)	Coberturas, paredes e pisos	Coefficiente de transmissão térmica	Reduzir consumo energético
Michels (2018)	Coberturas (barreiras radiantes)	Fluxo de calor e eficiência	Redução de transferência de calor
Spinelli et al. (2018)	Fachada e paredes	Transmitância térmica	Isolamento térmico
Ataide e Piovesan (2019)	Bloco de concreto celular autoclavado e bloco cerâmico vazado	Condutividade térmica	Comparação de desempenho térmico e acústico entre vedações
Castro (2019)	Paredes	Transmitância térmica	Reduzir consumo energético
Damdelen (2019)	Materiais cimentícios, agregados e fator água/cimento	Transmitância térmica	Reduzir consumo energético
Franco et al. (2019)	Argamassa, concreto e blocos de concreto	Condutividade térmica	Reduzir consumo energético
Innocent e Ramalingam (2019),	Argamassa com vermiculita	Transmitância térmica e amortecimento térmico	Eficiência energética
Nematchoua et al. (2020)	Materiais de mudança de fase (PCM) e poliestireno expandido	Transferência de calor	Conforto térmico
Vettorazzi et al. (2021)	Coberturas, paredes, pisos e janelas	Transmitância e massa térmica	Conforto térmico e redução do consumo energético
D'Agostino et al. (2022)	Poliestireno expandido (EPS) e poliuretano	Condutividade e transmitância térmica	Durabilidade e desempenho térmico
Omena et al. (2023)	Alvenaria (convencional e steel frame)	Transmitância e capacidade térmica	Análise do desempenho térmico de alvenaria

Fonte: Autor (2024)

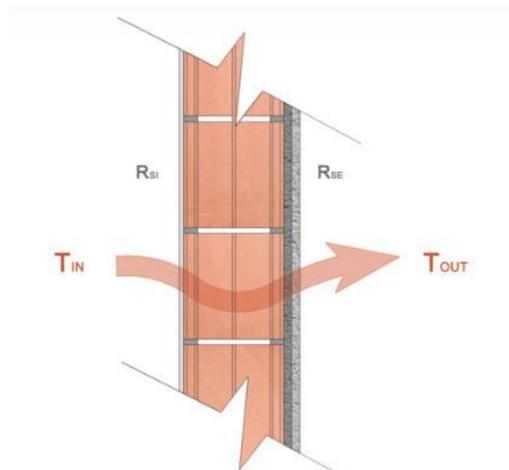
Observa-se que a maior parte dos trabalhos selecionados na revisão bibliográfica é internacional. Além disso, nota-se que a propriedade térmica mais avaliada é a transmitância térmica, evidenciando sua relevância.

2.1 - Propriedades térmicas dos materiais

Visando proporcionar melhor conforto térmico aos usuários de uma edificação, é necessário que seu desempenho térmico seja adequado para esta finalidade. De acordo com Lamberts *et al.* (2000), o conforto térmico pode ser definido como o estado mental que expressa a satisfação de um indivíduo com o ambiente térmico em que ele se encontra. Uma das maneiras de se alcançar condições de conforto térmico interno é por meio de climatização artificial (ar condicionado). Porém, este método se associa, necessariamente, a um consumo de energia. A redução deste consumo pode ser obtida, entretanto, adotando-se soluções construtivas termicamente favoráveis a este propósito para a envoltória. Segundo a norma ABNT NBR 15575 - *Edificações habitacionais — Desempenho* (ABNT, 2021), o desempenho térmico de edificações depende de uma série de características da unidade habitacional, como: componentes (paredes e coberturas), áreas envidraçadas, ventilação, cargas térmicas internas (pessoas, iluminação e equipamentos), aberturas e localização (clima).

Entre as principais propriedades térmicas que influenciam as trocas de calor entre os ambientes internos e externos estão: a resistência térmica (R), a transmitância térmica (U) e a capacidade térmica (C_T). As trocas de calor mais ou menos intensas entre esses ambientes depende dessas propriedades, entre outros fatores. Quanto maior a resistência térmica, expressa em $(m^2.K)/W$, menor o fluxo de calor. A transmitância térmica é o inverso da resistência térmica total, que é a soma das resistências térmicas das camadas de um elemento, como uma parede, incluindo as resistências superficiais interna e externa, de acordo com a NBR 15220 (ABNT, 2005). Logo, a transmitância térmica é o fluxo de calor transmitido por unidade de área e de temperatura (Figura 3), expressa em $W/(m^2.K)$.

Figura 3 – Fluxo de calor em uma parede



Fonte: ArchDaily (2019)

A capacidade térmica é a “quantidade de calor necessária para variar em uma unidade a temperatura de um sistema”, expressa na unidade J/K (ABNT, 2005). Um estudo de Brito *et al.* (2014), realizado em um pequeno edifício da cidade de São Paulo demonstrou, por meio de simulações computacionais, que houve melhora em seu desempenho térmico utilizando-se parede com maior capacidade térmica. Outro estudo, de Pereira (2009), concluiu, através de simulações em uma edificação real na cidade de Florianópolis-SC, que a propriedade térmica de melhor correlação com as horas de desconforto da edificação foi a capacidade térmica. Portanto, tanto a transmitância térmica quanto a capacidade térmica dos componentes construtivos merecem atenção para a melhoria do desempenho térmico das edificações.

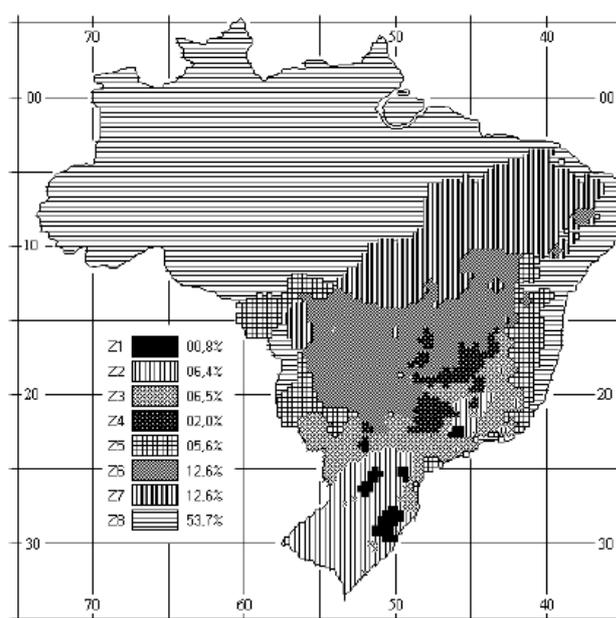
2.2 - Normas e regulamentos de desempenho térmico de edificações no Brasil

Por conta do cenário de aumento do consumo de energia, buscam-se estratégias de projeto e técnicas para construir obras que permitam uso eficiente e racional da energia, além da redução do consumo. Dessa maneira, surgiram no Brasil, em anos recentes, normas e regulamentos técnicos para edificações relacionadas a esse tema.

Duas normas que balizam pesquisas, projetos e construções são adotadas como linhas principais de direcionamento do presente trabalho: ABNT NBR 15220/2022 – Desempenho térmico de edificações e ABNT NBR 15575/2021 – Edificações

habitacionais — Desempenho. A primeira parte da NBR 15220 estabelece definições, símbolos e unidades de propriedades térmicas, como a resistência, a transmitância e a capacidade térmica, que são utilizadas para se analisar o desempenho térmico de edificações. A segunda parte contém os métodos de cálculo dessas propriedades de elementos constituintes da edificação. O zoneamento bioclimático brasileiro é apresentado na Parte 3, que também propõe diretrizes construtivas relacionadas a características dessas regiões. A Figura 4 mostra a divisão do território brasileiro em oito zonas bioclimáticas.

Figura 4 - Zoneamento bioclimático brasileiro



Fonte: ABNT (2005)

Segundo o Manual para aplicação do RTQ-C (2017), o zoneamento bioclimático objetiva orientar a adoção de diretrizes construtivas que uma edificação deve seguir, visando maior conforto térmico para seus ocupantes. Ou seja, o zoneamento procura otimizar o desempenho térmico das edificações, buscando a melhor adequação em função do clima. Para isso, segundo a NBR 15220-3 (ABNT, 2005), foi utilizada uma base de dados climáticos do Brasil, contendo as seguintes variáveis: médias mensais das temperaturas máximas, médias mensais das temperaturas mínimas e médias mensais das umidades relativas do ar.

Entretanto, segundo Martins *et al.* (2012), o uso de médias mensais como base de dados pode gerar distorções, sobretudo em regiões que apresentem grandes amplitudes

anuais. Neste cenário, alguns estudos têm sido desenvolvidos visando preencher lacunas da norma. De acordo com um relatório de Bavaresco *et al.* (2017), a divisão do zoneamento bioclimático brasileiro pode ter limitações, já que diversas cidades da mesma zona possuem características climáticas distintas, resultando em estratégias inadequadas em alguns casos. Segundo os autores, uma subdivisão é necessária para solucionar este problema.

Em paralelo a isso, segundo Soares *et al.* (2021), há uma desigualdade no número de estudos nos diferentes estados e regiões do Brasil. O autor fez um levantamento bibliográfico sobre o tema Eficiência Energética em Edifícios e observou que a região sul do país concentrou mais da metade dos objetos de estudo.

O Quadro 2 mostra as estratégias construtivas para cada zona bioclimática brasileira, segundo a NBR 15220-3 (ABNT, 2005) e, Tabela 1, as diretrizes construtivas relativas à transmitância térmica, atraso térmico e fator de calor solar para paredes externas e coberturas, segundo a mesma norma.

Quadro 2 – Estratégias e diretrizes de cada Zona Bioclimática

Zona bioclimática	Aberturas de ventilação	Estratégias (inverno)	Estratégias (verão)	Vedações externas
ZB1	Médias	Aquecimento solar da edificação e vedações internas pesadas (inércia térmica)	-	Paredes e coberturas leves
ZB2	Médias	Aquecimento solar da edificação e vedações internas pesadas (inércia térmica)	Ventilação cruzada	Paredes e coberturas leves
ZB3	Médias	Aquecimento solar da edificação e vedações internas pesadas (inércia térmica)	Ventilação cruzada	Paredes e coberturas leves
ZB4	Médias	Aquecimento solar da edificação e vedações internas pesadas (inércia térmica)	Resfriamento evaporativo e massa térmica para resfriamento, e ventilação seletiva	Paredes pesadas e coberturas leves
ZB5	Médias	Vedações internas pesadas (inércia térmica)	Ventilação cruzada	Paredes e coberturas leves
ZB6	Médias	Vedações internas pesadas (inércia térmica)	Resfriamento evaporativo e massa térmica para resfriamento, e ventilação seletiva	Paredes pesadas e coberturas leves
ZB7	Pequenas	-	Resfriamento evaporativo e massa térmica para resfriamento, e ventilação seletiva	Paredes e coberturas pesadas
ZB8	Grandes	-	Ventilação cruzada permanente	Paredes e coberturas leves

Fonte: ABNT (2005)

Tabela 1 - Transmitância térmica, atraso térmico e fator de calor solar admissíveis para cada tipo de vedação externa

Vedações externas		Transmitância Térmica U (W/m ² .K)	Atraso térmico Φ (horas)	Fator solar - FSo (%)
Paredes	Leve	$U \leq 3,0$	$\Phi \leq 4,3$	$FSo \leq 5,0$
	Leve refletora	$U \leq 3,6$	$\Phi \leq 4,3$	$FSo \leq 4,0$
	Pesada	$U \leq 2,2$	$\Phi \geq 6,5$	$FSo \leq 3,5$
Coberturas	Leve isolada	$U \leq 2,0$	$\Phi \leq 3,3$	$FSo \leq 6,5$
	Leve refletora	$U \leq 2,3.FT$	$\Phi \leq 3,3$	$FSo \leq 6,5$
	Pesada	$U \leq 2,0$	$\Phi \geq 6,5$	$FSo \leq 6,5$

FT – Fator de correção da transmitância. Para coberturas sem forro ou com áticos não ventilados, FT = 1.

Fonte: ABNT (2005)

A NBR 15575 é a referência nacional para o desempenho de edificações residenciais em diversos aspectos. As partes 1, 4 e 5 abordam o desempenho térmico. Na primeira parte são estabelecidos os requisitos gerais e critérios para a avaliação do desempenho térmico de edificações habitacionais. Na quarta parte apresentam-se os critérios de desempenho térmico de sistemas de vedações verticais internas e externas das edificações e, na parte 5, os critérios de desempenho térmico para os sistemas de coberturas das edificações.

Um importante marco para a construção civil brasileira do ponto de vista de desempenho térmico foi a Lei 10.295, criada em 2001, conhecida como “Lei da Eficiência Energética”, que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, visando o uso eficiente dos recursos energéticos e a preservação do meio ambiente (BRASIL, 2001). De acordo com a publicação “Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética”, do Ministério de Minas e Energia (BRASIL, 2018, p.1):

A Lei de Eficiência Energética foi aprovada para reforçar os programas de etiquetagem, permitindo ao governo brasileiro estabelecer índices

mínimos de eficiência energética para equipamentos e, conseqüentemente, proibir a comercialização de modelos com baixa eficiência energética. Criado pela mesma lei, o Comitê Gestor de Indicadores de Eficiência Energética (CGIEE) é responsável por determinar os índices mínimos para cada produto.

Outro marco foi uma parceria entre o Inmetro – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia– e a Eletrobrás/PROCEL criando o Programa Brasileiro de Etiquetagem de Edificações (PBE Edifica). Esse programa publicou os Regulamentos Técnicos da Qualidade do Nível de Eficiência Energética: RTQ-C e RTQ-R. O RTQ-C mostra os procedimentos para a etiquetagem de eficiência energética de edifícios comerciais, de serviço e públicos. O RTQ-R avalia a eficiência energética de edificações residenciais. O objetivo desses regulamentos é estimular a construção de edificações energeticamente mais eficientes, classificando o nível de eficiência em uma escala crescente. Também foram publicados manuais desses regulamentos procurando detalhar os métodos de cálculo e sua aplicação.

2.3 - Soluções construtivas, comportamento do usuário e o impacto no desempenho térmico

Os materiais isolantes possuem um papel fundamental no desempenho térmico da envoltória dos edifícios. Além de suas propriedades intrínsecas, fatores como a mistura, combinação ou a justaposição de mais de um material formando componentes e elementos construtivos interferem nas propriedades do conjunto. A relação água/cimento é um exemplo, para o concreto. Segundo Damdelen (2019), quanto menor a relação água/cimento, maior será a condutividade térmica do concreto, aumentando a transmitância térmica do material. Outros exemplos podem ser citados, como painéis de vedação de gesso acartonado e blocos de alvenaria fabricados com misturas de agregados e aglomerantes.

Um desafio atual é encontrar soluções com bom desempenho e que sejam viáveis economicamente, além de sustentáveis do ponto de vista ambiental. Segundo Schiavoni *et al.* (2016), alguns materiais como painéis de isolamento a vácuo (VIP, em inglês) e aerogéis são extremamente promissores pelos valores muito baixos de condutividade

térmica, entretanto esbarram nos custos elevados em comparação a materiais convencionais.

Segundo Pennacchia *et al.* (2016), a reutilização de alguns resíduos urbanos na envoltória da edificação gera custos menores e proporcionam o mesmo desempenho térmico que os materiais convencionais. Os materiais estudados pelos autores foram tubos de papelão, pneus de automóveis, paletes de madeira e garrafas plásticas e de vidro. Franco *et al.* (2019) adotaram uma estratégia sustentável ao substituir os agregados naturais por escória de aciaria em compósitos da envoltória à base de cimento. Os resultados indicaram melhor desempenho térmico que os compósitos convencionais, devido à baixa condutividade térmica.

Os materiais de mudança de fase (PCM, sigla em inglês para *phase change materials*) têm sido bastante estudados. De acordo com Socaciu (2012), os PCM possuem como característica a absorção de energia durante o processo de aquecimento, à medida que a mudança de fase ocorre, e liberam essa energia para o ambiente na faixa de mudança de fase durante o processo reverso, de resfriamento. Ou seja, são materiais com alta capacidade de armazenamento de energia. Um estudo de Nematchoua *et al.* (2020) demonstrou, por simulações, que o uso de PCM em fachadas permite economia de até 19% no consumo de energia em regiões costeiras de clima tropical. Um outro estudo, de Mourid e El Alami (2017), concluiu que o uso de PCM em coberturas tem um bom efeito de isolamento térmico, já que reduz as oscilações diárias de temperatura e o fluxo de calor para o ambiente interno.

Outro fator importante a ser levado em consideração nos estudos de desempenho térmico é a durabilidade dos materiais ou da edificação. D'Agostino *et al.* (2022) realizaram um estudo experimental medindo a durabilidade do poliuretano e do EPS (poliestireno expandido), testando a deterioração desses componentes aplicados em um edifício. Não houve variação significativa da vida útil das paredes e, além disso, houve aumento no consumo de energia para aquecimento do edifício de apenas 2% após um período de oito anos.

Vettorazzi *et al.* (2021) realizaram um estudo de simulação do consumo energético de edifícios nas zonas bioclimáticas 1, 2 e 3 do Brasil. Através de um algoritmo evolutivo que otimiza o conceito de “Passive House”, várias simulações foram realizadas com o

objetivo de encontrar as melhores configurações da envoltória dos edifícios para menor consumo energético. Os resultados revelaram que o uso do conceito de “Passive House” em edifícios unifamiliares da região sul do Brasil apresentou desempenhos térmico e energético significativamente superiores aos do edifício de referência, construído de acordo com o regulamento térmico nacional (RTQ-R), com redução de até 83% da demanda energética anual de ar condicionado.

Kadiri *et al.* (2018) realizaram uma simulação térmica em Marrocos, alterando também as configurações da envoltória, buscando menores valores de transmitância térmica para as paredes e coberturas, além de utilizar vidros de baixa emissividade. Concluíram que a demanda energética diminuiu em até 40% em relação a uma casa padrão local. Um estudo no sul do Brasil realizado por Spinelli *et al.* (2018) obteve uma redução de até 81% da transmitância térmica e de 68% do consumo energético ao adotar uma parede com EPS, tela de vidro e tinta branca no revestimento.

Para a realidade brasileira especificamente, as paredes de alvenaria constituem uma das soluções mais comuns na envoltória de edificações. Elas formam os fechamentos verticais da maioria das construções nos centros urbanos. Os blocos cerâmicos e de concreto estão entre os mais utilizados como alvenaria no Brasil. De acordo com Garcia *et al.* (2019), o bloco de concreto é o mais utilizado para alvenaria estrutural no país.

Na pesquisa de Castro (2019) foram realizadas simulações de variações de alvenaria e seu desempenho térmico em um cômodo hipotético. Foram estudadas paredes com bloco cerâmico e com bloco de concreto. Os resultados indicaram redução de mais de 20% no valor da transmitância térmica da parede com revestimento convencional ao se utilizar o bloco cerâmico em detrimento do bloco de concreto. Conseqüentemente, observou-se também redução do consumo energético com uso de aparelho de ar condicionado em simulações computacionais. Ataíde e Piovesan (2019) observaram, em seu estudo, que o bloco de concreto celular autoclavado proporciona melhores resultados quanto ao desempenho térmico, apresentando menores índices de condutividade térmica.

Um estudo de Omena *et al.* (2023) realizou uma comparação do desempenho térmico em vedações por alvenaria com bloco cerâmico e *steel frame* em Palmas-TO e concluiu que o bloco cerâmico apresentou um resultado superior.

Um estudo feito por Da Silva (2007) comparou paredes duplas e simples (compostas por tijolos furados) e concluiu que o isolamento térmico é maior utilizando parede dupla em relação à parede simples. Entretanto, essa solução envolve maior dificuldade de execução e maiores custos.

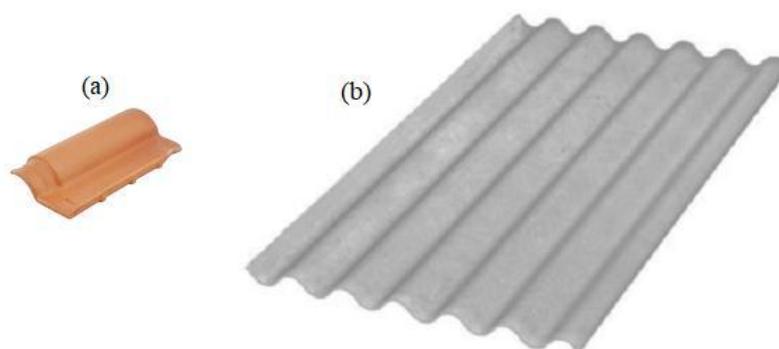
Além do tipo de bloco empregado na parede, o revestimento também é extremamente importante para o desempenho térmico do sistema de vedação vertical. No mesmo estudo de Castro (2019), concluiu-se que o uso de argamassa isolante pode reduzir em até 30% o valor da transmitância térmica. Argamassas isolantes, geralmente de densidade mais baixa do que uma argamassa convencional, apresentam menor condutividade.

Segundo Innocent e Ramalingam (2019), argamassas de cimento e vermiculita podem proporcionar resistência mecânica e propriedades térmicas satisfatórias na envoltória de um edifício, já que permitem maior resistência térmica e estabilidade contra variações de temperatura externa. As proporções cimento/vermiculita utilizadas em seu estudo, em massa, foram 1:0,5, 1:1 e 1:1,5. Quanto maior a proporção de vermiculita em relação ao cimento, menor foi a resistência mecânica da argamassa obtida. De acordo com o mesmo estudo, isso se deve ao aumento da porosidade. Um outro estudo, de Pinto (2019), analisou o desempenho térmico e mecânico de argamassas de revestimento com substituições do agregado natural pela vermiculita expandida com proporções cimento/vermiculita, em volume, de 1:1,5 a 1:3. Concluiu-se que a argamassa com vermiculita expandida possui bom desempenho térmico, sem grande prejuízo para propriedades mecânicas.

Como já mencionado, as coberturas das edificações compõem sua envoltória e também desempenham importante papel no desempenho térmico. Ao incidir sobre as telhas, parte do calor da radiação solar é absorvida e transmitida para a edificação. De acordo com Machado *et al.* (2003), a cobertura é o elemento da edificação que está mais sujeito a flutuações térmicas, devido à elevada exposição direta ao sol, ou seja, à radiação solar. Michels (2018) afirma que uma parcela significativa de energia gasta com resfriamento de ambientes é utilizada em decorrência da transferência de calor pela cobertura das edificações.

De acordo com Michels (2018), os tipos de telhas mais comumente usadas no Brasil são as de fibrocimento e as de cerâmica (Figura 5). As primeiras geralmente são mais utilizadas em edificações de baixa renda, por serem mais baratas. Um estudo de Pimenta *et al.* (2016) comparou três tipos de cobertura - fibra de celulose e betume, fibrocimento e cerâmica – e concluiu que a cobertura cerâmica foi a que obteve o menor ganho térmico e, portanto, apresentou melhor desempenho térmico.

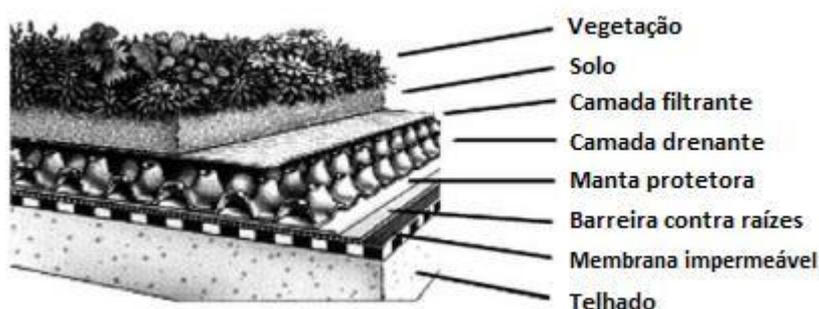
Figura 5 – Telha cerâmica (a) e telha de fibrocimento (b)



Fonte: Leroy Merlin (2023)

Recentemente, os telhados “verdes”, de cobertura vegetal, têm sido muito estudados devido aos diversos benefícios trazidos sob os aspectos térmico e ambiental. “Os telhados verdes são sistemas de cobertura em que, ao invés da presença das telhas, há a presença de uma camada vegetal, além das camadas de impermeabilização, de drenagem e de substrato” (MICHELS, 2018). Na Figura 6 ilustra-se a composição de um telhado verde padrão e suas camadas.

Figura 6 – Camadas de um telhado verde



Fonte: Adaptado de Lazzarin, Castellotti e Busato (2005)

Segundo Kumar e Mahalle (2016), os telhados verdes podem proporcionar: redução do consumo de energia, melhoria no conforto térmico e acústico nos edifícios, redução no escoamento de águas pluviais e sequestro de CO₂ da atmosfera. Na Grécia, um estudo de Spala *et al.* (2008) demonstrou, por meio de simulações, que o uso de telhado verde em um edifício de escritórios de Atenas permitiu redução de cerca de 40% na carga de resfriamento durante o verão. Entretanto, foi observado leve aumento da carga de aquecimento desse edifício no inverno. Segundo Tsang e Jim (2011), coberturas verdes são mais eficientes em climas tropicais úmidos do que em regiões temperadas. De acordo com Minke (2003), o telhado verde pode ser muito útil tanto em climas frios, quanto em climas quentes. Em regiões frias, ajuda a reter o calor, armazenando-o nos ambientes internos. Já em climas quentes, isola os espaços interiores das altas temperaturas externas.

Finalmente, deve-se levar em conta que além dos materiais e elementos construtivos que compõem uma edificação, o comportamento dos usuários de uma unidade habitacional pode ter um impacto significativo no desempenho térmico de edificações residenciais. Segundo Viana *et al.* (2023), o comportamento do usuário compreende as várias formas de sua interação com os elementos do ambiente, como a abertura de janelas, a manipulação de equipamentos, sistemas de iluminação e condicionamento artificial. Segundo Sorgato (2015), as formas de reduzir o impacto do comportamento do usuário são: recursos de automação, por meio do controle dos sistemas da edificação, ou recursos simplificados, como “manual do usuário” com informações de como ventilar e controlar o sombreamento da edificação, por exemplo. Ainda segundo Sorgato (2015), operações inadequadas realizadas pelos ocupantes podem aumentar o consumo energético. Por exemplo, em regiões quentes, quando a temperatura do ar externo for maior que a do ar interno, a ventilação natural pode afetar o desempenho térmico da edificação, obrigando o manuseio adequado de aberturas. De acordo com Sorgato *et al.* (2016), uma ventilação adequada do edifício pode ser obtida por automação.

