

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo



Dissertação

Análise do desempenho térmico de uma espuma vítrea aplicada em habitação de
interesse social

Juliana Neumann Seixas

Pelotas, 2020

Juliana Neumann Seixas

Análise do desempenho térmico de uma espuma vítrea aplicada em habitação de interesse social

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Pelotas, como requisito à obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Linha de pesquisa: Conforto e Sustentabilidade do Ambiente Construído

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Grala da Cunha

Coorientadora: Profa. Dra. Margarete R. F. Gonçalves

Pelotas, 2020

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

S457a Seixas, Juliana Neumann

Análise do desempenho térmico de uma espuma vítrea aplicada em habitação de interesse social / Juliana Neumann Seixas ; Eduardo Grala da Cunha, orientador ; Margarete R. F. Gonçalves, coorientador. — Pelotas, 2020.
97 f.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, 2020.

1. Espuma vítrea. 2. Simulação computacional. 3. Desempenho térmico. 4. Zonas bioclimáticas brasileiras. I. Cunha, Eduardo Grala da, orient. II. Gonçalves, Margarete R. F., coorient. III. Título.

CDD : 728

Juliana Neumann Seixas

Análise do desempenho térmico de uma espuma vítrea aplicada em habitação de interesse social

Dissertação aprovada, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Arquitetura e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 15/12/2020

Banca examinadora:

Prof. Dr. Eduardo Grala da Cunha (Orientador), UFPel

Doutor em Arquitetura pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dra. Margarete R. Freitas Gonçalves (Coorientadora), UFPel

Doutora em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Profa. Dra. Celina Maria Britto Correa, UFPel

Doutora em Arquitetura pela Universidade Politécnica de Madrid

Prof. Dr. Rubens Camaratta, UFPel

Doutor em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Profa. Dra. Amanda Dantas de Oliveira, UFPel

Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de São Carlos

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida.

Aos meus pais e irmã, Gelson, Clara e Daniela, por me proporcionarem as condições essenciais para a finalização dessa etapa. Pelo amor, incentivo e paciência.

À UFPel, FAUrb e ao PROGRAU, pela oportunidade da pesquisa interdisciplinar e de qualidade.

Ao meu orientador, Eduardo Grala, pelo acolhimento, orientações, conhecimentos transmitidos e incentivos de buscar novas perspectivas, que tanto fizeram diferença.

À minha coorientadora, Margarete Gonçalves, quem me acompanha e direciona desde a graduação. Pela amizade, conversas e apoio durante todos estes anos.

Aos colegas e professores do LABCEE e GES3E, pela troca de conhecimento e convívio. Em especial ao colega Rodrigo Leitzke, que colaborou com a realização das simulações, além de todo auxílio e profissionalismo perante o assunto. Ao LAPEM, em destaque ao professor Rubens Camaratta e ao bolsista Frantchescole Cardoso que, juntamente com seus colegas de laboratório, auxiliaram na troca de informações e auxílio na parte inicial do trabalho.

Obrigada.

Resumo

SEIXAS, Juliana Neumann. **Análise do desempenho térmico de uma espuma vítrea aplicada em habitação de interesse social**. Orientador: Eduardo Grala da Cunha. 2020. 97 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2020.

Em decorrência dos gastos energéticos mundiais, e o consumo elevado das edificações residenciais, é cada vez maior a procura pela eficiência energética neste setor. O desenvolvimento sustentável, que ocorre também através da redução do consumo, pode ser aprimorado através de novas tecnologias e ferramentas que auxiliem no controle de consumo e conforto destas edificações. Neste sentido, o presente trabalho buscou a avaliação, por meio de simulação computacional, do desempenho de uma espuma vítrea comercial quando aplicada em uma habitação de interesse social, com objetivo de melhorar a eficiência das edificações, através do aumento do conforto térmico e redução do gasto de energia das mesmas. Para tal, foi definida a tipologia e geometria do objeto base de estudo, a modelagem e configurações do caso base e dos casos otimizados com ventilação natural e condicionamento artificial, utilizando espessuras de isolamento térmico na cobertura de 2,3 cm, 1 cm e 0,5 cm, além de espessuras para as paredes de 2,5 cm, 1,5 cm e 0,5 cm. Ainda, foram realizadas outras 9 combinações entre paredes e coberturas, a fim de verificar quais configurações seriam mais eficientes. Foi possível comprovar que a otimização C1P1, a qual apresenta maiores espessuras de isolamento tanto na cobertura quanto nas paredes, obteve os melhores resultados quando utilizada a ventilação natural, para a zona bioclimática 1, caracterizada como uma zona mais fria e onde há as maiores diferenças nos percentuais de conforto. Ainda, para os casos condicionados artificialmente, apesar dos menores gastos de energia aparecerem na zona bioclimática 3, o isolante também se comportou melhor na zona bioclimática 1, onde, por sua vez, reduziu significativamente os consumos de energia.

Palavras-chave: Espuma vítrea. Simulação computacional. Desempenho térmico. Zonas bioclimáticas brasileiras.

Abstract

SEIXAS, Juliana Neumann. **Analysis of the thermal performance of a glassy foam applied in social housing**. Advisor: Eduardo Grala da Cunha. 2020. 97 f. Dissertation (Masters in Architecture and Urbanism) – Program of Posgraduation in Architecture and Urbanism, University of Pelotas, Pelotas, 2020.

As a result of global energy expenditure, and the high consumption of residential buildings, the demand for energy efficiency in this sector is increasing. Sustainable development, which also occurs through the reduction of consumption, can be improved through new technologies and tools that assist in the control of consumption and comfort of these buildings. In this sense, the present work sought to evaluate, through computer simulation, the performance of a commercial glassy foam, when applied in a social housing, with the objective of improving the efficiency of buildings, by increasing thermal comfort and reducing the energy expenditure. For this purpose, the typology and geometry of the base object of study was defined, the modeling and configurations of the base case and the optimized cases with natural ventilation and artificial conditioning, using thermal insulation thicknesses of 2.3 cm, 1 cm and 0, 5 cm, plus wall thicknesses of 2.5 cm, 1.5 cm and 0.5 cm. Still, 9 other combinations were made between walls and roofs, in order to verify which configurations would be more efficient. It was possible to prove that the C1P1 optimization, which has greater insulation thickness both on the roof and on the walls, obtained the best results when using natural ventilation, for the bioclimatic zone 1, characterized as a colder zone and where there are the greatest differences comfort percentages. Still, for the artificially conditioned cases, despite the lower energy expenditures, they appeared in the bioclimatic zone 3, the insulator also performed better in the bioclimatic zone 1, where, in turn, significantly reduced energy consumption.

Keywords: Glass foam. Computational simulation. Thermal performance. Bioclimatic zones.

Lista de Figuras

Figura 1 - Consumo por uso final em residências.	15
Figura 2 - Convecção em meio líquido.	25
Figura 3 - Radiação solar e vegetação.	27
Figura 4 - Trocas de calor por radiação em edifícios e Efeito Estufa.	28
Figura 5 - Exemplo de espuma vítrea obtida com 5% de SiC com poros de tamanhos entre a) 106-75 µm e b) 53-75 µm.	33
Figura 6 - Características da FOAMGLAS® T4+	36
Figura 7 - Zoneamento bioclimático brasileiro.	41
Figura 8 - Fluxograma das etapas do método de pesquisa.	45
Figura 9 - Perspectiva do estudo de caso.	46
Figura 10 - Planta baixa do estudo de caso (caso-base).	46
Figura 11 - Modelo do caso base no SketchUp – Fachadas leste e sul.	48
Figura 12 - Modelo do caso base no SketchUp – Fachadas oeste e norte.	48
Figura 13 - Ocupação - dias de semana.	52
Figura 14 - Ocupação - finais de semana.	52
Figura 15 - Iluminação - dias de semana.	53
Figura 16 - Iluminação - Finais de semana.	54
Figura 17 - Temperatura operativa de conforto em função da temperatura média ...	62
Figura 18 - Resultado do consumo de energia anual para o caso base.	64
Figura 19 - Conforto adaptativo médio das zonas bioclimáticas.	68
Figura 20 - Índice percentual do conforto térmico das ZT1 ventiladas naturalmente.	69
Figura 21 - Índice percentual do conforto térmico das ZT2 ventiladas naturalmente.	70
Figura 22 – Índice percentual do conforto térmico das ZT3 ventiladas naturalmente.	71
Figura 23 - Índice percentual do conforto térmico das ZT4 ventiladas naturalmente.	72
Figura 24 - Conforto térmico adaptativo médio dos edifícios ventilados naturalmente na ZB1.	73
Figura 25 - Conforto térmico adaptativo médio dos edifícios ventilados naturalmente na ZB2.	73

Figura 26 - Conforto térmico adaptativo médio dos edifícios ventilados naturalmente na ZB3.....	74
Figura 27 - Índice percentual do conforto térmico das ZT1 condicionadas artificialmente.	75
Figura 28 - Índice percentual do conforto térmico das ZT2 condicionadas artificialmente.	76
Figura 29 - Índice percentual do conforto térmico das ZT3 condicionadas artificialmente.	76
Figura 30 - Consumo anual de energia das ZT1 condicionadas artificialmente.	77
Figura 31 - Consumo anual de energia das ZT2 condicionadas artificialmente.	77
Figura 32 - Consumo anual de energia das ZT3 condicionadas artificialmente.	78
Figura 33 - Consumo anual de energia por área de construção condicionada artificialmente.	80
Figura 34 - Consumo anual de energia por aquecimento por área de construção condicionada artificialmente.	81
Figura 35 - Consumo anual de energia por resfriamento por área de construção condicionada artificialmente.	82

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Condutividade térmica dos materiais	28
Tabela 2 - Propriedades e áreas de aplicação das espumas vítreas	34
Tabela 3 - Área do envelope opaco, translúcido e percentual de abertura na fachada	47
Tabela 4 - Características das zonas térmicas.....	48
Tabela 5 - Transmitância térmica, atraso térmico admissíveis para cada tipo de vedação.....	49
Tabela 6 - Composição das paredes externas	50
Tabela 7 - Composição das paredes internas	50
Tabela 8 - Composição da cobertura	51
Tabela 9 - Composição da laje de piso	51
Tabela 10 - Características climáticas das três cidades.....	54
Tabela 11 - Dias típico das três cidades correspondentes às zonas bioclimáticas ...	55
Tabela 12 - Temperaturas médias mensais do solo do caso base nas ZB1, ZB2 e ZB3.....	56
Tabela 13 - Propriedades e espessuras da espuma vítrea	58
Tabela 14 - Composição da cobertura – Otimização C1	58
Tabela 15 - Composição da cobertura – Otimização C2.....	59
Tabela 16 - Composição da cobertura – Otimização C3.....	59
Tabela 17 - Composição da parede externa – Otimização P1	60
Tabela 18 - Composição da cobertura – Otimização P2	60
Tabela 19 - Composição da cobertura – Otimização P3	61
Tabela 20 - Espessura das espumas vítreas nas otimizações combinadas	62
Tabela 21 - Resultado do consumo de energia anual para caso base.....	64
Tabela 22 - Percentual de conforto e desconforto das zonas térmicas do caso base condicionado artificialmente	66
Tabela 23 - Percentual de conforto e desconforto das zonas térmicas do caso base ventilado naturalmente	66
Tabela 24 - Área das zonas térmicas.....	67

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
ASTM C168	<i>American Society for Testing and Materials</i>
C1	Cobertura com espuma vítrea de espessura 0,023 metros
C1P1	Otimização com Cobertura com espuma vítrea de 0,023 m e Parede com espuma vítrea de 0,025 metros
C1P2	Otimização com Cobertura com espuma vítrea de 0,023 m e Parede com espuma vítrea de 0,015 metros
C1P3	Otimização com Cobertura com espuma vítrea de 0,023 m e Parede com espuma vítrea de 0,005 metros
C2	Cobertura com espuma vítrea de espessura 0,01 metros
C2P1	Otimização com Cobertura com espuma vítrea de 0,01 m e Parede com espuma vítrea de 0,025 metros
C2P2	Otimização com Cobertura com espuma vítrea de 0,01 m e Parede com espuma vítrea de 0,015 metros
C2P3	Otimização com Cobertura com espuma vítrea de 0,01 m e Parede com espuma vítrea de 0,005 metros
C3	Cobertura com espuma vítrea de espessura 0,005 metros
C3P1	Otimização com Cobertura com espuma vítrea de 0,005 m e Parede com espuma vítrea de 0,025 metros
C3P2	Otimização com Cobertura com espuma vítrea de 0,005 m e Parede com espuma vítrea de 0,015 metros
C3P3	Otimização com Cobertura com espuma vítrea de 0,005 m e Parede com espuma vítrea de 0,005 metros
COP	Coeficiente de Performance
CRT	Tubo de Raio Catódico
Eletrobras	Centrais Elétricas Brasileiras S.A.
ENCE	Etiqueta Nacional de Conservação de Energia
EPS	Poliestireno Expandido
IEA	<i>International Energy Agency</i>

MME	Ministério de Minas e Energia
MMW	Ministério de Minas e Energia
NBR	Norma Brasileira Registrada
P1	Parede com espuma vítrea de espessura 0,025 metros
P2	Parede com espuma vítrea de espessura 0,015 metros
P3	Parede com espuma vítrea de espessura 0,005 metros
PMCMV	Programa Minha Casa Minha Vida
PNEf	Plano Nacional de Eficiência Energética
Procel	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PU	Poliuretano
RTQ-C	Regulamento Técnico de Qualidade para Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos
RTQ-R	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais
SLS	vidros planos de recipientes
ZB1	Zona Bioclimática 1 – Curitiba
ZB2	Zona Bioclimática 2 – Pelotas
ZB3	Zona Bioclimática 3 - Florianópolis
ZT1	Zona Térmica 1 – Dormitório 1
ZT2	Zona Térmica 2 – Dormitório 2
ZT3	Zona Térmica 3 – Sala Estar/Cozinha
ZT4	Zona Térmica 4 – Banheiro

Sumário

1. INTRODUÇÃO	14
1.1.2 Objetivos específicos.....	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 Propriedades térmicas dos materiais	20
2.1.1 Condutividade térmica	22
2.1.2 Condução	23
2.1.3 Convecção.....	25
2.1.4 Radiação	26
2.2 Isolantes térmicos	30
2.2.1 Classificação dos isolantes.....	31
2.3 Sólidos celulares	32
2.3.1 Espumas vítreas.....	33
2.3.2 Produção de espumas vítreas alternativas.....	36
2.4 Desempenho térmico das edificações.....	38
2.4.1 Normas e Regulamentos	39
2.5 Simulação Computacional.....	42
2.5.1 EnergyPlus®.....	43
3. MÉTODO.....	44
3.1 Etapas de pesquisa.....	44
3.2 Definição do objeto de estudo.....	45
3.3 Modelagem e configuração da edificação do caso base.....	47
3.3.1 Modelagem.....	47
3.3.3 Fechamento vertical equivalente (transmitância e capacidade térmica dos elementos construtivos)	49
3.3.4 Configuração de ocupação, iluminação e equipamentos	51
3.3.5 Arquivos climáticos	54
3.3.6 Definição de temperatura do solo	56

3.3.7	Configuração do sistema de climatização artificial e de ventilação natural	57
3.4	Configuração dos edifícios otimizados	57
3.4.1	Isolamento da cobertura	58
3.4.2	Isolamento das paredes	60
3.4.3	Isolamento das paredes e cobertura	61
3.5	Método de avaliação do desempenho térmico	62
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
4.1	Caso base	64
4.2	Conforto por zona térmica dos casos otimizados com ventilação natural	69
4.3	Conforto e consumo anual de energia dos casos otimizados com condicionamento artificial	74
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	83
5.1	Limitações da pesquisa	83
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	84
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85

1. INTRODUÇÃO

Apesar da falta de acesso à eletricidade para 850 milhões de pessoas em todo o mundo, em 2018 o consumo de energia elétrica mundial, desconsiderando as perdas por transmissão, chegou a 21.971 TWh. No Brasil houve um aumento de 1,4% do consumo de energia elétrica em relação ao ano anterior, o que totaliza 535,4 TWh, sendo considerada a segunda maior fonte de energia utilizada, perdendo apenas para o petróleo (IEA, 2019).

O aumento da preocupação brasileira com o setor de energia nacional e a estimativa de uma demanda em alta nas próximas décadas (UNDP, 2019), em conjunto da falta de novas políticas de eficiência energética e de esforços para tornar as medidas existentes mais rigorosas (IEA, 2019), faz-se necessária a otimização e conservação dos recursos energéticos em todos os segmentos.

A melhoria da eficiência energética é o elemento mais importante que pode levar o mundo ao cenário de desenvolvimento sustentável, ocorre através da redução do consumo, tanto por meio de conscientização como, também, pelas abordagens inovadoras, através da utilização de tecnologias e ferramentas digitais (IEA, 2019). Além do entendimento dos conceitos de eficiência energética que, por sua vez, entende-se ser uma característica relativa à edificação que represente o seu potencial de possibilitar o conforto térmico, visual e acústico dos usuários com consumos de energia baixa (LAMBERTS *et al.*, 1997).

A melhoria da eficiência energética nos setores residencial e público, por exemplo, proporcionaram uma ampla gama de benefícios sociais, ambientais e econômicos, incluindo segurança energética, criação de empregos, redução da pobreza, melhoria da saúde e redução da emissão de gases de efeito estufa (UNDP, 2019). Por isso, a arquitetura e seus elementos construtivos devem buscar se adequar para que uma edificação proporcione as mesmas condições ambientais com menor custo de energia, sendo considerado mais eficiente energeticamente. (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

Em 2001, após a crise do setor energético no Brasil, esse cuidado com a conservação de energia foi evidenciado e induziu o governo a implementar políticas públicas em relação a eficiência energética das edificações. Foi aprovada, então, em outubro de 2001 a Lei 10.295, estabelecendo informações sobre a política nacional de conservação e uso racional de energia (BRASIL, 2001b) e, na sequência, no mês de dezembro, publicado o Decreto nº 4.059 que regulamenta a Lei 10.295 e estabelece níveis mínimos de eficiência energética. Estes níveis devem ser atendidos pelos equipamentos produzidos ou comercializados em todo o território brasileiro, assim como as edificações (BRASIL, 2001a).

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2019), no Brasil as edificações consomem aproximadamente 51% da energia elétrica gerada. Em 2019 só o setor residencial apresentou o percentual de 23,7% de consumo de energia elétrica anual no país, evoluindo 3,2% de consumo, se comparado com o ano anterior. Observando a região Sul do país (Figura 1), os sistemas de condicionamento de ar são responsáveis pela maior parte do consumo de energia elétrica em uma edificação residencial, sendo este próximo de 32% (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2015).

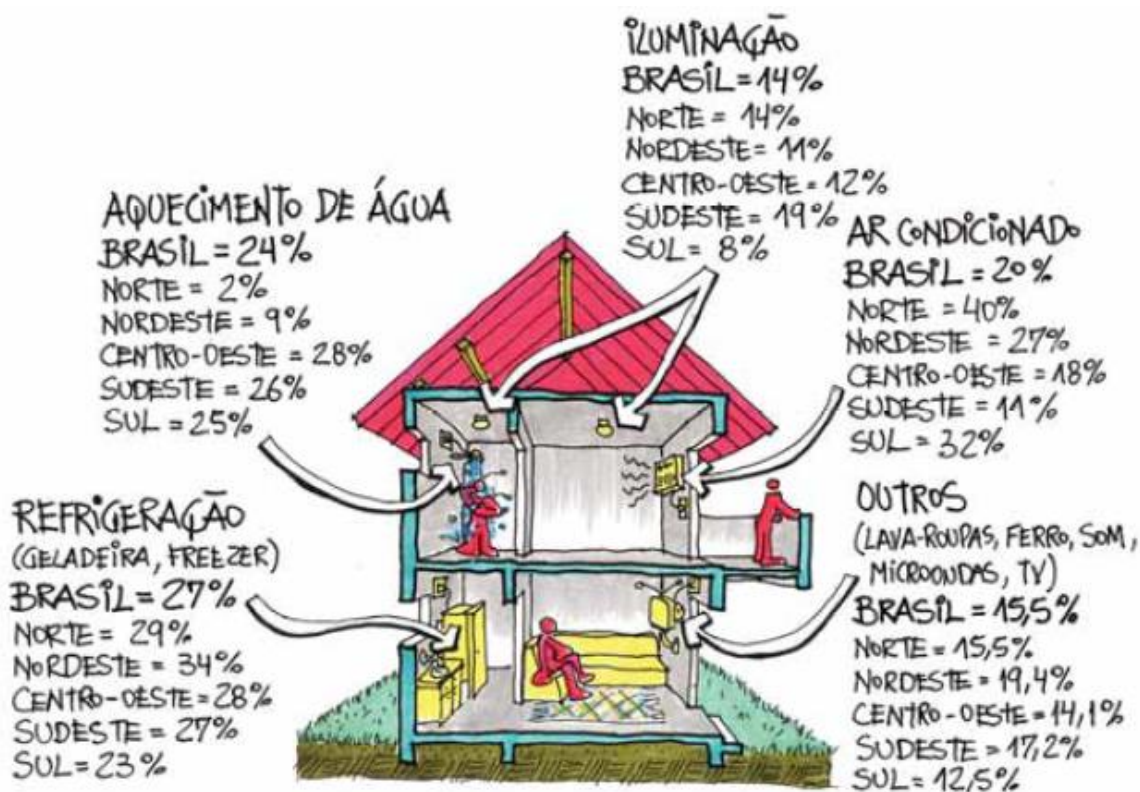


Figura 1 - Consumo por uso final em residências.

Fonte: Lamberts; Dutra; Pereira, 2015.

Os valores de consumo energético são reflexo também da construção das edificações residenciais brasileiras, pois os materiais utilizados possuem influência sobre o consumo de energia da edificação, sendo ainda principalmente utilizados materiais como alvenaria e concreto, sem a utilização de isolantes térmicos na sua envoltória (PROCEL, 2019; TRIANA; LAMBERTS; SASSI, 2015). Assim, o Ministério de Minas e Energia desenvolveu e coordenou o Plano Nacional de Eficiência Energética - PNEf (MME, 2011), que propõe ações para aumentar a eficiência energética das edificações de diversos setores (incluindo residencial, comercial, industrial, entre outros) e reduzir o consumo de energia elétrica no país em 10% até 2030, projetando assim um consumo previsto no Plano Nacional de Energia 2030.

Em conjunto com o aumento dos gastos energéticos e na busca pela desaceleração do déficit habitacional no Brasil, que em 2017 chegou ao recorde histórico atingindo 7,78 milhões de unidades (ABRAINC, 2018), o Governo Federal lançou através da Lei 11.977, em julho de 2009, o programa para construção de habitações de interesse social Minha Casa, Minha Vida – PMCMV (BRASIL, 2009). Este programa visa facilitar o acesso à casa própria para famílias de baixa renda e, conjuntamente, promover o auxílio na geração de emprego e de renda por meio do aumento do investimento no setor da construção civil.

Na execução das edificações do PMCMV não são consideradas as diferenças climáticas, microclimáticas e condições locais, descartando as necessidades de cada região. Além disso, a alta demanda e o baixo valor de aquisição prejudicam a escolha dos materiais, gerando uma edificação de baixa qualidade que pode não corresponder de forma adequada às condições climáticas de onde estão submetidas (DALBEM, 2018). Como consequência, há um aumento no desconforto térmico e um nível de eficiência energética baixo que conduz a maiores exigências quanto ao uso de sistemas artificiais de condicionamento de ar, o que acarreta em uma maior demanda de energia elétrica e demonstra necessidade de melhoria no projeto e materiais utilizados nas edificações (INDIVIATA *et al.*, 2016).

Um dos objetivos da análise do desempenho térmico das edificações residenciais é a busca por intercorrências que diminuam o consumo de energia elétrica atribuída à climatização dos ambientes. Em locais de climas quentes ou amenos, como o Brasil, em um dos parâmetros de eficiência energética que os estudos avaliam é destacado o uso de isolamento térmico na envoltória (FOSAS et

al., 2018; (MIRRAHIMI et al., 2016; TRIANA; LAMBERTS; SASSI, 2018; TUBELO et al., 2018).

Devido ao seu conjunto de vantagens e características, com o decorrer dos anos as espumas vítreas, material cerâmico industrial existente no mercado, estão gradualmente sendo inseridas como isolantes térmicos em construções industriais e estruturas comerciais, conduzindo a um aumento de seu uso substituindo as espumas orgânicas (POKORNY, 2006). Em climas extremamente quentes, frios e/ou úmidos ela apresenta um bom comportamento e é uma solução mais direta para conservar o calor no interior dos ambientes, onde as temperaturas externas estão muito baixas e igualmente manter o mesmo resfriado quando as temperaturas externas se encontram elevadas excessivamente (POKORNY; VICENZI; BERGMANN, 2008). Apesar da espuma vítrea apresentar excelentes propriedades mecânicas, físicas e químicas, sua utilização em diferentes campos da construção, como habitações residenciais, ainda não foi pesquisada. Em especial, os trabalhos que simulam sua viabilidade de utilização considerando consumo energético e conforto térmico são pouco explorados.

Neste sentido, a presente pesquisa buscou avaliar por meio de simulação computacional o desempenho térmico de espumas vítreas comerciais quando utilizadas como isolantes térmicos em diferentes soluções construtivas aplicadas na envoltória de uma habitação unifamiliar de baixa renda, a fim de melhorar a eficiência energética das edificações. Com o tema proposto, observou-se a oportunidade para analisar a capacidade de isolamento térmico das espumas vítreas comerciais e contribuir para o entendimento mais detalhado acerca da sua aplicação. O desempenho da edificação foi avaliado em três diferentes Zonas Bioclimáticas Brasileiras (ZB1, ZB2 e ZB3) representadas, respectivamente, pelas cidades de Curitiba (PR), Pelotas (RS) e Florianópolis (SC).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo principal analisar por meio de simulação computacional o desempenho térmico e a eficiência energética de uma espuma vítrea comercial, quando utilizada como isolante térmico em uma habitação de interesse social, considerando as zonas bioclimáticas brasileiras 1, 2 e 3.

1.1.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos a serem atendidos ao longo deste trabalho, destacam-se:

- Avaliar, com o auxílio de *softwares*, o conforto térmico de uma edificação padrão quando utilizada uma espuma vítrea comercial como isolante térmico em seu envelope, comparando-as com a seu caso base sem isolamento;
- Analisar os gastos energéticos de uma habitação de interesse social com e sem o isolante térmico;
- Verificar os níveis de conforto térmico das zonas térmicas da habitação de interesse social nas zonas bioclimáticas 1, 2 e 3;
- Analisar as melhorias no desempenho térmico entre as diferentes otimizações de envelope definidas no estudo.

1.2 Estrutura do trabalho

O trabalho foi constituído de cinco capítulos onde, neste primeiro, buscou-se incluir uma breve introdução sobre os assuntos referentes ao tema principal, apontando as justificativas para a sua realização, os objetivos gerais e específicos da pesquisa.

No segundo capítulo é apresentada a revisão de literatura relevante à pesquisa, abordando as temáticas fundamentais para o seu embasamento e execução. Foram compreendidas as propriedades térmicas dos materiais, tratando de assuntos relacionados às trocas de calor e energia entre o meio e o ambiente construído; relacionando o efeito da microestrutura na condutividade térmica; os principais isolantes térmicos e suas classificações; além de adentrar nos conceitos sobre sólidos celulares e espumas vítreas, exemplificando trabalhos realizados na área; normas brasileiras e identificação das estratégias bioclimáticas; e, por fim, uma breve discussão sobre a simulação computacional, o programa *EnergyPlus®* e também trabalhos que utilizaram a simulação computacional em conjunto das análises de isolamento térmico em edificações.

O método desenvolvido na pesquisa é apresentado no terceiro capítulo, estando dividido em 4 grandes etapas: Etapa 1: definição do objeto de estudo; Etapa

2: modelagem, configuração e simulação do caso base; Etapa 3: configuração e simulação dos edifícios de referência otimizados; Etapa 4: análise comparativa, apresentando o método de análise de resultados.

No quarto capítulo estão apresentados os resultados dos desempenhos térmicos e seus níveis de eficiência energética, obtidos das simulações das otimizações propostas no trabalho em relação ao caso base definido.

Por fim, o quinto capítulo apresenta as considerações finais e as principais conclusões obtidas, as limitações e sugestões para trabalhos posteriores.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Propriedades térmicas dos materiais

A propriedade térmica é o resultado do comportamento que um dado material tem ao receber um estímulo térmico, seja este um aumento ou redução da temperatura (CALLISTER; RETHWISCH, 2013). Quando há diferenças de temperaturas, esta energia em forma de calor é transmitida de um meio mais quente para um meio mais frio. Da mesma forma, isso acontece com materiais e elementos construtivos, fazendo com que seu comportamento térmico esteja em função das suas propriedades térmicas.

Para Callister e Rethwisch (2013), algumas propriedades térmicas podem ser críticas na utilização prática dos sólidos, como a capacidade calorífica, expansão ou dilatação térmica e condutibilidade térmica. A capacidade calorífica, também chamada de calor específico (c) quando considerada a capacidade calorífica por unidade de massa (J/kgK), é a propriedade que expressa a habilidade do material em absorver calor da sua vizinhança. É a quantidade de energia (J) necessária para aumentar em um grau (K) a temperatura de um mol de um material. Ela pode ser expressa conforme a equação 1:

$$C = \frac{dQ}{dT} \quad (1)$$

Onde C (J/molK) é a capacidade calorífica, dQ (J) corresponde a quantidade de energia requerida para produzir uma variação de temperatura dT (K).

Quando um sólido absorve energia em forma de calor, sua temperatura é elevada e suas dimensões aumentam, ocorrendo a dilatação ou expansão térmica. Assim como, quando resfriados, sofrem contração. Esta mudança no tamanho do material em função da temperatura pode ser expressa da seguinte forma, conforme equações 2 e 3:

$$\frac{l_f - l_o}{l_o} = \alpha l (T_f - T_o) \quad (2)$$

Ou

$$\frac{\Delta l}{l_o} = \alpha_l \Delta T \quad (3)$$

Onde:

l_o = comprimento inicial

l_f = comprimento final

T_o = temperatura inicial

T_f = temperatura final

α_l = coeficiente linear de expansão térmica (propriedade do material que indica a extensão na qual um material se expande no aquecimento, tendo unidades de °C⁻¹ ou °F⁻¹)

Considerando que o aquecimento ou resfriamento afetam todas as dimensões de um corpo, ocorre também a variação de volume, que pode ser calculada pela equação 4:

$$\frac{\Delta V}{V} = \alpha_v \Delta T \quad (4)$$

Onde:

ΔV = variação do volume

V = volume inicial

α_v = coeficiente volumétrico de expansão térmica

Quando em se tratando de construções, o conforto térmico é influenciado diretamente pelas variáveis climáticas como a temperatura, a umidade, a velocidade do ar e a radiação solar incidente no local (CRUZ, 2009). A investigação do comportamento e das propriedades térmicas dos materiais aplicados nas envoltórias é fundamental, pois é através deles que a edificação recebe ou perde energia em

forma de calor, através dos ambientes externos e internos, atuando diretamente nas condições internas de conforto térmico (BEZERRA, 2003). Mediante este conhecimento, pode-se dimensionar e especificar corretamente os materiais antes de empregados na obra (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2015). Na física, a resistência térmica representa a maior ou menor facilidade com que se dá o fluxo de calor em uma direção (BEZERRA, 2003). A equação 5 mostra que a resistência térmica, considerando uma parede plana, decorre da geometria do material e sua condutividade térmica.

$$R = \frac{L}{\lambda A} \quad (5)$$

Onde:

R = resistência térmica (K/W)

L = espessura da parede (m)

λ = condutividade térmica (W/mK)

A = área perpendicular ao fluxo de calor (m²)

Sistemas construtivos que possuem alta resistência térmica proporcionam a redução do fluxo de calor através dos fechamentos e possibilitam a redução da carga térmica no interior das edificações que, por consequência, apresentam menores consumos de energia elétrica voltada para à climatização (BEZERRA, 2003). Desta forma, estima-se que a possibilidade de redução do consumo de energia em prédios já construídos é de 30% e, para novas construções, pode chegar até 50% (LAMBERTS *et al.*, 1997).

2.1.1 Condutividade térmica

A condutividade térmica ocorre quando o calor é transportado a partir de regiões de alta temperatura para regiões de baixa temperatura de um material. Ela é a propriedade física dos materiais que expressa em valores a capacidade de um material de transmitir calor entre os corpos quentes e frios (CALLISTER; RETHWISCH, 2013; POKORNY; VICENZI; BERGMANN, 2008). Quando há

necessidade de maior transferência de calor (como em casos de operações de aquecimento) a condutividade térmica será maior e necessitando minimizar as perdas de calor a condutividade térmica será baixa. Em um sistema construtivo, essa é a propriedade mais relevante no caso de materiais utilizados como isolantes térmicos, onde, simultaneamente com a espessura da parede e do material, da diferença de temperatura entre as duas faces, deverá trazer uma resistência térmica elevada (BEZERRA, 2003; MELO, 2007). A equação 6 define a condutividade térmica em termos matemáticos para fluxo de calor em condições de regime estacionário, ou seja, para situações em que o fluxo de calor não se altera ao longo do tempo. O sinal negativo da expressão indica que a direção do fluxo de calor é aquela da região mais quente para a região mais fria (CALLISTER; RETHWISCH, 2013).

$$q = -k \frac{dT}{dx} \quad (6)$$

Onde:

q = fluxo de calor por unidade de tempo por unidade de área

k = condutividade térmica

dT/dx = gradiente de temperatura através do meio de condução

O calor é transportado em materiais sólidos por meio de ondas de vibração da rede cristalina (fótons) e por meio dos elétrons livres, sendo a condutividade térmica o resultado da soma destas duas contribuições. Ainda assim, existem algumas formas de troca de energia térmica devido à diferença de temperatura entre os corpos, sendo estas: condução, convecção e radiação.

2.1.2 Condução

A condução ocorre através do contato entre as moléculas do material que contém temperaturas diferentes entre si. Quando um corpo é aquecido, os átomos vibram com maior frequência e passam a ter movimentos de maior velocidade e amplitude. Através do contato entre dois corpos, um aquecido e outro frio, os átomos da zona aquecida provocam choques nos átomos vizinhos frios e transformam a

energia cinética em energia térmica, até que ocorra um equilíbrio entre os dois corpos (BEZERRA, 2003; CALLISTER; RETHWISCH, 2013).

Segundo Bezerra (2003) a Lei de Fourier é considerada a taxa de fluxo de calor por condução em uma determinada direção, e é proporcional à área normal à direção do fluxo a taxa de temperatura na mesma direção. No contexto de paredes planas, a Lei de Fourier se expressa de forma simplificada pela fórmula:

$$Q_{cond} = \frac{Ak}{L}(T_1 - T_2) \quad (7)$$

Onde:

Q_{cond} = taxa de fluxo de calor transferido por condução (W)

k = condutividade térmica do material (W/mK)

T_1 = temperatura da superfície 1 (K)

T_2 = temperatura da superfície 2 (K)

A = área da superfície que participa do processo de transferência de calor (m²)

L = distância entre as superfícies 1 e 2 (m)

Em um sistema construtivo, o coeficiente de condutividade térmica (k) dependerá, sobretudo, do material, da sua espessura e da diferença de temperatura entre as suas faces. Em materiais compostos, k será função também das propriedades radiantes das superfícies em questão e da quantidade de ar que existe dentro do material. Nos materiais porosos, k dependerá da composição, da quantidade de matéria sólida, da distribuição, geometria e dimensão dos poros, além do teor de umidade, do tipo de gás no interior do material. Possuem melhores características isolantes os materiais com porosidade celular homogênea, se comparado a materiais com a mesma densidade, porém com células de ar extrudadas, onde o calor se propaga por convecção natural (BEZERRA, 2003).

2.1.3 Convecção

Nos fluidos, a troca térmica que transcorre é a chamada convecção. O contato com uma fonte quente resulta em um crescimento do volume sem que haja alteração no peso do mesmo e, conseqüentemente, reduz sua densidade (BEZERRA, 2003). Neste caso, a transferência de energia em forma de calor se dá através do resultado da diferença de densidade entre os fluídos, onde o fluido frio tem maior densidade em comparação ao fluido quente, como ilustrado pelo comportamento da água em uma panela quente na figura 2:

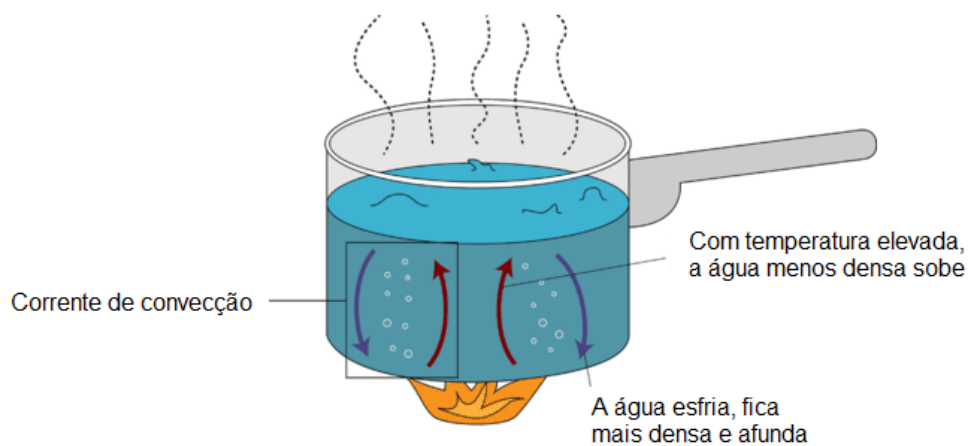


Figura 2 - Convecção em meio líquido.
Fonte: Adaptado de SMITHSON, 2014.

Se o fluido passar por uma superfície sólida, a qual apresenta temperatura diferente do mesmo, haverá troca de calor entre a superfície e o fluido. Se o movimento ou escoamento do fluido for realizado de forma mecânica, a transferência de calor por convecção é considerada forçada. Em contrapartida, se o fluido se desloca em função da diferença de densidade, a convecção é chamada livre ou natural. Para que seja possível calcular a taxa de fluxo de calor transferido por convecção, é possível utilizar a equação 9:

$$Q_{\text{conv}} = A h (T_1 - T_2) \quad (8)$$

Onde:

Q_{conv} = taxa de fluxo de calor transferido por convecção (W)

A = área da superfície que participa do processo de transferência de calor (m^2)

h = coeficiente médio de transferência de calor por convecção ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)

T_1 = temperatura da superfície (K)

T_2 = temperatura do fluido circundante (K)

O coeficiente de transferência de calor por convecção dependerá de diversas propriedades termodinâmicas e de transporte de fluido como, por exemplo, o tipo de fluido que se movimenta na superfície, da natureza do escoamento e do acabamento superficial.

2.1.4 Radiação

Já a radiação é composta por um sistema de transmissão de calor de uma fonte quente para uma fonte fria, sem que haja necessidade do meio material para propagação, ou seja, é um fenômeno superficial em que o calor emitido de acordo com a temperatura superficial do material. Este processo ocorre através da emissão e propagação de ondas eletromagnéticas que atuam entre as fontes sem aquecer o meio intermediário, chamada de calor radiante (BEZERRA, 2003; CRUZ, 2009).

A principal fonte de calor é a radiação solar, que pode ser explorada ou evitada, conforme necessário, podendo também ser minimizada por elementos vegetais e topográficos do local (Figura 3) (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

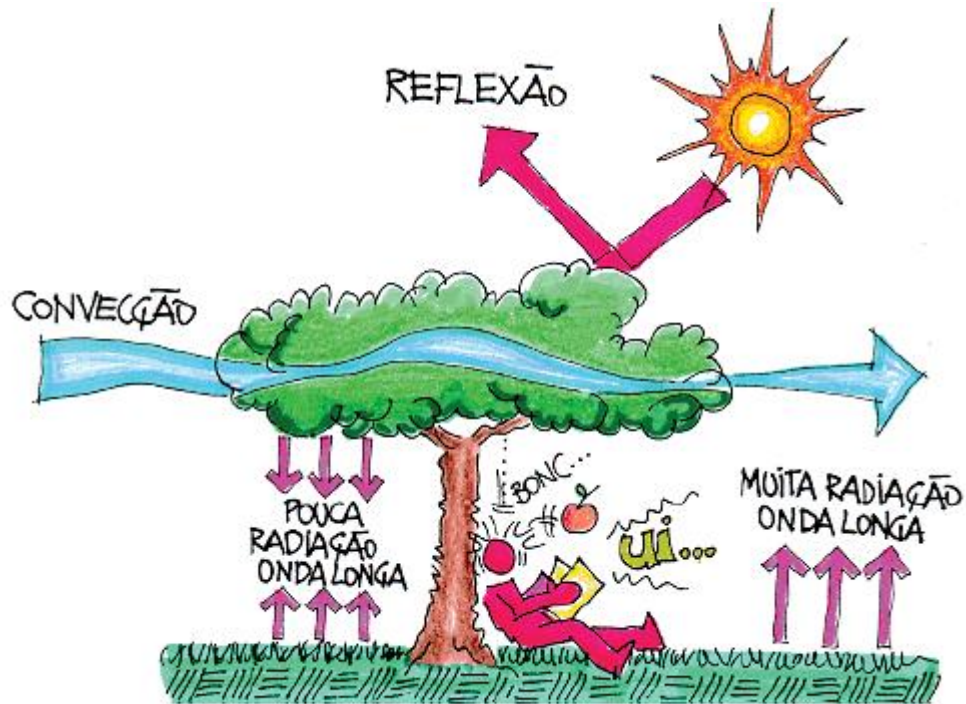


Figura 3 - Radiação solar e vegetação.

Fonte: LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014.

As edificações recebem energia térmica do meio externo por meio de mecanismos de radiação e convecção, onde a superfície externa é exposta a temperaturas superiores as internas, ocorrendo a troca de calor por condução para a superfície mais fria (BEZERRA, 2003; CRUZ, 2009). Com isso, a temperatura do material aumenta e ocorre uma transferência de energia térmica da superfície interna para o meio interno por radiação e convecção (BEZERRA, 2003).

Além disso, a transferência de energia térmica por radiação (Figura 4) pode ser distribuída em cinco partes: 1) radiação solar direta (onda curta); 2) radiação solar difusa (onda curta); 3) radiação térmica solar refletida pelo solo e pelo entorno (onda curta); 4) radiação térmica emitida pelo solo aquecido e pelo céu (onda longa); e 5) radiação térmica emitida pelo edifício (onda longa) (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

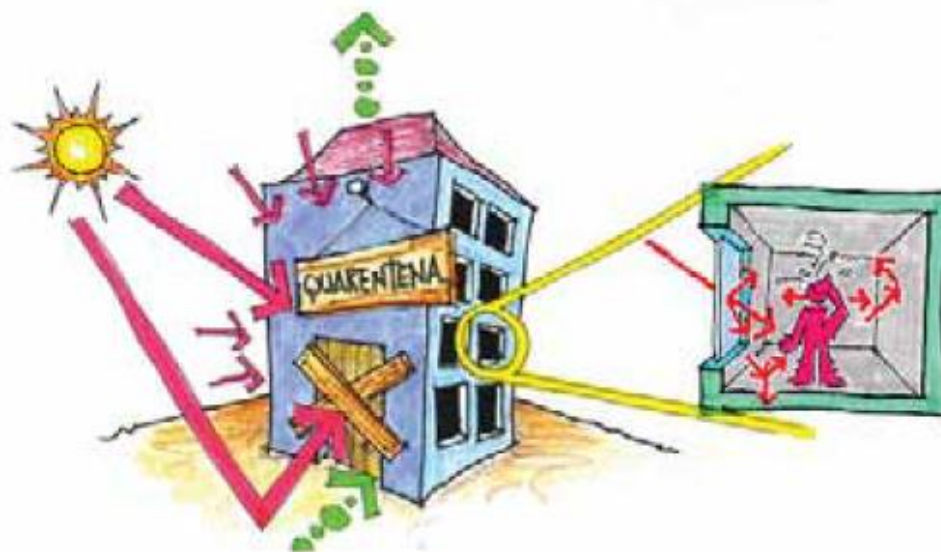


Figura 4 - Trocas de calor por radiação em edifícios e Efeito Estufa.

Fonte: LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014.

Para que seja possível determinar o fluxo de calor que se busca obter através do processo de radiação é necessário considerar a emissividade do material utilizado na construção, que é a capacidade que uma superfície tem de fornecer energia térmica quando comparado a um corpo negro (radiador ideal) (BEZERRA, 2003). Outros fatores como da densidade do material (que representa sua capacidade de conduzir quantidades maiores ou menores de calor por unidade de tempo e que é influenciada diretamente na sua condutividade) juntamente com a espessura e capacidade calorífica do mesmo também exercem influência sobre o fluxo de calor (CRUZ, 2009). Na tabela 1 é possível perceber que na maioria dos casos, à medida que a densidade do material diminui, também, sua condutividade térmica reduz:

Tabela 1 - Condutividade térmica dos materiais

Material	ρ (kg/m ³)	λ (W/mK)	c (kJ/kgK)
Argamassas			
argamassa comum	1800-2100	1,15	1
argamassa de gesso (ou cal e gesso)	1200	0,7	0,84
Cerâmica			

tijolos e telhas de barro	1000-1300	0,7	0,92
	1300-1600	0,9	0,92
	1600-1800	1	0,92
	1800-200	1,05	0,92

Concreto (com agregados de pedra)

concreto normal	2200-2400	1,75	1
concreto cavernoso	1700-2100	1,4	1

Isolantes térmicos

lã de rocha	20-200	0,045	0,75
lã de vidro	10-100	0,045	0,7
poliestireno expandido moldado	15-35	0,035	1,42
poliestireno extrudado	25-40	0,03	1,42
espuma rígida de poliuretano	30-40		1,67

Madeiras e derivados

madeiras com densidade de massa aparente	800-1000	0,29	1,34
carvalho, freijó, pinho, cedro, pinus	600-750	0,23	1,34
	450-600	0,15	1,34
	300-450	0,12	1,34
aglomerado de fibras de madeira (denso)	850-1000	0,2	2,3
aglomerado de fibras de madeira (leve)	200-250	0,058	2,3
aglomerado de partículas de madeira	650-750	0,17	2,3
	550-650	0,14	2,3
placas prensadas	450-55	0,12	2,3
	350-450	0,1	2,3
placas extrudadas	550-650	0,16	2,3
	450-550	0,15	2,3
Compensado	350-450	0,12	2,3
	450-550	0,15	2,3
aparas de madeira aglomerada com cimento em fábrica	350-450	0,12	2,3
	250-350	0,1	2,3
	200	0,12	2,3

Metais

aço, ferro fundido	7800	55	0,46
Alumínio	2700	230	0,88
Cobre	8900	380	0,38

Zinco	7100	112	0,38
Plásticos			
borrachas sintéticas, poliamidas, poliésteres, polietilenos	900-1700	0,4	
polimetacrílicos de metila (acrílicos)	1200-1400	0,2	
policloreto de vinila (PVC)			
Vidro			
vidro comum	2500	1	0,84

ρ = Densidade de massa aparente; λ = Condutividade térmica; c = Calor específico.

Fonte: Adaptado da NBR 15220 – Parte 1, 2005.

2.2 Isolantes térmicos

A ASTM C168 define isolantes térmicos como o material ou um conjunto de materiais que limitam o fluxo de calor nas edificações e, por sua vez, são utilizados para promover a resistência térmica (ASTM C168). Dentre as finalidades da utilização dos isolantes térmicos em determinados meios, se encontra a possibilidade de ordenação da temperatura em um ambiente, proporcionar maior conforto térmico, proteger as estruturas para evitar trincas por expansão térmica, conservação e estocagem de alimentos, economia de energia; sendo amplamente utilizados em setores como os de eletrodomésticos (geladeiras, freezers, climatizadores, etc.), automóveis e edificações (CRUZ, 2009).

Os isolantes térmicos nas edificações têm como função fundamental o aumento da resistência térmica, para que possa reduzir as trocas térmicas entre o exterior e o interior e, também, diminuir as necessidades de sistemas de climatização (SILVA, 2006; CRUZ, 2009). Além da baixa condutividade e elevada resistência ao calor quando comparado a outros materiais, conforme mostrado na tabela 1, espera-se que estes também apresentem: elevada porosidade, baixa massa específica; incombustibilidade ou auto-extinguibilidade; estabilidade química e física; alto calor específico; baixa difusidade térmica; baixo coeficiente de higroscopicidade; facilidade na aplicação; resistência ao ataque de roedores, insetos e fungos; ausência de odor; economia (CRUZ, 2009).

É necessário entender que mesmo não existindo ainda materiais isolantes perfeitos, capazes de impossibilitar totalmente a transferência de calor, é preciso fazer uma associação do maior número de características esperadas, devendo analisar a sua finalidade (CRUZ, 2009). A exemplo da aplicação de estratégias de utilização de isolantes térmicos para minimizar os gastos do consumo de energia, Bezerra (2003) em seu trabalho menciona o “Pavilhão de Sevilha”, na Espanha, que utilizou mecanismos de projeto, permitindo assim essa redução do consumo a um quarto do que seria necessário para o funcionamento de um sistema de ar condicionado, até atingir o conforto térmico pelos usuários.

2.2.1 Classificação dos isolantes

Cada isolante térmico possui vantagens e desvantagens e, de forma geral, são escolhidos conforme os objetivos a serem alcançados (CRUZ, 2009). Dentre os empregados na construção civil, objetivando limitar as trocas de calor entre os ambientes, encontram-se os naturais e os industrializados.

Dentre os isolantes naturais (podendo ter origem mineral e animal), Cruz (2009) cita como exemplo a cortiça, as penas de aves, as cascas de cereais (arroz, trigo e outros), algumas argilas que possibilitam expansão e fibras de madeira. Na classificação dos comercializados estão o poliuretano (PU), as lãs de vidro e de rocha, o poliestireno expandido (EPS) e os sólidos celulares. É habitual encontrar o EPS em forma de chapas retangulares, sendo possível adaptar seu formato ao que se deseja aplicar. Sua estrutura celular fechada, onde o ar faz a redução da passagem de calor é uma das principais características que o permite isolar termicamente, uma vez que, quanto maior o número de poros do material, maior a presença de ar em seus vazios, fazendo com que impeça a transferência de calor (BEZERRA, 2003).

Alguns trabalhos buscam alternativas para a produção dos materiais construtivos habitualmente encontrados no mercado. Bezerra (2003) analisou, de forma quantitativa, o desempenho térmico de paredes compostas por blocos de concretos com agregados residuais de EPS. A fim de comparação utilizou-se uma parede de blocos de concreto comum (empregada como referencial), outras duas com proporções distintas de EPS/areia, uma parede com tijolos cerâmicos de oito furos e outra com blocos de cimentos vazados. A partir dos resultados obtidos, o autor verificou que as paredes combinadas com EPS apresentaram melhores

desempenhos, sendo possível empregar o mesmo como material constituinte dos blocos, onde se comporta também como isolante térmico, auxiliando na redução do consumo de energia elétrica.

2.3 Sólidos celulares

As características dos sólidos celulares dependem diretamente das propriedades individuais do sólido que os formam, como, por exemplo, metal, polímero, compósito ou cerâmico. Nos materiais cerâmicos, a porosidade tem uma alta interferência sobre a condutibilidade térmica, pois poros com volumes maiores - de forma geral - resultam em uma diminuição desta propriedade. Com isso, muitas cerâmicas utilizadas para isolamento térmico são porosas, pois a transferência de calor através de poros ocorre de maneira lenta e ineficiente. Poros internos normalmente contém ar que, por sua vez, possuem condutibilidade térmica muito baixa (aproximadamente 0,02 W/mK). Além disso, a convecção dos gases dentro dos poros é também relativamente ineficiente.

Os poros encontrados nos sólidos celulares podem ser classificados de três modos distintos:

1) quanto à disposição dos poros: a) favos de mel - poros dispostos em duas dimensões, b) espumas - poros dispostos nas três dimensões;

2) quanto à conectividade dos poros: a) porosidade aberta - quando há conexão entre os poros, b) porosidade fechada - quando não há conexão entre os poros, c) porosidade mista – quando apresenta conexão dos dois tipos;

3) quanto ao tamanho de poros: a) microporos - menor que 2nm, b) mesoporos - 2nm a 50 nm, c) macroporos - acima de 50 nm (TEIXEIRA, 2016).

Scheffler e Colombro (2006) citam que os materiais usualmente utilizados para a obtenção de cerâmicas celulares são alumina, mulita, zircônia, carbetos de silício, hidroxiapatita e sistemas compósitos destes mesmos materiais. Além disso, é possível obter estas cerâmicas celulares tendo como matéria prima os materiais vítreos ou parcialmente cristalinos, como os vidros e vitrocerâmicas, possibilitando a utilização de resíduos sólidos como possível fonte de vidro. Neste grupo, inserem-se as espumas

vítreas, que possuem principal emprego o isolamento térmico (SCHEFFLER; COLOMBRO, 2006).

2.3.1 Espumas vítreas

As primeiras espumas artificiais sólidas produzidas foram as espumas vítreas, que estão disponíveis no mercado com patentes desde 1930 (PORKORNY, 2006; TEIXEIRA, 2016). Assim como os sólidos celulares, elas são caracterizadas como materiais porosos obtidos através da adição de um agente espumante ao vidro e, posteriormente, queimados em altas temperaturas acima da temperatura de sinterização (KÖNIG; PETERSEN; YUE, 2014; POKORNY, 2006). Na forma física, a espuma vítrea é considerada um sistema heterofásico, pois é formada por uma fase gasosa e outra sólida. Em sua fase sólida, o vidro forma finas paredes entre os poros que são preenchidos, por sua vez, com a fase gasosa (POKORNY, 2006).

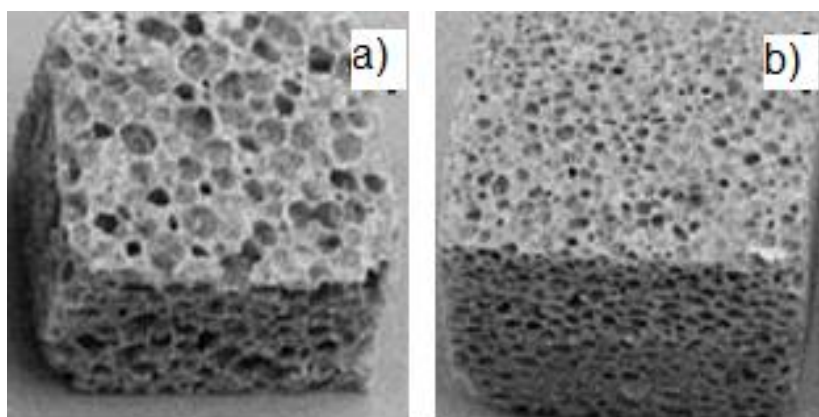


Figura 5 - Exemplo de espuma vítrea obtida com 5% de SiC com poros de tamanhos entre a) 106-75 μm e b) 53-75 μm .