Um estudo de Ramos *et al.* (2020) concluiu que a maior parte dos usuários de todas as zonas bioclimáticas brasileiras prefere ambientes naturalmente ventilados. Em suma, o comportamento do usuário e suas operações na habitação são fatores que contribuem para melhorar o desempenho térmico da edificação. Porém, constituem ainda um desafio

complexo, já que, assim como as características climáticas das regiões, a rotina e os hábitos das pessoas são altamente variáveis.

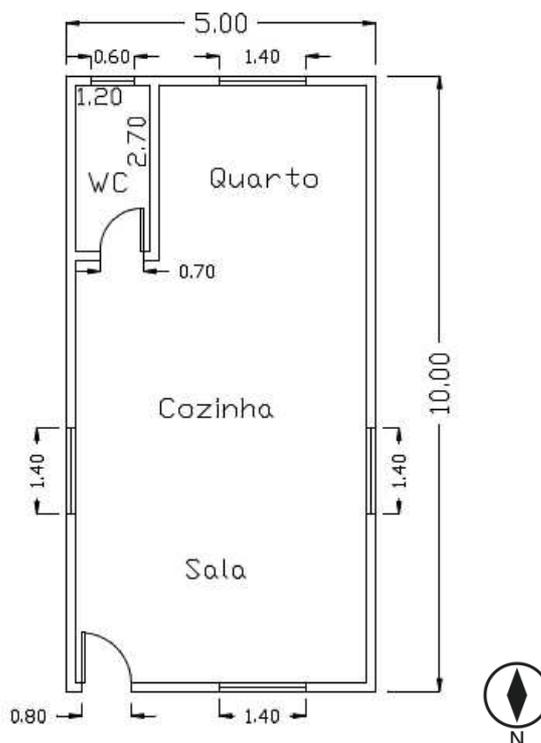
3. METODOLOGIA

O desenvolvimento do presente trabalho se deu em duas etapas. Na **primeira**, foram calculados o valor da transmitância térmica (U) e da capacidade térmica (Ct) de diferentes configurações da envoltória de uma edificação teórica, por meio de procedimentos baseados em normas técnicas. O modelo de edificação escolhido é um *loft*, isto é, uma moradia de ambientes integrados, apresentando volume único, à exceção do banheiro, para simplificação das diversas análises da pesquisa. Portanto, este modelo é caracterizado por possuir planta integrada, ou seja, quarto, sala e cozinha dividem um espaço aberto, sem divisórias.

Ressalta-se que a literatura indica que para análises de comportamento térmico de edificações, pavimentos apresentando múltiplos ambientes interligados por aberturas de grandes dimensões (portas) sob condições de livre circulação de ar (abertas), comportam-se basicamente como um único grande ambiente e podem ser estudados desta forma sem perda significativa de consistência nos resultados numéricos. Isso também justifica a simplificação da escolha de tal modelo para este trabalho, que também permite a inclusão e variação de tipos de coberturas diferentes no estudo.

Foi objeto de estudo, portanto, um único ambiente de permanência prolongada (APP). De acordo com a ABNT NBR 15575 (ABNT, 2021), são definidos como APPs aqueles de ocupação contínua por um ou mais indivíduos (como sala e dormitório). Já os ambientes de permanência transitória (APT), são os ambientes de ocupação transitória por um ou mais indivíduos (como cozinha e banheiro). Além disso, de acordo com a ABNT NBR 15575 (ABNT, 2021), quando um APP for utilizado como sala e como dormitório (como no caso do *loft* do presente trabalho), a UH deve ser modelada considerando o uso misto em termos de ocupação e cargas internas.

O *loft* estudado tem dimensões de 5,0 m de largura, 10,0 m de comprimento (50 m² de área construída) e 3,0 m de pé direito, conforme pode ser visualizado na Figura 7.

Figura 7 – Planta baixa do *loft*

Fonte: Autor (2024)

O *loft* conta com um único ambiente de permanência prolongada (APP) com quatro janelas, uma em cada parede. Cada janela possui as dimensões 1,40 m de largura e 1,20 m de altura, ou seja, as quatro resultam em uma área total de iluminação/ventilação de 6,72 m². O banheiro possui dimensões internas de 1,20 m de largura e 2,70 m de comprimento, com uma janela de 0,6 m de largura e 0,8 m de altura, ou seja, cerca de 15% da área do piso.

A orientação da unidade habitacional foi fixada, conforme a Figura 7. A parede da frente, contendo a porta de entrada e medindo 5,0 m, ficou orientada para o Norte. A parede de trás, contendo os fundos do cômodo principal (com janela) e o fechamento vertical do banheiro com sua respectiva janela, medindo ao todo 5,0 m, ficou orientada para o Sul. A parede que não contém parte do banheiro e mede 10,0 m ficou orientada para o Oeste. A parede que contém parte do banheiro e mede 10,0 m ficou orientada para o Leste. Esta orientação foge daquela mais favorável em termos de menos ganho de calor no hemisfério sul, com a parede de maior dimensão no eixo Leste-Oeste, justamente para

avaliar a situação mais desfavorável da edificação, isto é, de mais insolação à tarde (norte) no verão e maior incidência solar no inverno.

Nessa etapa do trabalho são consideradas diversas configurações para os seguintes parâmetros:

- Tipo de alvenaria;
- Tipo de argamassa de revestimento, de acordo com sua categoria quanto à condutividade térmica - isolante ou normal;
- Tipo de cobertura, com diferentes características térmicas.

Para os cálculos da transmitância térmica e da capacidade térmica das paredes foram utilizadas planilhas eletrônicas elaboradas no programa computacional Excel, da Microsoft[®]. Os cálculos foram feitos conforme a norma ABNT NBR15220-2 (ABNT, 2022). Os valores de transmitância e capacidade térmica das coberturas são adotados segundo o Anexo Geral V da portaria do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia – INMETRO nº50/2013 - Catálogo de propriedades térmicas de paredes, coberturas e vidros (INMETRO, 2013).

Após a obtenção dos valores de transmitância e capacidade térmica das paredes e das coberturas, foi realizada a avaliação do desempenho térmico do *loft*, por meio do procedimento “simplificado” proposto pela norma ABNT NBR 15575. Para as paredes, a avaliação das propriedades térmicas foi de acordo com a ABNT NBR 15575-4 (ABNT, 2021); para as coberturas, conforme a ABNT NBR 15575-5 (ABNT, 2021). Em seguida, foi feita uma análise de combinações de soluções construtivas para cada zona bioclimática brasileira, visando observar se as configurações analisadas atendem aos requisitos mínimos de desempenho térmico para cada uma delas. As paredes e coberturas que não atenderem aos critérios mínimos nas zonas bioclimáticas não serão utilizadas na segunda etapa do trabalho.

Na **segunda etapa**, a partir dos valores obtidos de U e Ct, foram realizadas simulações computacionais com o programa computacional TRNSYS 17⁴, capaz de avaliar sistemas transientes. O programa computacional escolhido para este trabalho foi o

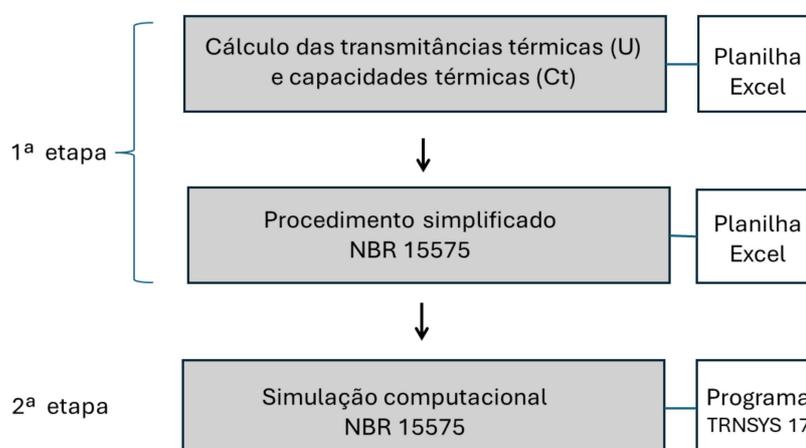
⁴<https://www.trnsys.com/>

TRNSYS17, devido ao fato de já haver um conhecimento prévio, por parte do autor da presente dissertação, sobre suas funcionalidades. Essa familiaridade com o programa representou uma oportunidade de realizar as simulações para o desenvolvimento do trabalho. Conforme a ABNT NBR 15575-1 (ABNT, 2021), o procedimento de simulação computacional deve avaliar o desempenho térmico anual da envoltória da edificação em relação a uma envoltória com características de **referência** estabelecidas na norma. Esse procedimento permite avaliar se a envoltória da unidade habitacional analisada terá um desempenho térmico classificado como **mínimo**, **intermediário** ou **superior**, de acordo com a mesma norma, e foi feito para cada uma das oito zonas bioclimáticas brasileiras.

As Figura 8 e Figura 9 apresentam um resumo dos procedimentos de avaliação de desempenho térmico. A Figura 8 mostra a sequência das etapas e os programas utilizados, enquanto a Figura 9 é a que consta na norma ABNT NBR15575-1 (ABNT, 2021), com métodos, parâmetros e modo de uso dos ambientes de permanência prolongada.

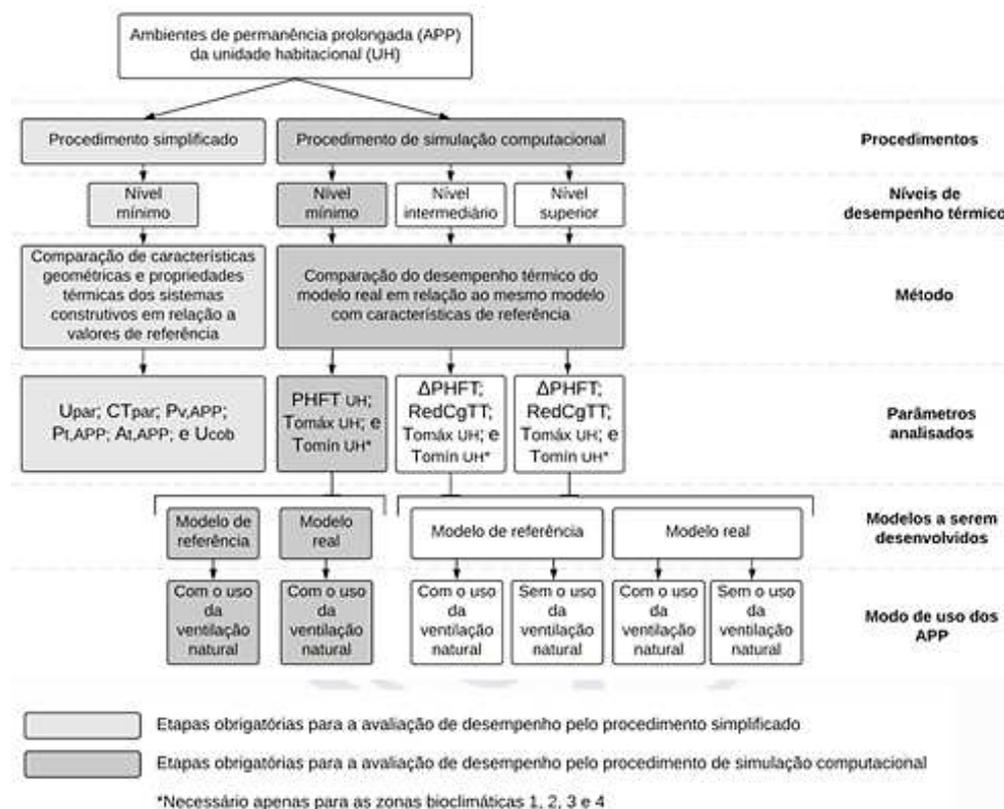
Figura 8 - Sequenciamento das etapas e programas utilizados

ETAPAS PARA ANÁLISE DE DESEMPENHO TÉRMICO DA UNIDADE HABITACIONAL (UH) - LOFT



Fonte: Autor (2024)

Figura 9 - Procedimentos de avaliação de desempenho térmico (NBR 15575)



Fonte: ABNT (2021)

Para as simulações, foram escolhidas as cidades de maior população de cada zona bioclimática, segundo estatísticas do IBGE (2021), objetivando maior alcance do trabalho. São elas (Tabela 2):

Tabela 2 - Cidades escolhidas para cada zona bioclimática e suas respectivas populações

Zona bioclimática	Cidade	População (milhões de habitantes)
1	Curitiba	1,96
2	Piracicaba	0,41
3	São Paulo	12,40
4	Brasília	3,09
5	Niterói	0,51
6	Goiânia	1,56
7	Teresina	0,87
8	Rio de Janeiro	6,76

Fonte: IBGE (2021)

3.1 - Parâmetros estudados

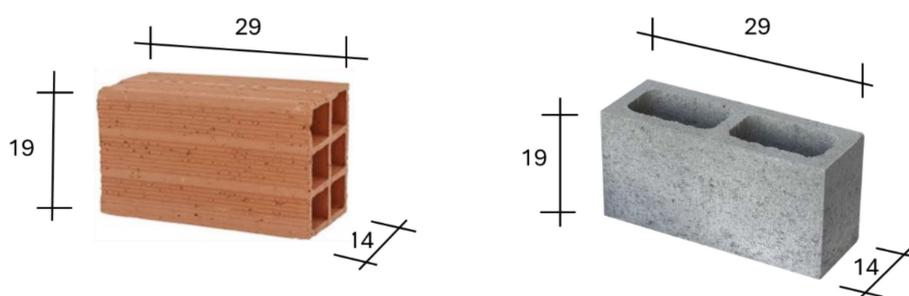
Para os cálculos de transmitância térmica das paredes variaram-se, como mencionado, o **tipo de alvenaria** (bloco de concreto e bloco cerâmico) e o **tipo de argamassa** (normal ou isolante), além de quatro tipos de cobertura.

Os tipos de alvenaria escolhidos são compostos por:

- Bloco cerâmico de vedação com seis furos horizontais.
- Bloco de concreto de vedação com dois furos verticais;

Esses dois tipos de alvenaria foram selecionados devido à sua forte presença no mercado da construção civil brasileiro. Todos os blocos utilizados possuem 29,0 cm de comprimento, 19,0 cm de altura e largura 14,0 cm, mais comumente encontradas.

Figura 10 - Bloco cerâmico vazado de vedação e bloco de concreto de vedação



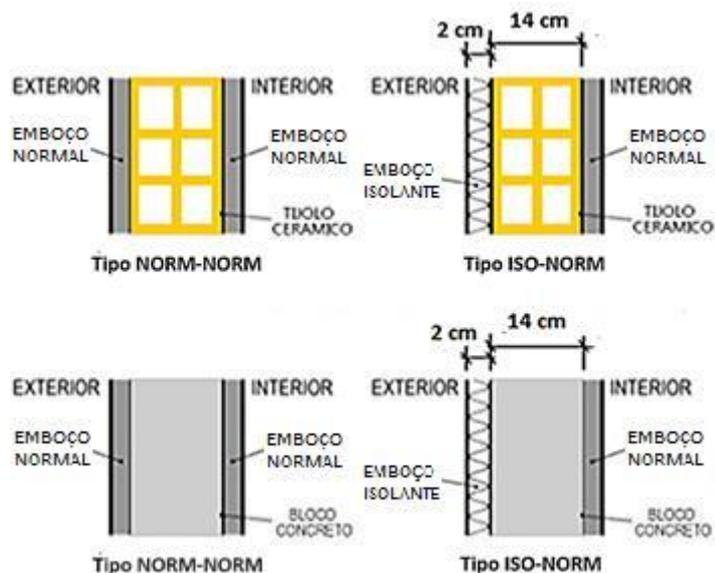
Fonte: Leroy Merlin (2022)

Quanto ao revestimento, reboco de argamassa cimentícia, variou-se a **condutividade térmica** (λ) da argamassa. Foi adotado o valor de 1,15 W/m.K para a condutividade térmica da argamassa convencional (normal) e 0,58 W/m.K para argamassa isolante, ou seja, metade do valor da argamassa convencional. Além disso, foram adotados os valores de 2000kg/m³ para a densidade de massa aparente da argamassa convencional e 1000kg/m³ para argamassa isolante, metade da primeira. São consideradas duas configurações de revestimento, portanto:

- a) revestimento com argamassa convencional nas superfícies externa e interna da parede - denominada "NORM-NORM";
- b) revestimento com argamassa isolante na superfície externa e convencional na interna - denominada "ISO-NORM".

Adotou-se a espessura de 2,0 cm para as camadas de revestimento externo e interno. A Figura 11 mostra as configurações das paredes estudadas.

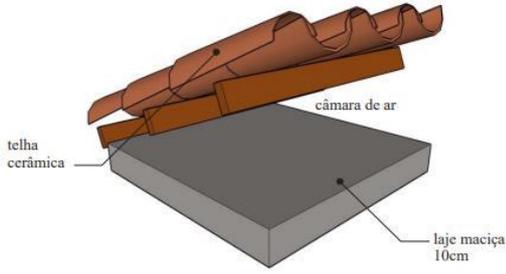
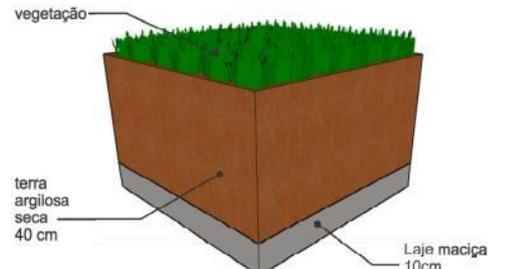
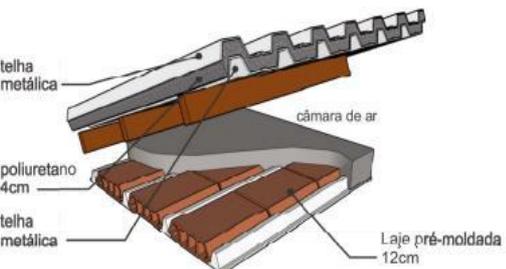
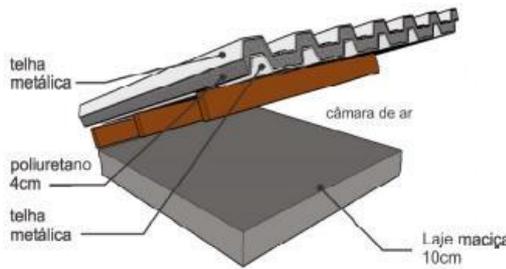
Figura 11– Configurações das paredes estudadas (corte vertical)



Fonte: Autor (2024)

As coberturas foram adotadas em função de diferentes valores de transmitância térmica, a fim de avaliar seu impacto no desempenho térmico da edificação. São quatro tipos de cobertura, de diferentes técnicas construtivas, cujas configurações foram retiradas do catálogo de propriedades térmicas de paredes, coberturas e vidros do INMETRO (2013). A seguir, na Tabela 3, são descritas as coberturas e suas características:

Tabela 3 - Coberturas e propriedades térmicas

	Cobertura	Descrição	U [W/(m ² .K)]	Ct [kJ/(m ² .K)]
I	 <p>telha cerâmica câmara de ar Laje maciça 10cm</p>	Laje maciça (10,0cm) Câmara de ar (> 5,0 cm) Telha cerâmica	2,05	238
II	 <p>vegetação terra argilosa seca 40 cm Laje maciça 10cm</p>	Laje maciça (10,0 cm), terra argilosa seca (40 cm) e vegetação	0,96	791
III	 <p>telha metálica câmara de ar poliuretano 4cm telha metálica Laje pré-moldada 12cm</p>	Laje pré-moldada 12,0 cm (concreto 4,0 cm + lajota e EPS 7,0 cm + argamassa 1,0 cm), câmara de ar (> 5,0 cm) e telhas metálicas de 0,1 cm com Poliuretano de 4,0 cm.	0,53	176
IV	 <p>telha metálica câmara de ar poliuretano 4cm telha metálica Laje maciça 10cm</p>	Laje maciça 10,0 cm Câmara de ar (> 5,0 cm) Telha metálica de 0,1cm com Poliuretano de 4,0cm	0,55	230

U – Transmitância térmica; Ct – capacidade térmica

Fonte: INMETRO (2013)

Observa-se que o segundo tipo de cobertura possui transmitância térmica de cerca de metade do valor da primeira. Já o terceiro tipo possui transmitância térmica de cerca de um quarto do valor da primeira cobertura, conseqüentemente metade do valor da segunda cobertura, aproximadamente. Finalmente, para a quarta cobertura, procurou-se uma

combinação que possui uma pequena diferença na transmitância térmica em relação à terceira cobertura, mas com diferença considerável no valor de capacidade térmica.

Os valores de absorvância das telhas escolhidas foram adotados da seguinte forma: Telha cerâmica = 0,5; Telha metálica = 0,15. O valor da telha cerâmica foi retirado da publicação de Dornellas (2021), que contém uma biblioteca de absorvância de telhas. A maior parte das telhas cerâmicas possui o valor de absorvância entre 0,45 e 0,60 e, portanto, adotou-se um valor intermediário. Para a telha metálica foi adotado o valor de 0,15, já que chapas de alumínio possuem valores que variam entre 0,05 e 0,25, segundo a ABNT NBR 15220 (ABNT, 2005).

Segundo a ABNT NBR 15575 (ABNT, 2021), as coberturas da unidade habitacional (UH) devem possuir, em cada zona bioclimática, o valor de transmitância térmica (U) igual ou inferior aos valores da Tabela 4:

Tabela 4 - Transmitância térmica de referência para coberturas

Transmitância Térmica (U) de coberturas (W/m².K)				
Zonas 1 e 2	Zonas 3 a 6		Zonas 7 e 8	
$U_{cob} \leq 2,30$	$\alpha_{cob} \leq 0,6$	$\alpha_{cob} 0,6$	$\alpha_{cob} \leq 0,4$	$\alpha_{cob} > 0,4$
	$U_{cob} \leq 2,3$	$U_{cob} \leq 1,5$	$U_{cob} \leq 2,3.FT$	$U_{cob} \leq 1,5.FT$

α_{cob} é a absorvância à radiação solar da superfície externa da cobertura.

FT é o fator de correção da transmitância aceitável para as coberturas (adimensional)

Fonte: ABNT (2021)

Procuraram-se, portanto, coberturas que atendessem aos requisitos mínimos estabelecidos em norma. No caso das ZBs 7 e 8, apenas a cobertura I da Tabela 3 não atende aos requisitos. Apesar disso, como se trata de um tipo de cobertura muito utilizado, esta configuração também foi considerada na segunda etapa (simulação computacional) do presente trabalho.

Conforme consta na norma ABNT NBR 15575 (ABNT, 2021), o modelo de referência deve adotar um elemento de vedação com 100 mm de espessura, com cobertura externa composta por telha com 6 mm de espessura, câmara de ar com resistência térmica de 0,21 (m².K)/W e laje com 100 mm de espessura. Outros aspectos do modelo de referência são também mencionados, como as características dos elementos transparentes

nas esquadrias, o percentual de abertura para ventilação e as características dos perfis das esquadrias.

3.2 - Procedimento simplificado de avaliação do desempenho térmico de edificações da norma ABNT NBR 15575:2021

O procedimento simplificado ABNT NBR 15575:2021 avalia o desempenho térmico da UH comparando suas propriedades térmicas com valores de referência, estabelecidos na própria norma. Os critérios desse procedimento para sistemas de vedações verticais externas (SVVE) são descritos na Parte 4 da norma, enquanto aqueles que se referem a coberturas são descritos na Parte 5.

Os parâmetros de referência para os SVVE são os seguintes: a) transmitância térmica de paredes externas; b) capacidade térmica de paredes externas; c) percentual de abertura para ventilação; d) percentual de elementos transparentes ou área de superfície dos elementos transparentes. Para o presente trabalho são avaliados apenas a transmitância e a capacidade térmica, fixando-se as aberturas para ventilação e os elementos transparentes, de modo a que atendam a critérios mínimos estabelecidos na norma.

3.2.1 - Critérios de desempenho da ABNT NBR 15575:2021

3.2.1.1 - Transmitância térmica de paredes externas (U_{par})

A Tabela 5 apresenta os limites de valores de transmitância térmica de paredes externas da norma ABNT NBR 15575:2021 para cada zona bioclimática:

Tabela 5 - Transmitância térmica de referência para paredes externas - NBR 15575:2021

Transmitância Térmica U (W/m ² .K)		
Zonas 1 e 2	Zonas 3, 4, 5, 6, 7 e 8	
$U_{par} \leq 2,7$	$\alpha_{par} \leq 0,6$	$\alpha_{par} > 0,6$
	$U_{par} \leq 3,7$	$U_{par} \leq 2,5$

α é a absorptância à radiação solar da superfície externa da parede.

Fonte: ABNT (2021)

Os cálculos da transmitância térmica das configurações de paredes do *loft* estudado foram realizados conforme a ABNT NBR 15220 (ABNT, 2022) com apoio de uma planilha eletrônica Excel[®]. O cálculo do valor da transmitância foi feito para as

combinações possíveis entre as soluções construtivas estudadas de paredes e cobertura. Para os cálculos da transmitância térmica, foi preciso calcular a resistência térmica total de cada solução de parede analisada (bloco e revestimentos). De acordo com a NBR 15575, a resistência térmica total é a média do limite inferior da resistência térmica total, $R_{tot,lower}$, e do limite superior da resistência térmica total, $R_{tot,upper}$.

3.2.1.2 - Capacidade térmica de paredes externas (CT_{par})

A Tabela 6 apresenta os valores de referência da capacidade térmica das paredes externas para cada zona bioclimática da UH:

Tabela 6 - Capacidade térmica de referência para paredes externas

Capacidade térmica de paredes CT_{par} ($\text{kJ/m}^2\cdot\text{K}$)	
Zonas 1 a 7	Zona 8
$CT_{par} \geq 130$	Sem requisito

Fonte: ABNT (2021)

Os cálculos da capacidade térmica, assim como para a transmitância térmica, foram realizados conforme a ABNT NBR 15220 (ABNT, 2022), com auxílio de uma planilha eletrônica.

3.3 - Procedimento de simulação computacional

Nessa etapa de procedimento por simulação computacional, avalia-se o desempenho térmico anual da envoltória escolhida (“modelo real”) em relação à envoltória de referência estabelecida na norma. Para o nível de desempenho mínimo, conforme foi observado na Figura 9, os modelos devem ser simulados com o uso de ventilação natural. Para os níveis intermediário e superior, os modelos devem ser simulados com e sem o uso de ventilação natural.

Para os modelos simulados com o uso da ventilação natural, deve-se permitir a abertura das janelas apenas quando o APP estiver ocupado, e de acordo com dois critérios de temperatura: quando a temperatura de bulbo seco interna do APP for igual ou superior a $19\text{ }^{\circ}\text{C}$; e quando a temperatura de bulbo seco interna for superior à temperatura de bulbo seco externa.

De acordo com a ABNT NBR 15575-1 (ABNT, 2021), utilizando a ventilação natural na simulação, serão determinados para os ambientes de permanência prolongada:

- $PHFT_{APP}$: percentual de horas de ocupação dos APP dentro de uma faixa de temperatura operativa estabelecida em norma;
- $Tomáx_{APP}$: temperatura operativa anual máxima de cada APP;
- $Tomín_{APP}$: temperatura operativa anual mínima de cada APP (quando a edificação estiver localizada nas zonas bioclimáticas 1, 2, 3 ou 4);

Após a obtenção dos valores de $PHFT_{APP}$, $Tomáx_{APP}$ e $Tomín_{APP}$ para cada APP, determina-se o $PHFT_{UH}$, a $Tomáx_{UH}$ e a $Tomín_{UH}$ da UH, através dos resultados no TRNSYS17, que são exportados para uma planilha eletrônica Excel[®].

Quando não se utiliza a ventilação natural na simulação, os seguintes parâmetros são determinados:

- $CgTR_{APP}$: somatório anual dos valores horários da carga térmica de refrigeração;
- $CgTA_{APP}$: somatório anual dos valores horários da carga térmica de aquecimento (quando a edificação é localizada em um clima que possui média anual da temperatura externa de bulbo seco inferior a 25 °C).

Após a obtenção dos valores de $CgTR_{APP}$ e $CgTA_{APP}$ para cada APP, determina-se o somatório anual dos valores horários da carga térmica total da UH ($CgTT_{UH}$), também com o auxílio de planilhas eletrônicas, com os resultados obtidos no TRNSYS17.

A avaliação dos critérios descritos acima é determinada por meio da média anual da temperatura externa de bulbo seco (TBS_m) do arquivo climático utilizado. A Tabela 7 mostra os intervalos de temperaturas externas de bulbo seco da norma.

Tabela 7 - Intervalos de temperaturas externas de bulbo seco

Intervalos de temperaturas externas	Média anual de temperatura externa de bulbo seco (TBS_m)
Intervalo 1	$TBS_m < 25,0 \text{ °C}$
Intervalo 2	$25,0 \text{ °C} \leq TBS_m < 27,0 \text{ °C}$
Intervalo 3	$TBS_m \geq 27,0 \text{ °C}$

Fonte: ABNT (2021)

Segundo planilha do PBE/Edifica – Programa Brasileiro de Etiquetagem de Edificações (PROCEL, 2022), as médias anuais de temperatura externa de bulbo seco de cada cidade escolhida e seus respectivos intervalos (de acordo com a Tabela 7), são as seguintes (Tabela 8):

Tabela 8 – Cidades escolhidas e seus respectivos intervalos de temperaturas externas

Cidade	Média anual de temperatura externa de bulbo seco (TBS_m)	Intervalos de temperaturas externas
Curitiba (ZB 1)	17,4 °C	Intervalo 1
Piracicaba (ZB 2)	20,9 °C	Intervalo 1
São Paulo (ZB 3)	19,6 °C	Intervalo 1
Brasília (ZB 4)	21,1 °C	Intervalo 1
Niterói (ZB 5)	22,0 °C	Intervalo 1
Goiânia (ZB 6)	23,2 °C	Intervalo 1
Teresina (ZB 7)	27,7 °C	Intervalo 3
Rio de Janeiro (ZB 8)	23,2 °C	Intervalo 1

Fonte: Autor (2024)

3.3.1 - Características do modelo real

Para a definição das aberturas do *loft* estudado, foram levadas em consideração as diretrizes e estratégias estabelecidas na ABNT NBR 15220, especificadas no capítulo anterior. Dado que a diretriz para a maior parte das zonas bioclimáticas é de ter aberturas médias para ventilação, o percentual de abertura para ventilação em relação à área de piso do APP seguirá esse padrão. De acordo com a ABNT NBR 15220 (ABNT, 2005), as aberturas médias para ventilação possuem de 15 a 25% da área do piso do APP, conforme a Tabela 9.

Tabela 9 – Diretrizes construtivas quanto às aberturas de ventilação

Aberturas para ventilação	A (% da área de piso)
Pequenas	10% < A < 15%
Médias	15% < A < 25%
Grandes	A > 40%

Fonte: ABNT NBR 15220 (ABNT, 2005)

Além das diretrizes e estratégias estabelecidas pela ABNT NBR 15220, a ABNT NBR 15575 também estabelece requisitos quanto a aberturas e elementos

transparentes para os sistemas de vedações verticais internas e externas. Para o percentual de abertura para ventilação, a ABNT NBR 15575 estabelece os seguintes percentuais mínimos de aberturas para o APP (Tabela 10):

Tabela 10 - Percentual de abertura de referência para ventilação

Percentual de abertura para ventilação ($P_{v,APP}$) %		
Zonas 1 a 7	Zona 8 – Região Norte	Zona 8 – Regiões Nordeste e Sudeste
$P_{v,APP} \geq 7,0\%$ da área de piso	$P_{v,APP} \geq 12,0\%$ da área de piso	$P_{v,APP} \geq 8,0\%$ da área de piso

Fonte: ABNT (2021)

Já para a proporção de referência dos elementos transparentes, a ABNT NBR 15575 estabelece os seguintes critérios para o APP (Tabela 11):

Tabela 11 - Proporção de referência dos elementos transparentes

Percentual de elementos transparentes para $A_{p,APP} \leq 20,0 \text{ m}^2$ ($P_{t,APP}$)	Área de superfície de elementos transparentes para $A_{p,APP} > 20,0 \text{ m}^2$ ($A_{t,APP}$)
$P_{t,APP} \leq 20 \%$	$A_{t,APP} \leq 4,0 \text{ m}^2$

Fonte: ABNT (2021)

Observa-se, portanto, que para APP's com mais de $20,0 \text{ m}^2$, a área de superfície de elementos transparentes deve ser menor ou igual que $4,0 \text{ m}^2$. Porém, considerando que o *loft* deste trabalho possui, aproximadamente, $42,0 \text{ m}^2$ de APP, torna-se inviável atender às diretrizes da NBR 15220 quanto às aberturas e o limite máximo de área de elemento transparente estabelecido na NBR 15575. Diante disso, foi desconsiderada a proporção máxima de referência dos elementos transparentes da ABNT NBR 15575 e considerou-se os percentuais de aberturas para ventilação como diretriz para determinar as dimensões das janelas do *loft*.

De acordo com Lamberts, Dutra e Pereira (2014), é nos elementos transparentes que acontecem as principais trocas térmicas da envoltória da edificação, já que a radiação incidente neles representa grande parcela da energia transmitida para o interior da edificação. Diante disso, considerou-se janelas com as mesmas dimensões nas quatro paredes do *loft*, para minimizar o efeito das diferentes direções do vento e de radiação solar

em cada zona bioclimática, além de assegurar a ventilação cruzada, em qualquer direção do ambiente.

Considerando que a área de piso do APP é de aproximadamente 42 m², o percentual de abertura para ventilação corresponde a 16% da área de piso do APP. Este percentual atende às aberturas mínimas estabelecidas pela NBR 15575 e, também, segue a diretriz da maior parte das zonas bioclimáticas, de aberturas médias para ventilação.

Os parâmetros de entrada no programa TRNSYS17 das paredes e coberturas dependem dos resultados de capacidade e transmitância térmica, calculados na primeira etapa deste trabalho (procedimento simplificado). Esses dados serão inseridos no programa.

3.3.2 - Características do modelo de referência

A modelagem da edificação de referência desta etapa fixa algumas propriedades térmicas dos componentes da envoltória. A Tabela 12 contém os parâmetros estabelecidos pela NBR 15575 para o modelo de referência.

Tabela 12 - Propriedades térmicas dos componentes construtivos do modelo de referência

Elemento	Condutividade térmica W/(m.K)	Calor específico J/(kg.K)	Absortância à radiação solar	Emissividade de onda longa	Densidade kg/m³
Paredes externas	1,75	1000	0,58	0,90	2.200
Paredes internas	1,75	1000	Adotar valor do modelo real	Adotar valor do modelo real	2.200
Pisos	1,75	1000	Adotar valor do modelo real	Adotar valor do modelo real	2.200
Telha com 6 mm de espessura	0,65	840	0,65	0,90	1.700
Laje com 100 mm de espessura	1,75	1000	Adotar valor do modelo real	Adotar valor do modelo real	2.200
Isolamento térmico da cobertura	-	-	0,70	0,90	-

Fonte: ABNT (2021)

No modelo de referência, as características dos elementos transparentes nas esquadrias e dos perfis das esquadrias do APP devem ser consideradas com os valores da Tabela 13 e da Tabela 14.

Tabela 13 - Características dos elementos transparentes para o modelo de referência

Elemento	Fator Solar (FS)	Transmitância térmica [W/(m².K)]	Percentual de elementos transparentes (%)
Elementos transparentes	0,87	5,70	17,00

Fonte: ABNT (2021)

Tabela 14 - Características dos perfis das esquadrias para o modelo de referência

Elemento	Condutividade térmica [W/(m.K)]	Absortância à radiação solar	Emissividade de onda longa	Largura dos perfis da esquadria (mm)
Perfis das esquadrias	56,00	0,58	0,90	50,00

Fonte: ABNT (2021)

Ressalta-se que os elementos transparentes de ambientes de permanência transitória (banheiro) devem ser modelados considerando as características do modelo real.

Quanto às janelas do APP, deve-se considerar a infiltração por frestas, quando fechadas, adotando-se os coeficientes estabelecidos na norma. Para a janela do banheiro, deve-se considerá-la sempre aberta, com percentual de abertura para ventilação igual ao estabelecido em projeto.

Para o cálculo da infiltração por frestas do modelo real, foram utilizados os mesmos coeficientes do modelo de referência (estabelecidos em norma). Entretanto, como os percentuais de aberturas e de elementos transparentes do modelo real são levemente diferentes do modelo de referência, a infiltração por frestas do modelo real e do de referência tiveram uma discreta diferença, já que o coeficiente de fluxo de ar por frestas leva em consideração a área das esquadrias.

De acordo com a NBR 15575, as portas internas dos modelos simulados devem ser consideradas sempre abertas entre os APP e os APT, com exceção de portas de banheiros, que devem ser consideradas sempre fechadas. A porta principal que separa o APP do ambiente externo também foi considerada sempre fechada.

3.3.3 - Modelagem da ocupação e das cargas internas

Além das características da edificação do modelo de referência, a modelagem também deve estabelecer os padrões de ocupação e uso da unidade habitacional. As tabelas a seguir (Tabela 15 e Tabela 16) contêm a modelagem da ocupação e das cargas internas, que devem ser consideradas iguais para o modelo real e para o modelo de referência.

Tabela 15 – Padrões de ocupação da UH

Horário	Ocupação		
	Dormitório (%)	Sala (%)	Uso misto (%)
00:00 – 07:59	100	0	100
08:00 – 13:59	0	0	0
14:00 – 17:59	0	50	50
18:00 – 21:59	0	100	100
22:00 – 23:59	100	0	100

Fonte: ABNT (2021)

Tabela 16 - Taxa metabólica e fração radiante para os usuários

Ambiente	Período de uso	Atividade realizada	Calor produzido por área de superfície corporal (W/m ²)	Calor produzido por uma pessoa com 1,80 m ² de área de superfície corporal (W)	Fração radiante
Dormitório	00:00 – 07:59 e 22:00 – 23:59	Dormindo ou descansando	45	81	0,30
Sala	14:00 – 21:59	Sentado ou assistindo TV	60	108	0,30
Uso misto	00:00 – 07:59 e 22:00 – 23:59	Dormindo ou descansando	45	81	0,30
	14:00 – 21:59	Sentado ou assistindo TV	60	108	0,30

Fonte: ABNT (2021)

Observa-se, na Tabela 15, uma terceira coluna voltada à ocupação de “uso misto”. De acordo com a ABNT NBR 15575 (ABNT, 2021), quando um APP for utilizado como sala e como dormitório (como no caso do *loft* do presente trabalho), a UH deve ser modelada considerando o uso misto. Portanto, neste estudo, deve-se considerar a quantidade de dois ocupantes (100 % da ocupação).

A Tabela 17 e a Tabela 18 apresentam as características da edificação quanto à iluminação.

Tabela 17 - Padrões de uso do sistema de iluminação artificial dos APP

Horário	Iluminação		
	Dormitório (%)	Sala (%)	Uso misto (%)
00:00 – 05:59	0	0	0
06:00 – 07:59	100	0	100
08:00 – 15:59	0	0	0
16:00 – 21:59	0	100	100
22:00 – 23:59	100	0	100

Fonte: ABNT (2021)

Tabela 18 - Densidade de potência instalada, fração radiante e fração visível para o sistema de iluminação

Ambiente	DPI (W/m ²)	Fração radiante	Fração visível
Dormitório	5,00	0,32	0,23
Sala	5,00	0,32	0,23
Uso misto	5,00	0,32	0,23

Fonte: ABNT (2021)

Além da iluminação, a NBR 15575 também considera a carga interna dos equipamentos. Na Tabela 19 constam os valores de referência para os equipamentos do APP.

Tabela 19 - Período de uso, densidade de carga interna e fração radiante para equipamentos dos APP

Ambiente	Período de uso	Potência (W)	Fração radiante
Sala	14:00 – 21:59	120	0,30
Uso misto	14:00 – 21:59	120	0,30

Fonte: ABNT (2021)

3.3.4 - Critérios de desempenho da NBR 15575 – Simulação computacional

3.3.4.1 - Percentual de horas de ocupação da UH dentro da faixa de temperatura operativa ($PHFT_{APP}$)

Conforme consta na ABNT NBR 15575-1 (ABNT, 2021), para o cálculo do $PHFT_{APP}$, o modelo, com o uso da ventilação natural, deve solicitar, como variável de saída, a temperatura operativa horária de cada APP da edificação. A partir disso, calcula-se o $PHFT_{APP}$, conforme a seguinte Equação 1:

$$PHFT_{APP} = \frac{N_{hFT}}{N_{hOcup}} \cdot 100 \quad \text{Equação 1}$$

Em que:

$PHFT_{APP}$ - percentual de horas de ocupação do APP dentro da faixa de temperatura operativa;

N_{hFT} - número de horas em que o APP se encontra ocupado e com temperaturas operativas dentro da faixa de temperatura operativa ao longo do ano;

N_{hOcup} - número de horas em que o APP é ocupado ao longo do ano.

No caso do presente trabalho, o $PHFT_{APP}$ será igual ao $PHFT_{UH}$, já que se trata de um *loft* e não há separação de salas e dormitórios, mas uso misto.

O cálculo do $PHFT_{UH}$ permitirá avaliar o percentual de horas em que a UH se encontra dentro da faixa de temperatura operativa, conforme os limites estabelecidos na Tabela 20:

Tabela 20 – Faixas de temperatura operativa do APP

Intervalos de temperaturas externas	Faixa de temperatura operativa do APP a ser considerada
Intervalo 1	18,0 °C < To_{app} < 26,0 °C
Intervalo 2	To_{app} < 28,0 °C
Intervalo 3	To_{app} < 30,0 °C

Fonte: ABNT (2021)

A Tabela 21 mostra os critérios estabelecidos para obter cada nível de desempenho térmico da UH.

Tabela 21 - Critério de avaliação de desempenho térmico da envoltória quanto ao PHFT_{UH}

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

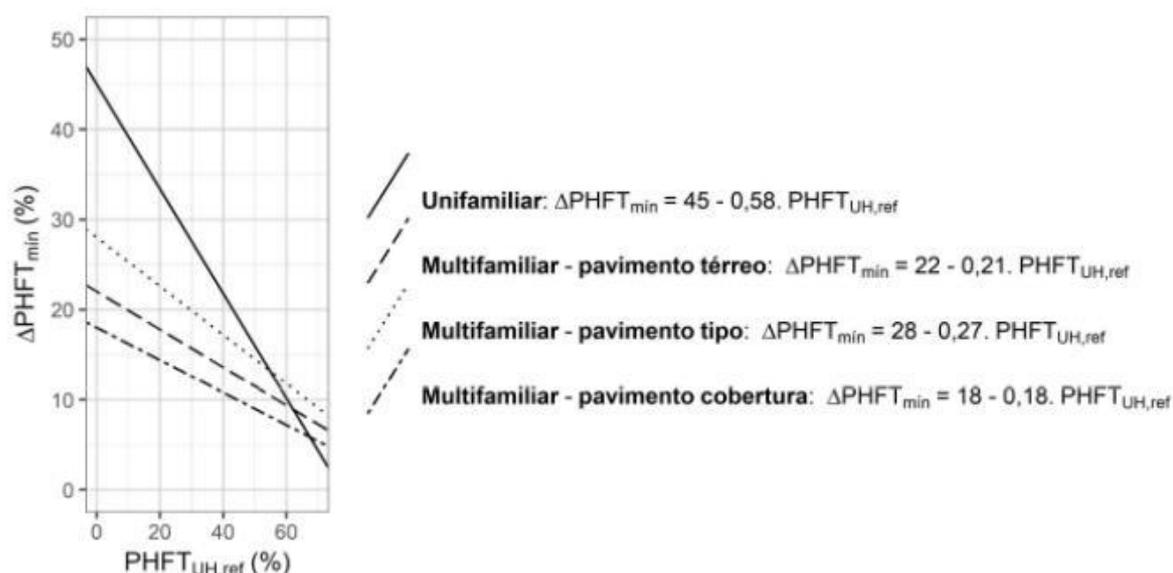
^a $\Delta PHFT$ é o incremento do $PHFT_{UH,real}$ em relação ao $PHFT_{UH,ref}$

^b $\Delta PHFT_{min}$ é o incremento mínimo do $PHFT_{UH,real}$ em relação ao $PHFT_{UH,ref}$

Fonte: ABNT (2021)

Os critérios para o atendimento dos níveis de desempenho térmico intermediário e superior para a avaliação de desempenho térmico da envoltória quanto ao $PHFT_{UH}$ são os mesmos. Ou seja, se o valor de $\Delta PHFT_{min}$ atender ao nível intermediário, também atenderá ao nível superior. Para um modelo de referência com $PHFT_{UH,ref}$ inferior a 70%, o valor de $\Delta PHFT_{min}$ deve atender ao valor obtido a partir do ábaco ou das equações da Figura 12 (habitação unifamiliar: $\Delta PHFT_{min} = 45 - 0,58 \cdot PHFT_{UH,ref}$). Se o modelo de referência possuir $PHFT_{UH,ref}$ igual ou superior a 70%, o valor de $\Delta PHFT_{min}$ deve ser igual a zero.

Figura 12 – Ábaco e Equações para obtenção do $\Delta PHFT_{min}$ quando $PHFT_{UH,ref}$ for inferior a 70 %



Fonte: ABNT (2021)

3.3.4.2 - Temperaturas operativas anuais máxima e mínima da UH

De acordo com a ABNT NBR 15575 (ABNT, 2021), deve-se considerar os períodos de ocupação dos APP para a obtenção das temperaturas operativas anuais máxima

e mínima da UH. Os critérios para o atendimento de todos os níveis de desempenho térmico (M, I, S) são os mesmos. Para todos os níveis de desempenho, em qualquer zona bioclimática, a temperatura operativa anual máxima do modelo real deve ser menor ou igual à temperatura anual máxima do modelo de referência, após somado um valor de tolerância ($\Delta Tomáx$), igual a 2 °C, conforme a ABNT NBR 15575 (ABNT, 2021). Assim, o critério de temperatura operativa anual máxima é descrito da seguinte forma:

$$Tomáx_{UH,real} \leq Tomáx_{UH,ref} + \Delta Tomáx$$

Em que:

$Tomáx_{UH,real}$ - temperatura operativa anual máxima da UH no modelo real;

$Tomáx_{UH,ref}$ - temperatura operativa anual máxima da UH no modelo de referência;

$\Delta Tomáx$ - valor de tolerância da temperatura operativa anual máxima.

Para a temperatura operativa anual mínima do modelo real, esse valor deve ser maior ou igual à temperatura anual mínima do modelo de referência, após subtraído um valor de tolerância ($\Delta Tomín$) igual a 1 °C, conforme a ABNT NBR 15575 (ABNT, 2021). Esse critério ($Tomín$), deve ser analisado apenas para as zonas bioclimáticas 1, 2, 3 ou 4. O critério de temperatura operativa anual mínima é descrito da seguinte forma:

$$Tomín_{UH,real} \geq Tomín_{UH,ref} - \Delta Tomín$$

Em que:

$Tomín_{UH,real}$ - temperatura operativa anual mínima da UH no modelo real;

$Tomín_{UH,ref}$ - temperatura operativa anual mínima da UH no modelo de referência;

$\Delta Tomín$ - valor de tolerância da temperatura operativa anual mínima.

3.3.4.3 - Carga térmica total da UH ($CgTT_{UH}$)

Conforme a ABNT NBR 15575 (ABNT, 2021), avalia-se, também, a carga térmica total da UH ($CgTT_{UH}$), resultado da avaliação individual das cargas térmicas de refrigeração e aquecimento de cada APP da UH. Novamente, como se trata de um *loft*, a carga térmica do APP calculada será a mesma da UH. A simulação é feita sem o uso da ventilação natural, durante o período em que os APP estiverem ocupados. A faixa de temperaturas operativas dentro dos limites estão determinados na Tabela 22.

Tabela 22 - Valores de temperatura operativa para o cálculo da $CgTR_{APP}$ e da $CgTA_{APP}$

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

Fonte: ABNT (2021)

De acordo com a ABNT NBR 15575 (ABNT, 2021), a carga térmica de refrigeração ($CgTR_{UH}$) da UH é igual à soma das cargas térmicas de refrigeração de cada APP. Entretanto, tratando-se de um *loft*, não será preciso fazer esse cálculo. A mesma lógica serve para a carga térmica de aquecimento ($CgTA_{UH}$) da UH localizada nos climas compreendidos no Intervalo 1 da Tabela 22. Dessa forma, a carga térmica total da UH ($CgTT_{UH}$), localizada no Intervalo 1, é obtida somando-se a carga térmica de refrigeração da UH ($CgTR_{UH}$) e a carga térmica de aquecimento da UH ($CgTA_{UH}$). Para UH localizadas no Intervalo 2 ou 3, a carga térmica total da UH ($CgTT_{UH}$) será igual à carga térmica de refrigeração da UH ($CgTR_{UH}$).

O critério de avaliação de desempenho térmico da envoltória quanto à $CgTT_{UH}$ é estabelecido conforme a Tabela 23.

Tabela 23 - Critério de avaliação de desempenho térmico da envoltória quanto à $CgTT_{UH}$

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

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

^bRedCgTT_{min} é a redução mínima da $CgTT_{UH,real}$ em relação á referência ($CgTT_{UH,ref}$)

Fonte: ABNT (2021)

A redução da carga térmica total da UH no modelo real em relação ao modelo de referência (RedCgTT) é dada pela Equação 2.

$$\text{RedCgTT} = \left[1 - \frac{(\text{CgTT}_{\text{UH,real}})}{(\text{CgTT}_{\text{UH,ref}})} \right] \cdot 100 \quad \text{Equação 2}$$

Em que:

RedCgTT - redução da carga térmica total da UH no modelo real em relação ao modelo de referência, expressa em porcentagem (%);

CgTT_{UH,real} - carga térmica total da UH no modelo real, expressa em quilowatts-hora por ano (kWh/ano);

CgTT_{UH,ref} - carga térmica total da UH no modelo de referência, expressa em quilowatts-hora por ano (kWh/ano).

Os critérios para o atendimento dos níveis de desempenho térmico intermediário e superior para este critério (CgTT) são determinados a partir do valor de PHFT_{UH,ref}. A seguir, apresentam-se os critérios para atender ao nível intermediário quanto à redução mínima da CgTT_{UH,real}:

- Modelos de referência com PHFT_{UH,ref} inferior a 70%: CgTT_{UH,real} do modelo real deve ser menor ou igual à CgTT_{UH,ref} do modelo de referência (RedCgTT ≥ 0%);
- Modelos de referência com PHFT_{UH,ref} igual ou superior a 70% e com CgTT_{UH,ref}/A_{p,UH} menor que 100: a redução mínima da CgTT_{UH,real} deve ser maior ou igual a 17% (RedCgTT ≥ 17%);
- Modelos de referência com PHFT_{UH,ref} igual ou superior a 70% e com CgTT_{UH,ref}/A_{p,UH} maior ou igual que 100: a redução mínima da CgTT_{UH,real} deve ser maior ou igual a 27% (RedCgTT ≥ 27%);

A seguir, apresentam-se os critérios para atender ao nível superior quanto à redução mínima da CgTT_{UH,real}:

- Modelos de referência com CgTT_{UH,ref}/A_{p,UH} menor que 100: a redução mínima da CgTT_{UH,real} deve ser maior ou igual a 35% (RedCgTT ≥ 35%);
- Modelos de referência com CgTT_{UH,ref}/A_{p,UH} maior ou igual que 100: a redução mínima da CgTT_{UH,real} deve ser maior ou igual a 55% (RedCgTT ≥ 55%);

4. RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 - Procedimento simplificado

4.1.1 - Transmitância térmica

A Tabela 24 e a Tabela 25 apresentam os resultados dos limites inferior e superior da resistência térmica total das paredes, respectivamente.

Tabela 24 – Resultados da $R_{\text{tot,lower}}$ das paredes

LIMITE INFERIOR DA RESISTÊNCIA TÉRMICA TOTAL [(m ² .K)/W]		
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria	
	Bloco de concreto	Bloco cerâmico
NORM-NORM	0,353	0,393
ISO-NORM	0,370	0,410

Fonte: Autor (2024)

Tabela 25 - Resultados da $R_{\text{tot,upper}}$ das paredes

LIMITE SUPERIOR DA RESISTÊNCIA TÉRMICA TOTAL [(m ² .K)/W]		
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria	
	Bloco de concreto	Bloco cerâmico
NORM-NORM	0,360	0,485
ISO-NORM	0,395	0,503

Fonte: Autor (2024)

Dado que a resistência térmica total é a média dos limites inferior e superior da resistência térmica, têm-se os seguintes resultados para a resistência térmica total das paredes (Tabela 26):

Tabela 26 - Resultados da R_{tot} das paredes

RESISTÊNCIA TÉRMICA TOTAL [(m ² .K)/W]		
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria	
	Bloco de concreto	Bloco cerâmico
NORM-NORM	0,356	0,439
ISO-NORM	0,382	0,457

Fonte: Autor (2024)

Na Tabela 27 apresentam-se os valores de transmitância térmica, inverso da resistência térmica.