Fonte: Adaptado de SCHEFFER; COLOMBO, 2015.

O agente espumante estimula a liberação dos gases que formam bolhas dispersas na matriz de vidro e faz com que o mesmo se expanda, formando um produto de baixa densidade e extremamente poroso (Figura 5) (KÖNIG; PETERSEN; YUE, 2014), considerado dez vezes mais leve que a água, com densidade por volta de 100kg/m^3 (PORKORNY, 2006). Estas propriedades são importantes, juntamente com a resistência ao congelamento, umidade e ao fogo, não absorvente à água, baixa condutividade térmica, baixa transmissão sonora, inércia química e não toxicidade

(KÖNIG et al, 2020; LI, 2011; SHI et al, 2016; ZHU et al, 2016). Na tabela 2, Ketov (2001 apud POKORNY, 2006) associa as possíveis aplicações das espumas vítreas levando em consideração suas propriedades tecnológicas:

Tabela 2 - Propriedades e áreas de aplicação das espumas vítreas

Propriedades	Possíveis aplicações
Baixa condutividade térmica	• Isolante térmico em construções civis e industriais – espuma vítrea reduz o consumo de materiais de construção; • Isolamento térmico em tubulações e encanamento de gás.
Baixa densidade combinada com alta resistência mecânica	• Carga baixa na base da construção (para construções realizadas em solos frágeis); • Telhados termicamente isolantes que não precisam ser substituídos com o uso; • Materiais de construção para pontes ou outros materiais flutuantes.
Incombustibilidade	• Isolante térmico em construções de edifícios; • Construções utilizadas como barreiras contra fogo; • Isolamento de tubulações e de vários equipamentos que trabalham em temperaturas acima de 600°C.
Trabalhabilidade	• Ao contrário dos materiais isolantes térmicos convencionais (concreto celular, espuma polimérica), a espuma vítrea combina bem com argamassa de sílica-alumina (concreto com cimento branco); • É facilmente cortada, podendo ser perfurada, pregada, colada.
Material altamente resistente à corrosão e quimicamente inerte	• Fabricação de isolantes térmicos/acústicos reutilizáveis; • Não sofre contração (estabilidade dimensional); • Utilizada em construções de tubulações e tanques para ácidos e petróleo.
Compatibilidade ambiental	• Indicado para construções de tanques e tubulações nas indústrias farmacêutica e alimentícia.

Fonte: Adaptado de Ketov, 2001 apud Pokorny, 2006.

Entre os materiais de isolamento térmico, as espumas vítreas exibem um maior potencial de sustentabilidade e uma combinação única de propriedades que

estão diretamente ligadas à sua porosidade. Os poros fechados auxiliam no maior isolamento térmico, resistência total à difusão do vapor de água, enquanto os poros abertos possibilitam maior isolamento acústico (KÖNIG *et al*, 2020).

Suas características impedem que aconteçam variações intempestivas da temperatura do ambiente e possibilita que o vapor passe o material, criando condições mais confortáveis. Por não reagir com a umidade e se manter estável, ela não exige reparos de degradação causada pelo tempo ou pela temperatura, como comumente exigem os isolantes térmicos à base de fibras poliméricas, ainda que haja algum dano significativo, pode ser reciclada e reutilizada em casos de drenagem de solo e/ou reutilizando como matéria-prima para a produção de um novo material (POKORNY, 2006).

Há alguns tipos principais de espumas vítreas, sendo estes: i) agregados soltos – produção contínua de chapas de espuma vítrea que são separadas em agregados e classificadas; ii) painéis, blocos e tubos – produção geralmente contínua de blocos e de outras formas, conforme molde a ser utilizado; iii) *pelets* – produção contínua de espuma vítrea na forma esférica que são utilizados na produção de blocos leves, painéis e chapas.

As espumas vítreas comerciais têm porosidade entre 85 e 95%, resistência à compressão entre 0,4 e 6,0 MPa e condutividade térmica entre 0,04 e 0,08 W/mK (SCHEFFLER; COLOMBO, 2006). Por serem utilizadas para qualquer tipo de construção em qualquer forma ou combinadas com outros materiais, estas propriedades se tornam características indispensáveis na aplicação do mesmo no setor da construção civil (RANGEL, 2018; POKORNY, 2006). Segundo o fabricante (SHEET, 2018), a espuma vítrea da marca *FOAMGLASS®* T4+, utilizada neste trabalho, apresenta ampla gama de aplicações no envelope da construção, podendo ser utilizada no isolamento de telhados planos, fachadas, pisos e paredes abaixo do nível do solo, telhados metálicos e especiais, isolamento interno (paredes, pisos, tetos) e possui características importantes, como mostrado na figura 6:

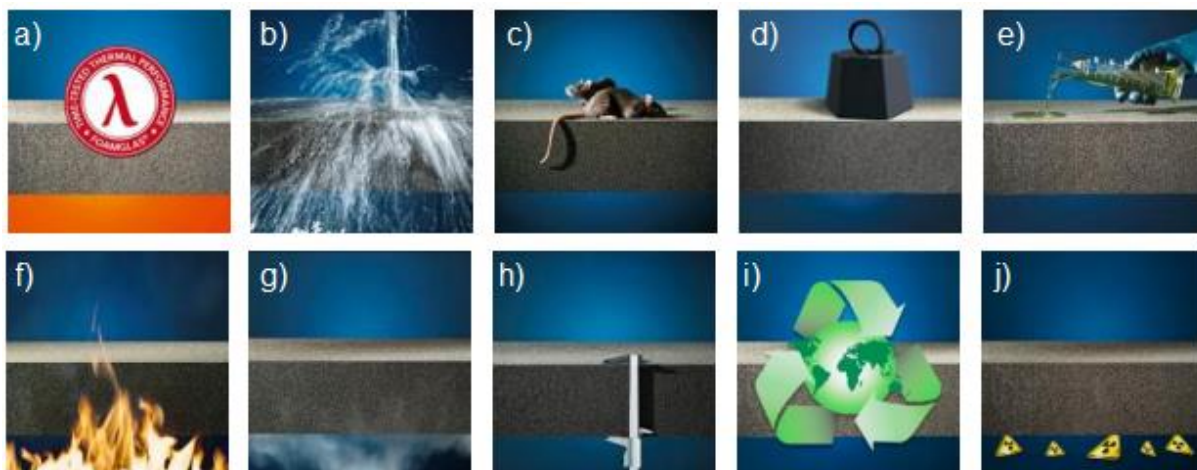


Figura 6 - Características da FOAMGLAS® T4+: a) desempenho térmico testado pelo tempo, b) à prova d'água, c) resistente ao ataque de predadores, d) alta resistência à compressão, e) resistente a ácido e a produtos químicos, f) não combustível, g) impermeável ao vapor de água, h) dimensionalmente estável, e) ecológico, j) proteção de radônio.

Fonte: Adaptado de SHEET, 2018.

2.3.2 Produção de espumas vítreas alternativas

O preço mais elevado das espumas vítreas, em comparação com outros materiais de isolamento, é a principal limitação para uma aceitação mais ampla do mercado de espuma de vidro (KÖNIG et al., 2020). Por isso, é cada vez mais difundida a pesquisa quanto a obtenção de espumas vítreas com matérias-primas alternativas e, por vezes, residuais.

Para a produção de espumas vítreas, Teixeira (2016) utilizou resíduos a partir do reaproveitamento de vidros de garrafas descartadas de diferentes colorações e da adição de casca de arroz entre 3 e 25% em massa, e conchas de ostras entre 1 e 15% em massa como agentes espumantes alternativos. As matérias-primas, após moídas, foram homogeneizadas a úmido e compactadas em prensa com 20 MPa. Após, as amostras compactadas foram expostas a queimas com temperaturas de 700 a 950 °C durante 30 a 120 minutos. Através das análises térmicas dos materiais obtidos, em sua maioria, apresentaram propriedades com valores dentro dos limites utilizados para as espumas vítreas comerciais, como condutividade térmica entre 0,068 e 0,154 W/mK para as espumas obtidas com casca de arroz e entre 0,057 e 0,077 W/mK para as que continham conchas de ostras. Desta forma, foi possível a viabilidade de obter materiais com porosidades controladas a partir das matérias

primas alternativas, funcionais onde o isolamento térmico e acústico e a não inflamabilidade são requisitos técnicos (TEIXEIRA, 2016).

Mugoni *et al* (2015) obtiveram espumas vítreas com resíduos de lâmpadas como matriz de vidro utilizando a casa do ovo com concentração de 5% em peso como agente espumante. Elas foram obtidas com o auxílio de uma prensa uniaxial com 40 MPa, queimadas entre 700° e 800° utilizando patamares de queima entre 14 e 45 minutos. Os valores de porosidade resultantes se aproximaram de 80%, observando também boa homogeneidade quanto à distribuição dos poros. Suas resistências mecânicas estiveram dentro dos padrões comerciais com média de 2 MPa.

Outra pesquisa envolvendo a produção de espumas vítreas com vidros de lâmpadas e casca de ovo foi a desenvolvida por Rangel (2016). No processo, as lâmpadas fluorescentes fizeram parte da estrutura sólida e a casca de ovo igualmente empregada como parte da composição do agente porogênico. Neste trabalho, as relações entre a composição química e a proporção dos agentes espumantes, além da granulometria das matérias-primas em função da temperatura de queima também foram consideradas. Para tanto, foram utilizados os percentuais de 5% e 7% em massa da casca de ovo e carbonato de cálcio comercial. Para a conformação utilizou-se uma prensa uniaxial com pressão de 40 MPa. Os corpos de prova foram queimados entre 650 °C e 900°C, com taxa de aquecimento de 150 °C/h e patamar de 30 minutos. Dentre os resultados obtidos, pode-se chegar a uma resistência mecânica de aproximadamente 1,43 MPa e uma condutividade térmica entre 0,131 e 0,282 W/mK.

Já Pokorny (2006) investigou a obtenção das espumas vítreas a partir dos resíduos de vidros e calcário dolomítico como agente espumante e avaliou a relação entre os parâmetros utilizados no processo e as propriedades associadas à microestrutura resultante. Suas amostras com formulações de teores entre 3% e 5% em peso de calcário dolomítico, conformadas e queimadas a temperaturas de 600°C e 1000°C mostraram que é viável a obtenção das espumas vítreas a partir das matérias-primas propostas. Estas espumas apresentaram valores de condutividade térmica entre 0,11 a 0,7 W/mK e resultados variados para a resistência mecânica, chegando ao valor máximo obtido de 2 MPa, propriedades semelhantes às de produtos comerciais que existem no mercado de isolantes térmicos industriais.

Outro resíduo também utilizado nas pesquisas de desenvolvimento de espumas vítreas são os vidros residuais de painel de tubos de raios catódicos (CRT). Visando a obtenção de porosidade fechada, König *et al.* (2020) utilizou-se deste resíduo que, para a síntese das amostras de espumas vítreas com poros fechados, foram misturados com 0,44% em peso de carbono (negro de fumo) e 5,97% em peso de manganês. Ainda, na sintetização utilizaram também vidros planos de recipientes (SLS) com 0,33% em peso de negro de fumo e 4,45% em peso de óxido de ferro. Além disso, fosfatos foram utilizados como agentes espumantes para controlar a cristalização, adicionando 1,85% em peso de fosfato de potássio nos CRT e 1,66% de fosfato de hidrogênio de cálcio com o vidro SLS.

Anteriormente, os CRT e as cascas de ovos também apareceram nas pesquisas de Fernandes *et al.* (2014) que, além dos materiais citados, também utilizaram calcita e/ou dolomita em formulações com apenas um agente porogênico e com misturas, sempre em proporções de 3%, prensagem a 40 MPa e temperaturas de queima entre 650 °C e 750 °C. Nesta pesquisa, os resultados das porosidades ficaram entre 80 % e 90 %, os valores de resistência mecânica variaram entre 1,5 MPa e 4 MPa, todos os valores dentro dos limites comerciais.

2.4 Desempenho térmico das edificações

O setor construtivo no Brasil cresce cada vez mais, destacando o destinado para edificações de baixa renda. Isso se deve ao aumento da utilização do programa do governo federal Minha Casa Minha Vida (MCMV), que chegou a 3,8 milhões de unidades entregues entre 2009 e março de 2017. Por influência desta quantidade elevada, alguns autores como Oliveira (2012) buscaram analisar os valores recomendados pela NBR 15220 – Parte 3, para habitações de interesse social, considerando os limites nela inseridos. Desta forma, foram definidas as características construtivas da habitação a ser simulada, afim de que atendesse às especificações mínimas propostas pelo programa MCMV. Assim, os resultados estabelecem referenciais de conforto térmico e eficiência energética, sendo simuladas e comparadas diversas configurações de envelope. Possibilitando, assim, a verificação da aceitabilidade das recomendações estabelecidas na norma.

Em seu trabalho, Matos (2007) avaliou o desempenho térmico de residências em Florianópolis utilizando a ventilação natural por meio da variação de parâmetros em um caso base. Um dos resultados obtidos foi que os limites estabelecidos pela norma NBR 15220 – 2005 para as áreas de abertura que visam a ventilação natural, não era apropriado para a residência em questão, reforçando a necessidade da análise individual de cada um dos casos, através das simulações computacionais.

Velosa, Fangueiro e Mendonça (2013) fizeram uma avaliação comparativa entre o desempenho térmico de materiais isolantes térmicos a partir de fibras têxteis, como estruturas tridimensionais do tipo sanduíche em poliéster, aglomerado de cortiça, fibra de coco, lã de rocha, fibra de reciclados, de sisal e fibras de poliéster. Os valores da solução de referência para as paredes divisórias leves convencionais, foram adotadas as constituídas de gesso cartonado e lã de rocha. Assim, foi considerado uma parede leve composta pelo isolamento como núcleo e membranas como revestimentos, variando sua espessuras de 8 mm até 66 mm. Considerando os matérias à base de fibra, as maiores condutividades térmicas são apresentadas para as paredes com fibras de poliéster com valores de 0,078, 0,119, 0,068 e 0,059 λ para as espessuras de 10, 13, 19 e 66 mm, respectivamente.

Outro estudo que teve por objetivo analisar comparativamente os resultados de desempenho térmico da envoltória de uma edificação residencial foi de Silva e Ghisi (2014) utilizando dos métodos de simulação do RTQ-R e NBR 15575 – Parte 1, considerando o clima de Florianópolis e utilizando o *EnergyPlus* como ferramenta de simulação. Neste estudo, foram geradas 500 combinações aleatórias e a maioria dos casos diferencia-se na análise de inverno, onde 134 casos chegaram a níveis A ou B do RTQ-R e “mínimo” ou “não atende” para a NBR 15575-1. Já para investigação no período de verão, 66 casos resultaram em nível E do RTQ-R e nível “intermediário” para a NBR 15575-1.

2.4.1 Normas e Regulamentos

Diante dos gastos com energia elétrica, o desempenho térmico das edificações tem sido um assunto bastante abordado nos últimos tempos, devido à escassez de recursos hídricos, e utilizar isolantes térmicos na construção das edificações passou

a ser uma exigência de quem constrói (CRUZ, 2009). Algumas pesquisas que adotam as estratégias de eficiência energética em edificações residenciais, tanto para regiões de clima principalmente frio ou quente, inclinam-se a indicação do uso de envoltórias isoladas, para que não seja permitida a perda de calor nas estações mais frias e possibilite o ganho de calor nas estações quentes (IEA, 2013).

Uma das recomendações da *International Energy Agency*, IEA (2013), que define diretrizes a serem aplicadas na envoltória como forma de melhorar a eficiência energética das edificações, é a adoção de isolamento térmico, também, em climas quentes, como forma de manter a temperatura interna e não permitir a entrada de calor do exterior. Porém, devido à possibilidade de sobreaquecimento dos ambientes, em função da utilização incorreta da ventilação natural e outros fatores, importar estratégias de eficiência energética de outros países sem conhecer o clima, as características do setor da construção civil e, também, a população do local, pode ser contestável.

Desde 2007, Portugal vem implementando a prática de certificação para edifícios a serem construídos e, também, para os que já estão construídos, com o objetivo de reduzir os custos com materiais e aumentar a eficiência energética, através do isolamento (HENRIQUES, 2007).

No Brasil, o Ministério das Minas e Energia (MME) em parceria com a Eletrobrás criou em 2003 o Programa Nacional de Eficiência Energética – Procel Edifica, que implementou a “Regulamentação para Etiquetagem Voluntária do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, Serviços e Públicos”. Neste regulamento, as edificações devem atingir valores mínimos de transmitância térmica para cada nível estabelecido de A até D de eficiência energética para ambientes climatizados e não climatizados, recebendo assim o selo Procel.

A partir de 2001 surgiram duas das mais relevantes normas brasileiras de desempenho de edificações, até o momento (KNOP, 2012). Estas normas surgiram através da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) mediante a NBR 15220 – 2005, que trata sobre o Desempenho Térmico das Edificações, restrito às habitações unifamiliares de interesse social e que apresenta os índices a serem necessários para calcular o desempenho das edificações. Em sua Parte 3, que trata sobre o zoneamento bioclimático brasileiro, diretrizes construtivas para estas

habitações e, também, recomendações de projeto para cada uma destas zonas. Através da classificação de 330 climas de cidades, foram definidas oito Zonas Bioclimáticas (ZB), conforme pode ser visto na figura 7. Para cada uma destas ZBs, são estabelecidas estratégias de condicionamento térmico passivo e diretrizes construtivas como forma de minimizar os maiores desconfortos causadas pelo clima.

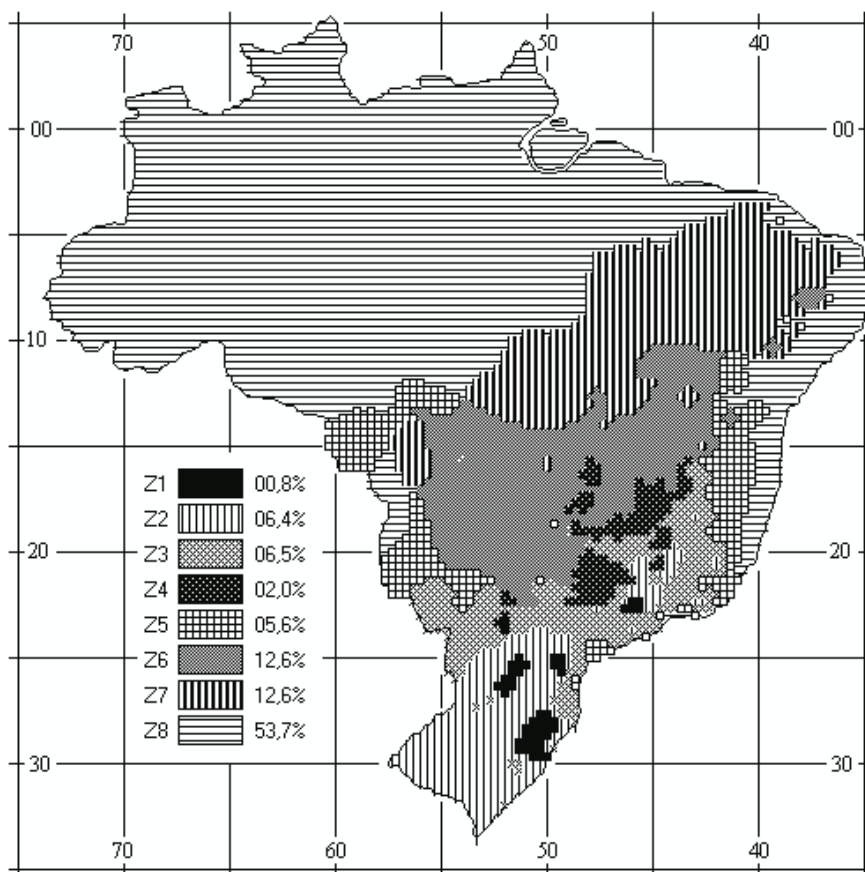


Figura 7 - Zoneamento bioclimático brasileiro. Fonte: NBR 15220 – Parte 3, 2005.

Fonte: NBR 15220 – Parte 3, 2005.

Já a NBR 15575 (2013) é a norma de desempenho de edifícios habitacionais que, além do desempenho térmico, trata sobre a edificação de um modo geral, considerando o desempenho estrutural, segurança contra incêndio, segurança no uso e operação, estanqueidade, desempenho acústico, desempenho lumínico, funcionalidade e acessibilidade, durabilidade e manutenibilidade e adequação ambiental. Nesta norma, são apresentadas exigências das edificações habitacionais e seu comportamento, relacionando-o também ao seu uso e operação. Conforme o

método simplificado da NBR 15575 (2013) para as ZBs 1, 2 e 3 a capacidade térmica exigida tanto das paredes internas como as externas deve ser $\geq 130 \text{ kJ/m}^2\text{K}$. As transmitâncias nas ZB1 e ZB2 devem ser $\leq 2,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ nas paredes externas e $\leq 2,3 \text{ W/m}^2\text{K}$ na cobertura. Quando a absorptância à radiação solar da superfície externa da parede e da cobertura na ZB3 for $\leq 0,6$ a transmitância térmica da parede deve ser $\leq 3,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ e da cobertura se mantém $\leq 2,3 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Em 2009, foi incorporado aos setores comerciais, públicos e de serviço o RTQ-C (Regulamento Técnico de Qualidade para Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos) que inclui métodos de análise do nível de eficiência energética das edificações considerando a envoltória, os sistemas de iluminação e de ar condicionado das edificações. Ele define o nível de eficiência energética das edificações através da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) e classifica sua eficiência de “A” a “E”, sendo “A” considerado o edifício mais eficiente e que cumpre com os requisitos estabelecidos no regulamento.

A partir da portaria nº 449 de 25 de novembro de 2010 foi publicado o regulamento técnico na versão para residências, o RTQ-R (Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais). Assim como o RTQ-C, o regulamento tem como objetivo criar condições para a etiquetagem no nível de eficiência energética de edificações unifamiliares e multifamiliares, também especificando requisitos técnicos e os métodos para classificação das edificações residenciais quanto à eficiência energética, para a obtenção da ENCE.

2.5 Simulação Computacional

O método usual para a execução de simulações computacionais é definido a partir da escolha de um caso base, ou seja, um edifício modelo onde serão operadas as variações dos parâmetros analisados (OLIVEIRA, 2017).

A simulação computacional permite fazer uma recriação e simplificação da realidade do ambiente proposto e pode ser usada como uma ferramenta de projeto que permite a geração de dados para uma análise rápida de alternativas a serem incorporadas. Há muitos fatores envolvidos e uma ampla quantidade de dados de entrada, os quais estão diretamente relacionados à qualidade e precisão das simulações. Para tanto, é fundamental o entendimento da importância e consequência

que cada elemento pode trazer, onde o nível de detalhe dependerá da aplicação e sendo necessário considerar os aspectos mais importantes para simplificação do modelo a ser simulado (MATOS, 2007).

Marinho *et al.* (2003) realizaram uma análise computacional com o auxílio do programa *Arquitrop* a fim de comparar o desempenho térmico de um ambiente constituído de alvenaria de tijolos com 8 furos e blocos de concreto leve. Os autores verificaram que houve uma diferença de carga térmica de dez vezes entre os dois casos, em que o concreto leve se mostrou com o melhor desempenho.

2.5.1 EnergyPlus®

O uso de softwares de simulação computacional é uma das opções de contribuição para o projeto arquitetônico, e vem progredindo na determinação de desempenho térmico e energético das edificações (TRINDADE; PEDRINI; DUARTE, 2010).

O *EnergyPlus*® é um dos programas utilizados para a simulação térmica e energética de edificações que integra seus sistemas. Através dele, é possível desenvolver estudos para melhoria da eficiência energética de edificações existentes ou em fase de projeto. O programa foi desenvolvido mediante a junção dos programas DOE-2 e BLAST, com a finalidade de elaborar uma ferramenta que possibilitasse a simulação da carga térmica e a análise energética de edificações e seus sistemas. A partir do comportamento térmico e energético da edificação, do clima em que ela está inserida e dos valores das cargas térmicas encontradas, é feito um cálculo que avalia a carga térmica exigida para aquecer ou resfriar o ambiente (MELO, 2007).

Além disso, a NBR 15575 – Parte 1 recomenda o emprego do programa para a realização das simulações computacionais:

Para a realização das simulações computacionais recomenda-se o emprego do programa *EnergyPlus*. Outros programas de simulação podem ser utilizados, desde que permitam a determinação do comportamento térmico de edificações sob condições dinâmicas de exposição ao clima, sendo capazes de reproduzir os efeitos de inércia térmica e validados pela *ASHRAE Standard 140*. (NBR 15575 – Parte 1, 2013, p 22).

3. MÉTODO

3.1 Etapas de pesquisa

O método da pesquisa foi dividido em 4 etapas, conforme esquematicamente apresentadas na figura 8. Na etapa 1 foi feita a definição da tipologia e a geometria objeto de estudo, que serviu como caso base. Na etapa 2 foi realizada a modelagem e as configurações do caso base utilizando o *software SketchUp* 2017, definindo suas zonas térmicas. Além disso, foram estabelecidas as configurações dos padrões de iluminação, ocupação e equipamentos, definição dos arquivos climáticos e temperaturas de solo para cada cidade das zonas bioclimáticas, bem como, configurações para modelos condicionados artificialmente e ventilados naturalmente, fazendo então a simulação do mesmo, sem isolante térmico. Na etapa 3, foram configurados e simulados os edifícios de referência otimizados utilizando três níveis de espessuras de isolamento térmico para cobertura, três níveis para as paredes externas e nove diferentes configurações que integram ambos os casos. Ao todo, foram efetuadas 96 simulações computacionais, considerando as zonas bioclimáticas 1, 2 e 3, utilizando o *software EnergyPlus*®. A etapa 4 apresenta os métodos de avaliação do desempenho térmico das edificações, considerando uma análise comparativa entre as variáveis construtivas utilizadas, desempenho térmico e energético.