Tabela 27 - Resultados de U das paredes

TRANSMITÂNCIA TÉRMICA [W/(m ² .K)]		
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria	
	Bloco de concreto	Bloco cerâmico
NORM-NORM	2,81	2,28
ISO-NORM	2,61	2,19

Fonte: Autor (2024)

Para uma melhor análise da influência das variáveis utilizadas nos cálculos de transmitância térmica para as diferentes configurações das paredes estudadas, a Tabela 28 apresenta a variação do valor de U em relação ao maior valor de transmitância térmica encontrado [2,81 W/(m².K)].

Tabela 28 - Variação normalizada de U das paredes

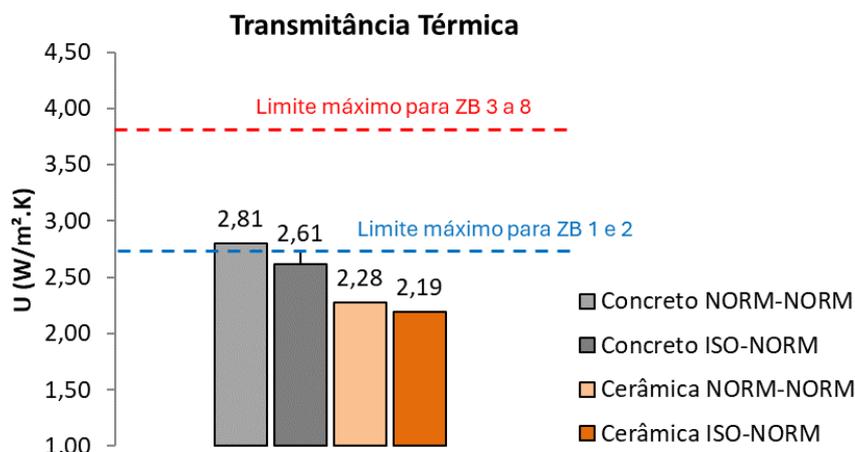
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Bloco de concreto	Bloco cerâmico
NORM-NORM	Valor de referência	-18,9%
ISO-NORM	-7,1%	-22,1%

Fonte: Autor (2024)

Observa-se que a mudança tanto do tipo de alvenaria quanto o tipo de revestimento empregado ocasionam redução do valor de transmitância em cerca de 22%. Além disso, observa-se que a alteração do tipo de alvenaria foi mais impactante no valor final de U do que a utilização da argamassa isolante no revestimento externo. Ressalta-se, entretanto, que a argamassa isolante adotada neste trabalho possui um valor de cerca de 50% da condutividade térmica da argamassa convencional. Um estudo de Castro (2019) concluiu que o emprego de argamassa isolante com condutividade de 0,2 W/(m.K) aplicada externamente pode reduzir em até cerca de 20% do valor de U da parede.

A Figura 13 mostra os valores de transmitância térmica de cada tipo de parede analisada, comparando-os com os limites máximos estabelecidos na norma ABNT NBR 15575 (Tabela 5) para cada zona bioclimática.

Figura 13 - Comparação da transmitância térmica das paredes



Fonte: Autor (2024)

Pode-se perceber que as paredes com bloco cerâmico, em qualquer configuração, atendem a todas as zonas bioclimáticas. Por sua vez, as paredes com bloco de concreto apresentaram valor de U muito próximo do limite estabelecido para as zonas bioclimáticas 1 e 2, independentemente do tipo de revestimento externo adotado. Apesar disso, para prosseguimento do presente estudo, foi considerado que todas as configurações de parede adotadas atendem aos requisitos de transmitância térmica e foram analisadas na segunda etapa deste trabalho.

4.1.2 - Capacidade térmica

A Tabela 29 apresenta os resultados dos cálculos da capacidade térmica para as composições de paredes analisadas, realizados em planilha eletrônica seguindo a NBR 15220 da ABNT (2022).

Tabela 29 - Resultados de Ct das paredes

Capacidade térmica [KJ/(m².K)]		
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria	
	Bloco de concreto	Bloco cerâmico
NORM-NORM	193	163
ISO-NORM	172	142

Fonte: Autor (2024)

Observa-se que o uso de argamassa isolante no revestimento externo causa diminuição da capacidade térmica para ambas as alvenarias. Isso se deve ao fato de a

argamassa isolante possuir menor densidade de massa aparente em relação à convencional. Já na comparação entre alvenarias, observa-se que as paredes com bloco cerâmico possuem menor capacidade térmica, também devido à diferença de densidade de massa aparente entre os blocos utilizados. A Tabela 30 apresenta a variação da capacidade térmica de acordo com cada configuração:

Tabela 30 - Variação normalizada da C_t das paredes estudadas

Tipo de argamassa (ext. – int.)	Bloco de concreto	Bloco cerâmico
NORM-NORM	Valor de referência	-15,5%
ISO-NORM	-10,9%	-26,4%

Fonte: Autor (2024)

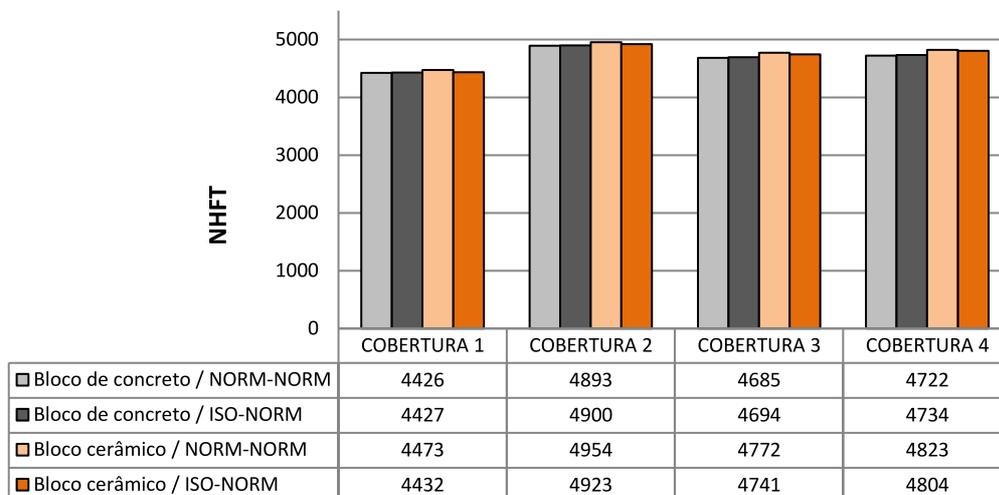
Conforme visto na Tabela 6, apresentada no capítulo anterior, a NBR 15575 estabelece um limite mínimo de capacidade térmica igual a 130 kJ/(m².K). Diante disso, nota-se que todas as configurações analisadas neste trabalho atendem a este critério, já que o menor valor encontrado foi de 142 kJ/(m².K).

4.2 - Procedimento de simulação computacional

4.2.1 - Percentual de horas de ocupação da UH dentro da faixa de temperatura operativa (PHFT_{APP})

O gráfico da Figura 14 apresenta os resultados do número de horas de ocupação da UH dentro da faixa de temperatura operativa, para as composições de paredes e coberturas analisadas nas cidades escolhidas. Vale lembrar que as simulações foram feitas no programa TRNSYS17, adotando-se, para o ambiente, ventilação natural. Conforme informações da Tabela 15, o número de horas de ocupação é de 6.570 (14 h/dia x 365 dias = 6.570 horas). Para a cidade de Curitiba, têm-se os seguintes resultados:

Figura 14 - Número de horas dentro da faixa de temperatura operativa em Curitiba (ZB 1)



Fonte: Autor (2024)

Para o modelo de referência, o número de horas dentro da faixa de temperatura operativa em Curitiba foi de 4164. Portanto, 63,4% das horas de ocupação do modelo real. Todos os resultados encontrados foram melhores que os do modelo de referência. A configuração que apresentou o melhor resultado (maior número de horas) foi a da parede cerâmica com argamassa convencional externamente, com a cobertura 2. O pior resultado foi o da parede de concreto utilizando argamassa convencional externamente, com cobertura 1.

Para atingir o desempenho mínimo para este critério, o $PHFT_{UH,real}$ deve ser maior que $0,9 \times PHFT_{UH,ref}$ ($0,9 \times 63,4\%$), ou seja, 57,1%.

Para atingir o nível de desempenho superior, calcula-se:

$$\Delta PHFT = PHFT_{UH,real} - PHFT_{UH,ref}$$

$$\Delta PHFT_{\min} = 45 - 0,58 \times PHFT_{UH,ref} = 45 - 36,8 = 8,2\%$$

A Tabela 31 mostra o PHFT e o $\Delta PHFT$ de cada configuração de parede com os quatro tipos de cobertura estudados e seus respectivos níveis de desempenho. Para valores de acima de 8,2%, o desempenho é considerado de nível superior.

Tabela 31 – PHFT e nível de desempenho de cada configuração em Curitiba (ZB 1)

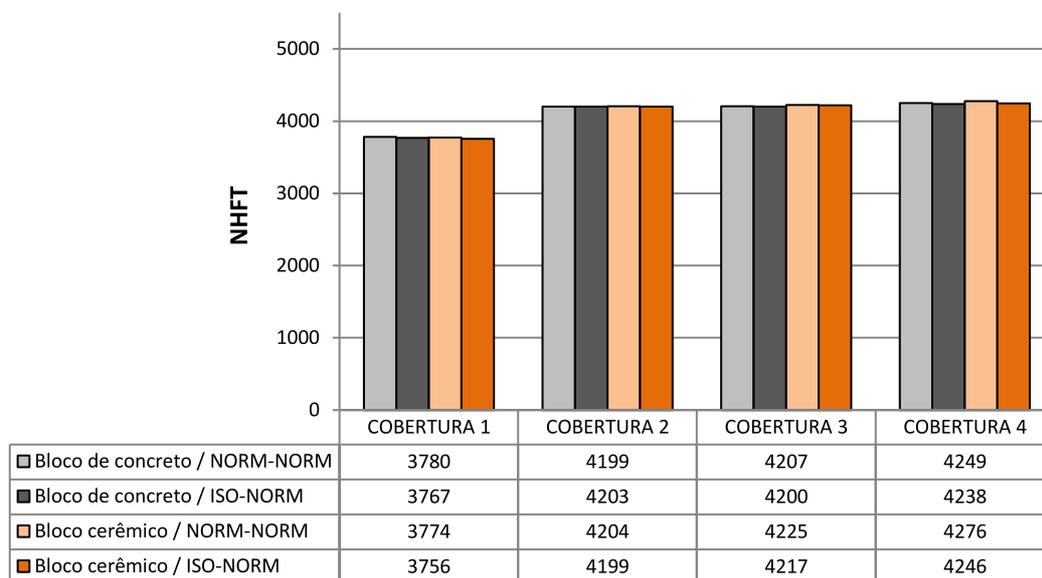
COBERTURA 1 – Telha cerâmica + Laje maciça						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	PHFT	Δ PHFT	Desempenho	PHFT	Δ PHFT	Desempenho
NORM-NORM	67,4%	4,0%	Mínimo	68,1%	4,7%	Mínimo
ISO-NORM	67,4%	4,0%	Mínimo	67,4%	4,0%	Mínimo
COBERTURA 2 – Telhado verde + Laje maciça						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	PHFT	Δ PHFT	Desempenho	PHFT	Δ PHFT	Desempenho
NORM-NORM	74,5%	11,1%	Superior	75,4%	12,0%	Superior
ISO-NORM	74,6%	11,2%	Superior	74,9%	11,5%	Superior
COBERTURA 3 – Telha metálica + laje pré-moldada						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	PHFT	Δ PHFT	Desempenho	PHFT	Δ PHFT	Desempenho
NORM-NORM	71,3%	7,9%	Mínimo	72,6%	9,2%	Superior
ISO-NORM	71,4%	8,0%	Mínimo	72,2%	8,8%	Superior
COBERTURA 4 – Telha metálica + Laje maciça						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	PHFT	Δ PHFT	Desempenho	PHFT	Δ PHFT	Desempenho
NORM-NORM	71,9%	8,5%	Superior	73,4%	10,0%	Superior
ISO-NORM	72,0%	8,6%	Superior	73,1%	9,7%	Superior

Fonte: Autor (2024)

Observa-se que todas as combinações atendem, pelo menos, ao nível mínimo de desempenho. As opções de nível superior foram aquelas que utilizaram coberturas de maior capacidade térmica (Coberturas 2 e 4).

Para a cidade de Piracicaba (ZB2), têm-se os seguintes resultados (Figura 15):

Figura 15 - Número de horas dentro da faixa de temperatura operativa em Piracicaba (ZB 2)



Fonte: Autor (2024)

Para o modelo de referência, o número de horas dentro da faixa de temperatura operativa em Piracicaba foi de 3736. Portanto, 56,9% das horas de ocupação. Novamente, todos os resultados foram melhores que o modelo de referência. A configuração que apresentou o melhor resultado foi a parede cerâmica utilizando argamassa convencional externamente com Cobertura 4. Já o pior resultado foi a parede de cerâmica utilizando argamassa isolante externamente com Cobertura 1.

O desempenho mínimo será atingido quando o $PHFT_{UH,real}$ for maior que $0,9 \times PHFT_{UH,ref}$, ou seja, 51,4%. Para atingir o nível de desempenho superior, calcula-se:

$$\Delta PHFT = PHFT_{UH,real} - PHFT_{UH,ref}$$

$$\Delta PHFT_{\min} = 45 - 0,58 \times PHFT_{UH,ref} = 45 - 33,0 = 12,0\%$$

A Tabela 32 apresenta o PHFT e o $\Delta PHFT$ de cada configuração e seu respectivo nível de desempenho. Para valores de acima de 12,0%, o desempenho será classificado como nível superior.

Tabela 32 - PHFT e nível de desempenho de cada configuração em Piracicaba (ZB 2)

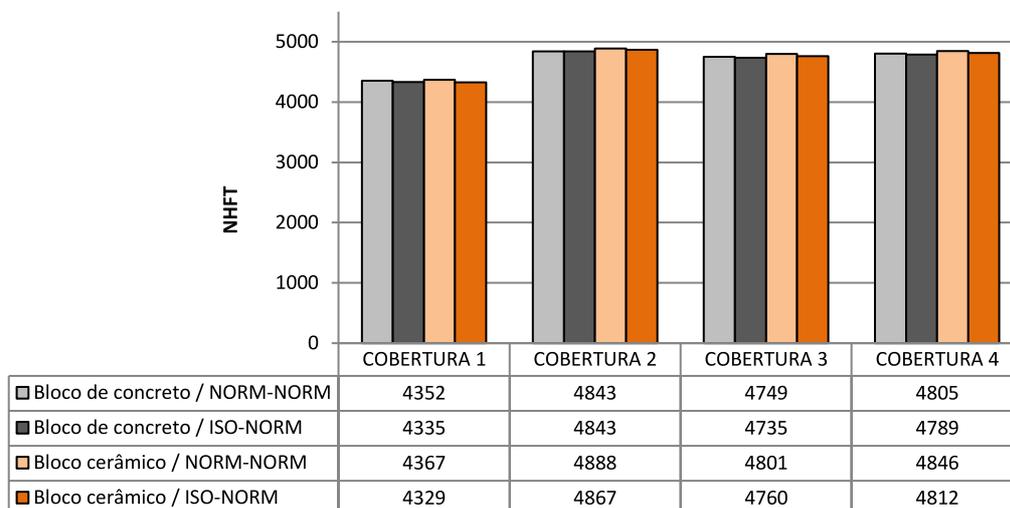
COBERTURA 1 – Telha cerâmica + Laje maciça						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	PHFT	Δ PHFT	Desempenho	PHFT	Δ PHFT	Desempenho
NORM-NORM	57,5%	0,6%	Mínimo	57,4%	0,5%	Mínimo
ISO-NORM	57,3%	0,4%	Mínimo	57,2%	0,3%	Mínimo
COBERTURA 2 – Telhado verde + Laje maciça						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	PHFT	Δ PHFT	Desempenho	PHFT	Δ PHFT	Desempenho
NORM-NORM	63,9%	7,0%	Mínimo	64,0%	7,1%	Mínimo
ISO-NORM	64,0%	7,1%	Mínimo	63,9%	7,0%	Mínimo
COBERTURA 3 – Telha metálica + laje pré-moldada						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	PHFT	Δ PHFT	Desempenho	PHFT	Δ PHFT	Desempenho
NORM-NORM	64,0%	7,1%	Mínimo	64,3%	7,4%	Mínimo
ISO-NORM	63,9%	7,0%	Mínimo	64,2%	7,3%	Mínimo
COBERTURA 4 – Telha metálica + Laje maciça						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	PHFT	Δ PHFT	Desempenho	PHFT	Δ PHFT	Desempenho
NORM-NORM	64,7%	7,8%	Mínimo	65,1%	8,2%	Mínimo
ISO-NORM	64,5%	7,6%	Mínimo	64,6%	7,7 %	Mínimo

Fonte: Autor (2024)

Neste caso, ZB2, todas as combinações atendem ao nível mínimo de desempenho, entretanto nenhuma combinação atingiu o nível superior.

Para a cidade de São Paulo (ZB3), têm-se os seguintes resultados (Figura 16):

Figura 16 - Número de horas dentro da faixa de temperatura operativa em São Paulo (ZB3)



Fonte: Autor (2024)

Para o modelo de referência, o número de horas dentro da faixa de temperatura operativa em São Paulo foi de 4189. Portanto, 63,7% do número de horas de ocupação. Todos os resultados encontrados foram melhores que o modelo de referência. Assim como em Curitiba, a configuração que apresentou o melhor resultado foi a parede cerâmica utilizando argamassa convencional externamente com Cobertura 2. O pior resultado foi a parede de cerâmica utilizando argamassa isolante externamente com Cobertura 1.

O desempenho mínimo será atingido quando o $PHFT_{UH,real}$ for maior que $0,9 \times PHFT_{UH,ref}$, ou seja, 57,3%. Para atingir o nível de desempenho superior, calcula-se:

$$\Delta PHFT = PHFT_{UH,real} - PHFT_{UH,ref}$$

$$\Delta PHFT_{\min} = 45 - 0,58 \times PHFT_{UH,ref} = 45 - 37,0 = 8,0\%$$

A Tabela 33 apresenta o PHFT e o $\Delta PHFT$ de cada configuração e seu respectivo nível de desempenho. Para valores de $\Delta PHFT$ acima de 8,0%, o desempenho terá o nível superior.

Tabela 33 - PHFT e nível de desempenho de cada configuração em São Paulo (ZB 3)

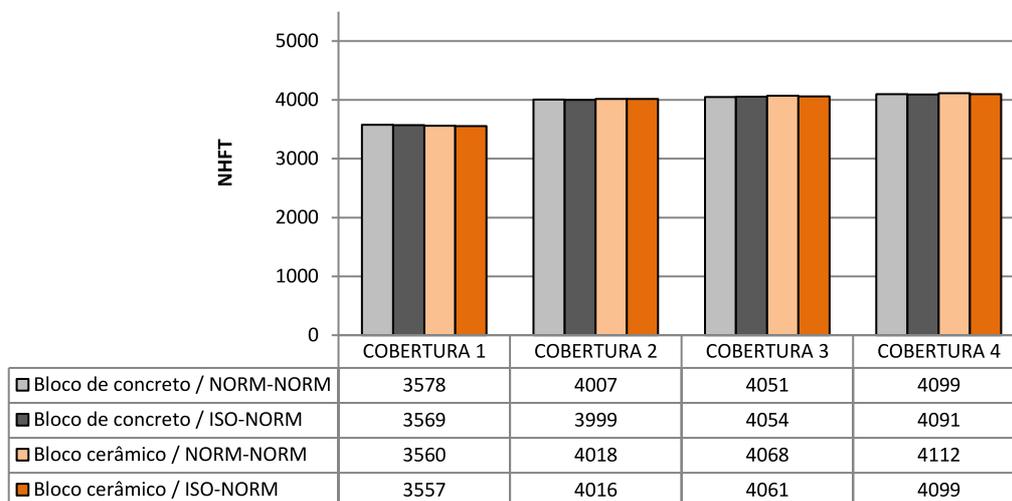
COBERTURA 1 – Telha cerâmica + Laje maciça						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	PHFT	Δ PHFT	Desempenho	PHFT	Δ PHFT	Desempenho
NORM-NORM	66,2%	2,5%	Mínimo	66,5%	2,8%	Mínimo
ISO-NORM	66,0%	2,3%	Mínimo	65,9%	2,2%	Mínimo
COBERTURA 2 – Telhado verde + Laje maciça						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	PHFT	Δ PHFT	Desempenho	PHFT	Δ PHFT	Desempenho
NORM-NORM	73,7%	10,0%	Superior	74,4%	10,7%	Superior
SO-NORM	73,7%	10,0%	Superior	74,1%	10,4%	Superior
COBERTURA 3 – Telha metálica + laje pré-moldada						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	PHFT	Δ PHFT	Desempenho	PHFT	Δ PHFT	Desempenho
NORM-NORM	72,3%	8,6%	Superior	73,1%	9,4%	Superior
ISO-NORM	72,1%	8,4%	Superior	72,4%	8,7%	Superior
COBERTURA 4 – Telha metálica + Laje maciça						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	PHFT	Δ PHFT	Desempenho	PHFT	Δ PHFT	Desempenho
NORM-NORM	73,1%	9,4%	Superior	73,7%	10,0%	Superior
ISO-NORM	72,9%	9,2%	Superior	73,2%	9,5%	Superior

Fonte: Autor (2024)

Com exceção das combinações com cobertura 1, que apenas atenderam ao nível mínimo de desempenho, todas as configurações analisadas atingiram o nível superior de desempenho. Assim como em Curitiba, os melhores resultados foram obtidos com coberturas de maior capacidade térmica (Coberturas 2 e 4).

Para a cidade de Brasília (ZB4), têm-se os seguintes resultados (Figura 17):

Figura 17 - Número de horas dentro da faixa de temperatura operativa em Brasília (ZB 4)



Fonte: Autor (2024)

Para o modelo de referência, o número de horas dentro da faixa de temperatura operativa em Brasília foi de 3612, equivalente a 55,0% das horas ocupadas. Neste caso, os resultados utilizando a Cobertura 1 foram piores que o modelo de referência. Já com as outras coberturas, os resultados foram superiores ao de referência. A configuração que apresentou o melhor resultado foi a parede cerâmica utilizando argamassa convencional externamente com Cobertura 4 e o pior resultado foi a parede de cerâmica utilizando argamassa isolante externamente com Cobertura 1.

O desempenho mínimo será atingido quando o $PHFT_{UH,real}$ for maior que $0,9 \times PHFT_{UH,ref}$, ou seja, 49,5%. Para atingir o nível de desempenho superior, calcula-se:

$$\Delta PHFT = PHFT_{UH,real} - PHFT_{UH,ref}$$

$$\Delta PHFT_{\min} = 45 - 0,58 \times PHFT_{UH,ref} = 45 - 31,9 = 13,1\%$$

A Tabela 34 apresenta o PHFT e o $\Delta PHFT$ de cada configuração e seu respectivo nível de desempenho. Para valores de $\Delta PHFT$ acima de 13,1%, o desempenho terá o nível superior.

Tabela 34 - PHFT e nível de desempenho de cada configuração em Brasília (ZB 4)

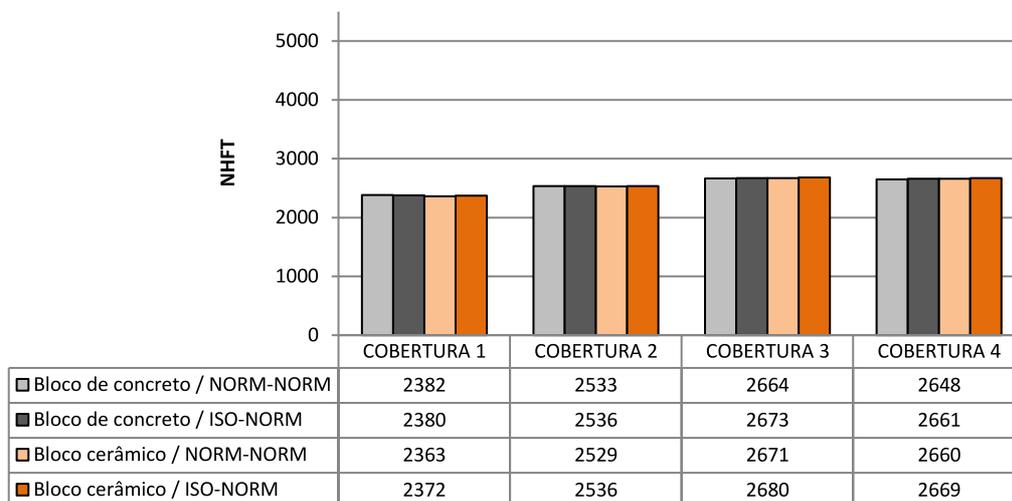
COBERTURA 1 – Telha cerâmica + Laje maciça						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	PHFT	Δ PHFT	Desempenho	PHFT	Δ PHFT	Desempenho
NORM-NORM	54,5%	-0,5%	Mínimo	54,2%	-0,8%	Mínimo
ISO-NORM	54,3%	-0,7%	Mínimo	54,1%	-0,9%	Mínimo
COBERTURA 2 – Telhado verde + Laje maciça						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	PHFT	Δ PHFT	Desempenho	PHFT	Δ PHFT	Desempenho
NORM-NORM	61,0%	6,0%	Mínimo	61,1%	6,1%	Mínimo
ISO-NORM	60,9%	5,9%	Mínimo	61,1%	6,1 %	Mínimo
COBERTURA 3 – Telha metálica + laje pré-moldada						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	PHFT	Δ PHFT	Desempenho	PHFT	Δ PHFT	Desempenho
NORM-NORM	61,6%	6,6%	Mínimo	61,9%	6,9%	Mínimo
ISO-NORM	61,7%	6,7%	Mínimo	61,8%	6,8%	Mínimo
COBERTURA 4 – Telha metálica + Laje maciça						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	PHFT	Δ PHFT	Desempenho	PHFT	Δ PHFT	Desempenho
NORM-NORM	62,4%	7,4%	Mínimo	62,6%	7,6%	Mínimo
ISO-NORM	62,3%	7,3%	Mínimo	62,4%	7,4%	Mínimo

Fonte: Autor (2024)

Em Brasília, todas as combinações atendem apenas ao nível mínimo de desempenho, ou seja, nenhuma combinação atingiu o nível superior.

Para a cidade de Niterói (ZB5), têm-se os seguintes resultados (Figura 18):

Figura 18 - Número de horas dentro da faixa de temperatura operativa em Niterói (ZB 5)



Fonte: Autor (2024)

Para o modelo de referência, o número de horas dentro da faixa de temperatura operativa em Niterói foi de 2489, equivalente a 37,9% das horas ocupadas. Assim como em Brasília, os resultados utilizando a Cobertura 1 foram piores que o modelo de referência. Já com as outras coberturas, os resultados foram superiores ao de referência. A configuração que apresentou o melhor resultado foi a parede cerâmica utilizando argamassa isolante externamente com Cobertura 3 e o pior resultado foi a parede de cerâmica utilizando argamassa convencional externamente com Cobertura 1.

O desempenho mínimo será atingido quando o $PHFT_{UH,real}$ for maior que $0,9 \times PHFT_{UH,ref}$, ou seja, 34,1%. Para atingir o nível de desempenho superior, calcula-se:

$$\Delta PHFT = PHFT_{UH,real} - PHFT_{UH,ref}$$

$$\Delta PHFT_{\min} = 45 - 0,58 \times PHFT_{UH,ref} = 45 - 22 = 23,0\%$$

A Tabela 35 apresenta o PHFT e o $\Delta PHFT$ de cada configuração e seu respectivo nível de desempenho. Para valores de $\Delta PHFT$ acima de 23,0%, o desempenho terá o nível superior.

Tabela 35 - PHFT e nível de desempenho de cada configuração em Niterói (ZB 5)

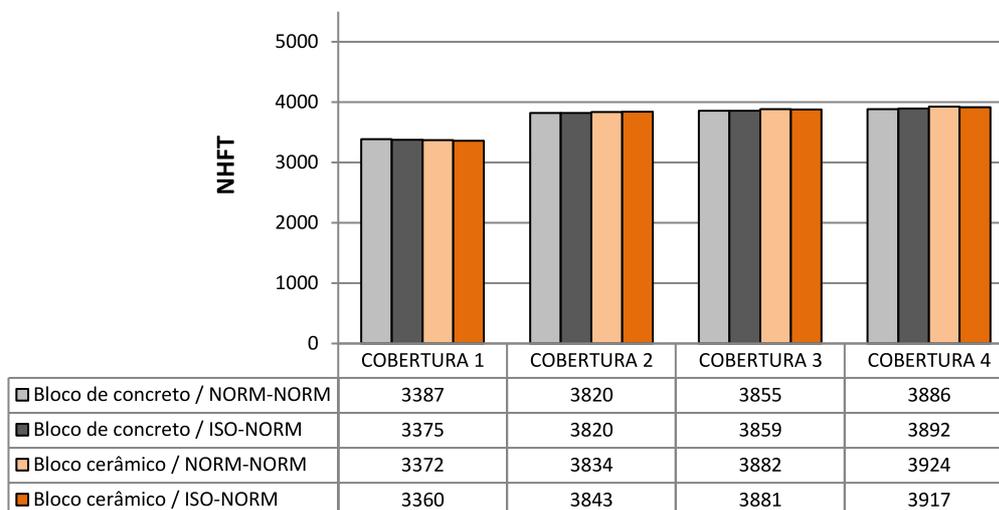
COBERTURA 1 – Telha cerâmica + Laje maciça						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	PHFT	Δ PHFT	Desempenho	PHFT	Δ PHFT	Desempenho
NORM-NORM	36,3%	-1,6%	Mínimo	36,0%	-1,9%	Mínimo
ISO-NORM	36,2%	-1,7%	Mínimo	36,1%	-1,8%	Mínimo
COBERTURA 2 – Telhado verde + Laje maciça						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	PHFT	Δ PHFT	Desempenho	PHFT	Δ PHFT	Desempenho
NORM-NORM	38,5%	0,6%	Mínimo	38,5%	0,6%	Mínimo
ISO-NORM	38,6%	0,7%	Mínimo	38,6%	0,7%	Mínimo
COBERTURA 3 – Telha metálica + laje pré-moldada						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	PHFT	Δ PHFT	Desempenho	PHFT	Δ PHFT	Desempenho
NORM-NORM	40,5%	2,6%	Mínimo	40,6%	2,7%	Mínimo
ISO-NORM	40,7%	2,8%	Mínimo	40,8%	2,9%	Mínimo
COBERTURA 4 – Telha metálica + Laje maciça						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	PHFT	Δ PHFT	Desempenho	PHFT	Δ PHFT	Desempenho
NORM-NORM	40,3%	2,4%	Mínimo	40,5%	2,6%	Mínimo
ISO-NORM	40,5%	2,6%	Mínimo	40,6%	2,7%	Mínimo

Fonte: Autor (2024)

Observa-se todas as combinações atendem apenas ao nível mínimo de desempenho, ou seja, nenhuma combinação atingiu o nível superior. Os melhores resultados foram obtidos com coberturas de menor transmitância térmica (Coberturas 3 e 4).

Para a cidade de Goiânia (ZB6), têm-se os seguintes resultados (Figura 19):

Figura 19 - Número de horas dentro da faixa de temperatura operativa em Goiânia (ZB 6)



Fonte: Autor (2024)

Para o modelo de referência, o número de horas dentro da faixa de temperatura operativa em Goiânia foi de 3408, portanto o percentual do modelo referencial foi de 51,9%. Novamente, os resultados utilizando a Cobertura 1 foram piores que o modelo de referência. Com as outras coberturas, os resultados foram superiores ao de referência. Assim como em Brasília, a configuração que apresentou o melhor resultado foi a parede cerâmica utilizando argamassa convencional externamente com Cobertura 4 e o pior resultado foi o da parede de cerâmica utilizando argamassa isolante externamente com Cobertura 1.

O desempenho mínimo será atingido quando o $PHFT_{UH,real}$ for maior que $0,9 \times PHFT_{UH,ref}$, ou seja, 46,7%. Para atingir o nível de desempenho superior, calcula-se:

$$\Delta PHFT = PHFT_{UH,real} - PHFT_{UH,ref}$$

$$\Delta PHFT_{\min} = 45 - 0,58 \times PHFT_{UH,ref} = 45 - 30,1 = 14,9\%$$

A Tabela 36 apresenta o PHFT e o $\Delta PHFT$ de cada configuração e seu respectivo nível de desempenho. Para valores de $\Delta PHFT$ acima de 14,9%, o desempenho terá o nível superior.

Tabela 36 - PHFT e nível de desempenho de cada configuração em Goiânia (ZB 6)

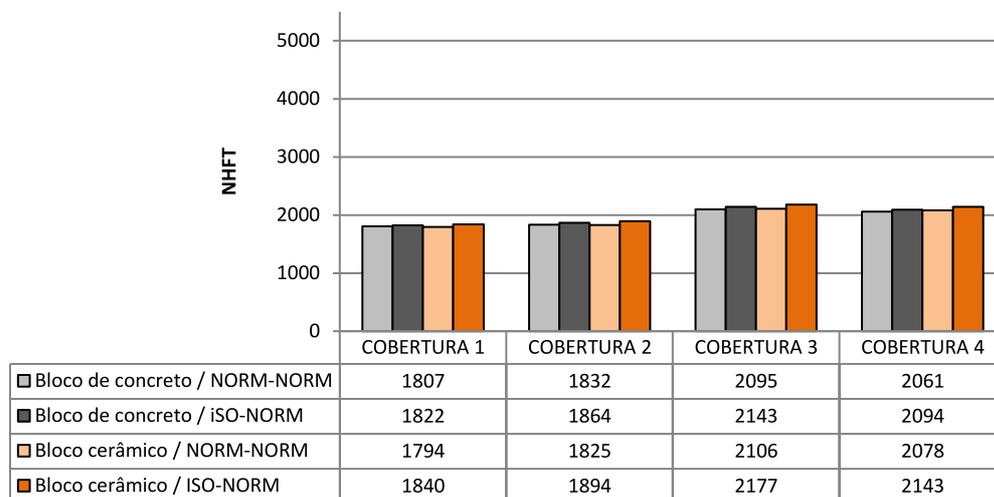
COBERTURA 1 – Telha cerâmica + Laje maciça						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	PHFT	Δ PHFT	Desempenho	PHFT	Δ PHFT	Desempenho
NORM-NORM	51,5%	-0,4%	Mínimo	51,3%	-0,6%	Mínimo
ISO-NORM	51,4%	-0,5%	Mínimo	51,1%	-0,8%	Mínimo
COBERTURA 2 – Telhado verde + Laje maciça						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	PHFT	Δ PHFT	Desempenho	PHFT	Δ PHFT	Desempenho
NORM-NORM	58,1%	6,2%	Mínimo	58,3%	6,4%	Mínimo
ISO-NORM	58,1%	6,2%	Mínimo	58,5%	6,6%	Mínimo
COBERTURA 3 – Telha metálica + laje pré-moldada						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	PHFT	Δ PHFT	Desempenho	PHFT	Δ PHFT	Desempenho
NORM-NORM	58,7%	6,8%	Mínimo	59,1%	7,2%	Mínimo
ISO-NORM	58,7%	6,8%	Mínimo	59,1%	7,2%	Mínimo
COBERTURA 4 – Telha metálica + Laje maciça						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	PHFT	Δ PHFT	Desempenho	PHFT	Δ PHFT	Desempenho
NORM-NORM	59,1%	7,2%	Mínimo	59,7%	7,8%	Mínimo
ISO-NORM	59,2%	7,3%	Mínimo	59,6%	7,7%	Mínimo

Fonte: Autor (2024)

Novamente, todas as combinações atendem apenas ao nível mínimo de desempenho, ou seja, nenhuma combinação atingiu o nível superior.

Para a cidade de Teresina (ZB7), têm-se os seguintes resultados (Figura 20):

Figura 20 - Número de horas dentro da faixa de temperatura operativa em Teresina (ZB 7)



Fonte: Autor (2024)

Para o modelo de referência, o número de horas dentro da faixa de temperatura operativa em Teresina foi de 2107, equivalente a 32,1% das horas ocupadas. Nesta cidade, quase todos os resultados são piores do que o modelo de referência. A configuração que apresentou o melhor resultado foi a parede cerâmica utilizando argamassa isolante externamente com Cobertura 3 e o pior resultado foi a parede de cerâmica utilizando argamassa convencional externamente com Cobertura 1.

O desempenho mínimo será atingido quando o $PHFT_{UH,real}$ for maior que $0,9 \times PHFT_{UH,ref}$, ou seja, 28,9%. Portanto todas as combinações com as Coberturas 3 e 4 atendem ao desempenho mínimo. As combinações com as Coberturas 1 e 2 não atingiram o desempenho mínimo. Para atingir o nível de desempenho superior, calcula-se:

$$\Delta PHFT = PHFT_{UH,real} - PHFT_{UH,ref}$$

$$\Delta PHFT_{\min} = 45 - 0,58 \times PHFT_{UH,ref} = 45 - 18,6 = 26,4\%$$

A Tabela 37 apresenta o PHFT e o $\Delta PHFT$ de cada configuração e seu respectivo nível de desempenho. Para valores de $\Delta PHFT$ acima de 26,4%, o desempenho terá o nível superior.

Tabela 37 - PHFT e nível de desempenho de cada configuração em Teresina (ZB 7)

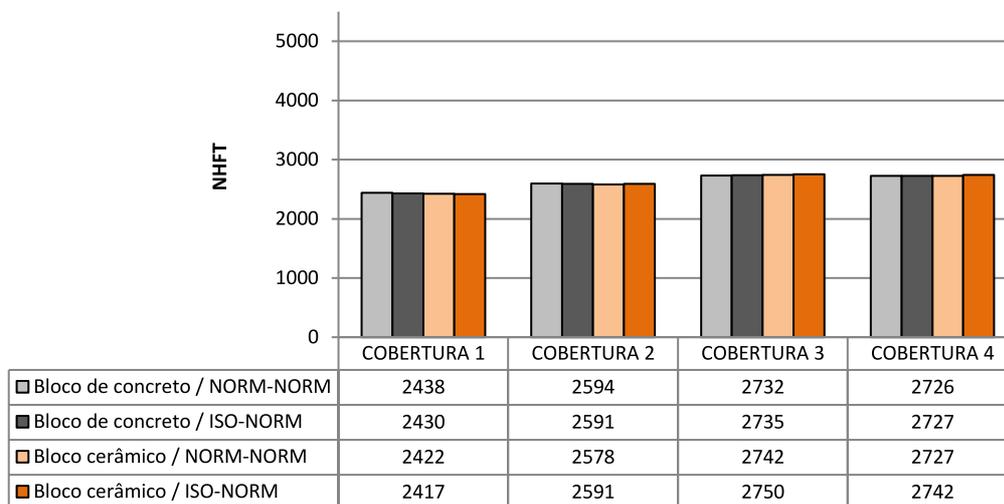
COBERTURA 1 – Telha cerâmica + Laje maciça						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	PHFT	Δ PHFT	Desempenho	PHFT	Δ PHFT	Desempenho
NORM-NORM	27,5%	-4,6%	-	27,3%	-4,8%	-
ISO-NORM	27,7%	-4,4%	-	28,0%	-4,1%	-
COBERTURA 2 – Telhado verde + Laje maciça						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	PHFT	Δ PHFT	Desempenho	PHFT	Δ PHFT	Desempenho
NORM-NORM	27,9%	-4,2%	-	27,8%	-4,3%	-
ISO-NORM	28,4%	-3,7%	-	28,8%	-3,3%	-
COBERTURA 3 – Telha metálica + laje pré-moldada						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	PHFT	Δ PHFT	Desempenho	PHFT	Δ PHFT	Desempenho
NORM-NORM	31,9%	-0,2%	Mínimo	32,0%	-0,1%	Mínimo
ISO-NORM	32,6%	0,5%	Mínimo	33,1%	1,0%	Mínimo
COBERTURA 4 – Telha metálica + Laje maciça						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	PHFT	Δ PHFT	Desempenho	PHFT	Δ PHFT	Desempenho
NORM-NORM	31,4%	-0,7%	Mínimo	31,6%	-0,5%	Mínimo
ISO-NORM	31,9%	-0,2%	Mínimo	32,6%	0,5%	Mínimo

Fonte: Autor (2024)

Percebe-se que apenas as configurações com as Coberturas 3 e 4, de menor transmitância térmica, que obtiveram o nível mínimo de desempenho.

Para a cidade do Rio de Janeiro (ZB8), têm-se os seguintes resultados (Figura 21):

Figura 21 - Número de horas dentro da faixa de temperatura operativa em Rio de Janeiro (ZB 8)



Fonte: Autor (2024)

Para o modelo de referência, o número de horas dentro da faixa de temperatura operativa no Rio de Janeiro foi de 2518, equivalente a 38,3% das horas ocupadas. Os resultados utilizando a Cobertura 1 foram piores que o modelo de referência. Com as outras coberturas, os resultados foram superiores ao de referência. A configuração que apresentou o melhor resultado foi a parede cerâmica utilizando argamassa isolante externamente com Cobertura 3 e o pior resultado também foi a parede de cerâmica utilizando argamassa isolante externamente, porém com Cobertura 1.

O desempenho mínimo será atingido quando o $PHFT_{UH,real}$ for maior que $0,9 \times PHFT_{UH,ref}$, ou seja, 34,4%. Para atingir o nível de desempenho superior, calcula-se:

$$\Delta PHFT = PHFT_{UH,real} - PHFT_{UH,ref}$$

$$\Delta PHFT_{min} = 45 - 0,58 \times PHFT_{UH,ref} = 45 - 22,2 = 22,8\%$$

A Tabela 38 apresenta o PHFT e o $\Delta PHFT$ de cada configuração e seu respectivo nível de desempenho. Para valores de $\Delta PHFT$ acima de 22,8%, o desempenho terá o nível superior.

Tabela 38 - PHFT e nível de desempenho de cada configuração em Rio de Janeiro (ZB 8)

COBERTURA 1 – Telha cerâmica + Laje maciça						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	PHFT	Δ PHFT	Desempenho	PHFT	Δ PHFT	Desempenho
NORM-NORM	37,1%	-1,2%	Mínimo	36,9%	-1,4%	Mínimo
ISO-NORM	37,0%	-1,3%	Mínimo	36,8%	-1,5%	Mínimo
COBERTURA 2 – Telhado verde + Laje maciça						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	PHFT	Δ PHFT	Desempenho	PHFT	Δ PHFT	Desempenho
NORM-NORM	39,5%	1,2%	Mínimo	39,2%	0,9%	Mínimo
ISO-NORM	39,4%	1,1%	Mínimo	39,4%	1,1%	Mínimo
COBERTURA 3 – Telha metálica + laje pré-moldada						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	PHFT	Δ PHFT	Desempenho	PHFT	Δ PHFT	Desempenho
NORM-NORM	41,6%	3,3%	Mínimo	41,7%	3,4%	Mínimo
ISO-NORM	41,6%	3,3%	Mínimo	41,9%	3,6%	Mínimo
COBERTURA 4 – Telha metálica + Laje maciça						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	PHFT	Δ PHFT	Desempenho	PHFT	Δ PHFT	Desempenho
NORM-NORM	41,5%	3,2%	Mínimo	41,5%	3,2%	Mínimo
ISO-NORM	41,5%	3,2%	Mínimo	41,7%	3,4%	Mínimo

Fonte: Autor (2024)

Observa-se que todas as combinações atendem apenas ao nível mínimo de desempenho, ou seja, nenhuma atingiu o nível superior. Os melhores resultados foram obtidos com coberturas de menor transmitância térmica (Coberturas 3 e 4).

Portanto, observando os resultados e as análises das tabelas apresentadas neste tópico, nota-se, de maneira geral, que as configurações de envoltória analisadas atendem ao nível de desempenho mínimo deste critério, com exceção das combinações com as Coberturas 1 e 2 na cidade de Teresina. Observa-se que o nível de desempenho superior só foi atingindo em zonas bioclimáticas mais frias (ZBs 1 e 3). Em todas as cidades, as configurações com a Cobertura 1 tiveram os piores resultados.

4.2.2 - Temperaturas operativas anuais máxima e mínima da UH ($TO_{,máx}$ e $TO_{,mín}$)

A seguir são apresentados os resultados com as temperaturas operativas anuais máxima e mínima da UH para as composições de paredes e coberturas analisadas nas cidades escolhidas. Novamente, as simulações foram feitas no programa TRNSYS17, adotando-se ventilação natural para o *loft*. Vale lembrar, no presente tópico, que o critério de atendimento de todos os níveis de desempenho térmico (mínimo, intermediário e superior) é o mesmo. As temperaturas são expressas em graus Celsius ($^{\circ}C$).

A seguir (Tabela 39), têm-se os resultados para Curitiba (ZB1):

Tabela 39 – Temperaturas operativas anuais máxima e mínima em Curitiba (ZB 1)

COBERTURA 1 – Telha cerâmica + Laje maciça								
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria							
	Bloco de concreto				Bloco cerâmico			
	TO, máx	Desempenho	TO, mín	Desempenho	TO, máx	Desempenho	TO, mín	Desempenho
NORM-NORM	34,6	Superior	8,0	Superior	34,7	Superior	8,3	Superior
ISO-NORM	34,7	Superior	8,1	Superior	34,8	Superior	8,2	Superior
COBERTURA 2 – Telhado verde + Laje maciça								
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de argamassa (ext. – int.)							
	Bloco de concreto				Bloco cerâmico			
	TO, máx	Desempenho	TO, mín	Desempenho	TO, máx	Desempenho	TO, mín	Desempenho
NORM-NORM	31,9	Superior	10,8	Superior	31,8	Superior	11,2	Superior
ISO-NORM	32,0	Superior	10,9	Superior	32,0	Superior	11,2	Superior
COBERTURA 3 – Telha metálica + laje pré-moldada								
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria							
	Bloco de concreto				Bloco cerâmico			
	TO, máx	Desempenho	TO, mín	Desempenho	TO, máx	Desempenho	TO, mín	Desempenho
NORM-NORM	32,5	Superior	8,9	Superior	32,4	Superior	9,3	Superior
ISO-NORM	32,6	Superior	9,0	Superior	32,6	Superior	9,3	Superior
COBERTURA 4 – Telha metálica + Laje maciça								
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria							
	Bloco de concreto				Bloco cerâmico			
	TO, máx	Desempenho	TO, mín	Desempenho	TO, máx	Desempenho	TO, mín	Desempenho
NORM-NORM	32,3	Superior	9,3	Superior	32,2	Superior	9,8	Superior
ISO-NORM	32,3	Superior	9,4	Superior	32,3	Superior	9,7	Superior

Fonte: Autor (2024)

Para o modelo de referência, a temperatura operativa mínima encontrada foi de 6,9 °C e a temperatura operativa máxima encontrada foi de 35,7 °C. Nota-se, portanto, pelos resultados, que o nível de desempenho superior é atingido para todas as configurações analisadas em Curitiba. Os melhores resultados foram obtidos com a utilização da Cobertura 2. O pior desempenho foi observado com a Cobertura 1.

A seguir (Tabela 40), têm-se os resultados para Piracicaba (ZB2):

Tabela 40 – Temperaturas operativas anuais máxima e mínima em Piracicaba (ZB 2)

COBERTURA 1 – Telha cerâmica + Laje maciça								
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria							
	Bloco de concreto				Bloco cerâmico			
	TO, máx	Desempenho	TO, mín	Desempenho	TO, máx	Desempenho	TO, mín	Desempenho
NORM-NORM	36,9	Superior	13,9	Superior	36,9	Superior	14,2	Superior
ISO-NORM	37,0	Superior	13,9	Superior	37,1	Superior	13,8	Superior
COBERTURA 2 – Telhado verde + Laje maciça								
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria							
	Bloco de concreto				Bloco cerâmico			
	TO, máx	Desempenho	TO, mín	Desempenho	TO, máx	Desempenho	TO, mín	Desempenho
NORM-NORM	34,3	Superior	15,9	Superior	34,2	Superior	16,2	Superior
ISO-NORM	34,3	Superior	15,9	Superior	34,3	Superior	16,1	Superior
COBERTURA 3 – Telha metálica + laje pré-moldada								
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria							
	Bloco de concreto				Bloco cerâmico			
	TO, máx	Desempenho	TO, mín	Desempenho	TO, máx	Desempenho	TO, mín	Desempenho
NORM-NORM	34,8	Superior	14,4	Superior	34,7	Superior	14,8	Superior
ISO-NORM	34,9	Superior	14,4	Superior	34,9	Superior	14,6	Superior
COBERTURA 4 – Telha metálica + Laje maciça								
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria							
	Bloco de concreto				Bloco cerâmico			
	TO, máx	Desempenho	TO, mín	Desempenho	TO, máx	Desempenho	TO, mín	Desempenho
NORM-NORM	34,7	Superior	14,7	Superior	34,6	Superior	15,1	Superior
ISO-NORM	34,7	Superior	14,7	Superior	34,7	Superior	14,9	Superior

Fonte: Autor (2024)

Para o modelo de referência, a temperatura operativa mínima encontrada foi de 12,5 °C e a temperatura operativa máxima encontrada foi de 37,9 °C. Nota-se, portanto, pelos resultados, que o nível de desempenho superior é atingido para todas as configurações analisadas em Piracicaba. Novamente, os melhores resultados foram obtidos com a utilização da Cobertura 2. O pior desempenho foi observado com a Cobertura 1.

A seguir (Tabela 41), têm-se os resultados para São Paulo (ZB3):

Tabela 41 – Temperaturas operativas anuais máxima e mínima em São Paulo (ZB 3)

COBERTURA1 – Telha cerâmica + Laje maciça								
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria							
	Bloco de concreto				Bloco cerâmico			
	TO, máx	Desempenho	TO, mín	Desempenho	TO, máx	Desempenho	TO, mín	Desempenho
NORM-NORM	36,1	Superior	13,1	Superior	36,1	Superior	13,4	Superior
ISO-NORM	36,2	Superior	13,1	Superior	36,3	Superior	13,2	Superior
COBERTURA 2 – Telhado verde + Laje maciça								
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria							
	Bloco de concreto				Bloco cerâmico			
	TO, máx	Desempenho	TO, mín	Desempenho	TO, máx	Desempenho	TO, mín	Desempenho
NORM-NORM	33,2	Superior	15,3	Superior	33,1	Superior	15,7	Superior
ISO-NORM	33,2	Superior	15,3	Superior	33,2	Superior	15,5	Superior
COBERTURA 3 – Telha metálica + laje pré-moldada								
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria							
	Bloco de concreto				Bloco cerâmico			
	TO, máx	Desempenho	TO, mín	Desempenho	TO, máx	Desempenho	TO, mín	Desempenho
NORM-NORM	34,1	Superior	13,9	Superior	34,0	Superior	14,3	Superior
ISO-NORM	34,1	Superior	13,9	Superior	34,2	Superior	14,1	Superior
COBERTURA 4 – Telha metálica + Laje maciça								
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria							
	Bloco de concreto				Bloco cerâmico			
	TO, máx	Desempenho	TO, mín	Desempenho	TO, máx	Desempenho	TO, mín	Desempenho
NORM-NORM	33,9	Superior	14,3	Superior	33,8	Superior	14,7	Superior
ISO-NORM	33,9	Superior	14,3	Superior	34,0	Superior	14,5	Superior

Fonte: Autor (2024)

Para o modelo de referência, a temperatura operativa mínima encontrada foi de 11,7 °C e a temperatura operativa máxima encontrada foi de 37,1 °C. Nota-se, portanto, pelos resultados, que o nível de desempenho superior é atingido para todas as configurações analisadas em São Paulo. Novamente, os melhores resultados foram obtidos com a utilização da Cobertura 2. O pior desempenho foi observado com a Cobertura 1.