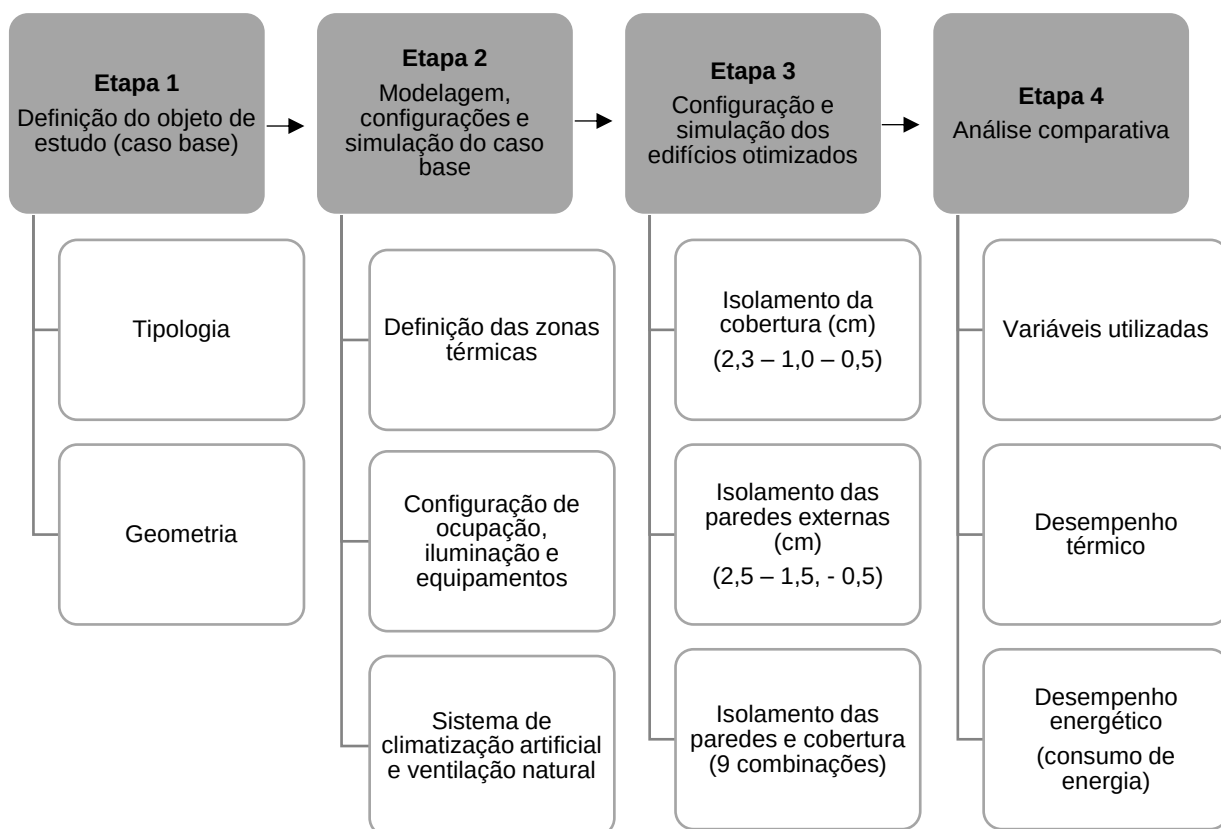


Figura 8 - Fluxograma das etapas do método de pesquisa.

3.2 Definição do objeto de estudo

Como caso base foi escolhido o projeto arquitetônico representativo de uma habitação de interesse social unifamiliar (Figuras 9 e 10), utilizado nos trabalhos de OLIVEIRA (2012) e de DALBEM (2018), o qual considera as especificações mínimas que constam nas informações do Ministério das Cidades para a segunda fase do programa “Minha Casa Minha Vida”, além do código de obras do município de Pelotas, ZB2, tendo por propósito uma edificação que represente a tendência atual da construção civil no país.

A edificação possui área total 45,86m², composta por quatro ambientes, sendo eles dois dormitórios, sala de estar e sozinha conjugadas e banheiro. Ela está inserida no eixo leste/oeste e com a maior área de esquadrias voltada para o norte. Por representar um projeto do programa governamental, não são conceituadas as diretrizes para a qualidade do projeto, não havendo também atenção com as características do clima analisado no trabalho.



Figura 9 - Perspectiva do estudo de caso.

Fonte: DALBEM, 2018.

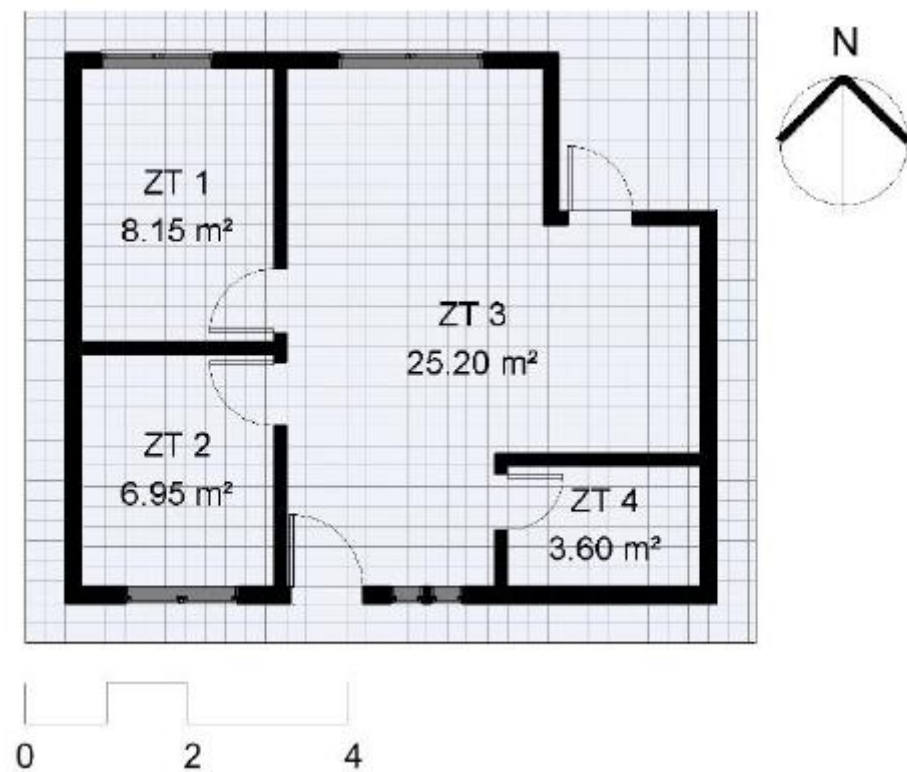


Figura 10 - Planta baixa do estudo de caso (caso-base).

Fonte: DALBEM, 2018.

A tabela 3 mostra as áreas opacas e translúcidas, onde a área total envidraçada corresponde a 9,45% da área opaca da edificação. O fator de forma da edificação é de 1,39, resultado da razão entre a área do envelope ($165,30\text{m}^2$) e o volume total da edificação ($119,24\text{m}^3$). Suas aberturas estão direcionadas para norte e sul com percentual de 19,18% e 15,58%, respectivamente.

Tabela 3 - Área do envelope opaco, translúcido e percentual de abertura na fachada

	Total	Norte	Leste	Sul	Oeste
Envelope opaco (m^2)	66,63	16,18	16,77	16,74	16,77
Envelope translúcido (m^2)	6,96	3,84	0,00	3,28	0,00
Área total do envelope (m^2)	73,58	20,02	16,77	20,02	16,77
Percentual de abertura (%)	9,46	19,18	0,00	15,58	0,00

Fonte:.. Adaptado de Dalbem, 2018.

A NBR 15575 exige que o percentual de abertura na fachada em relação a área de piso seja de 7%, para ambientes de permanência prolongada. Os percentuais na edificação estudada são de 19,53% no dormitório 1, 22,83% no dormitório 2, 12,62% na sala de estar/cozinha e de 12,31% no banheiro.

3.3 Modelagem e configuração da edificação do caso base

3.3.1 Modelagem

Para a modelagem da edificação, foi utilizado a interface gráfica do *software SketchUp®* 2015 com o *plugin Legacy Open Studio* 1.0.13 e a simulação dos modelos foi realizada utilizando o *software Energy Plus®*, versão 8.5.0 (DOE, 2017).

As figuras 11 e 12 mostram a modelagem feita para a edificação do estudo de caso. Para cada ambiente foi modelada uma zona térmica (ZT), conforme a tabela 4, que apresenta as características das zonas térmicas do modelo.

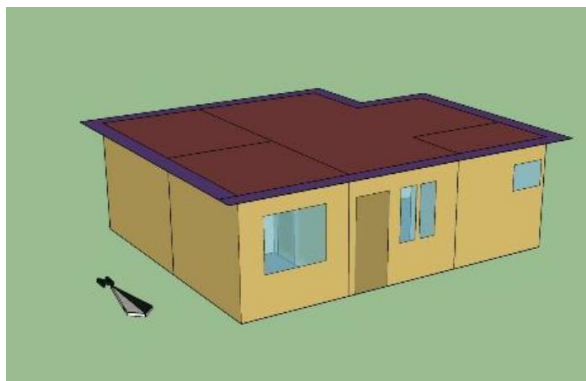


Figura 11 - Modelo do caso base no SketchUp – Fachadas leste e sul.

Fonte: Adaptado de Dalbem, 2018.

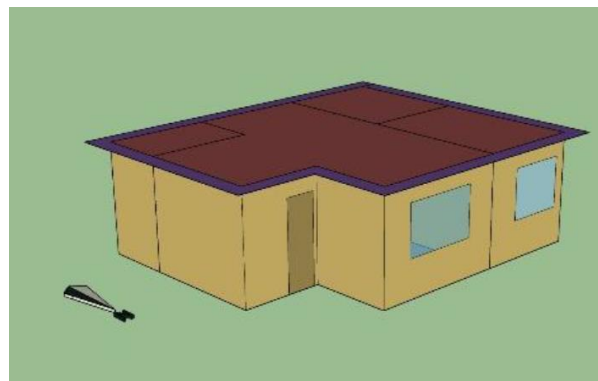


Figura 12 - Modelo do caso base no SketchUp – Fachadas oeste e norte.

Fonte: Adaptado de Dalbem, 2018.

Tabela 4 - Características das zonas térmicas

Zona térmica	Ambiente	Área (m ²)	Pé-direito (m)	Volume (m ³)
ZT1	Dormitório 1	8,60	2,60	22,36
ZT2	Dormitório 2	7,36	2,60	19,14
ZT3	Estar/Cozinha	26,00	2,60	67,60
ZT4	Banheiro	3,90	2,60	10,14
Total	Edificação HIS	45,86	2,60	119,24

Fonte: Adaptado de Dalbem, 2018.

3.3.2 Fechamentos verticais e horizontais

Para a caracterização dos materiais e elementos construtivos que compuseram os fechamentos, inicialmente, com base na NBR 15220-3, foram definidas as propriedades térmicas de paredes externas e cobertura, em função dos zoneamentos bioclimáticos. Nas zonas bioclimáticas 1, 2 as paredes devem ser leves e as coberturas leves e isoladas. Para a zona bioclimática 3, as paredes devem ser leves refletoras e as coberturas leves e isoladas. A tabela 5 indica as propriedades que constam na norma como limites para as vedações externas, adotadas por Oliveira (2012) em seu projeto arquitetônico representativo de uma habitação de interesse social unifamiliar.

Tabela 5 - Transmitância térmica, atraso térmico admissíveis para cada tipo de vedação

Vedações externas		Transmitância térmica – U	Atraso térmico - ϕ	Fator de calor solar – FCS
		W/m ² K	Horas	%
Paredes	Leve	$U \leq 3,00$	$\phi \leq 4,3$	$FCS \leq 5,0$
	Leve Refletora	$U \leq 3,60 \geq$	$\phi \leq 4,3$	$FCS \leq 4,0$
	Pesada	$U \leq 2,20$	$\phi \geq 6,5$	$FCS \leq 3,5$
Coberturas	Leve	$U \leq 2,00$	$\phi \leq 3,3$	$FCS \leq 6,5$
	Leve Refletora	$U \leq 2,30.FT$	$\phi \leq 3,3$	$FCS \leq 6,5$
	Pesada	$U \leq 2,00$	$\phi \geq 6,5$	$FCS \leq 6,5$

Fonte: Adaptado de NBR 15220 – 3, tabela C.2 (2005).

3.3.3 Fechamento vertical equivalente (transmitância e capacidade térmica dos elementos construtivos)

Na organização adotada pelo programa *EnergyPlus*® para operar os componentes construtivos, há algumas limitações para elaborar os modelos de materiais e componentes. O programa supõe todos os componentes sendo formados por camadas transversais ao fluxo de calor e não permite o cálculo de resistências térmicas de forma paralela. Para isso, foi utilizado a NBR 15220 – 2, onde constam métodos de cálculos da transmitância térmica (U), capacidade térmica (C_t), atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificação.

As paredes externas são compostas de alvenaria cerâmica, com blocos de 6 furos nas dimensões 14 cm x 19 cm x 29 cm, com reboco de 2 cm nas duas faces. As paredes internas são executadas com tijolos maciços, também com reboco de 2 cm nas duas faces. A cobertura é composta por telhas de fibrocimento de 0,8 cm e fixadas sobre uma estrutura de madeira. O forro de todos os ambientes será de madeira de 2 cm, também, fixados sobre uma estrutura de madeira.

A laje de piso é formada por *radier* de concreto armado com 10 cm de espessura. Na parte superior do *radier* será executada a argamassa de assentamento e o piso cerâmico. Foi configurada a absorvência térmica (α) de 0,2 nas paredes externas e de 0,6 na cobertura. Todo o envelope opaco foi configurado com emissividade (ϵ) de 0,9. As tabelas 6, 7, 8 e 9 mostram as propriedades dos materiais que compõe a edificação.

Tabela 6 - Composição das paredes externas

Paredes externas						
Composição	e (m)	λ (W/mK)	ρ (kg/m ³)	c (kJ/kgK)	R (m ² /WK)	CT (kJ/m ² K)
Argamassa	0,02	1,15	1800	1	0,02	36
Bloco cerâmico 6 furos - 14x10x29	0,14	0,70	609,28	0,92	0,20	78,48
Argamassa	0,02	1,15	1800	1	0,02	36
Resistência térmica total						0,40
Transmitância térmica						2,47
Capacidade térmica total						150,48

e= Espessura; λ = Condutividade térmica; ρ = Densidade de massa aparente; c= Calor específico; R= Resistência térmica, CT= Capacidade térmica.

Tabela 7 - Composição das paredes internas

Paredes internas						
Composição	e (m)	λ (W/mK)	ρ (kg/m ³)	c (kJ/kgK)	R (m ² /WK)	CT (kJ/m ² K)
Argamassa	0,02	1,15	1800	1	0,02	36
Tijolo maciço	0,11	1	1800	0,92	0,11	182,16
Argamassa	0,02	1,15	1800	1	0,02	36
Resistência térmica total						0,31
Transmitância térmica						3,18
Capacidade térmica total						254,16

e= Espessura; λ = Condutividade térmica; ρ = Densidade de massa aparente; c= Calor específico; R= Resistência térmica, CT= Capacidade térmica.

Tabela 8 - Composição da cobertura

Cobertura						
Composição	e (m)	λ (W/mK)	ρ (kg/m ³)	c (kJ/kgK)	R (m ² /WK)	CT (kJ/m ² K)
Telha fibrocimento	0,008	0,65	1800	0,84	0,01	12,10
Câmara de ar	> 0,05	-	-	-	0,14	0
Forro de madeira	0,02	0,12	450	1,34	0,17	12,06
Resistência térmica total						0,46
Transmitância térmica						2,18
Capacidade térmica total						24,16

e= Espessura; λ = Condutividade térmica; ρ = Densidade de massa aparente; c= Calor específico; R= Resistência térmica, CT= Capacidade térmica.

Tabela 9 - Composição da laje de piso

Laje de piso						
Composição	e (m)	λ (W/mK)	ρ (kg/m ³)	c (kJ/kgK)	R (m ² /WK)	CT (kJ/m ² K)
Radier - concreto	0,10	1,75	2200	1	0,06	220
Argamassa	0,02	1,15	1800	1	0,02	36
Revestimento cerâmico	0,01	1,30	2300	0,0965	0,01	22,20
Resistência térmica total						0,29
Transmitância térmica						3,42
Capacidade térmica total						278,20

e= Espessura; λ = Condutividade térmica; ρ = Densidade de massa aparente; c= Calor específico; R= Resistência térmica, CT= Capacidade térmica.

O caso base foi configurado sob duas condições, para análise conforme o Regulamento Técnico de Qualidade (RTQ-R, 2009): 1) ventilada naturalmente e 2) condicionada artificialmente, como descrito no item 3.3.7.

3.3.4 Configuração de ocupação, iluminação e equipamentos

O Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R, 2009) foi utilizado como fonte quanto à ocupação

dos ambientes, definição da taxa metabólica das atividades realizadas em cada ambiente, além do padrão de uso e densidade de potência da iluminação e cargas internas de equipamentos.

Foi adotado o padrão mínimo de ocupação, considerando duas pessoas por dormitório e quatro pessoas no ambiente de estar e cozinha. As agendas de ocupação foram modeladas separadamente para os dias de semana e finais de semana, conforme as figuras 13 e 14.

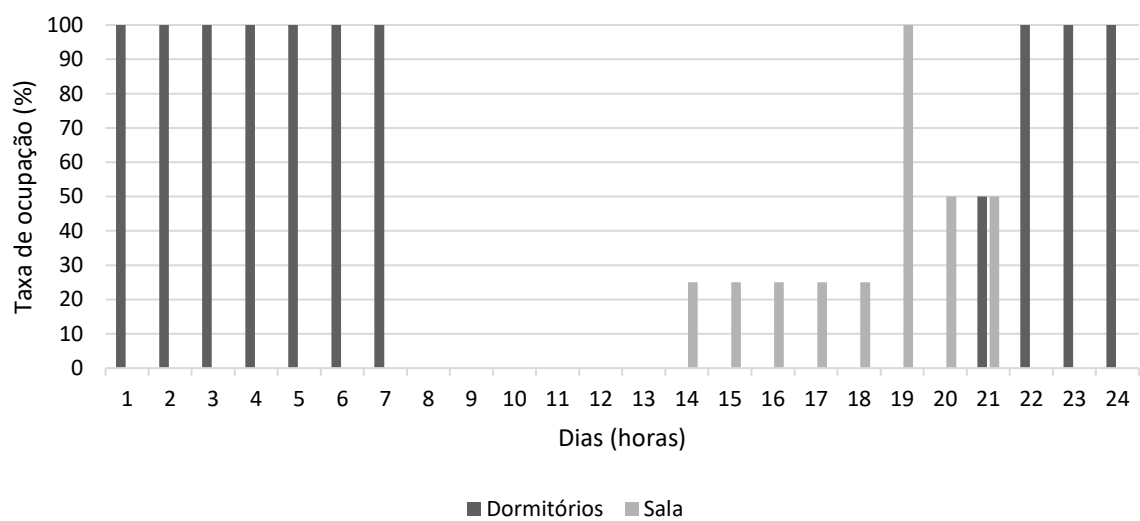


Figura 13 - Ocupação - dias de semana.

Fonte: Adaptado de INMETRO, 2012.

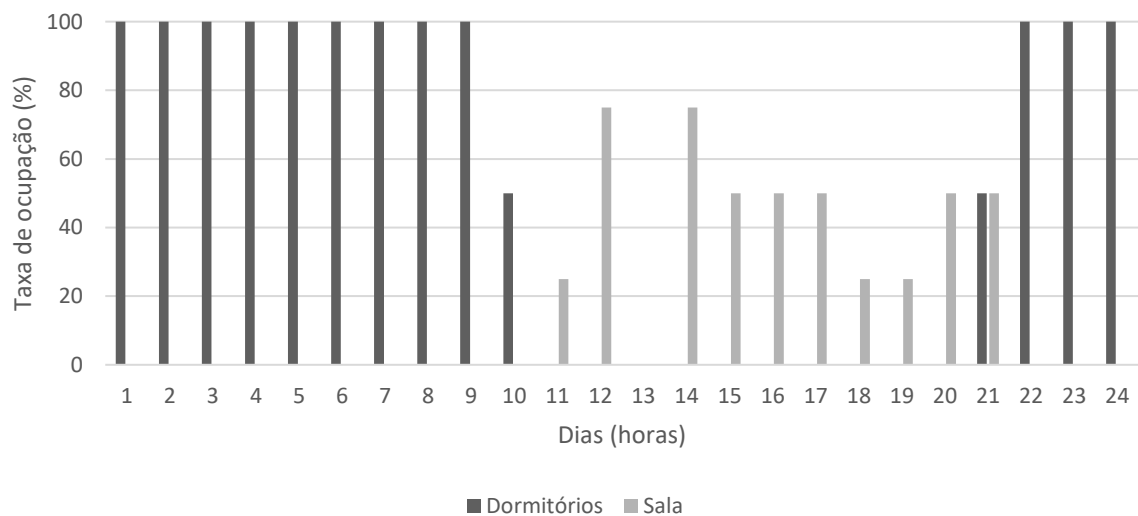


Figura 14 - Ocupação - finais de semana.

Fonte: Adaptado de INMETRO, 2012.

A taxa metabólica foi adotada de acordo com o tipo de atividade desempenhada em cada ambiente que é de 81 W por pessoa nos dormitórios e de 108 W por pessoa na sala de estar/cozinha.

As figuras 15 e 16 apresentam os padrões de iluminação modelados para os ambientes de permanência prolongada, igualmente separados para os dias de semana e finais de semana, respectivamente. A densidade de potência instalada (DPI) de iluminação foi de 6 W/m² as salas e de 5 W/m² nos dormitórios. Já a densidade de carga interna com equipamento adotada é de 1,5 W/m² para a sala, considerada no período de 24 horas (INMETRO, 2012).

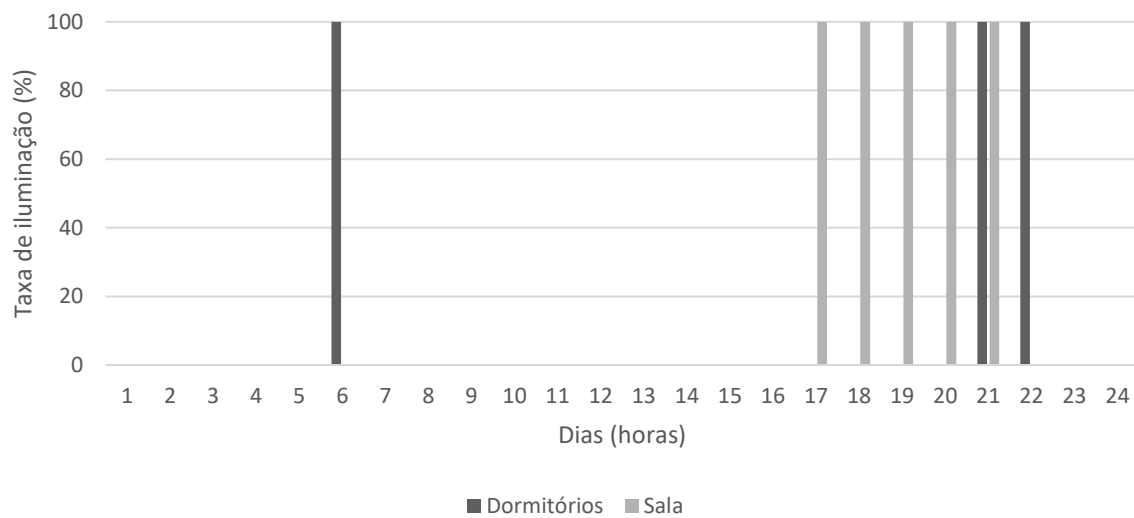


Figura 15 - Iluminação - dias de semana.

Fonte: Adaptado de INMETRO, 2012.

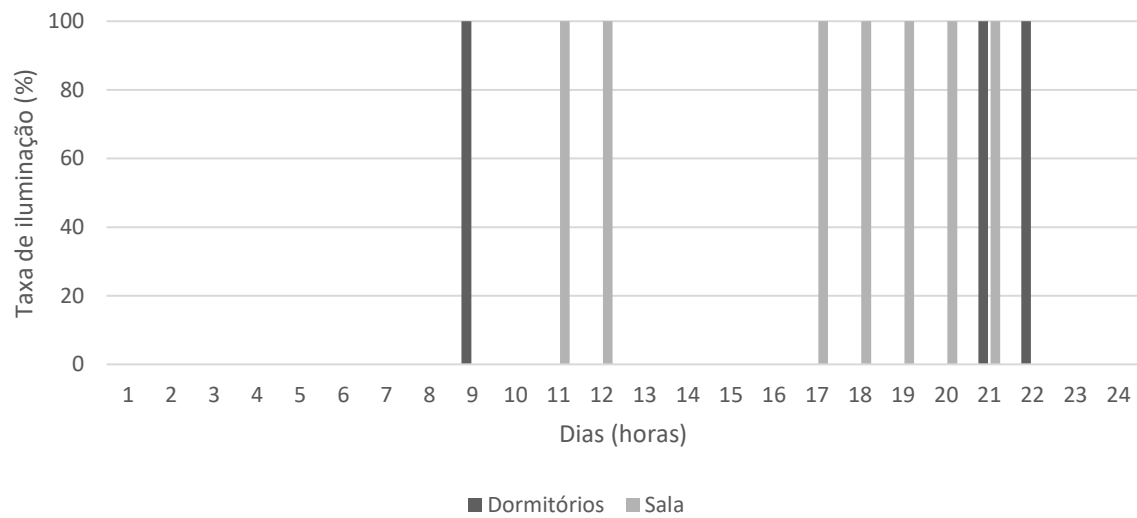


Figura 16 - Iluminação - Finais de semana.

Fonte: Adaptado de INMETRO, 2012.

3.3.5 Arquivos climáticos

Para representar a zonas bioclimáticas 1, 2 e 3 foram utilizados os dados dos arquivos climáticos de Curitiba (PR), Pelotas (RS) e Florianópolis (SC), respectivamente. O arquivo correspondente às informações de Pelotas foi objeto estudado e preparado por Leitzke *et al.* (2018) em seu trabalho e os demais estão disponíveis pelo LABEEE (2018). Na tabela 10 são exibidas algumas características climáticas das três cidades adotadas como parâmetro.

Tabela 10 - Características climáticas das três cidades

Mês	Temperatura de bulbo seco (°C)									Umidade relativa (%)			Radiação solar global (W/m²)		
	Média			Máxima			Mínima			Média			Média		
	ZB1	ZB2	ZB3	ZB1	ZB2	ZB3	ZB1	ZB2	ZB3	ZB1	ZB2	ZB3	ZB1	ZB2	ZB3
Jan	19,6	23,6	24,3	30,5	29,0	31,1	14,2	19,3	16,7	81	78	75	4117	5529	5218
Fev	20,9	23,5	24,2	29,1	28,8	31,9	13,9	19,6	16,9	77	81	74	4911	5140	5608
Mar	19,9	21,8	23,6	29,2	27,3	29,8	13,7	17,7	16,8	77	82	74	4431	4366	4606
Abr	17,9	18,6	22,3	28,2	25,0	31,2	8,3	14,1	12,3	81	82	75	3826	3609	3841
Mai	15,0	15,2	19,4	26,6	21,1	28,4	6,2	11,1	8,2	78	86	74	3414	2548	3222
Jun	14,7	12,6	18,7	23,9	18,3	28,3	3,7	8,5	12,5	83	85	82	2608	2092	2358
Jul	15,4	12,3	17,5	26,5	17,8	30,0	5,2	8,3	5,1	71	85	80	3735	2230	2172
Ago	15,7	14,0	16,4	27,9	19,1	23,6	6,2	9,6	6,2	78	85	71	3386	2659	3772
Set	14,6	15,5	17,8	29,6	20,3	25,7	5,1	11,7	6,7	78	83	75	3948	3359	4022
Out	17,6	17,9	21,3	21,0	22,5	27,5	9,0	14,0	14,9	83	82	74	3974	4258	4726
Nov	18,0	20,0	22,2	28,0	25,1	31,9	12,7	16,8	12,4	82	79	71	4932	5423	5304

Dez	19,4	22,5	23,4	32,2	27,8	31,5	10,2	18,1	16,3	76	78	72	5790	5815	4911
------------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	----	----	----	------	------	------

Fonte: Adaptado de LABEEE, 2018; LEITZKE, 2018.