A seguir (Tabela 42), têm-se os resultados para Brasília (ZB4):

Tabela 42 – Temperaturas operativas anuais máxima e mínima em Brasília (ZB 4)

COBERTURA 1 – Telha cerâmica + Laje maciça								
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria							
	Bloco de concreto				Bloco cerâmico			
	TO, máx	Desempenho	TO, mín	Desempenho	TO, máx	Desempenho	TO, mín	Desempenho
NORM-NORM	36,3	Superior	17,2	Superior	36,4	Superior	17,4	Superior
ISO-NORM	36,4	Superior	17,2	Superior	36,6	Superior	17,2	Superior
COBERTURA 2 – Telhado verde + Laje maciça								
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria							
	Bloco de concreto				Bloco cerâmico			
	TO, máx	Desempenho	TO, mín	Desempenho	TO, máx	Desempenho	TO, mín	Desempenho
NORM-NORM	33,8	Superior	17,1	Superior	33,7	Superior	17,1	Superior
ISO-NORM	33,9	Superior	17,1	Superior	33,9	Superior	17,2	Superior
COBERTURA 3 – Telha metálica + laje pré-moldada								
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria							
	Bloco de concreto				Bloco cerâmico			
	TO, máx	Desempenho	TO, mín	Desempenho	TO, máx	Desempenho	TO, mín	Desempenho
NORM-NORM	34,2	Superior	17,3	Superior	34,2	Superior	17,2	Superior
ISO-NORM	34,3	Superior	17,2	Superior	34,3	Superior	17,2	Superior
COBERTURA 4 – Telha metálica + Laje maciça								
Tipo de argamassa (ext. – int)	Tipo de alvenaria							
	Bloco de concreto				Bloco cerâmico			
	TO, máx	Desempenho	TO, mín	Desempenho	TO, máx	Desempenho	TO, mín	Desempenho
NORM-NORM	34,0	Superior	17,3	Superior	34,0	Superior	16,6	Superior
ISO-NORM	34,1	Superior	17,2	Superior	34,2	Superior	17,2	Superior

Fonte: Autor (2024)

Para o modelo de referência, a temperatura operativa mínima encontrada foi de 16,3 °C e a temperatura operativa máxima encontrada foi de 37,3 °C. Nota-se, portanto, pelos resultados, que o nível de desempenho superior é atingido para todas as configurações analisadas em Brasília. Para temperaturas operativas mínimas, os resultados foram muito próximos entre si, não se destacando nenhum telhado. Em relação às temperaturas operativas máximas, os melhores resultados foram obtidos com a utilização da Cobertura 2. O pior desempenho foi observado com a Cobertura 1.

A seguir (Tabela 43), têm-se os resultados para Niterói (ZB5):

Tabela 43 – Temperaturas operativas anuais máxima em Niterói (ZB5)

COBERTURA 1 – Telha cerâmica + Laje maciça				
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria			
	Bloco de concreto		Bloco cerâmico	
	TO, máx	Desempenho	TO, máx	Desempenho
NORM-NORM	39,7	Superior	39,8	Superior
ISO-NORM	39,8	Superior	39,9	Superior
COBERTURA2 – Telhado verde + Laje maciça				
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria			
	Bloco de concreto		Bloco cerâmico	
	TO, máx	Desempenho	TO, máx	Desempenho
NORM-NORM	36,8	Superior	36,7	Superior
ISO-NORM	36,9	Superior	36,8	Superior
COBERTURA 3 – Telha metálica + laje pré-moldada				
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria			
	Bloco de concreto		Bloco cerâmico	
	TO, máx	Desempenho	TO, máx	Desempenho
NORM-NORM	37,6	Superior	37,5	Superior
ISO-NORM	37,6	Superior	37,6	Superior
COBERTURA 4 – Telha metálica + Laje maciça				
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria			
	Bloco de concreto		Bloco cerâmico	
	TO, máx	Desempenho	TO, máx	Desempenho
NORM-NORM	37,2	Superior	37,3	Superior
ISO-NORM	37,4	Superior	37,4	Superior

Fonte: Autor (2024)

Para o modelo de referência, a temperatura operativa máxima encontrada foi de 40,7 °C. Nota-se, portanto, pelos resultados, que o nível de desempenho superior é atingido para todas as configurações analisadas em Niterói. Os melhores resultados foram obtidos com a utilização da Cobertura 2. O pior desempenho foi observado com a Cobertura 1.

A seguir (Tabela 44), têm-se os resultados em Goiânia (ZB6):

Tabela 44 – Temperaturas operativas anuais máxima em Goiânia (ZB 6)

COBERTURA 1 – Telha cerâmica + Laje maciça				
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria			
	Bloco de concreto		Bloco cerâmico	
	TO, máx	Desempenho	TO, máx	Desempenho
NORM-NORM	38,4	Superior	38,4	Superior
ISO-NORM	38,5	Superior	38,6	Superior
COBERTURA 2 – Telhado verde + Laje maciça				
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria			
	Bloco de concreto		Bloco cerâmico	
	TO, máx	Desempenho	TO, máx	Desempenho
NORM-NORM	35,8	Superior	35,6	Superior
ISO-NORM	35,8	Superior	35,8	Superior
COBERTURA 3 – Telha metálica + laje pré-moldada				
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria			
	Bloco de concreto		Bloco cerâmico	
	TO, máx	Desempenho	TO, máx	Desempenho
NORM-NORM	36,3	Superior	36,1	Superior
ISO-NORM	36,3	Superior	36,3	Superior
COBERTURA 4 – Telha metálica + Laje maciça				
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria			
	Bloco de concreto		Bloco cerâmico	
	TO, máx	Desempenho	TO, máx	Desempenho
NORM-NORM	36,1	Superior	35,9	Superior
ISO-NORM	36,2	Superior	36,2	Superior

Fonte: Autor (2024)

Para o modelo de referência, a temperatura operativa máxima encontrada foi de 39,8 °C. Nota-se, portanto, pelos resultados, que o nível de desempenho superior é atingido para todas as configurações analisadas em Goiânia. Os melhores resultados foram obtidos com a utilização da Cobertura 2. O pior desempenho foi observado com a Cobertura 1.

A seguir (Tabela 45), têm-se os resultados em Teresina (ZB7):

Tabela 45 – Temperaturas operativas anuais máxima em Teresina (ZB 7)

COBERTURA 1 – Telha cerâmica + Laje maciça				
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria			
	Bloco de concreto		Bloco cerâmico	
	TO, máx	Desempenho	TO, máx	Desempenho
NORM-NORM	42,8	Superior	42,9	Superior
ISO-NORM	42,9	Superior	43,1	Superior
COBERTURA 2 – Telhado verde + Laje maciça				
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria			
	Bloco de concreto		Bloco cerâmico	
	TO, máx	Desempenho	TO, máx	Desempenho
NORM-NORM	40,3	Superior	40,1	Superior
ISO-NORM	40,3	Superior	40,3	Superior
COBERTURA 3 – Telha metálica + laje pré-moldada				
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria			
	Bloco de concreto		Bloco cerâmico	
	TO, máx	Desempenho	TO, máx	Desempenho
NORM-NORM	40,7	Superior	40,6	Superior
ISO-NORM	40,7	Superior	40,8	Superior
COBERTURA 4 – Telha metálica + Laje maciça				
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria			
	Bloco de concreto		Bloco cerâmico	
	TO, máx	Desempenho	TO, máx	Desempenho
NORM-NORM	40,5	Superior	40,4	Superior
ISO-NORM	40,6	Superior	40,6	Superior

Fonte: Autor (2024)

Para o modelo de referência, a temperatura operativa máxima encontrada foi de 43,8 °C. Nota-se, portanto, pelos resultados, que o nível de desempenho superior é atingido para todas as configurações analisadas em Teresina. Os melhores resultados foram obtidos com a utilização da Cobertura 2. O pior desempenho foi observado com a Cobertura 1.

A seguir (Tabela 46), têm-se os resultados no Rio de Janeiro (ZB8):

Tabela 46 – Temperaturas operativas anuais máxima no Rio de Janeiro (ZB 8)

COBERTURA 1 – Telha cerâmica + Laje maciça				
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria			
	Bloco de concreto		Bloco cerâmico	
	TO, máx	Desempenho	TO, máx	Desempenho
NORM-NORM	40,0	Superior	40,1	Superior
ISO-NORM	40,1	Superior	40,2	Superior
COBERTURA 2 – Telhado verde + Laje maciça				
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria			
	Bloco de concreto		Bloco cerâmico	
	TO, máx	Desempenho	TO, máx	Desempenho
NORM-NORM	37,4	Superior	37,3	Superior
ISO-NORM	37,4	Superior	37,4	Superior
COBERTURA 3 – Telha metálica + laje pré-moldada				
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria			
	Bloco de concreto		Bloco cerâmico	
	TO, máx	Desempenho	TO, máx	Desempenho
NORM-NORM	37,8	Superior	37,5	Superior
ISO-NORM	37,8	Superior	37,8	Superior
COBERTURA 4 – Telha metálica + Laje maciça				
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria			
	Bloco de concreto		Bloco cerâmico	
	TO, máx	Desempenho	TO, máx	Desempenho
NORM-NORM	37,7	Superior	37,5	Superior
ISO-NORM	37,7	Superior	37,7	Superior

Fonte: Autor (2024)

Para o modelo de referência, a temperatura operativa máxima encontrada foi de 40,9 °C. Nota-se, portanto, pelos resultados, que o nível de desempenho superior é atingido para todas as configurações analisadas no Rio de Janeiro. Os melhores resultados foram obtidos com a utilização da Cobertura 2. O pior desempenho foi observado com a Cobertura 1.

4.2.3 - Conclusões gerais dos resultados com ventilação natural

Após a obtenção dos resultados para os critérios com ventilação natural (PHFT, $TO_{máx}$ e $TO_{mín}$), podem-se tirar algumas conclusões:

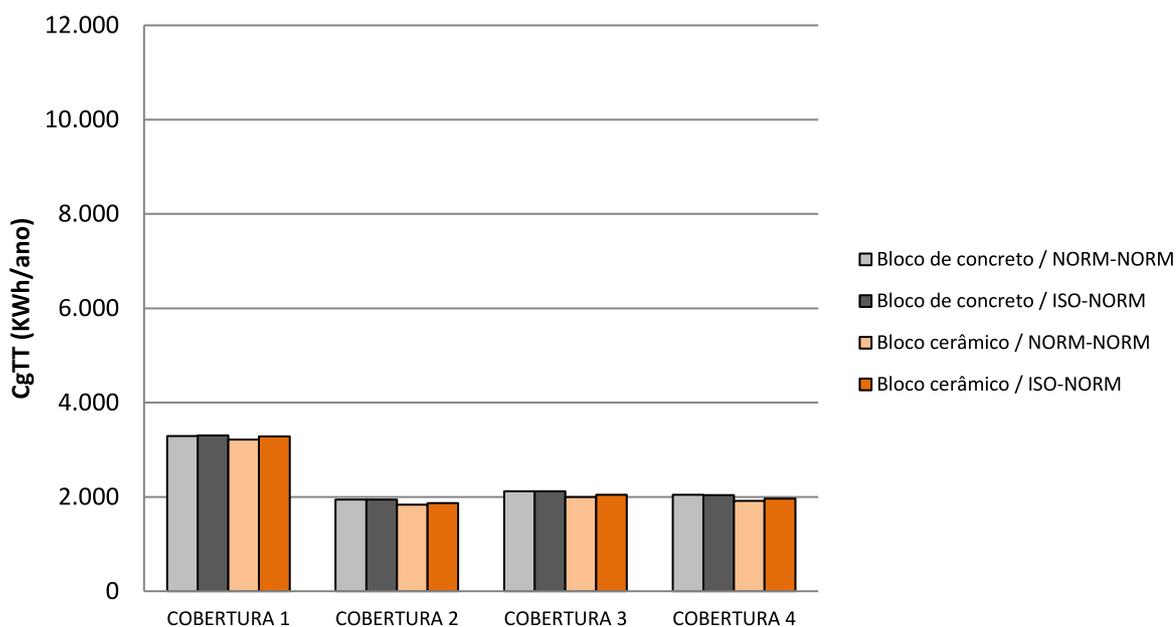
- a) Para o critério de temperaturas operativas anuais máxima e mínima ($TO_{m\acute{a}x}$ e $TO_{m\acute{i}n}$) da UH, todas as configurações analisadas apresentam o nível de desempenho superior, qualquer que seja a zona bioclimática.
- b) Para este critério, observou-se que, em regiões frias (ZB 1 a 3), as configurações com a Cobertura 2 apresentaram resultado superior em relação às demais para as temperaturas operativas anuais mínimas. Nas regiões quentes (ZB 5 a 8), observa-se que a maior diferença encontrada nas temperaturas operativas anuais máximas é entre as combinações da Cobertura 1 com as demais. Neste caso, a Cobertura 1 teve um resultado pior. As configurações com as outras coberturas tiveram valores de $TO_{M\acute{a}x}$ parecidos.
- c) Para o critério de percentual de horas de ocupação da UH dentro da faixa de temperatura operativa (PHFT), apenas na Zona Bioclimática 7 algumas combinações analisadas não atenderam nem ao nível de desempenho mínimo. Para as demais zonas, todas as configurações atingiram o desempenho mínimo, sendo que nas Zonas Bioclimáticas 1 e 3 (regiões mais frias), o nível superior foi alcançado em diversas configurações analisadas.
- d) Assim como no critério de temperaturas operativas anuais máxima e mínima da UH, para o critério de percentual de horas de ocupação da UH dentro da faixa de temperatura operativa (PHFT), as combinações com os piores resultados foram com a Cobertura 1. Para as regiões mais frias (ZB 1 a 3), notou-se que as configurações com telhados de maior capacidade térmica (Coberturas 2 e 4) foram as que obtiveram os melhores resultados. No caso, as Coberturas 1 e 4 possuem praticamente a mesma capacidade térmica, entretanto a transmitância térmica da Cobertura 4 é quatro vezes menor. Já para regiões mais quentes, os melhores resultados foram observados utilizando os telhados de menor transmitância térmica (Coberturas 3 e 4).
- e) Em ambos os critérios ($TO_{m\acute{a}x}$, $TO_{m\acute{i}n}$ e PHFT), a influência da cobertura no desempenho foi mais impactante do que a escolha do tipo de argamassa e alvenaria.

4.2.4 - Carga térmica total da UH ($CgTT_{UH}$)

A seguir são apresentados os resultados de carga térmica total para as composições de paredes e coberturas analisadas nas cidades escolhidas. Para este critério, salienta-se que as simulações foram feitas no programa TRNSYS17 sem o uso da ventilação natural, ou seja, considerando a energia teórica necessária para alcance das condições de conforto térmico, com o uso de equipamentos mecânicos ideais (eficiência de 100%). Os resultados de $CgTT$ são expressos em KWh/ano. Em todas as cidades analisadas, para se obter o nível intermediário a redução da carga térmica ($RedCgTT$) deve ser maior que 0%.

Para a cidade de Curitiba (ZB1), têm-se os seguintes resultados (Figura 22):

Figura 22 - Cargas térmicas totais em Curitiba (ZB 1)



Fonte: Autor (2024)

A configuração que apresentou o melhor resultado foi a parede de bloco cerâmico utilizando argamassa convencional externamente com Cobertura 2 e o pior resultado foi a parede de bloco de concreto com argamassa isolante externa e Cobertura 1.

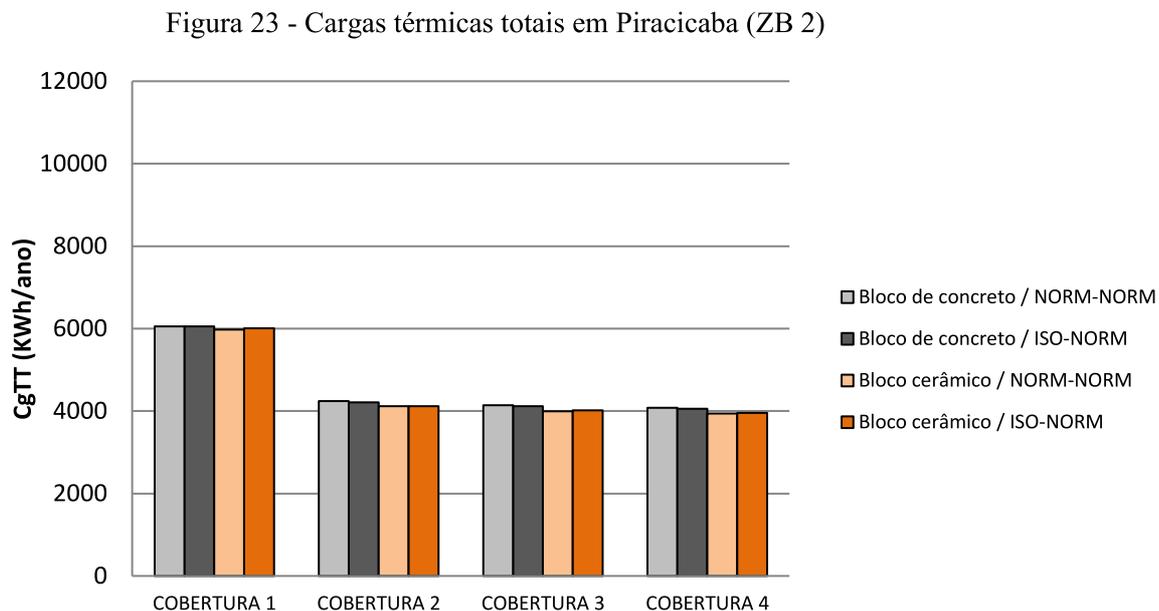
Tabela 47 – Cargas térmicas e desempenho de cada configuração em Curitiba (ZB 1)

COBERTURA 1 – Telha cerâmica + Laje maciça						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	CgTT	RedCgTT	Desempenho	CgTT	RedCgTT	Desempenho
NORM-NORM	3289	15,9%	Intermediário	3215	17,8%	Intermediário
ISO-NORM	3303	15,5%	Intermediário	3281	16,1%	Intermediário
COBERTURA 2 – Telhado verde + Laje maciça						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	CgTT	RedCgTT	Desempenho	CgTT	RedCgTT	Desempenho
NORM-NORM	1946	50,2%	Superior	1833	53,1%	Superior
ISO-NORM	1942	50,3%	Superior	1871	52,2%	Superior
COBERTURA 3 – Telha metálica + laje pré-moldada						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	CgTT	RedCgTT	Desempenho	CgTT	RedCgTT	Desempenho
NORM-NORM	2122	45,7%	Superior	1997	48,9%	Superior
ISO-NORM	2120	45,8%	Superior	2048	47,6%	Superior
COBERTURA 4 – Telha metálica + Laje maciça						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	CgTT	RedCgTT	Desempenho	CgTT	RedCgTT	Desempenho
NORM-NORM	2043	47,8%	Superior	1919	50,9%	Superior
ISO-NORM	2038	47,9%	Superior	1965	49,8%	Superior

Fonte: Autor (2024)

Para o modelo de referência, a carga térmica total foi de 3911 KWh/ano. Para atingir o nível superior a redução da carga térmica (RedCgTT) deve ser maior que 35%. Com exceção das combinações com a Cobertura 1, que obtiveram o nível intermediário de desempenho, todas as configurações analisadas atingiram o nível superior.

Para a cidade de Piracicaba (ZB2), têm-se os seguintes resultados (Figura 23):



Fonte: Autor (2024)

A combinação que apresentou o melhor resultado foi a parede de bloco cerâmico com argamassa normal externamente e Cobertura 4 e os piores resultados foram para parede de bloco de concreto com Cobertura 1.

Tabela 48 – Cargas térmicas e desempenho de cada configuração em Piracicaba (ZB 2)

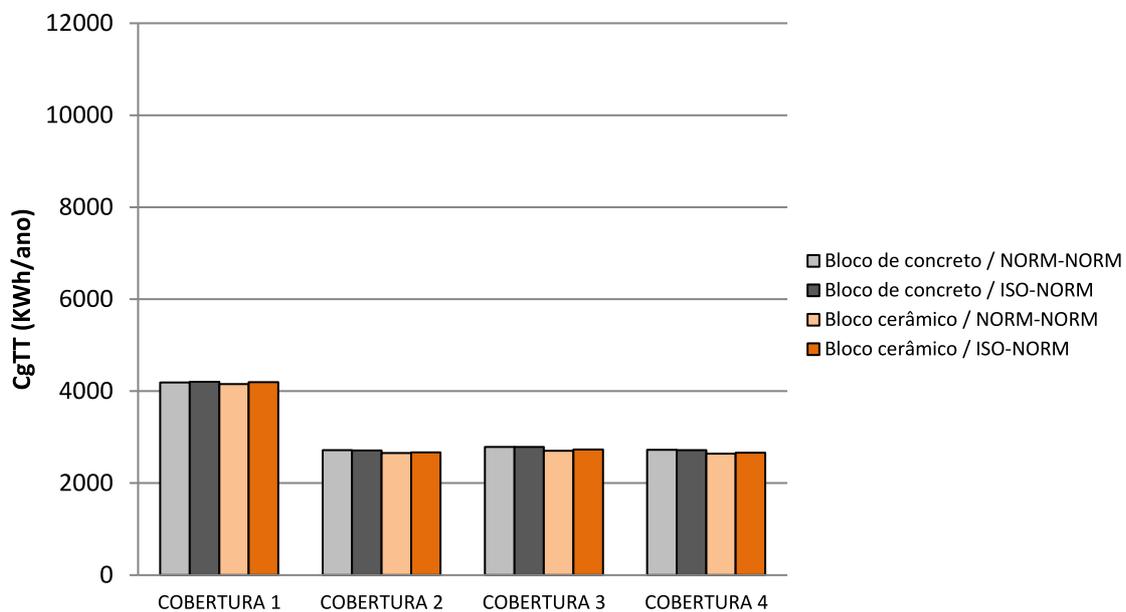
COBERTURA 1 – Telha cerâmica + Laje maciça						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	CgTT	RedCgTT	Desempenho	CgTT	RedCgTT	Desempenho
NORM-NORM	6050	4,8%	Intermediário	5978	5,9%	Intermediário
ISO-NORM	6050	4,8%	Intermediário	6007	5,5%	Intermediário
COBERTURA 2 – Telhado verde + Laje maciça						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	CgTT	RedCgTT	Desempenho	CgTT	RedCgTT	Desempenho
NORM-NORM	4240	33,3%	Intermediário	4120	35,2%	Intermediário
ISO-NORM	4212	33,7%	Intermediário	4115	35,3%	Intermediário
COBERTURA 3 – Telha metálica + laje pré-moldada						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	CgTT	RedCgTT	Desempenho	CgTT	RedCgTT	Desempenho
NORM-NORM	4141	34,8%	Intermediário	3996	37,1%	Intermediário
ISO-NORM	4120	35,2%	Intermediário	4016	36,8%	Intermediário
COBERTURA 4 – Telha metálica + Laje maciça						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	CgTT	RedCgTT	Desempenho	CgTT	RedCgTT	Desempenho
NORM-NORM	4082	35,8%	Intermediário	3940	38,0%	Intermediário
ISO-NORM	4057	36,2%	Intermediário	3952	37,8%	Intermediário

Fonte: Autor (2024)

Para o modelo de referência, a carga térmica total foi de 6356 KWh/ano. Para atingir o nível superior, a redução da carga térmica (RedCgTT) deve ser maior que 55%. Todas as configurações analisadas obtiveram o nível intermediário de desempenho.

Para a cidade de São Paulo (ZB3), têm-se os seguintes resultados (Figura 24):

Figura 24 - Cargas térmicas totais em São Paulo (ZB 3)



Fonte: Autor (2024)

A configuração que apresentou o melhor resultado foi a parede de bloco cerâmico com argamassa convencional externamente e Cobertura 4 e o pior resultado foi a parede de bloco de concreto com argamassa isolante externa e Cobertura 1.

Tabela 49 – Cargas térmicas e desempenho de cada configuração em São Paulo (ZB 3)

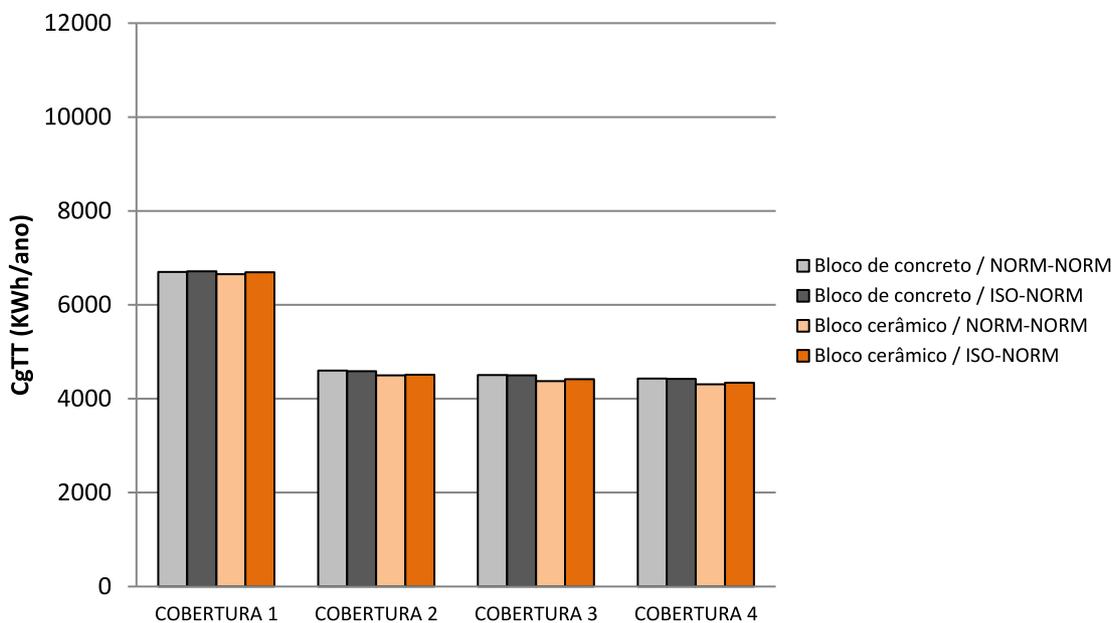
COBERTURA 1 – Telha cerâmica + Laje maciça						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	CgTT	RedCgTT	Desempenho	CgTT	RedCgTT	Desempenho
NORM-NORM	4190	7,2%	Intermediário	4156	8,0%	Intermediário
ISO-NORM	4203	6,9%	Intermediário	4195	7,1%	Intermediário
COBERTURA 2 – Telhado verde + Laje maciça						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	CgTT	RedCgTT	Desempenho	CgTT	RedCgTT	Desempenho
NORM-NORM	2718	39,8%	Intermediário	2653	41,2%	Intermediário
ISO-NORM	2713	39,9%	Intermediário	2666	41,0%	Intermediário
COBERTURA 3 – Telha metálica + laje pré-moldada						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	CgTT	RedCgTT	Desempenho	CgTT	RedCgTT	Desempenho
NORM-NORM	2790	38,2%	Intermediário	2702	40,2%	Intermediário
ISO-NORM	2788	38,3%	Intermediário	2733	39,5%	Intermediário
COBERTURA 4 – Telha metálica + Laje maciça						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	CgTT	RedCgTT	Desempenho	CgTT	RedCgTT	Desempenho
NORM-NORM	2724	39,7%	Intermediário	2639	41,6%	Intermediário
ISO-NORM	2719	39,8%	Intermediário	2663	41,0%	Intermediário

Fonte: Autor (2024)

Para o modelo de referência, a carga térmica total foi de 4515 KWh/ano. Para atingir o nível superior a redução da carga térmica (RedCgTT) deve ser maior que 55%. Todas as configurações analisadas obtiveram o nível intermediário de desempenho.