Para a zona bioclimática 1, a cidade de Curitiba mostra temperaturas mais baixas no decorrer do ano e possui média anual de 17,4°C. Junho é apontado como o mês mais frio, com temperatura média de 14,7°C e o mês de fevereiro é o mais quente, onde a temperatura média chega a 20,9°C. Na zona bioclimática 2, a cidade de Pelotas apresenta temperaturas anuais médias de 18,1°C. Tem o mês de janeiro como o mais quente, com temperatura média chegando a 23,6°C e o de julho é apontado como o mais frio e mostra temperatura média 12,3°C. Na zona bioclimática 3, a cidade de Florianópolis mostra temperaturas mais elevadas onde, assim como a ZB1 em seu mês mais quente, mostra uma média anual de 20,9°C. Entretanto, janeiro é o mês com temperatura mais elevada, na média de 24,3°C e agosto o mês mais frio, onde as temperaturas médias chegam a 16,4°C.

Para os modelos condicionados artificialmente é necessário definir um dia típico, conforme arquivos climáticos (Tabela 11). Já para os modelos ventilados naturalmente, a análise é feita de forma anual.

Tabela 11 - Dias típico das três cidades correspondentes às zonas bioclimáticas

	ZB1 - Curitiba		ZB2 - Pelotas		ZB3 - Florianópolis	
Médias	Dia Típico de Verão (21/01)	Dia Típico de Inverno (21/07)	Dia Típico de Verão (23/01)	Dia Típico de Inverno (19/06)	Dia Típico de Verão (21/01)	Dia Típico de Inverno (21/07)
Temperatura mínima [°C]	21	3,1	27,52	7,92	25,7	8,5
Temperatura máxima [°C]	28,6	3,1	36,1	12,74	30,8	8,5
Amplitude térmica [°C]	10,2	10,2	10,35	7,96	7,9	7,9
Velocidade do vento [m/s]	3,9	0,5	2,11	6,06	4,7	1,5

Fonte: Adaptado de Leitzke, 2018; LABEEE, 2018.

Conhecer as condições climatológicas e as necessidades de conforto dos ambientes proporciona o planejamento prévio e a análise dos materiais construtivos a serem empregados nas edificações (CRUZ, 2009).

3.3.6 Definição de temperatura do solo

Em se tratando principalmente de edificações térreas, a temperatura do solo é um parâmetro importante, pois o resultado das trocas de calor do ambiente tem como fator determinante as trocas de calor entre o piso e o solo (OLIVEIRA, 2012). Os ganhos de energia por radiação podem acontecer de modo direto, difuso, por reflexão da energia no solo e nas adjacências, por emissão do solo aquecido e da atmosfera. As perdas são capazes de ocorrer por radiação emitida da edificação para o ar circundante, para o solo ou para superfície (BEZERRA, 2003).

Desta forma, a temperatura do solo foi determinada a partir da utilização do programa *SLAB*, vinculado ao *EnergyPlus®*. Para isso foi necessário realizar uma simulação inicial para a verificação das temperaturas médias mensais do ar interno, em que o solo foi considerado sob uma condição adiabática. Em seguida, as temperaturas médias mensais do ar interno obtidas foram configuradas e simuladas com o *SLAB*, que corrige as temperaturas médias mensais do solo (Tabela 12). Os resultados obtidos foram configurados no *EnergyPlus®*.

Tabela 12 - Temperaturas médias mensais do solo do caso base nas ZB1, ZB2 e ZB3

Mês	ZB1: Curitiba		ZB2: Pelotas		ZB3: Florianópolis	
	CA (°C)	VN (°C)	CA (°C)	VN (°C)	CA (°C)	VN (°C)
Janeiro	21,44	20,28	24,77	24,40	24,28	24,04
Fevereiro	22,18	21,13	24,5	24,21	24,40	24,18
Março	21,85	20,76	23,08	22,3	23,96	23,53
Abril	20,85	19,58	21,45	20,5	23,13	22,51
Mai	19,39	17,07	19,11	17,22	21,31	20,31
Junho	18,63	15,82	17,72	14,59	20,23	18,95
Julho	19,15	16,79	17,99	15,23	19,64	17,90
Agosto	19,37	17,01	18,13	15,43	19,64	17,82
Setembro	19,22	16,67	18,96	17,04	20,07	18,59
Outubro	20,30	18,33	20,58	19,48	21,67	20,86
Novembro	20,62	19,25	22,44	21,49	22,73	22,13
Dezembro	21,69	20,48	23,74	22,97	23,54	23,12

CA= Condicionado Artificialmente; VN= Ventilado Naturalmente.

3.3.7 Configuração do sistema de climatização artificial e de ventilação natural

Conforme sugerido pelo RTQ-R (2009), foram criados dois casos base. O modelo ventilado naturalmente foi configurado com ventilação natural durante 24 horas diárias. A abertura das janelas acontece quando a temperatura do ar do ambiente for igual ou superior à temperatura do termostato, ou seja, 20°C ($T_{\text{int}} \geq T_{\text{setpoint}}$), e quando houver condições favoráveis, ou seja, quando a temperatura do ar externo é inferior à temperatura do ar interno ($T_{\text{ext}} \leq T_{\text{int}}$).

O modelo condicionado artificialmente foi estabelecido através de um sistema de ar-condicionado para os ambientes de permanência prolongada no período noturno, das 21h às 8h, com *setpoint* de 22°C para aquecimento e 24°C para refrigeração. O sistema de aquecimento tem um coeficiente de performance (COP) de 2,75, e o sistema de refrigeração, de 3,00. A taxa de fluxo de ar por pessoa é de $0,00944 \text{ m}^3/\text{s}$. A eficiência do motor é de 0,90, e a do ventilador é de 0,70. Para o período diurno foi definida a ventilação natural, das 8h às 21h e controlada igualmente ao modelo ventilado naturalmente.

3.4 Configuração dos edifícios otimizados

Foram configuradas 15 variações do envelope a partir do caso base. A estratégia foi melhorar o isolamento térmico da cobertura agregando 2,3 cm, 1,0 cm e 0,5 cm do isolante térmico estudado. Para as paredes externas, o isolante térmico foi adicionado em espessuras de 2,5 cm, 1,5 cm e 0,5, cm. A tabela 13 exemplifica as espessuras utilizadas e mostra as propriedades da espuma vítrea FOAMGLAS® T4+, utilizada como isolante térmico nas otimizações tanto na cobertura quanto nas paredes externas. Simultaneamente, de maneira a facilitar o entendimento das otimizações e resultados futuramente expostos neste trabalho, na tabela 13 também se apresenta os códigos de cada nomenclatura utilizada na organização das otimizações.

Tabela 13 - Propriedades e espessuras da espuma vítrea

Cobertura							
	Cód.	e (m)	λ (W/mK)	ρ (kg/m ³)	c (kJ/kgK)	R (m ³ /WK)	CT (kJ/m ² K)
Espuma vítrea	C1	0,023	0,041	115	1	0,56	2,64
	C2	0,01				0,24	1,15
	C3	0,005				0,12	0,57

Paredes externas							
	Cód.	e (m)	λ (W/mK)	ρ (kg/m ³)	c (kJ/kgK)	R (m ³ /WK)	CT (kJ/m ² K)
Espuma vítrea	P1	0,025	0,041	115	1	0,60	2,90
	P2	0,015				0,36	1,72
	P3	0,005				0,12	0,57

e= Espessura; λ = Condutividade térmica; ρ = Densidade de massa aparente; c= Calor específico; R= Resistência térmica, CT= Capacidade térmica.

3.4.1 Isolamento da cobertura

Nas otimizações da cobertura, foram utilizados três níveis de isolamento, com espessuras de 0,8 cm para a telha de fibrocimento, uma câmara de ar de 5 cm e forro de madeira de 2 cm. As mudanças se dão a partir da variação da espessura da espuma vítrea, que são 2,3 cm, 1 cm e 0,5 cm, respectivamente intituladas como otimização C1, C2 e C3. As tabelas 14, 15 e 16 abaixo, mostram a composição de cada otimização para cobertura.

Tabela 14 - Composição da cobertura – Otimização C1

Cobertura – C1						
Composição	e (m)	λ (W/mK)	ρ (kg/m ³)	c (kJ/kgK)	R (m ³ /WK)	CT (kJ/m ² K)
Telha fibrocimento	0,008	0,65	1800	0,84	0,01	12,10
Câmara de ar	> 0,05	-	-	-	0,14	0
Espuma vítrea	0,023	0,041	115	1	0,56	2,64
Forro de madeira	0,02	0,12	450	1,34	0,17	12,06
Resistência térmica total						1,05
Transmitância térmica						0,95

Capacidade térmica total	26,80
---------------------------------	-------

e= Espessura; λ = Condutividade térmica; ρ = Densidade de massa aparente; c= Calor específico; R= Resistência térmica, CT= Capacidade térmica.

Tabela 15 - Composição da cobertura – Otimização C2

Cobertura – C2						
Composição	e (m)	λ (W/mK)	ρ (kg/m³)	c (kJ/kgK)	R (m²/WK)	CT (kJ/m²K)
Telha fibrocimento	0,008	0,65	1800	0,84	0,01	12,10
Câmara de ar	> 0,05	-	-	-	0,14	0
Espuma vítrea	0,01	0,041	115	1	0,24	1,15
Forro de madeira	0,02	0,12	450	1,34	0,17	12,06
Resistência térmica total	0,73					
Transmitância térmica	1,37					
Capacidade térmica total	25,31					

e= Espessura; λ = Condutividade térmica; ρ = Densidade de massa aparente; c= Calor específico; R= Resistência térmica, CT= Capacidade térmica.

Tabela 16 - Composição da cobertura – Otimização C3

Cobertura – C3						
Composição	e (m)	λ (W/mK)	ρ (kg/m³)	c (kJ/kgK)	R (m²/WK)	CT (kJ/m²K)
Telha fibrocimento	0,008	0,65	1800	0,84	0,01	12,10
Câmara de ar	> 0,05	-	-	-	0,14	0
Espuma vítrea	0,005	0,041	115	1	0,12	0,57
Forro de madeira	0,02	0,12	450	1,34	0,17	12,06
Resistência térmica total	0,61					
Transmitância térmica	1,64					
Capacidade térmica total	24,73					

e= Espessura; λ = Condutividade térmica; ρ = Densidade de massa aparente; c= Calor específico; R= Resistência térmica, CT= Capacidade térmica.

3.4.2 Isolamento das paredes

Para as otimizações da composição das paredes externas também foram utilizados três níveis de isolamento, sendo as camadas compostas por 2 cm de argamassa, um bloco cerâmico de 6 furos com 14 cm, espuma vítrea como isolante e outra camada de argamassa de também 2 cm. Neste caso, as variações são igualmente da espessura da espuma vítrea, de 2,5 cm, 1,5 cm e 0,5 cm, respectivamente intituladas como otimização P1, P2 e P3, conforme tabelas 17, 18, e 19 abaixo.

Tabela 17 - Composição da parede externa – Otimização P1

Paredes externas - P1						
Composição	e (m)	λ (W/mK)	ρ (kg/m ³)	c (kJ/kgK)	R (m ² /WK)	CT (kJ/m ² K)
Argamassa	0,02	1,15	1800	1	0,02	36
Bloco cerâmico 6 furos - 14x10x29	0,14	0,70	609,28	0,92	0,20	78,48
Espuma vítrea	0,025	0,041	115	1	0,61	2,88
Argamassa	0,02	1,15	1800	1	0,02	36
Resistência térmica total						1,02
Transmitância térmica						0,98
Capacidade térmica total						153,36

e= Espessura; λ = Condutividade térmica; ρ = Densidade de massa aparente; c= Calor específico; R= Resistência térmica, CT= Capacidade térmica.

Tabela 18 - Composição da cobertura – Otimização P2

Paredes externas – P2						
Composição	e (m)	λ (W/mK)	ρ (kg/m ³)	c (kJ/kgK)	R (m ² /WK)	CT (kJ/m ² K)
Argamassa	0,02	1,15	1800	1	0,02	36
Bloco cerâmico 6 furos - 14x10x29	0,14	0,70	609,28	0,92	0,20	78,48
Espuma vítrea	0,015	0,041	115	1	0,37	1,73
Argamassa	0,02	1,15	1800	1	0,02	36

Resistência térmica total	0,78
Transmitância térmica	1,28
Capacidade térmica total	152,21

e= Espessura; λ = Condutividade térmica; ρ = Densidade de massa aparente; c= Calor específico; R= Resistência térmica, CT= Capacidade térmica.

Tabela 19 - Composição da cobertura – Otimização P3

Paredes externas						
Composição	e (m)	λ (W/mK)	ρ (kg/m ³)	c (kJ/kgK)	R (m ² /WK)	CT (kJ/m ² K)
Argamassa	0,02	1,15	1800	1	0,02	36
Bloco cerâmico 6 furos - 14x10x29	0,14	0,70	609,28	0,92	0,20	78,48
Espuma vítrea	0,005	0,041	115	1	0,12	0,57
Argamassa	0,02	1,15	1800	1	0,02	36
Resistência térmica total						0,53
Transmitância térmica						1,87
Capacidade térmica total						151,05

e= Espessura; λ = Condutividade térmica; ρ = Densidade de massa aparente; c= Calor específico; R= Resistência térmica, CT= Capacidade térmica.

3.4.3 Isolamento das paredes e cobertura

As otimizações combinadas foram nomeadas conforme a espessura do isolante térmico tanto na cobertura quanto na parede, condicionadas artificialmente e ventiladas naturalmente. Por exemplo, C1P1 corresponde à otimização combinada que considerou a espessura de 2,3 cm de isolante para a cobertura e 2,5 cm de isolante para a parede, conforme descrito na tabela 20, e, assim, sucessivamente, resultando em nove casos combinados:

Tabela 20 - Espessura das espumas vítreas nas otimizações combinadas

	e (m) Cobertura	e (m) Parede
C1P1	0,023	0,025
C1P2	0,023	0,015
C1P3	0,023	0,005
C2P1	0,01	0,025
C2P2	0,01	0,015
C2P3	0,01	0,005
C3P1	0,005	0,025
C3P2	0,005	0,015
C3P3	0,005	0,005

3.5 Método de avaliação do desempenho térmico

O desempenho térmico do sistema construtivo alternativo foi avaliado através da análise comparativa em relação as paredes e coberturas construídas sem o isolamento térmico (caso base), considerando a edificação ventilada naturalmente e condicionada artificialmente, entre todas as configurações otimizadas do modelo. Tal análise foi baseada no modelo de conforto adaptativo da *ASHRAE 55* (2017) representado graficamente na figura 17.

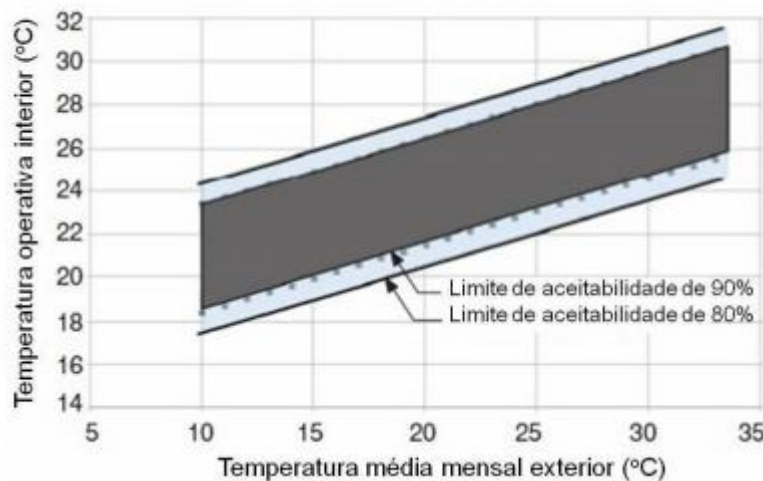


Figura 17 - Temperatura operativa de conforto em função da temperatura média

Fonte: Adaptado de ASHRAE 55, 2017.

Essa relação linear representa o intervalo de conforto da temperatura operativa de conforto (T_{oc}), em função da temperatura média mensal exterior (T_{ext}) para duas classes de conforto correspondentes a 80 % e 90 % de satisfação dos ocupantes,

incluindo os limites de aceitabilidade de 90% apenas para informação. A expressão adotada no cálculo da temperatura operativa, considerando o limite de 80% de aceitabilidade, é traduzida pela equação 9.

$$T_{oc} = 17,8 + 0,31 T_{ext} \quad (9)$$

Onde:

T_{oc} = Temperatura operativa de conforto (°C)

T_{ext} = Temperatura média mensal externa (°C)

Para 80% de aceitabilidade dos usuários, a temperatura operativa interna pode variar de -3,5°C até +3,5°C da temperatura operativa de conforto obtida a partir da equação 9.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caso base

A *International Energy Agency*, IEA (2019) estima que os verões mais quentes e as ondas de frio foram responsáveis por quase um quinto do crescimento no uso global de energia em 2018, os quais aumentaram a demanda por resfriamento e levando a maiores necessidades de aquecimento. Na tabela 21 são apresentados os resultados do consumo de aquecimento e resfriamento do caso base, representada pela edificação condicionada artificialmente, regulamentada através da NBR 15575 e com configurações iguais de geometria e solução de envelope para as zonas bioclimáticas 1, 2 e 3 propostas, considerando a área de construção condicionada. Os mesmos resultados estão apresentados no gráfico da figura 18. Os casos ventilados naturalmente possuem gasto energético anual por área de construção de 51,79 kWh/m².

Tabela 21 - Resultado do consumo de energia anual para caso base

ZB	Consumo de energia kWh/m ² .ano		
	Aquecimento	Resfriamento	Total
1	47,32	0,33	47,65
2	35,92	3,36	39,28
3	16,28	4,41	20,69

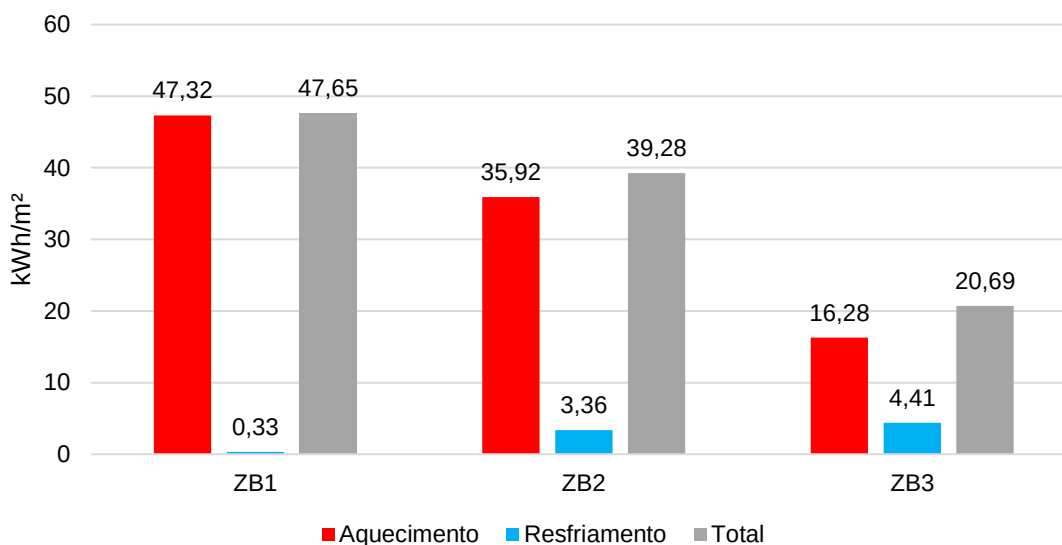


Figura 18 - Resultado do consumo de energia anual para o caso base.

Tanto o desempenho térmico quanto o consumo de energia (Figura 18) são distintos nas três zonas bioclimáticas, pois estão associados às condições climáticas do local. Em todas as edificações, há uma alta transmitância térmica do envelope que possibilita as trocas de calor entre a parte interna da edificação com o ambiente exterior. Os ganhos internos e o auxílio do sistema de ar-condicionado produzem calor dentro do edifício e este calor, considerando o período de inverno, é perdido de forma rápida para o exterior através do envelope. O consumo de energia de aquecimento acentuado é o resultado deste comportamento que, para manter a temperatura interna dentro dos limites de conforto no período da noite, ativa o condicionamento de ar.

No período do dia durante o inverno, a edificação ganha calor através do envelope, tanto pelos fechamentos opacos quanto pelos transparentes, através da radiação solar direta e por condução, como visto anteriormente. Neste intervalo de tempo, a ventilação natural mantém o conforto térmico, que é acionada com *setpoint* de 20 °C quando a temperatura interna é superior à externa (condição favorável). Isso pode gerar sobreaquecimento, pois a edificação é capaz de permanecer sem ventilar por alguns períodos. O envelope da edificação possui alta transmitância térmica que contribuiu para o resfriamento da edificação, visto que o calor recebido durante o dia passa para o exterior do envelope que, neste período, apresenta temperatura menor que seu interior. Ou seja, este movimento auxilia na diminuição do consumo de energia para resfriamento, no período noturno, quando o ar-condicionado é acionado.

Assim a ZB1, que possui clima mais frio e índices de percentual de desconforto menores para calor (na maioria dos casos, com percentual menor que 1% tanto com condicionamento de ar, tanto para ventilação natural), obteve o menor consumo de energia de resfriamento e consumo elevado para aquecimento. Essa zona possui o percentual de conforto com valores médios entre as zonas térmicas que constituem a edificação, exceto para a ZT3 onde seu percentual de conforto é o mais elevado, quando comparado às outras zonas bioclimáticas. Além disso, seu desconforto por frio também aparece com valores médios em todas as zonas térmicas. Já as zonas bioclimáticas 2 e 3 apresentaram consumos de energia ligeiramente maiores para resfriamento, devido a seus verões mais rigorosos.

Já nos casos climatizados, a ZB2 apresenta os maiores índices de desconforto por frio em função do inverno mais rigoroso, índices intermediários de desconforto por calor e menor percentual de conforto térmico das zonas estudadas e, além disso

mostra uma alta variação de temperatura, devido seus valores extremos. Na ventilação natural, a ZB2 mantém seus percentuais de conforto intermediário em todas as zonas, e índices de desconforto por frio também em percentual médio, excetuando a ZT2 que apresenta percentual superior, comparando com as outras zonas bioclimáticas. Mesmo indicando os maiores percentuais de desconforto por calor e maior consumo de energia de resfriamento no caso base condicionado artificialmente e ventilado naturalmente a ZB3 exibe os maiores percentuais de conforto térmico e menor consumo de energia.

Nas tabelas 22 e 23 estão apresentados os resultados do conforto térmico adaptativo das zonas térmicas do caso base, para as zonas bioclimáticas 1, 2 e 3, condicionado artificialmente e ventilado naturalmente, para fins de comparação.

Tabela 22 - Percentual de conforto e desconforto das zonas térmicas do caso base condicionado artificialmente

	ZT1 (Dormitório 1)			ZT2 (Dormitório 2)		
	Conforto (%)	Frio (%)	Calor (%)	Conforto (%)	Frio (%)	Calor (%)
ZB1	89,54%	9,62%	0,83%	88,78%	10,61%	0,62%
ZB2	81,97%	16,78%	1,24%	80,54%	18,55%	0,91%
ZB3	90,10%	7,16%	2,74%	89,37%	8,14%	2,49%

	ZT3 (Estar/Cozinha)			ZT4 (Banheiro)		
	Conforto (%)	Frio (%)	Calor (%)	Conforto (%)	Frio (%)	Calor (%)
ZB1	89,03%	9,21%	1,76%	50,97%	48,71%	0,32%
ZB2	81,94%	16,07%	1,99%	49,83%	49,26%	0,91%
ZB3	87,72%	8,38%	3,90%	67,80%	30,01%	2,19%

Tabela 23 - Percentual de conforto e desconforto das zonas térmicas do caso base ventilado naturalmente

	ZT1 (Dormitório 1)			ZT2 (Dormitório 2)		
	Conforto (%)	Frio (%)	Calor (%)	Conforto (%)	Frio (%)	Calor (%)
ZB1	45,54%	54,24%	0,23%	41,93%	57,93%	0,14%
ZB2	42,99%	55,87%	1,14%	40,95%	58,17%	0,88%
ZB3	61,19%	36,61%	2,20%	59,46%	38,66%	1,87%

ZT3 (Estar/Cozinha)			ZT4 (Banheiro)		
---------------------	--	--	----------------	--	--

	Conforto (%)	Frio (%)	Calor (%)	Conforto (%)	Frio (%)	Calor (%)
ZB1	39,77%	59,30%	0,92%	34,94%	64,99%	0,07%
ZB2	41,05%	57,09%	1,86%	38,38%	60,76%	0,86%
ZB3	55,97%	40,88%	3,15%	55,01%	43,32%	1,67%

Em se tratando de orientações e zonas térmicas, no caso condicionado artificialmente, a ZT1 apresenta os maiores percentuais de conforto térmico de 89,54% (ZB1), 81,97% (ZB2) e 90,10% (ZB3), e índices intermediários de desconforto por frio entre as zonas (desconsiderando a ZT4, que não é considerada uma zona de permanência prolongada) com percentuais de 9,62% 16,78% e 7,16%, respectivamente. O mesmo ocorre no caso base ventilado naturalmente, mantendo os maiores percentuais de conforto (45,54%, 42,99% e 61,19%), porém, ao contrário do caso condicionado, tem os menores desconfortos por frio.

É sabido que as edificações do hemisfério sul que estão orientadas e possuem suas aberturas na fachada norte apresentam maiores vantagens quanto aos ganhos de calor. Desta forma, assim como a ZT1, também a ZT3 possui bons percentuais de conforto, uma vez que parte de suas aberturas estão igualmente orientadas para o norte, correspondendo ao total de 19,18% de aberturas na fachada norte. A ZT2 (...)

Também, para fins de comparação, um valor de conforto térmico médio ponderado para cada uma das edificações de todas as zonas bioclimáticas, considerando-os condicionados artificialmente e ventilados naturalmente (Figura 19), foi gerado respeitando as proporções dos cômodos na área construída total da edificação (Tabela 23). Além disso, é importante ressaltar que para o caso climatizado, a configuração da edificação foi feita através das indicações do RTQ-R, sendo avaliado pelo modelo de conforto adaptativo da *ASHRAE* 55 (2017), que estipula o conforto térmico em limites de 80% de aceitabilidade. Ou seja, os casos condicionados artificialmente devem levar em consideração não somente seus percentuais de conforto, mas principalmente o do consumo energético necessário para alcançar as variações de conforto.