Para a cidade de Brasília (ZB4), têm-se os seguintes resultados (Figura 25):

Figura 25 - Cargas térmicas totais em Brasília (ZB 4)



Fonte: Autor (2024)

Assim como em São Paulo, configuração que apresentou o melhor resultado foi a parede de bloco cerâmico com argamassa normal externamente e Cobertura 4 e o pior resultado foi a parede de bloco de concreto com argamassa isolante externamente e Cobertura 1.

Tabela 50 – Cargas térmicas e desempenho de cada configuração em Brasília (ZB 4)

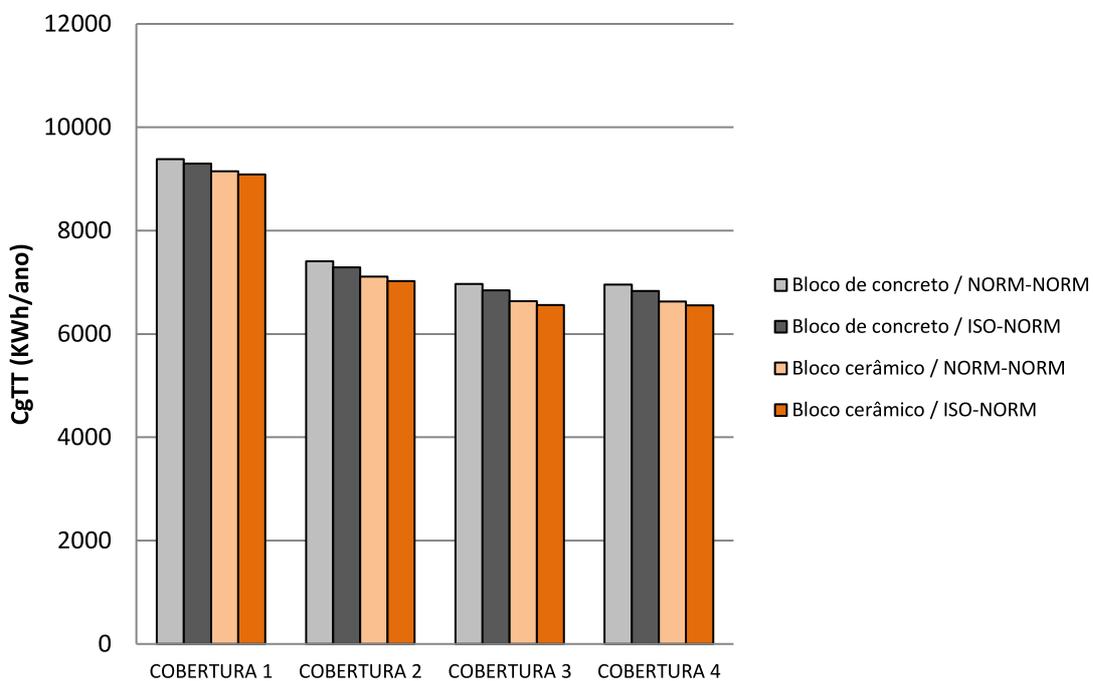
COBERTURA 1 – Telha cerâmica + Laje maciça						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	CgTT	RedCgTT	Desempenho	CgTT	RedCgTT	Desempenho
NORM-NORM	6702	5,0%	Intermediário	6652	5,7%	Intermediário
ISO-NORM	6717	4,8%	Intermediário	6694	5,1%	Intermediário
COBERTURA 2 – Telhado verde + Laje maciça						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	CgTT	RedCgTT	Desempenho	CgTT	RedCgTT	Desempenho
NORM-NORM	4599	34,8%	Intermediário	4500	36,2%	Intermediário
ISO-NORM	4590	34,9%	Intermediário	4513	36,0%	Intermediário
COBERTURA 3 – Telha metálica + laje pré-moldada						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	CgTT	RedCgTT	Desempenho	CgTT	RedCgTT	Desempenho
NORM-NORM	4502	36,2%	Intermediário	4377	38,0%	Intermediário
ISO-NORM	4501	36,2%	Intermediário	4420	37,3%	Intermediário
COBERTURA 4 – Telha metálica + Laje maciça						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	CgTT	RedCgTT	Desempenho	CgTT	RedCgTT	Desempenho
NORM-NORM	4427	37,2%	Intermediário	4306	39,0%	Intermediário
ISO-NORM	4422	37,3%	Intermediário	4340	38,5%	Intermediário

Fonte: Autor (2024)

Para o modelo de referência, a carga térmica total foi de 7054 KWh/ano. Para atingir o nível superior a redução da carga térmica (RedCgTT) deve ser maior que 55%. Todas as configurações analisadas obtiveram o nível intermediário de desempenho.

Para a cidade de Niterói (ZB5), têm-se os seguintes resultados (Figura 26):

Figura 26 - Cargas térmicas totais em Niterói (ZB 5)



Fonte: Autor (2024)

A combinação que apresentou o melhor resultado foi a parede cerâmica utilizando argamassa isolante externamente com Cobertura 4 e o pior resultado foi a parede de concreto utilizando argamassa convencional externamente com Cobertura 1.

Tabela 51 – Cargas térmicas e desempenho de cada configuração em Niterói (ZB 5)

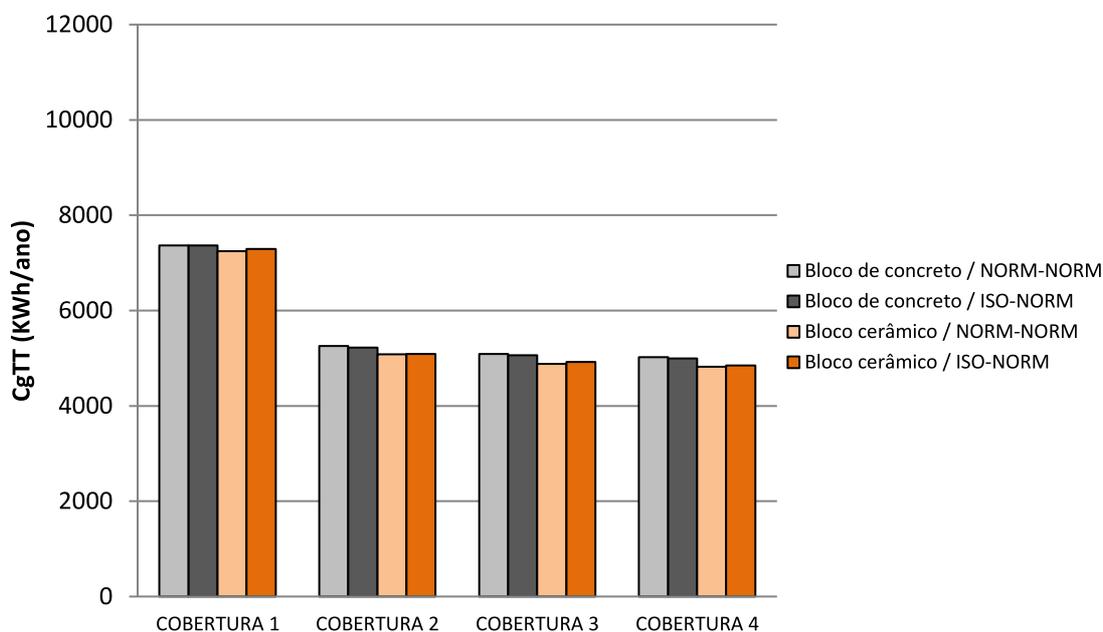
COBERTURA 1 – Telha cerâmica + Laje maciça						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	CgTT	RedCgTT	Desempenho	CgTT	RedCgTT	Desempenho
NORM-NORM	9383	4,6%	Intermediário	9149	6,9%	Intermediário
ISO-NORM	9294	5,5%	Intermediário	9088	7,6%	Intermediário
COBERTURA 2 – Telhado verde + Laje maciça						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	CgTT	RedCgTT	Desempenho	CgTT	RedCgTT	Desempenho
NORM-NORM	7407	24,7%	Intermediário	7112	27,7%	Intermediário
ISO-NORM	7289	25,9%	Intermediário	7026	28,5%	Intermediário
COBERTURA 3 – Telha metálica + laje pré-moldada						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	CgTT	RedCgTT	Desempenho	CgTT	RedCgTT	Desempenho
NORM-NORM	6967	29,1%	Intermediário	6636	32,5%	Intermediário
ISO-NORM	6847	30,4%	Intermediário	6563	33,2%	Intermediário
COBERTURA 4 – Telha metálica + Laje maciça						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	CgTT	RedCgTT	Desempenho	CgTT	RedCgTT	Desempenho
NORM-NORM	6956	29,2%	Intermediário	6629	32,6%	Intermediário
ISO-NORM	6834	30,5%	Intermediário	6552	33,4%	Intermediário

Fonte: Autor (2024)

Para o modelo de referência, a carga térmica total foi de 9831 KWh/ano. Para atingir o nível superior a redução da carga térmica (RedCgTT) deve ser maior que 55%. Todas as configurações analisadas obtiveram o nível intermediário de desempenho.

Para a cidade de Goiânia (ZB6), têm-se os seguintes resultados (Figura 27):

Figura 27 - Cargas térmicas totais em Goiânia (ZB 6)



Fonte: Autor (2024)

Assim como em Brasília, a configuração que apresentou o melhor resultado, em Goiânia, foi a parede de bloco cerâmico com argamassa normal externamente e Cobertura 4 e o pior resultado foi o da parede de bloco concreto com argamassa isolante externamente e Cobertura 1.

Tabela 52 – Cargas térmicas e desempenho de cada configuração em Goiânia (ZB 6)

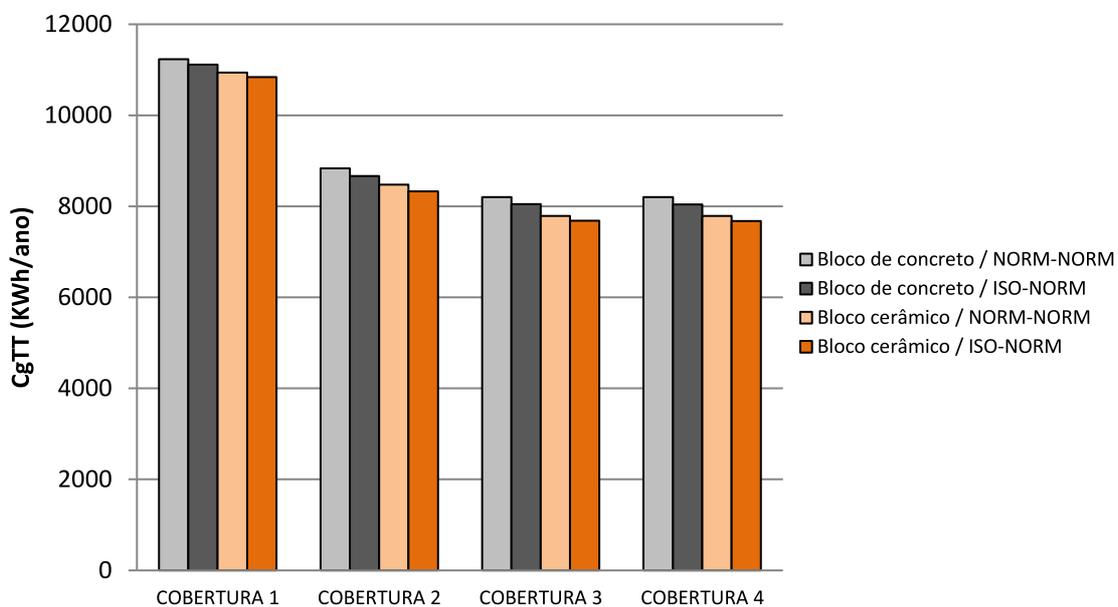
COBERTURA 1 – Telha cerâmica + Laje maciça						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	CgTT	RedCgTT	Desempenho	CgTT	RedCgTT	Desempenho
NORM-NORM	7363	7,5%	Intermediário	7246	9,0%	Intermediário
ISO-NORM	7363	7,5%	Intermediário	7292	8,4%	Intermediário
COBERTURA 2 – Telhado verde + Laje maciça						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	CgTT	RedCgTT	Desempenho	CgTT	RedCgTT	Desempenho
NORM-NORM	5259	33,9%	Intermediário	5081	36,2%	Intermediário
ISO-NORM	5226	34,3%	Intermediário	5090	36,0%	Intermediário
COBERTURA 3 – Telha metálica + laje pré-moldada						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	CgTT	RedCgTT	Desempenho	CgTT	RedCgTT	Desempenho
NORM-NORM	5087	36,1%	Intermediário	4881	38,7%	Intermediário
ISO-NORM	5061	36,4%	Intermediário	4919	38,2%	Intermediário
COBERTURA 4 – Telha metálica + Laje maciça						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	CgTT	RedCgTT	Desempenho	CgTT	RedCgTT	Desempenho
NORM-NORM	5025	36,9%	Intermediário	4822	39,4%	Intermediário
ISO-NORM	4995	37,2%	Intermediário	4850	39,1%	Intermediário

Fonte: Autor (2024)

Para o modelo de referência, a carga térmica total foi de 7959 KWh/ano. Para atingir o nível superior a redução da carga térmica (RedCgTT) deve ser maior que 55%. Todas as configurações analisadas obtiveram o nível intermediário de desempenho.

Para a cidade de Teresina (ZB7), têm-se os seguintes resultados (Figura 28):

Figura 28 - Cargas térmicas totais em Teresina (ZB 7)



Fonte: Autor (2024)

Como em Niterói, a configuração que apresentou o melhor resultado, em Teresina, foi a parede de bloco cerâmico com argamassa isolante externamente e Cobertura 4 e o pior resultado foi a parede de bloco de concreto com argamassa normal externamente e Cobertura 1.

Tabela 53 – Cargas térmicas e desempenho de cada configuração em Teresina (ZB 7)

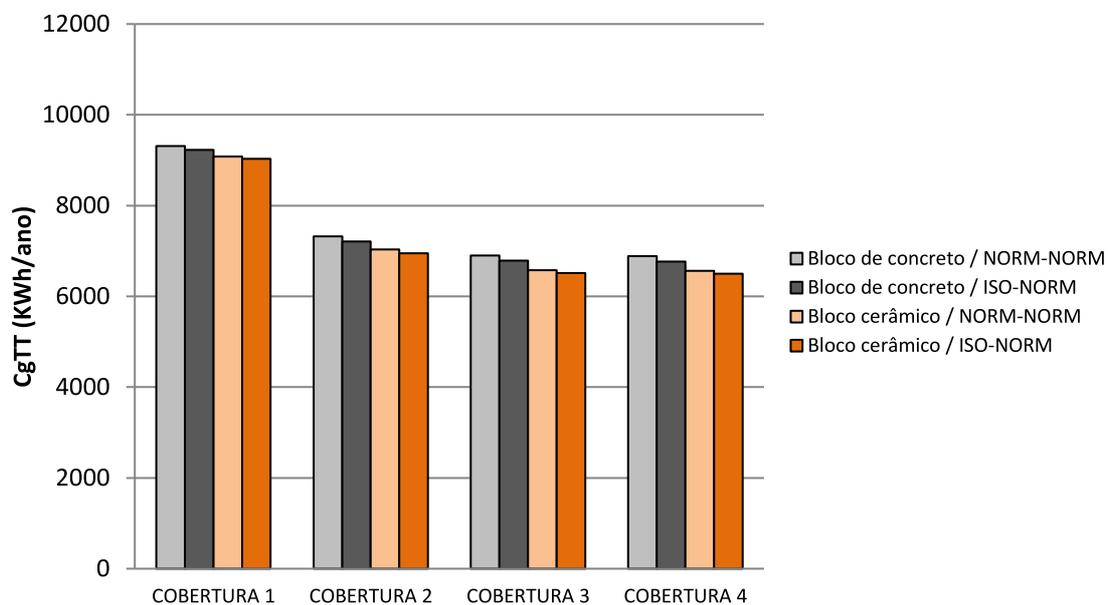
COBERTURA 1 – Telha cerâmica + Laje maciça						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	CgTT	RedCgTT	Desempenho	CgTT	RedCgTT	Desempenho
NORM-NORM	11232	4,0%	Intermediário	10936	6,6%	Intermediário
ISO-NORM	11111	5,1%	Intermediário	10840	7,4%	Intermediário
COBERTURA 2 – Telhado verde + Laje maciça						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	CgTT	RedCgTT	Desempenho	CgTT	RedCgTT	Desempenho
NORM-NORM	8837	24,5%	Intermediário	8474	27,6%	Intermediário
ISO-NORM	8669	25,9%	Intermediário	8331	28,8%	Intermediário
COBERTURA 3 – Telha metálica + laje pré-moldada						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	CgTT	RedCgTT	Desempenho	CgTT	RedCgTT	Desempenho
NORM-NORM	8206	29,9%	Intermediário	7786	33,5%	Intermediário
ISO-NORM	8048	31,2%	Intermediário	7681	34,4%	Intermediário
COBERTURA 4 – Telha metálica + Laje maciça						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	CgTT	RedCgTT	Desempenho	CgTT	RedCgTT	Desempenho
NORM-NORM	8203	29,9%	Intermediário	7791	33,4%	Intermediário
ISO-NORM	8040	31,3%	Intermediário	7674	34,4%	Intermediário

Fonte: Autor (2024)

Para o modelo de referência, a carga térmica total foi de 11706 KWh/ano. Para atingir o nível superior a redução da carga térmica (RedCgTT) deve ser maior que 55%. Todas as configurações analisadas obtiveram o nível intermediário de desempenho.

Para a cidade do Rio de Janeiro (ZB8), têm-se os seguintes resultados (Figura 29):

Figura 29 - Cargas térmicas totais em Rio de Janeiro (ZB 8)



Fonte: Autor (2024)

Novamente, a configuração que apresentou o melhor resultado foi a parede de bloco cerâmico com argamassa isolante externamente e Cobertura 4 e o pior resultado foi a parede de bloco de concreto com argamassa normal externamente e Cobertura 1.

Tabela 54 – Cargas térmicas e desempenho de cada configuração no Rio de Janeiro (ZB 8)

COBERTURA 1 – Telha cerâmica + Laje maciça						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	CgTT	RedCgTT	Desempenho	CgTT	RedCgTT	Desempenho
NORM-NORM	9311	4,8%	Intermediário	9082	7,2%	Intermediário
ISO-NORM	9229	5,7%	Intermediário	9030	7,7%	Intermediário
COBERTURA 2 – Telhado verde + Laje maciça						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	CgTT	RedCgTT	Desempenho	CgTT	RedCgTT	Desempenho
NORM-NORM	7321	25,2%	Intermediário	7031	28,1%	Intermediário
ISO-NORM	7209	26,3%	Intermediário	6953	28,9%	Intermediário
COBERTURA 3 – Telha metálica + laje pré-moldada						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	CgTT	RedCgTT	Desempenho	CgTT	RedCgTT	Desempenho
NORM-NORM	6901	29,5%	Intermediário	6577	32,8%	Intermediário
ISO-NORM	6789	30,6%	Intermediário	6514	33,4%	Intermediário
COBERTURA 4 – Telha metálica + Laje maciça						
Tipo de argamassa (ext. – int.)	Tipo de alvenaria					
	Bloco de concreto			Bloco cerâmico		
	CgTT	RedCgTT	Desempenho	CgTT	RedCgTT	Desempenho
NORM-NORM	6884	29,6%	Intermediário	6565	32,9%	Intermediário
ISO-NORM	6770	30,8%	Intermediário	6497	33,6%	Intermediário

Fonte: Autor (2024)

Para o modelo de referência, a carga térmica total foi de 9785 KWh/ano. Para atingir o nível superior a redução da carga térmica (RedCgTT) deve ser maior que 55%. Todas as configurações analisadas obtiveram o nível intermediário de desempenho.

4.2.5 - Conclusões gerais dos resultados sem ventilação natural

A partir de todos os resultados para o critério de carga térmica total da UH, que é o único a não utilizar a ventilação natural, obtiveram-se as seguintes conclusões:

- a) Na ZB 1 (Curitiba) a maior parte das configurações analisadas atingiu o nível superior de desempenho, exceto aquelas compostas pela Cobertura 1.

No restante das cidades analisadas e com qualquer combinação avaliada, o nível intermediário foi atingido.

- b) Assim como nos critérios com ventilação natural, as combinações com os piores resultados foram com a Cobertura 1. Para as regiões mais frias (ZB 1 a 3), notou-se que as configurações com telhados de maior capacidade térmica (Coberturas 2 e 4) foram as que obtiveram os melhores resultados. Para regiões mais quentes, os melhores resultados foram observados utilizando os telhados de menor transmitância térmica (Coberturas 3 e 4).
- c) Novamente, a influência do telhado no desempenho foi mais impactante do que a escolha do tipo de argamassa e de alvenaria. No critério de carga térmica total da UH, observou-se que a utilização da argamassa isolante externamente, especialmente em regiões frias, teve um impacto muito baixo na carga térmica. A mudança do tipo de alvenaria, apesar de não ter um impacto tão alto quanto ao da mudança de cobertura, foi uma medida mais eficaz. O bloco cerâmico possui um melhor desempenho que o bloco de concreto.
- d) As maiores reduções de carga térmica total, em relação ao modelo de referência, foram observadas nas regiões mais frias (ZBs 1 a 3), sendo que em Curitiba atingiram-se reduções de mais de 50% com algumas combinações. Nas regiões mais quentes (ZBs 5 a 8), as reduções foram menores. Entretanto, em todas as cidades dessas regiões observaram-se combinações com reduções de carga térmica de, no mínimo, 30%.

4.3 - Análise dos resultados

Após os resultados dos procedimentos simplificado e de simulação computacional, observou-se que, de maneira geral, as composições analisadas atendem aos requisitos mínimos estabelecidos na NBR 15575, salvo algumas exceções.

O Quadro 3 apresenta um resumo do desempenho térmico do loft estudado atingido em cada zona bioclimática brasileira para cada critério avaliado.

Quadro 3 – Resumo de desempenho térmico do loft estudado nas zonas bioclimáticas

Zona Bioclimática	Critério PHFT: Todas as combinações atingem o desempenho mínimo?	Critério PHFT: Alguma combinação atinge o desempenho superior?	Critério TO: Todas as combinações atingem o desempenho superior?	Critério CgTT: Todas as combinações atingem o desempenho intermediário?	Critério CgTT: Alguma combinação atinge o desempenho superior?
ZB 1	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
ZB 2	Sim	Não	Sim	Sim	Não
ZB 3	Sim	Sim	Sim	Sim	Não
ZB 4	Sim	Não	Sim	Sim	Não
ZB 5	Sim	Não	Sim	Sim	Não
ZB 6	Sim	Não	Sim	Sim	Não
ZB 7	Não	Não	Sim	Sim	Não
ZB 8	Sim	Não	Sim	Sim	Não

Fonte: Autor (2024)

Nota-se que, no caso de zonas bioclimáticas de clima mais ameno (ZB 1 e 3), as configurações analisadas neste trabalho obtiveram um bom desempenho térmico nos critérios analisados, sobretudo em Curitiba (ZB 1). Já na zona bioclimática de clima mais quente (ZB 7), observou-se que as soluções, sobretudo as configurações com a Cobertura 1, não apresentaram um desempenho ideal visando melhor conforto térmico.

A seguir é feita uma análise para cada cidade, comparando os resultados com as recomendações adotadas na NBR15220 quanto aos tipos de vedações externas.

4.3.1 - Curitiba (ZB 1)

Observou-se que, para a cidade de Curitiba, os melhores desempenhos foram obtidos usando a Cobertura 2 e tijolo cerâmico. Os piores resultados foram obtidos utilizando a Cobertura 1 e bloco de concreto. Nesta zona bioclimática, o uso da argamassa isolante não só teve baixo impacto no resultado como piorou o desempenho da envoltória em algumas combinações. Em sua maioria, tanto nos critérios com ventilação, quanto sem ventilação, as configurações obtiveram o nível de desempenho superior.

A NBR15220, para esta zona bioclimática, conforme a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, estabelece como recomendação a utilização de paredes e coberturas leves, com limites máximos transmitância térmica e de capacidade térmica. Entretanto, neste trabalho, observou-se que os melhores resultados foram obtidos com coberturas de alta capacidade térmica, ou seja, maiores valores. Ressalta-se que baixa transmitância térmica também ajudou na melhora dos resultados. Quanto às paredes, observa-se que, de fato, os melhores resultados foram obtidos com a parede cerâmica, que possui menor transmitância térmica e menor capacidade térmica em relação à parede de concreto.

4.3.2 - Piracicaba (ZB 2)

Para Piracicaba, os melhores desempenhos foram obtidos usando a Cobertura 4 e tijolo cerâmico. Os piores resultados foram obtidos utilizando a Cobertura 1. Utilizando ventilação natural, os tipos de parede analisados tiveram pouca interferência no resultado. Nas simulações sem ventilação, observou-se que a parede cerâmica teve um melhor desempenho em comparação à de concreto. Assim como na ZB 1, o uso da argamassa isolante não só teve baixo impacto no resultado como piorou o desempenho da envoltória em algumas combinações.