Tabela 24 - Área das zonas térmicas

	Área (m²)	Área (%)
ZT1	8,6	18,75

ZT2	7,36	16,05
ZT3	26	56,70
ZT4	3,9	8,50
Total	45,86	100

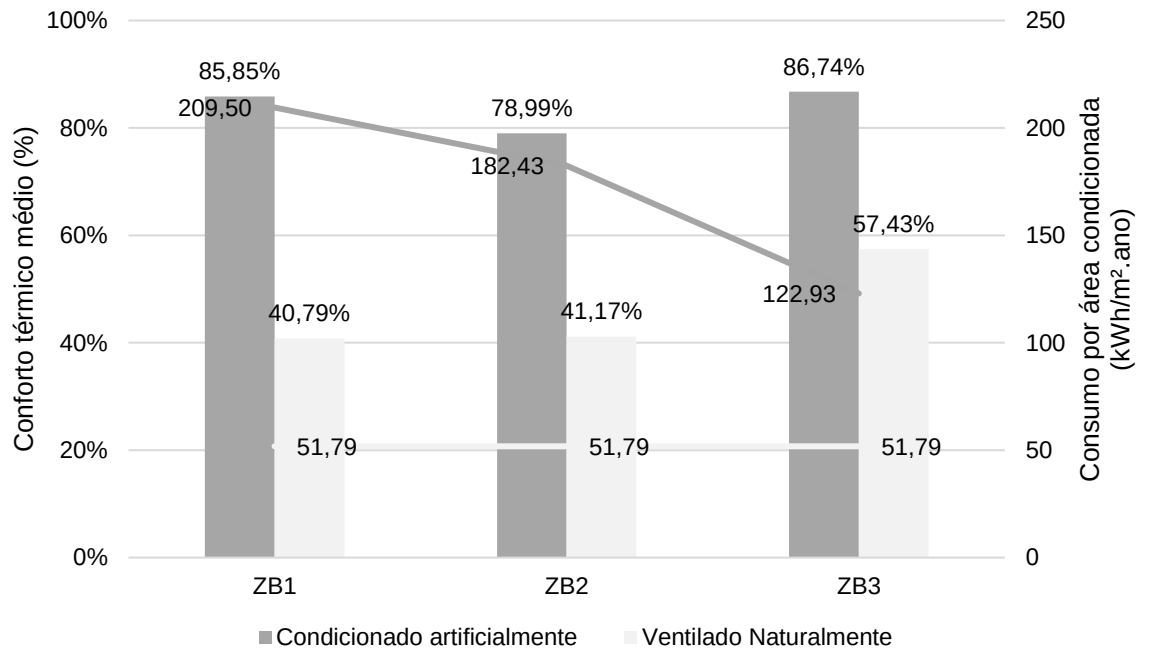


Figura 19 - Conforto adaptativo médio das zonas bioclimáticas.

O caso base, quando aplicado na ZB3, apresenta melhores percentuais de conforto térmico médio, tanto para o caso condicionado artificialmente quanto para o ventilado naturalmente. Essa zona apresenta também o menor valor do gasto de energia para manter seus cômodos com maiores percentuais de conforto, devido a menor diferença entre o caso ventilado naturalmente e condicionado artificialmente, que é de 29,31%,

Quando aplicado à ZB1, o caso base possui percentual com valor médio de conforto quando condicionado artificialmente, porém, o menor percentual para o caso ventilado naturalmente, chegando a uma variação de 45,06% de conforto entre as duas situações. Além disso, possui o maior gasto energético apresentado para chegar ao nível de conforto térmico de 85,85%.

Desta forma, o caso base aplicado à ZB2 possui o menor percentual de conforto térmico para o caso base condicionado e valor próximo do percentual da edificação

aplicada na ZB1 para a situação de ventilação natural. Sua variação de percentual entre as duas situações chega a 37,82%.

4.2 Conforto por zona térmica dos casos otimizados com ventilação natural

As figuras 20, 21, 22 e 23 exibem os níveis de conforto térmico para cada zona térmica nos modelos ventilados naturalmente, apresentando menores e maiores índices de conforto, quando comparados ao caso base nas mesmas condições. A tabela completa com os valores de conforto, desconforto por frio e desconforto por calor de cada um dos casos otimizados se encontram no apêndice B.

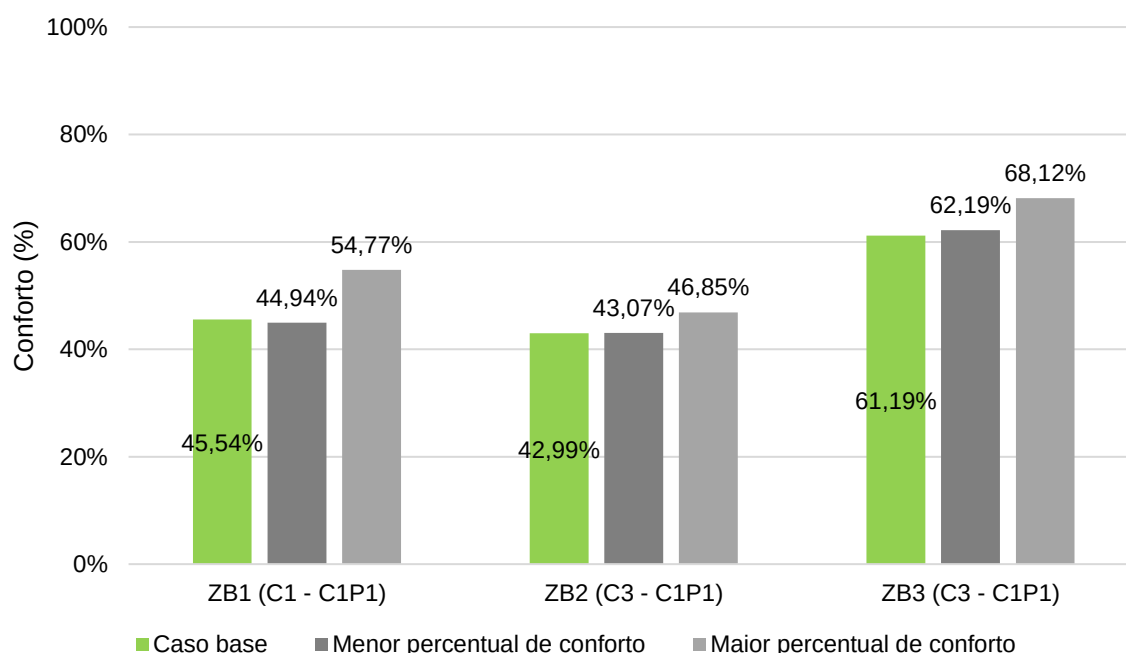


Figura 20 - Índice percentual do conforto térmico das ZT1 ventiladas naturalmente.

Através da figura 20 é possível perceber que para a ZT1, apesar da ZB3 ter atingido um conforto de 68,12% e haver diferença de 6,93% entre o caso base e o caso otimizado, o isolante térmico tem melhor comportamento na ZB1, onde houve um aumento de 9,23% no percentual de conforto, comparando o caso base com o caso otimizado de maior percentual de conforto. Na ZB2 houve um acréscimo de 3,89% de conforto total para a edificação, comparada ao caso base.

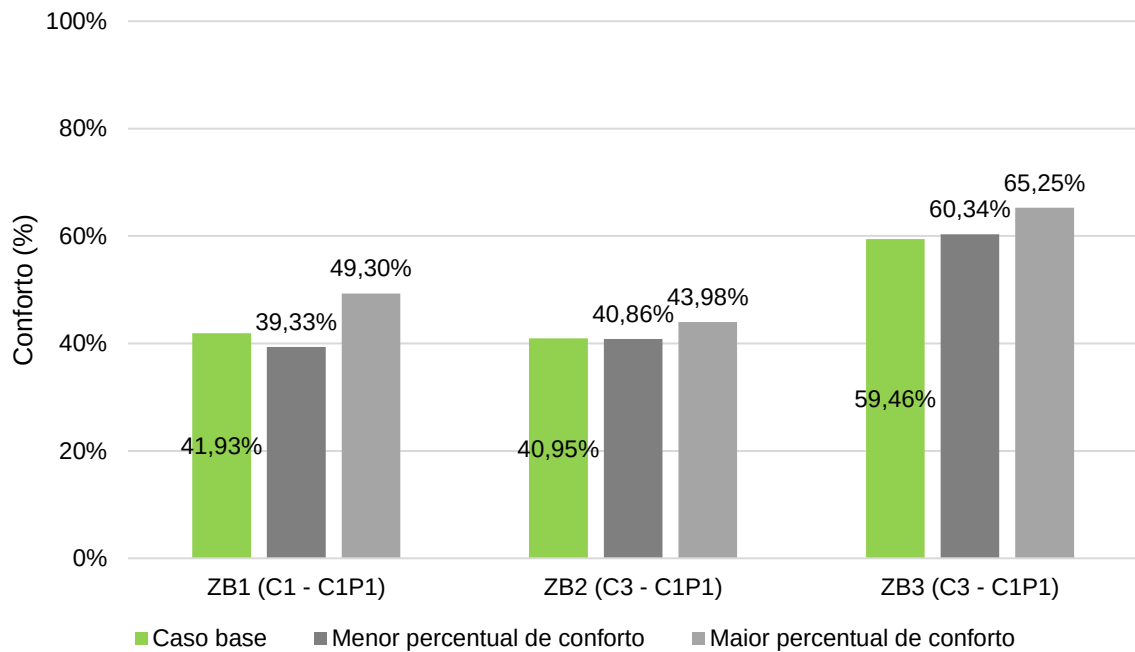


Figura 21 - Índice percentual do conforto térmico das ZT2 ventiladas naturalmente.

Na figura 21 verifica-se que na ZT2 o maior percentual de conforto também é apresentado na ZB3, chegando a 65,25% e com diferença de 5,79% comparado ao caso base. Também na ZB1 a espuma vítrea apresenta o maior aumento percentuais de conforto chegando a 7,37%, quando comparada ao caso base. Porém, é possível perceber que houve uma diminuição de 2,60% para o menor percentual de conforto térmico, do caso otimizado C1. A ZB2 também apresenta a menor diferença de conforto térmico entre o caso base e o caso otimizado e redução de 0,09% para o menor percentual de conforto.

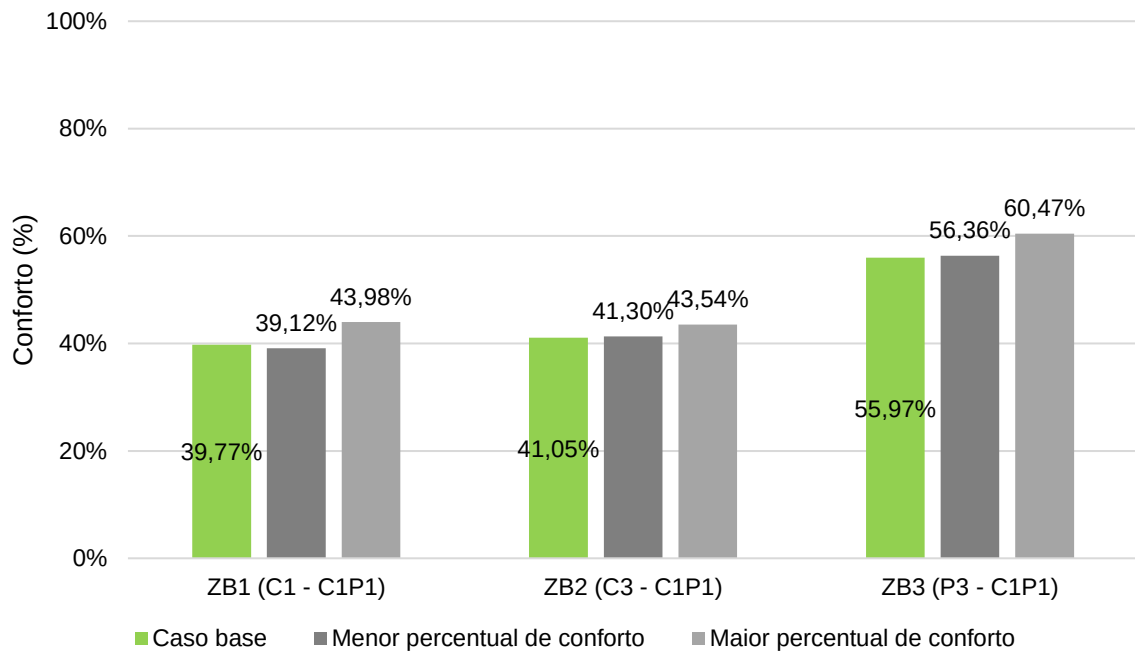


Figura 22 – Índice percentual do conforto térmico das ZT3 ventiladas naturalmente.

Já na figura 22, na zona ZT3 os maiores índices de conforto térmico seguem na ZB3 com valores de 60,47% e, neste caso, há também a maior mudança do percentual de conforto, aumentando seus valores tanto o caso com maior percentual de conforto (com valor de 4,50% de diferença em relação ao caso base), quanto para o caso com menor percentual de conforto, com diferença de 0,39%. A ZB2 segue com a menor diferença entre o caso base e o maior percentual de conforto. A ZB1, que nas outras zonas térmicas aparece com melhor comportamento do isolante térmico, para a ZT3 mostra valor de 4,21%, e não pode ser considerada a zona que apresenta melhor aproveitamento do isolante, e tem perda de 0,65% de conforto para o caso não otimizado.

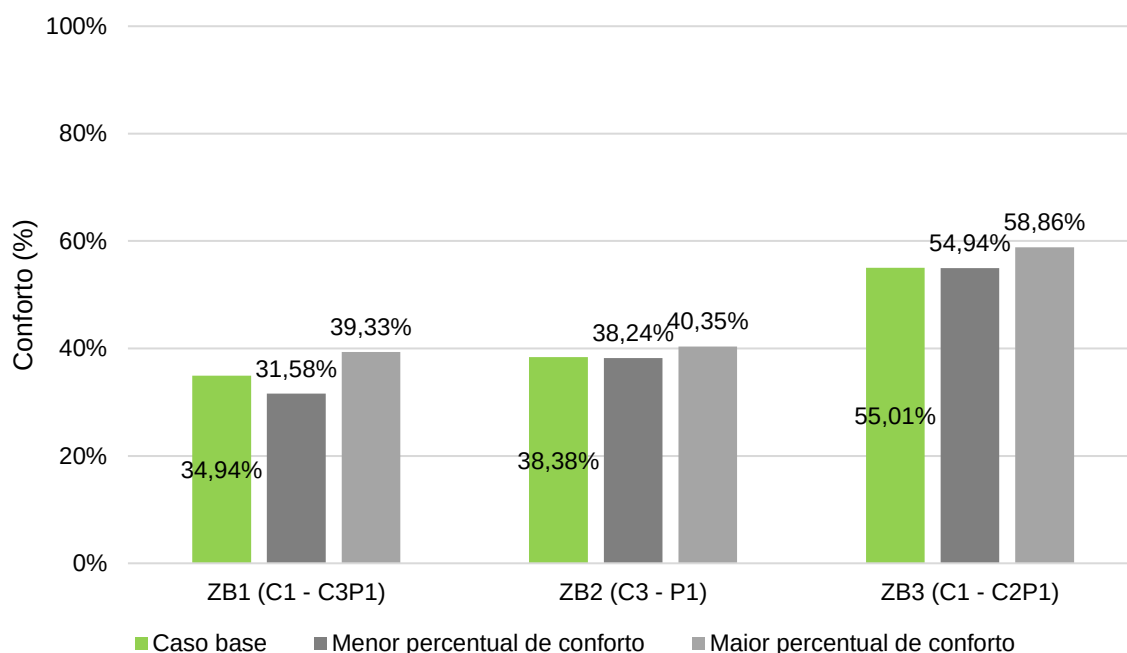


Figura 23 - Índice percentual do conforto térmico das ZT4 ventiladas naturalmente.

Quanto à ZT4, que corresponde a zona do banheiro, observou-se que esta tem os menores índices de conforto e as menores diferenças entre o caso não otimizado e o otimizado. Ainda assim, é possível perceber que a ZB1 apresenta a maior diferença entre o maior percentual de conforto e o caso base, com valor de 4,39% e a ZB2 apresenta a menor diferença entre o percentual, com 1,97%. Neste caso, quando comparado o caso base com os modelos otimizados com menor percentual de conforto, todos os resultados apresentam piora no conforto térmico, com número de 3,36%, 0,14% e 0,07% na ZB1, ZB2 e ZB3, respectivamente.

Devido suas orientações (como mostrado anteriormente no item 3.2) a ZT1 tem sua abertura direcionada para o norte, a ZT2 para o sul, ZT3 tem abertura para ambas as orientações, porém possui maior percentual para o norte e a ZT4 para sul.

Assim como o caso base, também foi feito uma média ponderada para obter o conforto térmico médio para cada uma das edificações das zonas bioclimáticas 1, 2 e 3 das otimizações ventiladas naturalmente, considerando a área dos cômodos na

área construída total da edificação. As figuras 24, 25 e 26 mostram os valores percentuais médios obtidos:

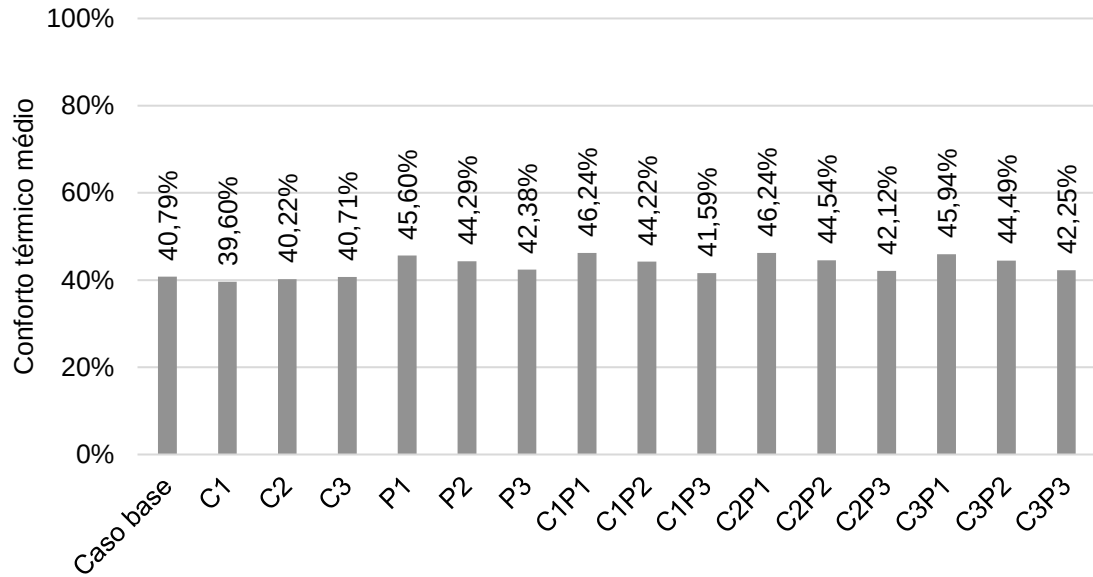


Figura 24 - Conforto térmico adaptativo médio dos edifícios ventilados naturalmente na ZB1.

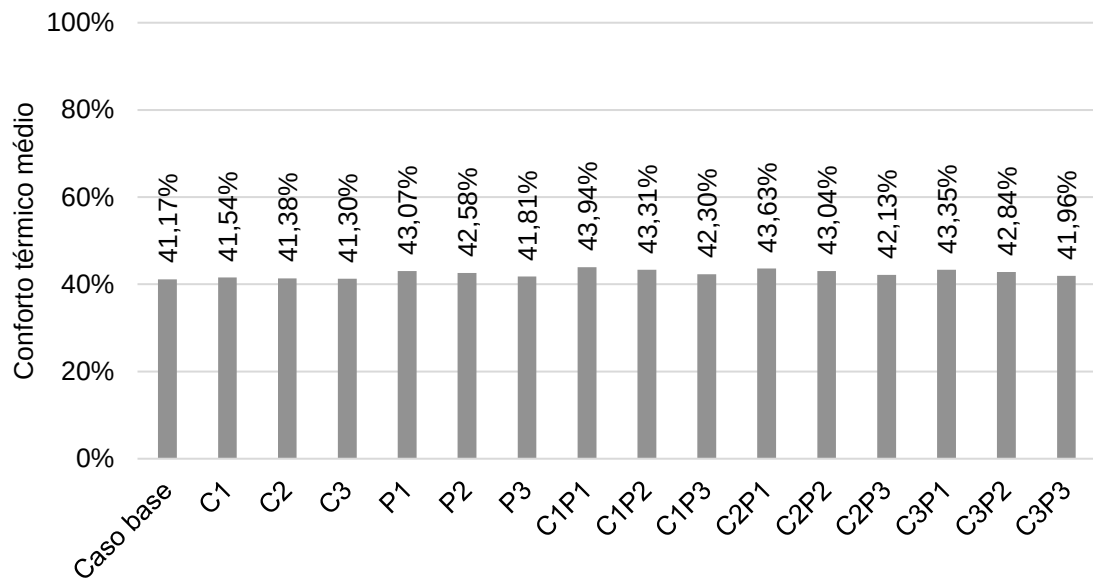


Figura 25 - Conforto térmico adaptativo médio dos edifícios ventilados naturalmente na ZB2.

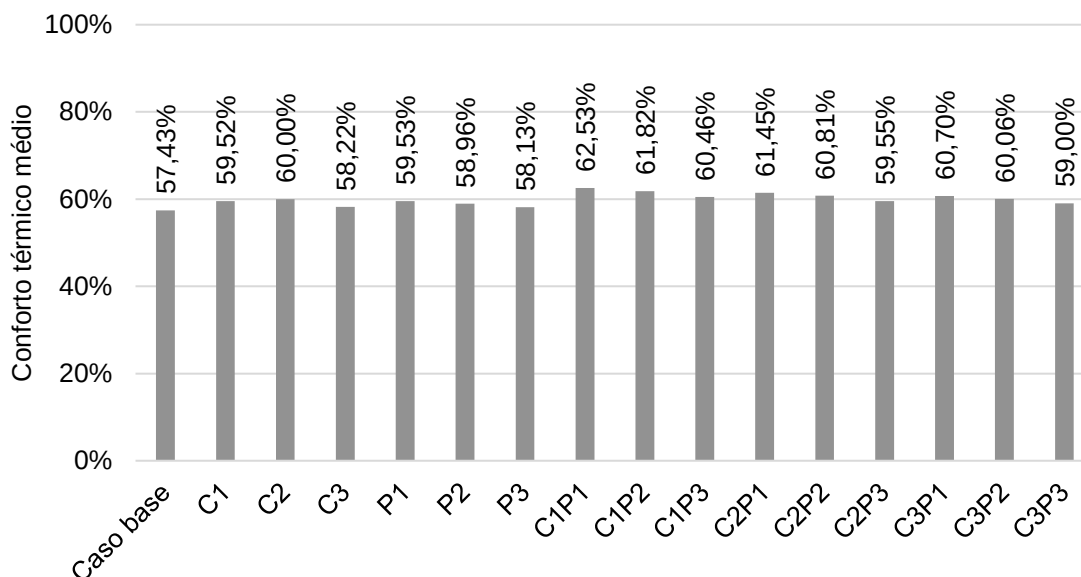


Figura 26 - Conforto térmico adaptativo médio dos edifícios ventilados naturalmente na ZB3.

Analisando-se comparativamente as figuras 24, 25 e 26 verifica-se que, apesar da ZB3 possuir maiores valores percentuais de conforto térmico médio, a zona ZB1 apresenta o resultado mais significativo de conforto térmico médio dos edifícios ventilados naturalmente, pois houve aumento de 5,45% entre o caso base e o caso otimizado com maior valor. Isso mostra que, considerando os percentuais médios ponderados dos edifícios ventilados naturalmente, a espuma vítrea auxilia de forma mais eficiente na ZB1.

4.3 Conforto e consumo anual de energia dos casos otimizados com condicionamento artificial

Os gastos energéticos para os edifícios otimizados com ventilação natural mantêm seus valores iguais ao caso base. Isto ocorre pois todos os casos possuem as mesmas configurações de ocupação e iluminação, exceto os casos em que há a configuração do sistema de climatização, o qual é utilizado para manter os níveis de conforto térmico, quando necessário, considerando as trocas de calor do envelope com o meio externo e o sobreaquecimento. O mesmo acontece para a ZT4 (banheiro), a qual o ar-condicionado não é acionado, mesmo nos casos otimizados onde há climatização nas outras zonas térmicas para manter os níveis de conforto. Ou seja,

neste caso a ZT4 se comporta da mesma maneira que os casos otimizados apenas com ventilação natural e também mantém seus gastos energéticos.

As figuras 27, 28 e 29 estão os maiores e menores percentuais de conforto térmico para as zonas térmicas condicionadas artificialmente, que estão comparados às figuras 31, 32, e 33, que apresentam os consumos anuais de energia por área de construção condicionada de cada uma das otimizações e dos casos bases também climatizados.

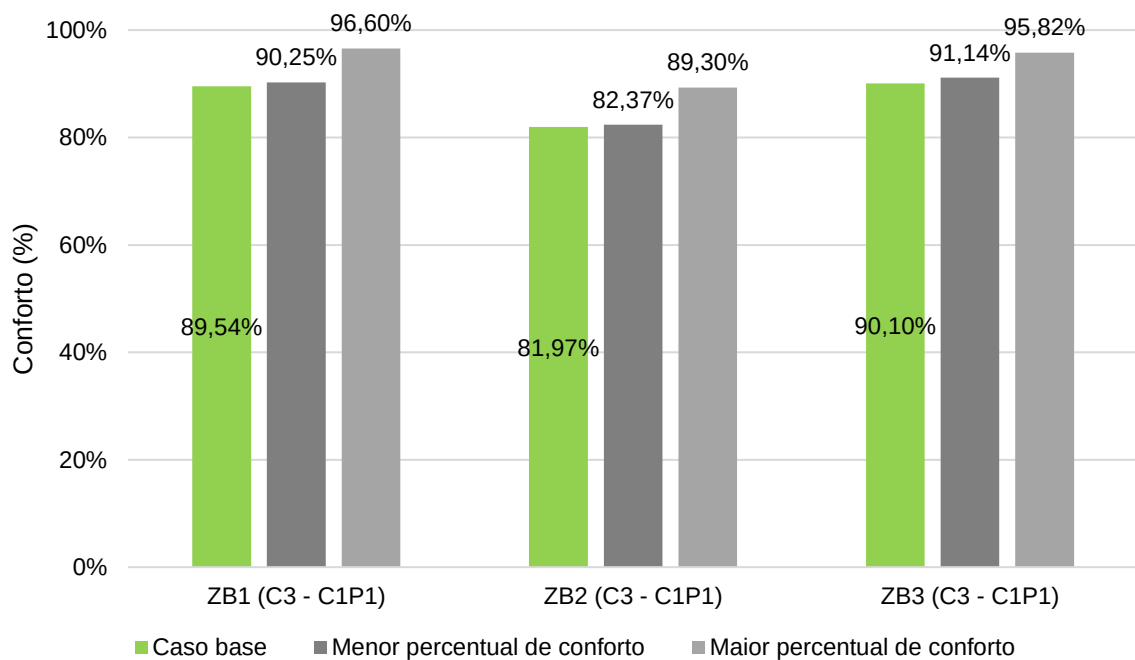


Figura 27 - Índice percentual do conforto térmico das ZT1 condicionadas artificialmente.

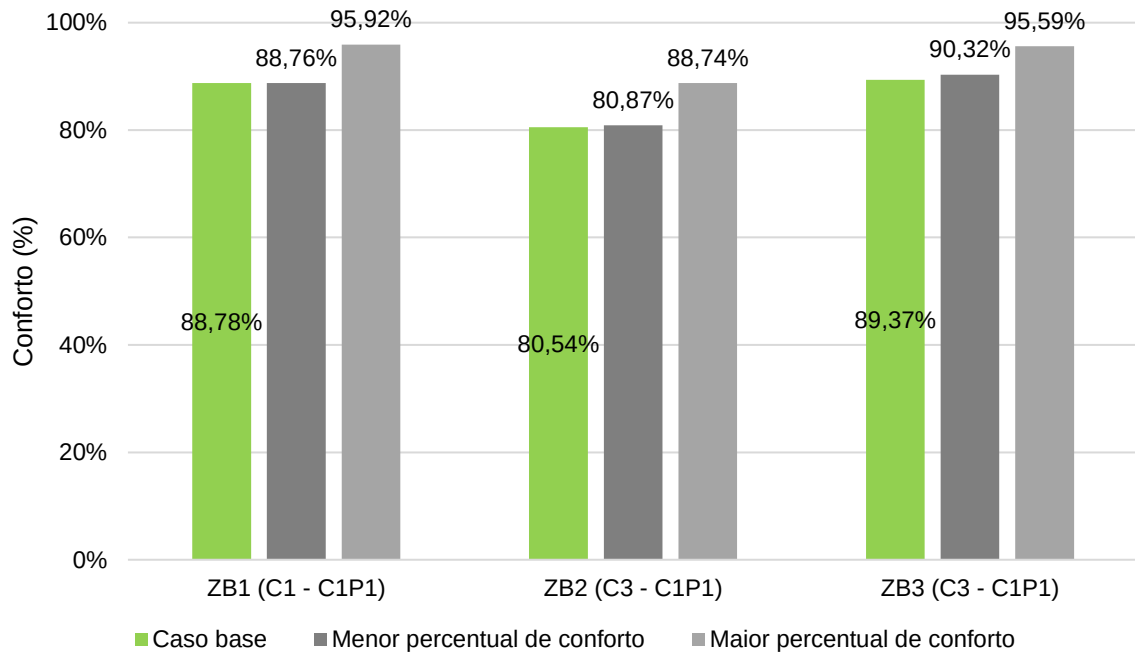


Figura 28 - Índice percentual do conforto térmico das ZT2 condicionadas artificialmente.

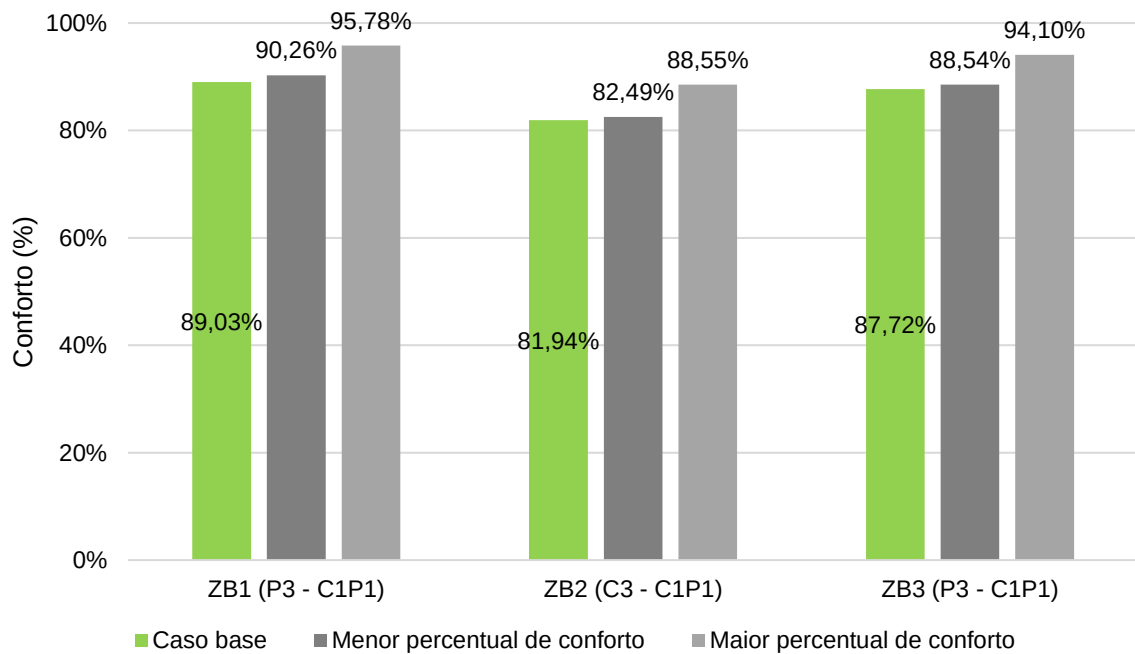


Figura 29 - Índice percentual do conforto térmico das ZT3 condicionadas artificialmente.

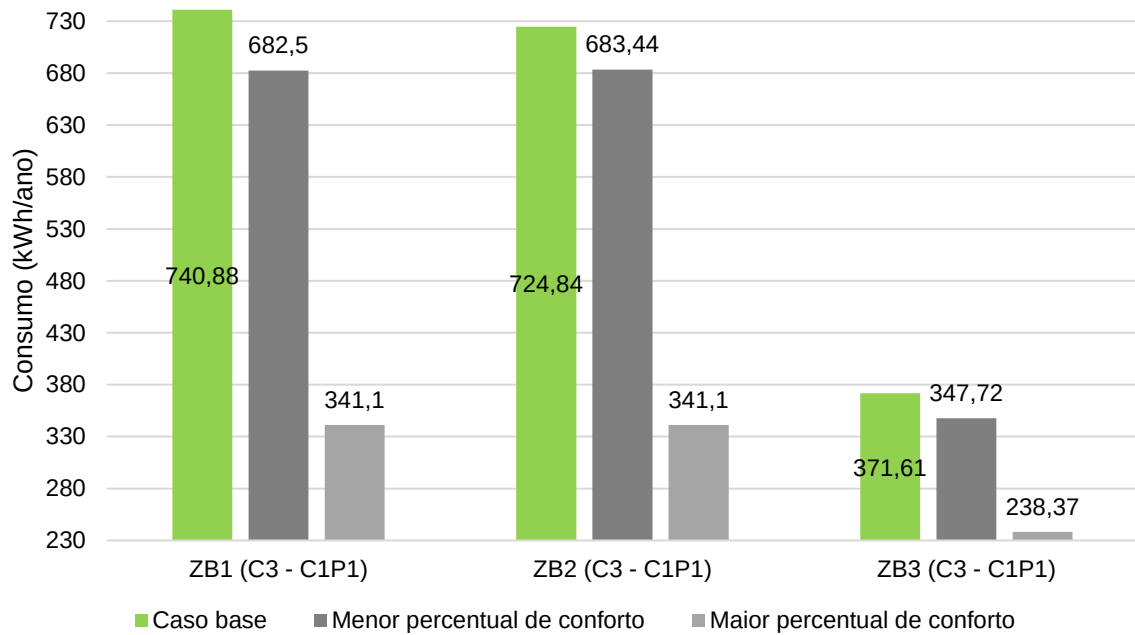


Figura 30 - Consumo anual de energia das ZT1 condicionadas artificialmente.

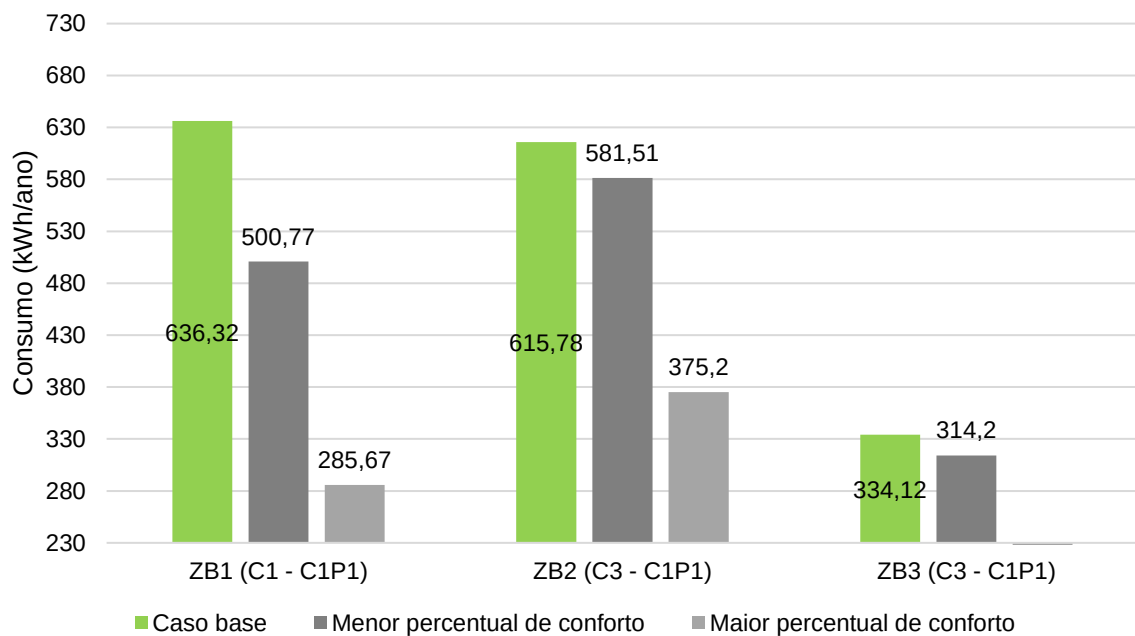


Figura 31 - Consumo anual de energia das ZT2 condicionadas artificialmente.

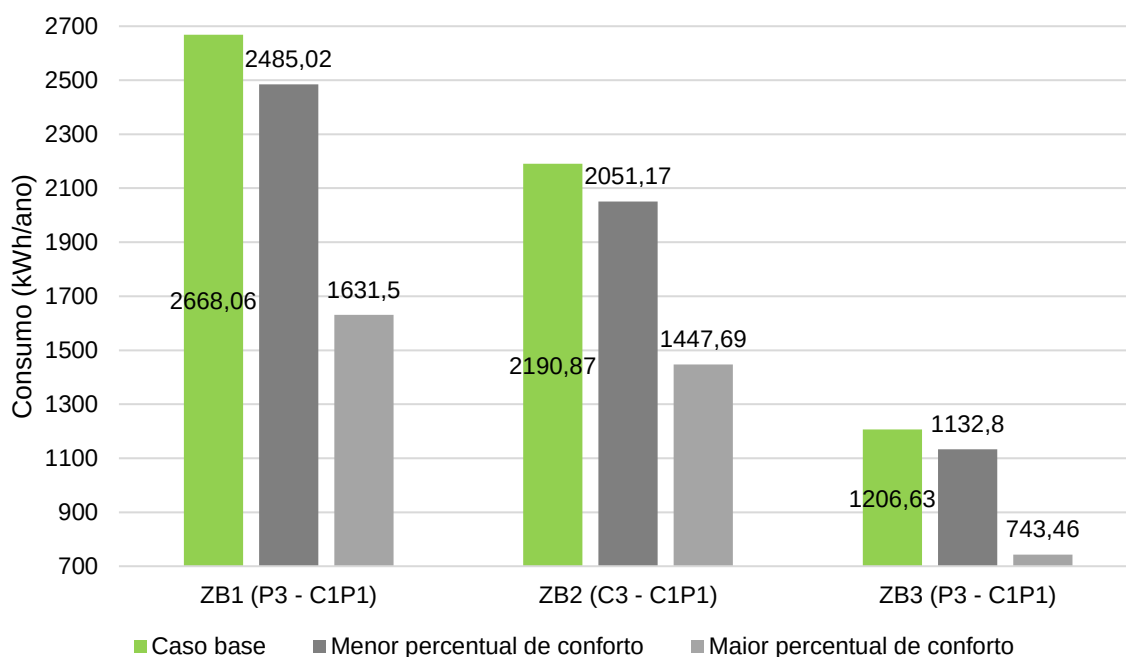


Figura 32 - Consumo anual de energia das ZT3 condicionadas artificialmente.

Na ZT1, as ZB1, ZB2 e ZB3 apresentam, respectivamente, aumento de 7,06%, 7,33% e 5,72% no percentual de conforto entre o caso base sem otimização e o maior percentual de conforto das otimizações empregas. Em comparação com o menor percentual de conforto, essa diferença é de 0,71%, 0,4% e 1,04%, na mesma ordem.

Em relação ao consumo, há uma diminuição de 399,78 kWh/ano (ZB1), 383,74 kWh/ano (ZB2) e 133,24 kWh/ano para os casos otimizado com maiores percentuais de conforto. Já a diminuição em comparação com o menor percentual de conforto, estes números chegam a 58,38 kWh/ano (ZB1), 41,40 kWh/ano (ZB2) e 133,24 kWh/ano (ZB3).

Já na ZT2, a diferença entre o caso base e os casos otimizados com maiores percentuais de conforto para a ZB1, ZB2 e ZB3 chegam a valores de 7,14%, 8,2% e 6,22%, nesta ordem. O caso otimizado com menor percentuais de conforto para a ZB1 ficou com uma variação de -0,02%, o que, na prática, mostra que não houve variação significativa do conforto neste caso. Para a ZB2, a variação ficou em 0,33% e na ZB3 a diferença é de 0,95%.

Os consumos para a ZT2, considerando os casos com maiores percentuais de conforto apresentam variação de 350,65 kWh/ano, 240,58 kWh/ano e 112,20 kWh/ano para a ZB1, ZB2 e ZB3. Já o consumo em relação aos casos com menores

percentuais de conforto tem variações de 135,55 kWh/ano, 34,27 kWh/ano e 19,92 kWh/ano, respectivamente,

Ainda, na ZT3 a variação dos percentuais do caso base com os maiores percentuais de conforto são de 6,75% (ZB1), 6,61% (ZB2) e 6,38% (ZB3). A variação em comparação com os maiores percentuais de conforto tem valores de 1,23%, 0,55% e 0,82%. Para o consumo, os valores chegam a 1036,56 kWh/ano, 743,18 kWh/ano e 463,17 kWh/ano para a ZB1, ZB2 e ZB3, respectivamente. Já com os menores percentuais de conforto, os valores apresentados de variação são de 182,56 kWh/ano, 139,7 kWh/ano e 73,83 kWh/ano.

Isso mostra que os maiores consumos para o nível aceitável de conforto térmico estão nos casos onde há maiores espessuras de isolamento térmico, tanto para parede quanto para cobertura. Além disso, a análise das figuras mostra que para todos os ambientes testados a condição C1P1 foi a que apresentou maior percentual de conforto térmico.

Já a figura 33 compara o consumo anual de energia por área de construção condicionada (kWh/m²) para os casos condicionados artificialmente de todas as zonas bioclimáticas. É possível perceber que as zonas bioclimáticas 1 e 2 apresentam maiores consumos de energia, sendo predominante para aquecimento (figura 34) por possuírem inverno mais rigoroso quando comparado com a zona bioclimática 3, que apresenta consumo de energia predominante para resfriamento (figura 35), isso ocorre devido às condições climáticas de cada zona.

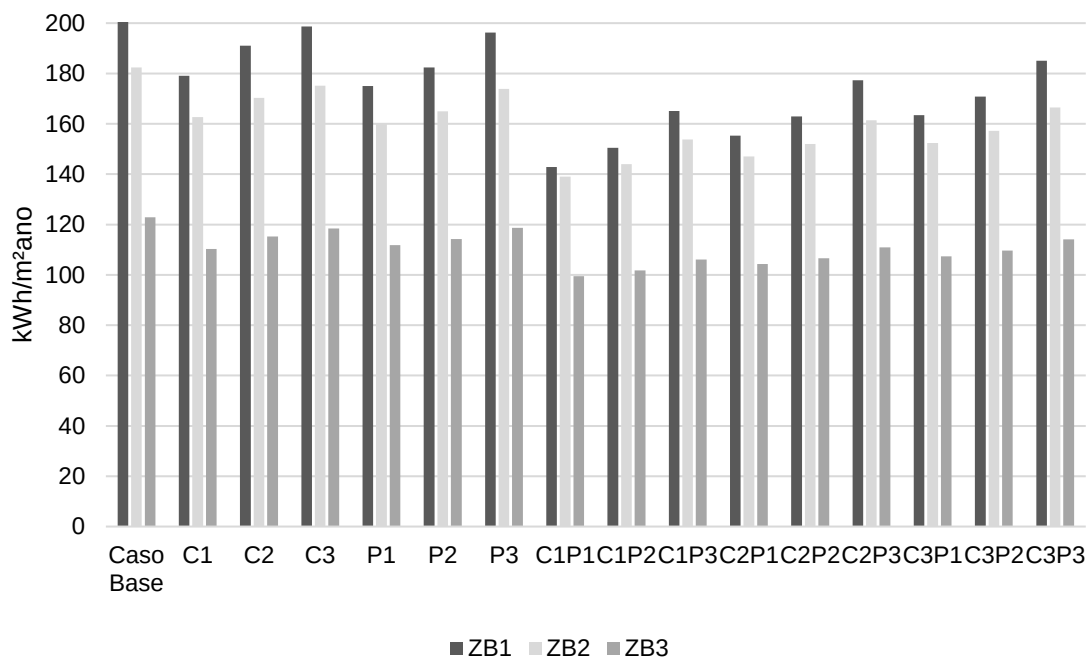


Figura 33 - Consumo anual de energia por área de construção condicionada artificialmente.

A figura 34 mostra o consumo anual de energia por aquecimento por área de construção condicionada artificialmente. Nesta é possível verificar que em relação ao caso base o consumo de energia de aquecimento foi menor para todas as situações testadas e que o pico de redução de consumo ocorreu para a amostra C1P1. A justificativa para o significativo pico de redução na amostra C1P1 está na maior espessura das paredes e da cobertura, uma vez que a troca térmica do ambiente interno com o externo é menor, mantendo o interior da edificação com maiores valores de conforto térmico e, assim, necessitando menores valores de energia para alcançar níveis de conforto acima de 80% de aceitabilidade.

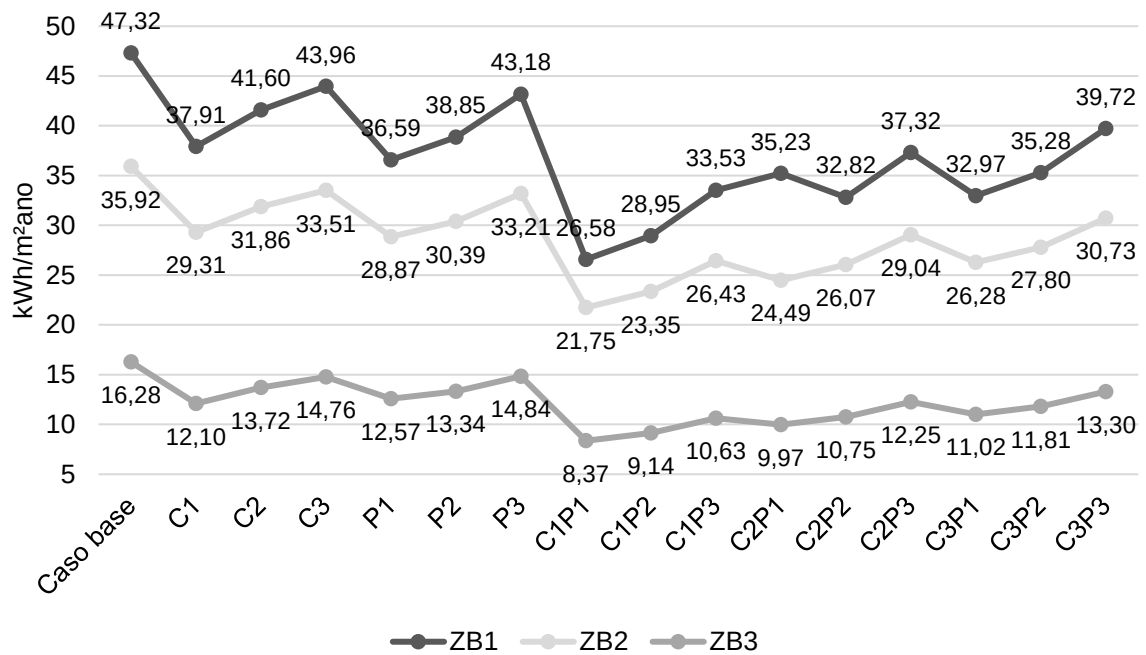


Figura 34 - Consumo anual de energia por aquecimento por área de construção condicionada artificialmente.

Fonte: Autora.

A figura 35 mostra o consumo anual de energia por resfriamento por área de construção condicionada artificialmente. Na análise da figura percebe-se que na zona ZB1 não houve aumento significativo de energia para o resfriamento e que para as zonas ZB2 e ZB3 o aumento de energia apresentou curvas similares tendo um pico significativo de aumento na amostra C1P1.

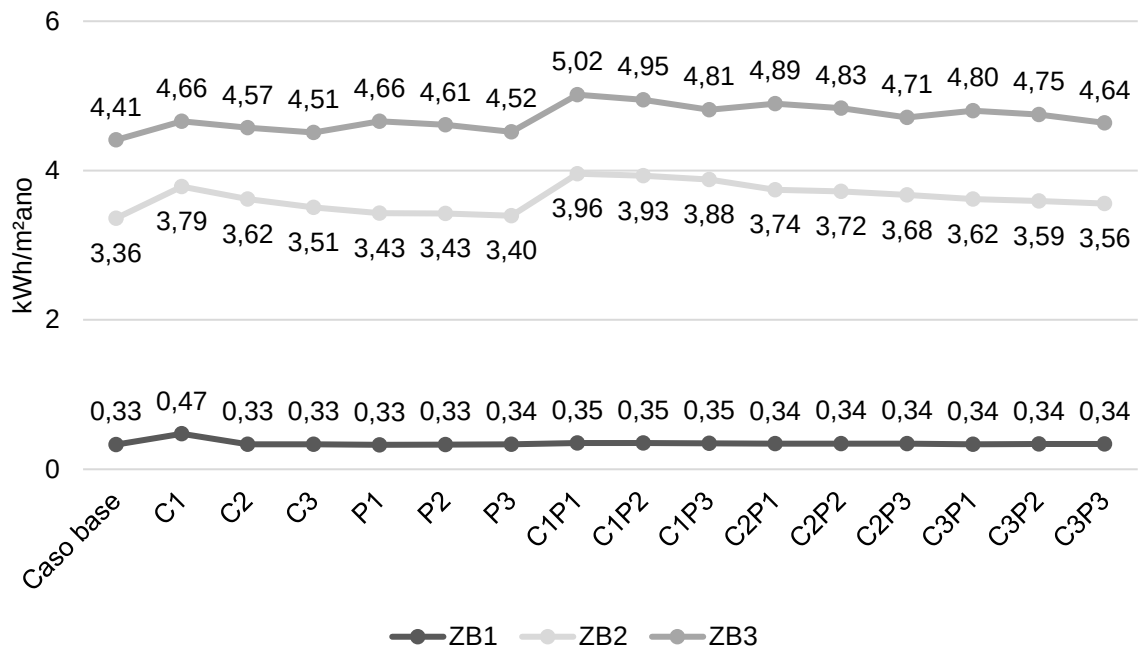


Figura 35 - Consumo anual de energia por resfriamento por área de construção condicionada artificialmente.

Mesmo que haja um leve aumento de consumo anual de energia por resfriamento nos casos mais isolados termicamente (e, por sua vez, mais confortáveis), os valores de consumo geral foram reduzidos significativamente com a utilização do isolante térmico e os percentuais de conforto também aumentaram.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As simulações feitas no caso base com o uso da espuma vítrea possibilitou perceber que para a melhor compreensão e avaliação do desempenho térmico de edificações é necessário o entendimento das diferentes variáveis que o estudo pode integrar.

Através desta pesquisa, percebe-se que há necessidade de adequação dos projetos das habitações de interesse social do Programa Minha Casa Minha Vida, que são aplicados para diferentes regiões, uma vez que cada local possui características bioclimáticas próprias e os sistemas construtivos recomendados passam a ser aceitos de forma geral, quando deveriam ser feitas intervenções nos projetos e materiais utilizados, podendo haver mais horas de conforto térmico para os usuários.

Além disso foi observado que as espumas vítreas, quando aplicadas como isolantes térmicos no envelope da edificação, aumentam os níveis de conforto mesmo sem intervenção no projeto arquitetônico e diminuem o consumo de energia elétrica destinada à climatização dos ambientes.

Vale ressaltar que, além das vantagens já citadas, as espumas vítreas são materiais passíveis de pesquisa para substituição de matérias-primas, possibilitando a substituição das mesmas por materiais alternativos, reutilizáveis e, assim, contribuir para a diminuição dos resíduos que são parcialmente descartados de forma incorreta.

Por fim, pode-se concluir que este estudo possibilitou uma análise qualitativa com enfoque na otimização da edificação como um todo, a fim de atingir percentuais de conforto térmico satisfatórios para o método de avaliação referido.

5.1 Limitações da pesquisa

Como limitação do trabalho é possível destacar que a pesquisa realizada não considerou os gastos atribuídos aos materiais de construção utilizados nas edificações e os investimentos para a aplicação das soluções propostas, bem como os custos de construção, fatores estes que podem vir a ser alvo de pesquisas complementares.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

O estudo proposto analisou de forma qualitativa os percentuais de conforto térmico das zonas bioclimáticas 1, 2 e 3 com a utilização de otimizações em seu envelope, considerando as espumas vítreas como isolantes térmicos. Porém, é importante destacar a necessidade de ampliação da pesquisa, através das avaliações do desempenho frente à norma NBR 15575 e o RTQ-R.

Por se tratar de um estudo em uma habitação de interesse social, o desenvolvimento de novos estudos com matérias-primas alternativas residuais na produção das espumas vítreas, que possam reduzir os possíveis custos de utilização das comercializadas, também, é uma proposta futura. Desta forma, além de reduzir os custos de energia devido a utilização de um isolante térmico e atingir os níveis de conforto, se viabilizaria a reutilização de materiais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE INCORPORADORAS IMOBILIÁRIAS - ABRAINC. **Análise das Necessidades Habitacionais e suas Tendências para os Próximos Dez Anos.** Disponível em: <<https://www.abrainc.org.br/wp-content/uploads/2018/10/ANEHAB-Estudo-completo.pdf>>. Acesso em: 20 mar. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-15220:** Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005.

ASTM; C168 – Standard terminology relating to thermal insulation; **ASTM International**; West Conshohocken/PA United States, 2003.

BEZERRA, Luciano André Cruz. **Análise do desempenho térmico de sistema constitutivo de concreto com EPS como agregado graúdo.** 2003. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

BRASIL. Decreto n. 4.059, de 19 de dezembro de 2001. Regulamenta a Lei no 10.295, de 17 de outubro de 2001, que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, e dá outras providências. Lex: Diário Oficial da União, Brasília, 2001a.

BRASIL. Lei Federal nº. 11.977, de 7 de julho de 2009. Dispõe sobre o Programa Minha Casa, Minha Vida – PMCMV e a regularização fundiária de assentamentos localizados em áreas urbanas. Brasília, 2009.

BRASIL. Lei nº. 10295, de 17 de outubro de 2001. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia. Lex: Diário Oficial da União, Brasília, 2001b.

CALLISTER, W. D. 2013. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução.** Rio de Janeiro - RJ. Oitava edição. Editora LTC.

CRUZ, Michelle Paiva. **Aplicação de resíduo industrial para isolamento térmico: uma proposta para utilização do poliuretano de mamona com agregado de resíduo plástico termofixo.** 2009. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

EPE – Empresa de Pesquisas Energéticas; **Balanço Energético Nacional 2019, ano base 2018**; Rio de Janeiro: EPE, 2019, 292p.