A NBR15220, para esta zona bioclimática, estabelece como recomendação a utilização de paredes e coberturas leves, com limites máximos de valores de transmitâncias térmicas e de capacidade térmica. Observou-se que, quanto menor a transmitância térmica (tanto da cobertura, quanto da parede), melhores foram os resultados. Entretanto, ressalta-se que coberturas com elevada capacidade térmica também obtiveram resultados satisfatórios. Quanto às paredes, observa-se que, de fato, os melhores resultados foram obtidos com a parede cerâmica, que possui menor transmitância térmica e menor capacidade térmica em relação à parede de concreto.

4.3.3 - São Paulo (ZB 3)

Em São Paulo, os melhores desempenhos foram obtidos usando as Coberturas 2 e 4, utilizando tijolo cerâmico. Os piores resultados foram obtidos utilizando a Cobertura 1. Assim como em Piracicaba, utilizando ventilação natural, os tipos de parede analisados tiveram pouca interferência no resultado. Nas simulações sem ventilação, observou-se que a parede cerâmica teve um melhor desempenho em comparação à de concreto. Também foi

visto que o uso da argamassa isolante não só teve baixo impacto no resultado como piorou o desempenho do envelope em algumas combinações. Em sua maioria, nos critérios com ventilação, as configurações obtiveram o nível de desempenho superior.

Assim como nas ZB 1 e 2, a NBR15220, para esta zona bioclimática, estabelece como recomendação a utilização de paredes e coberturas leves, com limites máximos de valores de transmitâncias térmicas e de capacidade térmica. Foi observado um comportamento semelhante às ZB 1 e 2. Ou seja, quanto menor a transmitância térmica (tanto da cobertura, quanto da parede), melhores foram os resultados, porém coberturas com elevada capacidade térmica também obtiveram resultados satisfatórios. Quanto às paredes, observa-se que, de fato, os melhores resultados foram obtidos com a parede cerâmica, que possui menor transmitância térmica e menor capacidade térmica em relação à parede de concreto.

4.3.4 - Brasília (ZB 4)

Para Brasília, assim como em Piracicaba e São Paulo, os melhores desempenhos foram obtidos usando a Cobertura 4 e tijolo cerâmico. Os piores resultados foram obtidos utilizando a Cobertura 1. Novamente, utilizando ventilação natural, os tipos de parede analisados tiveram pouca interferência no resultado. Mais uma vez, o uso da argamassa isolante não só teve baixo impacto no resultado como piorou o desempenho do envelope em algumas combinações.

A NBR15220, para esta zona bioclimática, estabelece como recomendação a utilização de paredes pesadas e coberturas leves, ou seja, paredes com limite mínimo de capacidade térmica e coberturas com limite máximo. Quanto à transmitância térmica, as paredes e coberturas devem possuir valores mais baixos (limite máximo estabelecido na norma). Observou-se que, quanto menor a transmitância térmica (tanto da cobertura, quanto da parede), melhores foram os resultados. Entretanto, ressalta-se que: a) coberturas com elevada capacidade térmica também obtiveram resultados satisfatórios; b) parede cerâmica (que possui menor capacidade térmica) obteve, de forma geral, melhores resultados em relação à parede de concreto. Ainda em relação às paredes, observa-se que, como os melhores resultados foram obtidos com a parede cerâmica, a menor transmitância térmica proporcionou um melhor desempenho do envelope.

4.3.5 - Niterói (ZB 5)

Para Niterói, os melhores desempenhos foram obtidos usando as Coberturas 3 e 4 e tijolo cerâmico. Os piores resultados foram obtidos utilizando a Cobertura 1. Utilizando ventilação natural, os tipos de parede analisados tiveram pouca interferência no resultado. Nas simulações sem ventilação, observou-se que a parede cerâmica teve um melhor desempenho em comparação à de concreto. Além disso, também foi visto que, apesar do uso da argamassa isolante ter baixo impacto no resultado, notou-se que a argamassa isolante teve um melhor desempenho. Apenas no critério de temperaturas máximas e mínimas operativas o nível de desempenho superior é atingido.

A NBR15220, para esta zona bioclimática, estabelece como recomendação a utilização de paredes e coberturas leves, com limites máximos de valores de transmitâncias térmicas e de capacidade térmica. Observou-se que, quanto menor a transmitância térmica (tanto da cobertura, quanto da parede), melhores foram os resultados. Foi notado que a capacidade térmica das coberturas pouco influenciou no desempenho final da envoltória, mostrando que nessa zona bioclimática a transmitância térmica é o principal fator preponderante.

4.3.6 - Goiânia (ZB 6)

Para Goiânia, os melhores desempenhos foram obtidos usando a Cobertura 4 e tijolo cerâmico. Os piores resultados foram obtidos utilizando a Cobertura 1. Novamente, utilizando ventilação natural, os tipos de parede analisados tiveram pouca interferência no resultado. Mais uma vez, o uso da argamassa isolante não só teve baixo impacto no resultado como piorou o desempenho da envoltória em algumas combinações.

Assim como na ZB 4, a NBR15220, para esta zona bioclimática, estabelece como recomendação a utilização de paredes pesadas e coberturas leves, ou seja, paredes com limite mínimo de capacidade térmica e coberturas com limite máximo. Quanto à transmitância térmica, as paredes e coberturas devem possuir valores mais baixos (limite máximo estabelecido na norma). Observou-se um comportamento semelhante à cidade de Brasília: quanto menor a transmitância térmica (tanto da cobertura, quanto da parede), melhores foram os resultados. Além disso, as coberturas com elevada capacidade térmica também mostraram resultados satisfatórios e a parede cerâmica (que possui menor

capacidade térmica) obteve, de forma geral, melhores resultados em relação à parede de concreto. Ainda em relação às paredes, observa-se que, como os melhores resultados foram obtidos com a parede cerâmica, a menor transmitância térmica proporcionou um melhor desempenho do envelope.

4.3.7 - Teresina (ZB 7)

Para Teresina, os melhores desempenhos foram obtidos usando as Coberturas 3 e 4 e tijolo cerâmico. Os piores resultados foram obtidos utilizando a Cobertura 1. Utilizando ventilação natural, os tipos de parede analisados também tiveram baixo impacto no resultado. Nas simulações sem ventilação, observou-se que a parede cerâmica teve um melhor desempenho em comparação à de concreto. Além disso, também foi visto que, apesar do uso da argamassa isolante ter pouca interferência no resultado, notou-se que a argamassa isolante teve um melhor desempenho. Apenas no critério de temperaturas máximas e mínimas operativas o nível de desempenho superior é atingido, sendo que no critério de horas dentro da faixa de temperatura operativa, as combinações com as Coberturas 1 e 2 não atingem nem o desempenho mínimo.

A NBR15220, para esta zona bioclimática, estabelece como recomendação a utilização de paredes e coberturas pesadas. Portanto, pela norma, deve-se utilizar paredes e coberturas com limites máximos de transmitância térmica, com limites mínimos de capacidade térmica. Observou-se que, quanto menor a transmitância térmica (tanto da cobertura, quanto da parede), melhores foram os resultados. Entretanto, foi notado que a capacidade térmica das coberturas pouco influenciou no desempenho final da envoltória, mostrando que nessa zona bioclimática a transmitância térmica é o principal fator preponderante.

4.3.8 - Rio de Janeiro (ZB 8)

Para o Rio de Janeiro, os desempenhos e análises dos componentes foram praticamente idênticas à cidade de Niterói (ZB 5), justificado pela pouca distância geográfica entre as cidades. Além disso, ressalta-se que as recomendações da NBR 15220 também são as mesmas: paredes e coberturas leves.

4.3.9 - Resumo:

O Quadro 4, a seguir, apresenta um resumo da análise das soluções construtivas estudadas para o *loft*, destacando aqueles elementos ou componentes cujos resultados de desempenho térmico podem ser considerados os “melhores” e os “piores” para cada zona bioclimática. O fato de os tipos de revestimento (argamassa isolante ou argamassa normal externa e interna) não constarem nessa análise significa que não influenciaram, de modo favorável ou desfavorável, a ponto de alterar a conclusão, em uma mesma zona bioclimática.

Quadro 4 – Resumo das diretrizes para cada zona bioclimática

Zona Bioclimática	Melhores soluções	Piores soluções
ZB 1	Cobertura 2 e bloco cerâmico	Cobertura 1 e bloco de concreto
ZB 2	Cobertura 4 e bloco cerâmico	Cobertura 1
ZB 3	Coberturas 2 e 4 e bloco cerâmico	Cobertura 1
ZB 4	Cobertura 4 e bloco cerâmico	Cobertura 1
ZB 5	Coberturas 3 e 4 e bloco cerâmico	Cobertura 1
ZB 6	Cobertura 4 e bloco cerâmico	Cobertura 1
ZB 7	Coberturas 3 e 4 e bloco cerâmico	Cobertura 1
ZB 8	Coberturas 3 e 4 e bloco cerâmico	Cobertura 1

Fonte: Autor (2024)

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente dissertação teve como objetivo avaliar diferentes combinações de componentes da envoltória de edificações habitacionais quanto ao desempenho térmico, estudando um *loft* idealizado especialmente para esta pesquisa. A escolha do *loft* se deu por motivo de simplificação do trabalho, considerando-se que para uma edificação de vários ambientes a análise deve ser feita para cada um separadamente, de acordo com a normalização técnica em vigor. Assim, manteve-se a finalidade principal de avaliação da envoltória de uma habitação nas zonas bioclimáticas brasileiras. Esta avaliação foi limitada a soluções construtivas convencionais no território brasileiro: dois tipos de alvenaria (bloco cerâmico e bloco de concreto), dois tipos de argamassa de revestimento de características térmicas distintas – uma (normal e uma isolante - e a quatro tipos de coberturas. O estudo foi aplicado em todas as zonas bioclimáticas, visando contribuir para a geração de dados e melhoria do processo de escolha de soluções construtivas para essas regiões. Todos os cálculos do procedimento simplificado foram feitos em uma planilha eletrônica (Excel[®]) e as simulações computacionais foram realizadas por meio do programa computacional TRNSYS 17.

As conclusões obtidas neste estudo servem apenas como uma referência para o desempenho térmico de ambientes com características similares às escolhidas no presente trabalho. Os valores absolutos obtidos podem variar para outras situações. Apesar de os parâmetros estudados terem sido avaliados em oito zonas diferentes, observou-se que a eficiência das técnicas manteve certo padrão, ou seja, algumas conclusões podem ser estendidas a todas as zonas bioclimáticas.

As reduções dos valores de transmitância térmica nas coberturas analisadas interferem diretamente no desempenho do modelo estudado. Em todas as cidades analisadas, as combinações com a cobertura com maior valor de U apresentaram os piores resultados. Além disso, observou-se que, dentre os componentes construtivos estudados, a variação do tipo de cobertura foi a que teve mais impacto nos resultados.

Em regiões mais quentes (ZB 5 a 8), a utilização de coberturas com menor transmitância térmica gerou melhor desempenho térmico da edificação. Além disso, a variação da capacidade térmica da cobertura causou baixo impacto, mostrando ser um fator

pouco significativo no desempenho térmico da habitação em regiões quentes. Em contrapartida, em regiões mais frias (ZB 1 e 3), o uso de coberturas com maiores capacidades térmicas proporcionou melhor desempenho térmico da edificação. Menores valores de transmitância também contribuíram para a obtenção de melhores resultados. Porém, em regiões frias, a capacidade térmica também se mostrou ser um fator impactante.

Quanto à alvenaria, observou-se que o bloco cerâmico, de modo geral, apresentou melhor desempenho térmico que o bloco de concreto. Apesar da mudança do tipo de bloco não ter um impacto tão alto como a variação de cobertura, esta técnica se mostrou mais eficaz do que a mudança do tipo de argamassa empregada externamente.

A utilização da argamassa isolante só se mostrou uma técnica eficiente em regiões quentes (ZB 5 a 8). Entretanto, não gerou impacto significativo na redução do consumo energético. Em regiões mais frias, observou-se pior desempenho térmico do *loft* com o uso da argamassa isolante. Portanto, não é considerada uma boa solução a utilização da argamassa externa isolante, sobretudo em regiões frias.

A NBR 15220 indica coberturas leves nas zonas bioclimáticas de clima predominantemente frio (ZBs 1 a 3), estabelecendo limites máximos de capacidade térmica. Entretanto, observou-se que, nessas zonas bioclimáticas, uma elevada capacidade térmica da cobertura se mostrou uma boa técnica, divergindo da diretriz da norma. Diante dos resultados e análises feitas para o desempenho térmico na edificação em todas as zonas bioclimáticas, pode-se concluir que: a utilização de coberturas com baixos valores de transmitância térmica e o bloco cerâmico são soluções potencialmente mais adequadas para se obter edifícios mais eficientes termicamente, ou seja, mais sustentáveis. Além disso, para regiões frias, o uso de coberturas com maior capacidade térmica se mostrou também uma técnica eficiente.

Com exceção da cidade de Curitiba (ZB1), apenas o nível intermediário de desempenho térmico é atingido no critério de cargas térmicas totais. Porém, ressalta-se que, em todas as cidades analisadas, foi possível obter redução do consumo energético considerável em relação ao modelo de referência. Em qualquer zona bioclimática, as configurações com coberturas de menores valores de U atingiram redução de, no mínimo, 30% da carga térmica.

À luz das normas técnicas em vigor usadas como parâmetro diretrizes do trabalho, verificou-se que a metodologia de cálculos para avaliação de desempenho térmico não é trivial e passa pela adoção de inúmeras condições ao longo do processo, tanto para o procedimento simplificado como para a simulação computacional, exigindo treino e conhecimento na área. Acredita-se que esse fator possa ser desestimulante para escritórios de projeto e empresas de construção, no sentido de, de fato, realizarem uma análise mais aprofundada de seus projetos no quesito desempenho térmico. Fica, portanto, a reflexão para trabalhos futuros no sentido de contemplar sugestões de simplificação do processo, isto é, das normas.

Em paralelo a isso, observa-se que a norma estabelece poucos níveis de classificação de desempenho, sendo esse ator um obstáculo para uma avaliação justa de cada tipo de envoltória. No caso do critério de carga térmica, por exemplo, o nível intermediário abrange uma ampla faixa de resultados que podem estar distantes uns dos outros. Isso pode gerar uma classificação que não considera diferenças maiores entre os resultados de uma mesma classe.

Trabalhos futuros sobre temas correlatos podem ser feitos para edificações de uso misto (*lofts*) com dimensões diferentes, assim como seria interessante verificar a influência da variação dos tamanhos das aberturas de vãos para portas e janelas, proporcionalmente à área do cômodo. Outra sugestão a análise de uma edificação com mais de um pavimento, com o objetivo de avaliar a influência térmica de ambientes contíguos.

Espera-se ter contribuído para a discussão sobre desempenho térmico das edificações nas regiões climáticas brasileiras, dando destaque à sua envoltória no que concerne a características de alvenaria, revestimento e coberturas bastante comuns no cenário brasileiro.

Finalmente, acredita-se que o trabalho tenha contribuído para a melhoria do processo de escolha de soluções construtivas em projetos de edificações para as zonas bioclimáticas brasileiras, com o fornecimento de dados dos casos estudados e com demonstração da prática dos cálculos das normas de desempenho térmico, com vistas à redução do consumo de energia e do conforto dos usuários.

REFERÊNCIAS

- AL-OBAIDI, Karam M.; ISMAIL, Mazran; RAHMAN, Abdul Malek Abdul. Passive cooling techniques through reflective and radiative roofs in tropical houses in Southeast Asia: A literature review. **Frontiers of Architectural Research**, v. 3, n. 3, p. 283-297, 2014.
- ARCHDAILYBRASIL. Disponível em <https://www.archdaily.com.br/br/899167/como-calcular-a-transmitancia-termica-valor-u-na-envoltoria-de-um-edificio> Acesso em 11 set. 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: Edificações habitacionais — Desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220: Desempenho térmico de edificações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220: Desempenho térmico de edificações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- ATAÍDE, Carolina Marieli; PIOVESAN, Tenile Rieger. Análise comparativa de desempenho térmico e acústico entre vedações internas de alvenaria de bloco cerâmico e bloco de concreto celular autoclavado. 2019.
- Bavaresco, M. V., Mazzaferro, L., Melo, A. P., & Lamberts, R. Classificação de climas brasileiros empregada na atualização dos Regulamentos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações. **CB3E Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações**. Florianópolis, 2017.
- BRAGA, Mariana Rodrigues. Requisitos para Certificação da Eficiência Energética de Edifícios Comerciais: Uma Análise Comparativa Brasil x Portugal. 2016. Tese de Doutorado. Instituto Politecnico do Porto (Portugal).
- BRASIL, Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional 2021: Ano base 2020**. Rio de Janeiro: EPE, 2021.
- BRASIL, Ministério de Minas e Energia. Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética. 2018.
- BRASIL. Lei n. 10.295, de 17 de outubro de 2001. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e dá outras sprovedências. Brasília: Diário Oficial da União, 2001. Disponível em http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/110295.htm. Acesso em 14 nov. 2023.
- BRITO, Adriana Camargo *et al.*. The effect of wall thermal capacity and thermal resistance in the energy efficiency of small office. 2014, Anais. Atlanta, Ga: Ashrae, 2014.
- CASTRO, Y. V. P. Estudo de transmitância térmica de paredes e sua influência no consumo de energia de uso de edificações. Trabalho de Conclusão de Curso. Juiz de Fora: UFJF, 2019.
- D'AGOSTINO, Diana *et al.* Experimental Study on the Performance Decay of Thermal Insulation and Related Influence on Heating Energy Consumption in Buildings. **Sustainability**, v. 14, n. 5, p. 2947, 2022.

DA SILVA, L. R. M. C. **Análise técnico/financeira de paredes exteriores em panos simples**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 2007.

DALBEM, Renata *et al.* Optimisation of a social housing for south of Brazil: From basic performance standard to passive house concept. **Energy**, v. 167, p. 1278-1296, 2019.

DAMDELEN, Omer. Influences of construction material type and water-cement ratio reduction on thermal transmittance of sustainable concrete mixes. **Construction and Building Materials**, v. 196, p. 345-353, 2019.

DORNELLES. K. A. Biblioteca de absorvância de telhas. Base de dados para análise de desempenho termoenergético de edifícios. Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo - IAU - USP, São Paulo, 2021.

EL KADIRI, Sara *et al.*. Thermal performance of a residential building in Ben Guerir City: A comparative evaluation for an optimized thermal load needs. In: **2018 6th international renewable and sustainable energy conference (IRSEC)**. IEEE, 2018. p. 1-8.

FERREIRA, S. A. **Estudo do desempenho térmico e acústico nas alvenarias**. Trabalho de Conclusão de Curso. Formiga: UNIFOR, 2015. 67p.

FRANCO, Luiza Carvalho *et al.*. Design and thermal evaluation of a social housing model conceived with bioclimatic principles and recycled aggregates. **Sustainable Cities and Society**, v. 51, p. 101725, 2019.

GARCIA, Bruno Rafael Godoi *et al.* Alvenaria estrutural, sistemas construtivos e suas diferenças para a alvenaria convencional. **Revista Engenharia em Ação UniToledo**, v. 4, n. 1, 2019.

GUILHERME, Deize Daiane Pinto. Estudo do desempenho térmico e mecânico em argamassas de revestimento com substituição do agregado natural pela vermiculita expandida. 2019. Dissertação de Mestrado. UFRN.

INMETRO. **Manual para Aplicação do RQT-C**. 4. ed. Florianópolis, SC, 2017. 212 p

INNOCENT, Lovelyn Theresa; RAMALINGAM, Velraj. Evaluation of thermal properties of cement-exfoliated vermiculite blocks as energy efficient building envelope material. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 47, n. 5, p. 3480-3495, 2018.

KAMENI NEMATCHOUA, Modeste; VANONA, Jean Christophe; OROSA, José A. Energy efficiency and thermal performance of office buildings integrated with passive strategies in coastal regions of humid and hot tropical climates in Madagascar. **Applied Sciences**, v. 10, n. 7, p. 2438, 2020.

KUMAR, G. Kiran; SABOOR, S.; BABU, TP Ashok. Study of various glass window and building wall materials in different climatic zones of India for energy efficient building construction. **Energy Procedia**, v. 138, p. 580-585, 2017.

KUMAR, Vinod; MAHALLE, A. M. Green Roofs for Energy Conservation and Sustainable Development. **International Journal of Applied Engineering Research**, v. 11, n. 4, p. 2776-2780, 2016.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energetic na arquitetura**. 3. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 2014. 366 p.

LAMBERTS, Roberto; GHISI, Enedir; PAPST, Ana L. Desempenho térmico de edificações. **Universidade Federal**, 2000.

LAZZARIN, Renato M.; CASTELLOTTI, Francesco; BUSATO, Filippo. Experimental measurements and numerical modelling of a green roof. **Energy and Buildings**, v. 37, n. 12, p. 1260-1267, 2005.

LEROY MERLIN. Disponível em https://www.leroymerlin.com.br/bloco-ceramico-vedacao-11,5x14x24cm-ceramica-nova-conquista_89247095?region=grande_sao_paulo&gclid=EA1aIQobChMIh7r0rY-f-wIVKuxcCh1yrwXYEAQYASABEgJFZfd_BwE Acesso em 28 set. 2022.

LEROY MERLIN. Disponível em https://www.leroymerlin.com.br/bloco-de-concreto-vedacao-vazado-19x19x39cm-blojaf_87707690 Acesso em 28 set. 2022.

LEROY MERLIN. Disponível em https://www.leroymerlin.com.br/telha-ceramica-40,40-cm-x-24,10-portuguesa-resinada-vermelha-barbello_88431042 Acesso em 27 mar. 2023.

LEROY MERLIN. Disponível em https://www.leroymerlin.com.br/telha-fibrocimento-2,44mx1,10mx5mm-brasilit_89131392 Acesso em 27 mar. 2023.

MACHADO, M.; BRITO, C.; NEILA, J. Comportamento térmico em modelos com cubiertas ecológicas. **Tecnología y Construcción**, Caracas, v. 19, n.3, p. 49-58. 2003.

MARTINS, Tathiane Agra de Lemos; BITTENCOURT, Leonardo Salazar; KRAUSE, Cláudia Mariz de Lyra Barroso. Contribuição ao zoneamento bioclimático brasileiro: reflexes sobre o semiárido nordestino. **Ambiente Construído**, v. 12, p. 59-75, 2012.

MICHELS, C. Análise da transferência de calor em coberturas com barreiras radiantes. Dissertação de mestrado. Florianópolis: UFSC, 2007.

MICHELS, C. **Avaliação experimental do desempenho térmico de coberturas**. 2018. Tese (doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

MINKE, G. (2003). **Techosverdes**. Planificación, ejecución, consejos prácticos. Montevideo: Fin de Siglo.

MOURID, Amina; EL ALAMI, Mustapha. Thermal behavior of a building provided with phase-change materials on the roof and exposed to solar radiation. **Journal of Solar Energy Engineering**, v. 139, n. 6, 2017.

OMENA, Thiago Henrique; DE PAULA MACEDO, Lorrán Michael; DE OLIVEIRA, Mariela Cristina Ayres. Comparação do desempenho térmico em vedações por alvenaria convencional e steel frame em Palmas-TO. **Peer Review**, v. 5, n. 8, p. 215-234, 2023.

PENNACCHIA, Elisa *et al.* Reuse and upcycling of municipal waste for zebenvelope design in European urban areas. **Sustainability**, v. 8, n. 7, p. 610, 2016.

PEREIRA, C, D. 2009. A Influência do Envoltória no Desempenho Térmico de Edificações Residenciais Unifamiliares Ocupadas e Ventiladas Naturalmente. Dissertação de mestrado. Florianópolis: UFSC, 2009.

PIMENTA, José Augusto Alves *et al.* Estudo comparativo do desempenho térmico das coberturas de fibra de celulose e betume, fibrocimento e cerâmica. In: **Colloquium Exactarum**. ISSN: 2178-8332. 2016. p. 21-35.

PROCEL - INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. Anexo da Portaria INMETRO nº 50/2013. Anexo Geral V - Catálogo de propriedades térmicas de paredes, coberturas e vidros.

PROCEL. INI-R. Disponível em: <http://www.pbeedifica.com.br/inir>. Acesso em: 29 set. 2022.

RAMOS, Greicetal.. Adaptive behaviour and air conditioning use in Brazilian residential buildings. **Building Research & Information**, v. 49, n. 5, p. 496-511, 2021.

SCHIAVONI, Samuel *et al.* Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 62, p. 988-1011, 2016.

SIMABUKULO, Lucas Antonio Nizuma *et al.* Energia, industrialização e modernidade: história social. **Energia e Saneamento**. Disponível em: < <http://www.museudaenergia.org.br/media/63129/03.pdf>>, v. 7, 2006.

SOARES, Mariáh Pereira Soares Pessanha *et al.* Uma revisão bibliográfica de medidas de eficiência energética em edifícios. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego**, v. 15, n. 2, p. 32-47, 2021.

SOCACIU, Lavinia Gabriela. Thermal energy storage with phase change material. **Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies**, v. 20, p. 75-98, 2012.

SORGATO, Marcio J.; MELO, Ana Paula; LAMBERTS, Roberto. The effect of window opening ventilation control on residential building energy consumption. **Energy and Buildings**, v. 133, p. 1-13, 2016.

SORGATO, Marcio José *et al.* A influência do comportamento do usuário no desempenho térmico e energético de edificações residenciais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.

SPALA, A. *et al.* On the green roof system. Selection, state of the art and energy potential investigation of a system installed in an office building in Athens, Greece. **Renewable Energy**, v. 33, n. 1, p. 173-177, 2008.

SPINELLI, Rodrigo *et al.* Isolamento térmico de fachadas: redução do consumo energético de edificações para Zona Bioclimática 2. **Sustainability in Debate**, v. 9, n. 1, p. 172-186, 2018.

TSANG, S. W.; JIM, Chi Yung. Theoretical evaluation of thermal and energy performance of tropical green roofs. **Energy**, v. 36, n. 5, p. 3590-3598, 2011.

VETTORAZZI, Egon *et al.* Optimization of the passive house concept for residential buildings in the South-Brazilian region. **Energy and Buildings**, v. 240, p. 110871, 2021.

VIANA, Marina Ribeiro; BARBOSA, Matheus Mendonça; GHISI, Enedir. Influência da operação de janelas e de venezianas no desempenho térmico de residências. **ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO**, v. 17, p. 1-10, 2023.

YILMAZ, Z. Evaluation of energy efficient design strategies for different climatic zones: Comparison of thermal performance of buildings in temperate-humid and hot-dry climate. **Energy and buildings**, v. 39, n. 3, p. 306-316, 2007.