FOSAS, Daniel et al. Mitigation versus adaptation: Does insulating dwellings increase overheating risk? **Building and Environment**, [s. l.], v. 143, n. May, p. 740–759, 2018.

HENRIQUES, Francisco. Reabilitação térmica de edifícios. 2007.

IEA, **Explore energy data by category, indicator, country or region.** IEA, Paris, 2019. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tables?country=WORLD> 20 mar. 2020.

IEA, International Energy Agency. **Technology Roadmap - Energy efficient buildings envelopes** SpringerReference. 2013 [s.l: s.n.]. Disponível em: <http://www.springerreference.com/index/doi/10.1007/SpringerReference_7300>. MMV 2020>. Acesso em: 20 mar. 2020.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL - INMETRO. Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais, RTQ-R. Eletrobrás, 2012.

INVIDIATA, Andrea et al. Análise do desempenho termoenergético de habitações unifamiliares de interesse social através do método de simulação do regulamento brasileiro. **XII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC)**. São Paulo, 2016.

KÖNIG, Jakob; PETERSEN, Rasmus R.; YUE, Yuanzheng. Influence of the glass–calcium carbonate mixture’s characteristics on the foaming process and the properties of the foam glass. **Journal Of The European Ceramic Society**. S.i, p. 1591-1598. jun. 2014.

KÖNIG, Jakob et al. Synthesis and properties of open-and closed-porous foamed glass with a low density. **Construction and Building Materials**, v. 247, p. 118574, 2020.

KNOP, Stifany. **Comportamento Termoenergético de Edificação Histórica com Novo Uso na Cidade de Pelotas: O Caso do Casarão 02–Secretaria Municipal da Cultura**. 2012. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pelotas.

LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando OR. Eficiência Energética na Arquitetura. 3ª Edição. **São Paulo: PW**, 2014.

LEITZKE, Rodrigo Karini et al. Optimization of the Traditional Method for Creating a Weather Simulation File: The Pelotas. epw Case. **Journal Of Civil Engineering and Architecture (online)**, v. 12, p. 741-756, 2018.

LI, Yadong; JIN, Li. Environmental release of mercury from broken compact fluorescent lamps. **Environmental Engineering Science**, v. 28, n. 10, p. 687-691, 2011.

MARINHO, G. S., OLIVEIRA, M. M.M F.; MENDES, J. U. L.; ARAÚJO V. M. D. de. **Aproveitamento de resíduo para fabricação de bloco construtivo alternativo**. In: III Encontro Nacional Sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis – ENECS. São Carlos-SP, 2003.

MELO, Ana Paula et al. Análise da influência da transmitância térmica no consumo de energia de edificações comerciais. 2007.

MIRRAHIMI, Seyedehzahra et al. The effect of building envelope on the thermal comfort and energy saving for high-rise buildings in hot-humid climate. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 53, p. 1508–1519, 2016.

MUGONI, CONSUELO et al. Design of glass foams with low environmental impact. **Ceramics International**, v. 41, n. 3, p. 3400-3408, 2015.

OLIVEIRA, Liader da Silva. **Avaliação dos Limites das Propriedades Térmicas dos Fechamentos Opacos da NBR 15220-3, para Habitações de Interesse Social, da Zona Bioclimática 2**. 2012. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pelotas.

POKORNY, Andrea. Obtenção e caracterização de espumas vítreas a partir de resíduos de vidro sodo-cálcico e calcário dolomítico como agente espumante. 2006.

PROCEL. **Pesquisas de Posse e Hábitos de Consumo de Energia (PPHs)**. 2019. Disponível em: <<http://www.procel.gov.br/main.asp?View=%7B4A5E324F-A3B0-482A-B1CDF75A2A150480%7D>>. Acesso em: 1 nov. 2019.

RAKHSHAN, Kambiz; FRIESS, Wilhelm A. Effectiveness and viability of residential building energy retrofits in Dubai. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 13, n. November 2016, p. 116–126, 2017.

RANGEL, Eduarda Medran et al. Espumas vítreas produzidas a partir de resíduos sólidos. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 23, n. 1, 2018.

SCHEFFLER, Michael; COLOMBO, Paolo (Ed.). **Cellular ceramics: structure, manufacturing, properties and applications**. John Wiley & Sons, 2006.

SHI, Huan et al. Influence of aluminium nitride as a foaming agent on the preparation of foam glass-ceramics from high-titanium blast furnace slag. **International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials**, v. 23, n. 5, p. 595-600, 2016.

SILVA, Arthur Santos; GHISI, Enedir. Análise comparativa dos resultados do desempenho térmico da envoltória de uma edificação residencial pelos métodos de simulação do RTQ-R e da NBR 15575-1. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 1, p. 215-230, 2014.

SMITHSON, Jackie. CK-12 Foundation, 2014. Disponível em: <<http://www.shutterstock.com>>. Acesso em: 4 nov. 2020.

TEIXEIRA, Luyza Bortolotto et al. Desenvolvimento de espumas vítreas obtidas a partir de resíduos. 2016.

TRIANA, Maria Andrea; LAMBERTS, Roberto; SASSI, Paola. Characterisation of representative building typologies for social housing projects in Brazil and its energy performance. **Energy Policy**, [s. l.], v. 87, n. December 2014, p. 524–541, 2015.

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

VELOSA, J. C.; FANGUEIRO, Raúl; MENDONÇA, Paulo. Estudo das propriedades térmicas de materiais fibrosos aplicados em paredes divisórias leves. **Ciência & Tecnologia dos Materiais**, v. 25, n. 1, p. 50-56, 2013.

ZHU, Mengguang et al. Preparation of glass ceramic foams for thermal insulation applications from coal fly ash and waste glass. **Construction and Building Materials**, v. 112, p. 398-405, 2016

Apêndices

Apêndice A – Percentual de conforto e desconforto das zonas térmicas da ZB1 condicionada artificialmente

ZB1 - Curitiba												
	ZT1			ZT2			ZT3			ZT4		
	Conf. (%)	Frio (%)	Calor (%)	Conf. (%)	Frio (%)	Calor (%)	Conf. (%)	Frio (%)	Calor (%)	Conf. (%)	Frio (%)	Calor (%)
Caso base	89,54%	9,62%	0,83%	88,78%	10,61%	0,62%	89,03%	9,21%	1,76%	50,97%	48,71%	0,32%
C1	90,53%	9,44%	0,03%	88,76%	11,24%	0,00%	90,79%	9,10%	0,11%	51,21%	48,79%	0,00%
C2	90,66%	9,28%	0,06%	89,11%	10,88%	0,01%	90,35%	9,08%	0,57%	51,21%	48,79%	0,00%
C3	90,25%	9,39%	0,35%	89,14%	10,71%	0,15%	89,95%	9,11%	0,94%	51,15%	48,81%	0,03%
P1	94,41%	4,65%	0,95%	94,21%	5,03%	0,75%	92,57%	5,48%	1,95%	63,85%	35,70%	0,46%
P2	93,24%	5,84%	0,91%	92,91%	6,38%	0,71%	91,72%	6,35%	1,93%	60,42%	39,16%	0,42%
P3	91,39%	7,77%	0,83%	90,71%	8,69%	0,61%	90,26%	7,95%	1,79%	55,09%	44,53%	0,38%
C1P1	96,60%	3,37%	0,03%	95,92%	4,08%	0,00%	95,78%	4,16%	0,07%	69,62%	30,38%	0,00%
C1P2	95,42%	4,53%	0,05%	94,54%	5,46%	0,00%	94,74%	5,19%	0,07%	64,49%	35,51%	0,00%
C1P3	92,75%	7,20%	0,05%	91,42%	8,58%	0,00%	92,66%	7,25%	0,09%	56,42%	43,58%	0,00%
C2P1	95,92%	3,96%	0,11%	95,56%	4,44%	0,00%	94,77%	4,54%	0,68%	67,47%	32,53%	0,00%
C2P2	94,91%	5,02%	0,07%	94,19%	5,81%	0,00%	93,80%	5,58%	0,62%	62,95%	37,05%	0,00%
C2P3	92,41%	7,53%	0,06%	91,53%	8,47%	0,00%	91,95%	7,47%	0,58%	55,95%	44,05%	0,00%
C3P1	95,29%	4,22%	0,49%	95,08%	4,71%	0,21%	93,97%	4,91%	1,12%	65,96%	33,98%	0,06%
C3P2	94,28%	5,32%	0,40%	93,78%	6,05%	0,17%	93,12%	5,82%	1,06%	61,89%	38,05%	0,06%
C3P3	92,15%	7,57%	0,29%	91,32%	8,55%	0,13%	91,29%	7,73%	0,98%	55,84%	44,11%	0,05%

Apêndice B – Percentual de conforto e desconforto das zonas térmicas da ZB1 ventilada naturalmente

ZB1 - Curitiba												
	ZT1			ZT2			ZT3			ZT4		
	Conf. (%)	Frio (%)	Calor (%)	Conf. (%)	Frio (%)	Calor (%)	Conf. (%)	Frio (%)	Calor (%)	Conf. (%)	Frio (%)	Calor (%)
Caso base	45,54%	54,24%	0,23%	41,93%	57,93%	0,14%	39,77%	59,30%	0,92%	34,94%	64,99%	0,07%
C1	44,94%	55,06%	0,00%	39,33%	60,67%	0,00%	39,12%	60,88%	0,00%	31,58%	68,42%	0,00%
C2	45,10%	54,86%	0,03%	40,58%	59,42%	0,00%	39,60%	60,23%	0,17%	32,96%	67,04%	0,00%
C3	45,71%	54,25%	0,05%	41,30%	58,70%	0,00%	39,92%	59,63%	0,45%	33,81%	66,19%	0,00%
P1	52,29%	47,37%	0,33%	48,56%	51,22%	0,22%	43,32%	55,63%	1,05%	40,47%	59,47%	0,06%
P2	50,42%	49,29%	0,29%	46,92%	52,90%	0,18%	42,39%	56,61%	1,00%	38,53%	61,42%	0,06%
P3	47,76%	52,00%	0,24%	44,01%	55,84%	0,15%	41,02%	58,04%	0,95%	36,48%	63,45%	0,07%
C1P1	54,77%	45,23%	0,00%	49,08%	50,92%	0,00%	43,96%	56,04%	0,00%	37,31%	62,69%	0,00%
C1P2	52,00%	48,00%	0,00%	46,24%	53,76%	0,00%	42,39%	57,61%	0,00%	35,41%	64,59%	0,00%
C1P3	47,88%	52,12%	0,00%	42,21%	57,79%	0,00%	40,63%	59,37%	0,00%	32,95%	67,05%	0,00%
C2P1	53,85%	46,12%	0,03%	49,30%	50,70%	0,00%	43,98%	55,84%	0,17%	38,73%	61,27%	0,00%
C2P2	51,37%	48,61%	0,02%	46,86%	53,14%	0,00%	42,79%	57,07%	0,15%	36,80%	63,20%	0,00%
C2P3	48,06%	51,92%	0,02%	43,13%	56,87%	0,00%	41,02%	58,84%	0,15%	34,44%	65,56%	0,00%
C3P1	53,29%	46,68%	0,03%	49,11%	50,89%	0,00%	43,61%	55,91%	0,48%	39,33%	60,67%	0,00%
C3P2	51,05%	48,92%	0,03%	47,00%	53,00%	0,00%	42,63%	56,89%	0,48%	37,74%	62,26%	0,00%
C3P3	47,98%	51,97%	0,05%	43,52%	56,48%	0,00%	41,03%	58,53%	0,45%	35,38%	64,62%	0,00%

Apêndice C – Percentual de conforto e desconforto das zonas térmicas da ZB2 condicionada artificialmente

ZB2 - Pelotas												
	ZT1			ZT2			ZT3			ZT4		
	Conf. (%)	Frio (%)	Calor (%)	Conf. (%)	Frio (%)	Calor (%)	Conf. (%)	Frio (%)	Calor (%)	Conf. (%)	Frio (%)	Calor (%)
Caso base	81,97%	16,78%	1,24%	80,54%	18,55%	0,91%	81,94%	16,07%	1,99%	49,83%	49,26%	0,91%
C1	83,13%	16,55%	0,32%	81,05%	18,80%	0,15%	83,97%	15,22%	0,81%	50,78%	48,95%	0,27%
C2	82,69%	16,61%	0,70%	80,91%	18,68%	0,41%	83,13%	15,50%	1,37%	50,59%	48,92%	0,49%
C3	82,37%	16,75%	0,88%	80,87%	18,57%	0,56%	82,49%	15,82%	1,69%	50,22%	49,16%	0,63%
P1	86,24%	12,61%	1,14%	85,65%	13,49%	0,86%	85,32%	12,59%	2,09%	55,61%	43,70%	0,70%
P2	85,01%	13,80%	1,19%	84,26%	14,91%	0,83%	84,62%	13,31%	2,07%	53,89%	45,34%	0,76%
P3	83,16%	15,64%	1,20%	82,17%	16,96%	0,87%	82,91%	15,05%	2,04%	51,59%	47,60%	0,81%
C1P1	89,30%	10,55%	0,15%	88,74%	11,23%	0,02%	88,55%	10,88%	0,57%	58,12%	41,84%	0,05%
C1P2	87,66%	12,18%	0,16%	86,29%	13,68%	0,03%	87,53%	11,88%	0,58%	55,79%	44,17%	0,05%
C1P3	85,14%	14,65%	0,22%	83,01%	16,93%	0,06%	85,37%	13,93%	0,71%	52,91%	46,99%	0,10%
C2P1	88,06%	11,44%	0,50%	87,59%	12,25%	0,16%	87,27%	11,53%	1,20%	57,03%	42,76%	0,21%
C2P2	86,67%	12,84%	0,49%	85,49%	14,32%	0,19%	86,35%	12,47%	1,19%	55,11%	44,63%	0,25%
C2P3	84,39%	15,03%	0,57%	82,77%	16,93%	0,30%	84,55%	14,19%	1,26%	52,20%	47,43%	0,37%
C3P1	86,62%	12,96%	0,42%	86,62%	12,96%	0,42%	86,43%	11,92%	1,66%	56,46%	43,17%	0,37%
C3P2	86,02%	13,25%	0,73%	84,83%	14,73%	0,45%	85,59%	12,77%	1,63%	54,58%	45,01%	0,41%
C3P3	83,96%	15,25%	0,79%	82,60%	16,86%	0,54%	83,94%	14,37%	1,69%	52,04%	47,42%	0,54%

Apêndice D – Percentual de conforto e desconforto das zonas térmicas da ZB2 ventiladas artificialmente

ZB2 - Pelotas												
	ZT1			ZT2			ZT3			ZT4		
	Conf. (%)	Frio (%)	Calor (%)	Conf. (%)	Frio (%)	Calor (%)	Conf. (%)	Frio (%)	Calor (%)	Conf. (%)	Frio (%)	Calor (%)
Caso base	42,99%	55,87%	1,14%	40,95%	58,17%	0,88%	41,05%	57,09%	1,86%	38,38%	60,76%	0,86%
C1	43,48%	56,23%	0,29%	41,08%	58,71%	0,21%	41,50%	57,79%	0,72%	38,41%	61,34%	0,25%
C2	43,24%	56,11%	0,65%	40,92%	58,57%	0,50%	41,36%	57,47%	1,18%	38,28%	61,19%	0,54%
C3	43,07%	56,12%	0,81%	40,86%	58,50%	0,64%	41,30%	57,16%	1,54%	38,24%	61,14%	0,62%
P1	45,48%	53,49%	1,03%	43,64%	55,57%	0,79%	42,52%	55,67%	1,80%	40,35%	59,02%	0,63%
P2	44,99%	53,95%	1,06%	42,93%	56,27%	0,80%	42,12%	56,06%	1,82%	39,66%	59,68%	0,66%
P3	43,71%	55,21%	1,08%	41,85%	57,31%	0,84%	41,59%	56,59%	1,83%	39,00%	60,26%	0,74%
C1P1	46,85%	53,01%	0,14%	43,98%	55,97%	0,05%	43,54%	56,00%	0,46%	40,06%	59,90%	0,05%
C1P2	45,96%	53,88%	0,16%	43,18%	56,77%	0,05%	43,01%	56,50%	0,49%	39,70%	60,25%	0,05%
C1P3	44,59%	55,24%	0,17%	42,01%	57,89%	0,10%	42,13%	57,25%	0,62%	38,95%	60,95%	0,10%
C2P1	46,45%	53,17%	0,38%	43,88%	55,89%	0,23%	43,13%	55,83%	1,04%	40,31%	59,52%	0,17%
C2P2	45,54%	54,05%	0,41%	42,99%	56,71%	0,30%	42,72%	56,24%	1,04%	39,73%	60,05%	0,23%
C2P3	44,22%	55,26%	0,51%	41,80%	57,83%	0,37%	42,00%	56,91%	1,10%	39,00%	60,66%	0,34%
C3P1	45,98%	53,33%	0,68%	43,85%	55,67%	0,48%	42,80%	55,82%	1,38%	40,24%	59,38%	0,38%
C3P2	45,34%	53,96%	0,70%	43,06%	56,45%	0,49%	42,42%	56,19%	1,39%	39,71%	59,90%	0,39%
C3P3	43,97%	55,29%	0,74%	41,88%	57,55%	0,57%	41,77%	56,80%	1,43%	38,95%	60,50%	0,55%

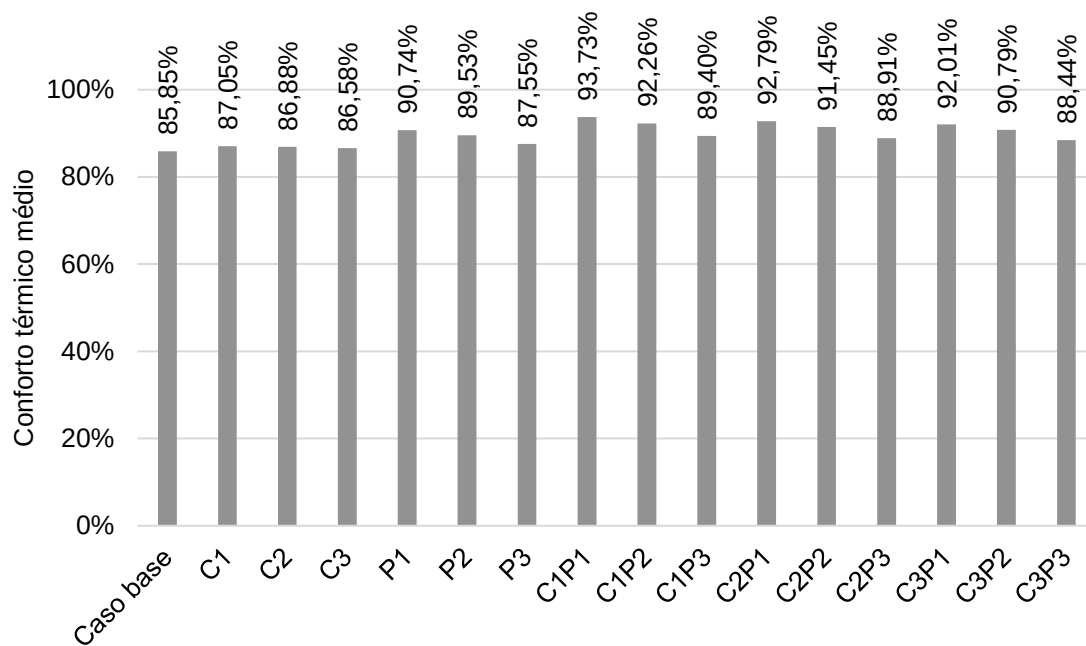
Apêndice C – Percentual de conforto e desconforto das zonas térmicas da ZB3 condicionada artificialmente

ZB3 - Florianópolis												
	ZT1			ZT2			ZT3			ZT4		
	Conf. (%)	Frio (%)	Calor (%)	Conf. (%)	Frio (%)	Calor (%)	Conf. (%)	Frio (%)	Calor (%)	Conf. (%)	Frio (%)	Calor (%)
Caso base	90,10%	7,16%	2,74%	89,37%	8,14%	2,49%	87,72%	8,38%	3,90%	67,80%	30,01%	2,19%
C1	93,12%	6,30%	0,58%	91,75%	7,76%	0,49%	91,34%	7,04%	1,62%	71,11%	28,29%	0,61%
C2	92,08%	6,46%	1,46%	90,95%	7,84%	1,21%	89,75%	7,67%	2,58%	69,70%	29,10%	1,20%
C3	91,14%	6,84%	2,02%	90,32%	8,05%	1,63%	88,98%	7,84%	3,17%	68,90%	29,45%	1,64%
P1	92,68%	4,33%	2,99%	92,85%	4,62%	2,52%	90,43%	5,49%	4,08%	74,68%	23,21%	2,11%
P2	92,19%	4,94%	2,87%	92,27%	5,23%	2,50%	89,82%	6,14%	4,04%	72,91%	24,94%	2,15%
P3	91,32%	5,88%	2,80%	90,87%	6,60%	2,53%	88,54%	7,49%	3,97%	70,00%	27,87%	2,13%
C1P1	95,82%	3,81%	0,37%	95,59%	4,20%	0,21%	94,10%	4,62%	1,28%	80,64%	19,16%	0,21%
C1P2	95,19%	4,41%	0,40%	94,70%	5,02%	0,27%	93,36%	5,32%	1,32%	78,15%	21,56%	0,29%
C1P3	94,06%	5,47%	0,47%	92,98%	6,64%	0,38%	92,43%	6,14%	1,43%	74,06%	25,48%	0,46%
C2P1	94,60%	4,03%	1,37%	94,61%	4,30%	1,08%	92,42%	5,01%	2,57%	78,23%	20,87%	0,90%
C2P2	94,01%	4,66%	1,34%	93,74%	5,18%	1,07%	91,94%	5,47%	2,59%	75,81%	23,22%	0,97%
C2P3	93,08%	5,56%	1,36%	92,37%	6,54%	1,08%	90,88%	6,52%	2,60%	72,36%	26,51%	1,13%
C3P1	93,77%	4,18%	2,05%	93,96%	4,50%	1,54%	91,53%	5,18%	3,29%	76,69%	21,88%	1,43%
C3P2	93,21%	4,76%	2,03%	93,17%	5,26%	1,56%	91,13%	5,65%	3,22%	74,62%	23,94%	1,44%
C3P3	92,31%	5,71%	1,99%	91,96%	6,46%	1,58%	89,93%	6,86%	3,21%	71,31%	27,15%	1,54%

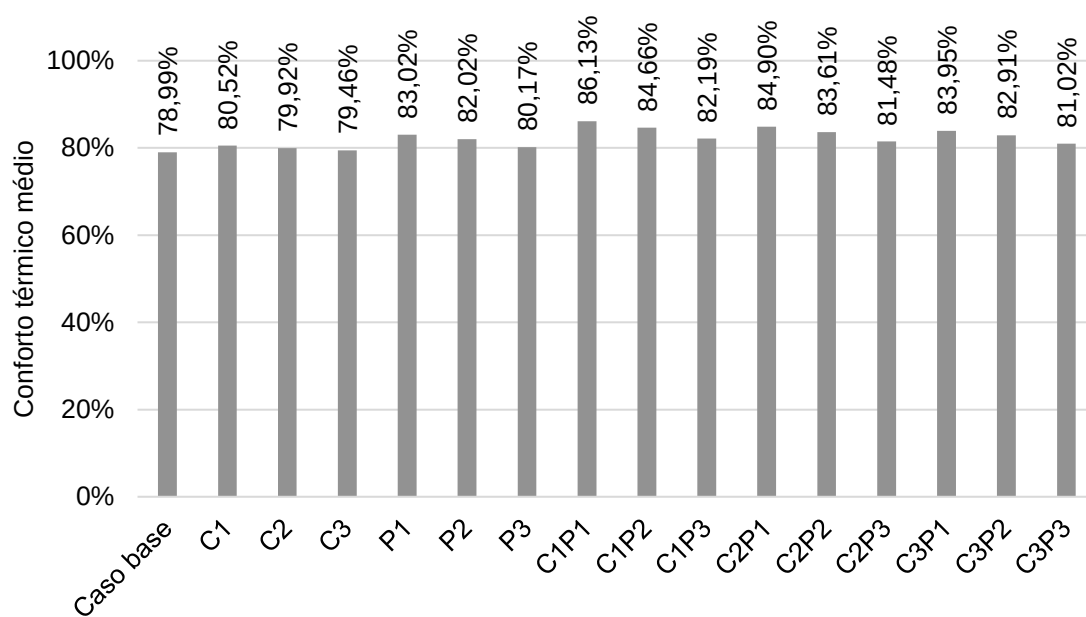
Apêndice D – Percentual de conforto e desconforto das zonas térmicas da ZB3 ventiladas naturalmente

ZB3 - Florianópolis												
	ZT1			ZT2			ZT3			ZT4		
	Conf. (%)	Frio (%)	Calor (%)	Conf. (%)	Frio (%)	Calor (%)	Conf. (%)	Frio (%)	Calor (%)	Conf. (%)	Frio (%)	Calor (%)
Caso base	61,19%	36,61%	2,20%	59,46%	38,66%	1,87%	55,97%	40,88%	3,15%	55,01%	43,32%	1,67%
C1	63,58%	36,07%	0,34%	60,89%	38,76%	0,35%	58,47%	40,59%	0,94%	54,94%	44,70%	0,35%
C2	69,70%	29,10%	1,20%	60,56%	38,77%	0,67%	57,34%	40,80%	1,86%	55,27%	44,09%	0,64%
C3	62,19%	36,38%	1,43%	60,34%	38,57%	1,08%	56,76%	40,87%	2,37%	55,25%	43,71%	1,04%
P1	64,09%	33,56%	2,35%	62,69%	35,41%	1,89%	57,32%	39,44%	3,24%	58,24%	40,29%	1,47%
P2	63,50%	34,21%	2,28%	61,93%	36,22%	1,85%	56,85%	39,92%	3,23%	57,37%	41,12%	1,51%
P3	62,31%	35,46%	2,24%	60,62%	37,59%	1,79%	56,36%	40,45%	3,20%	56,06%	42,37%	1,56%
C1P1	68,12%	31,69%	0,19%	65,25%	34,53%	0,22%	60,47%	38,88%	0,65%	58,84%	41,04%	0,13%
C1P2	67,07%	32,68%	0,25%	64,24%	35,53%	0,24%	60,01%	39,28%	0,71%	57,75%	42,07%	0,18%
C1P3	64,97%	34,74%	0,30%	62,39%	37,33%	0,29%	59,10%	40,09%	0,81%	55,98%	43,71%	0,31%
C2P1	66,87%	32,45%	0,67%	64,52%	34,91%	0,57%	59,17%	39,12%	1,71%	58,86%	40,64%	0,50%
C2P2	65,96%	33,32%	0,72%	63,65%	35,78%	0,57%	58,74%	39,52%	1,74%	57,88%	41,60%	0,53%
C2P3	64,18%	35,03%	0,79%	61,99%	37,42%	0,59%	57,82%	40,38%	1,80%	56,30%	43,12%	0,58%
C3P1	65,90%	32,88%	1,22%	63,87%	35,19%	0,94%	58,37%	39,25%	2,39%	58,77%	40,46%	0,78%
C3P2	65,08%	33,73%	1,19%	63,00%	36,07%	0,92%	57,89%	39,73%	2,39%	57,95%	41,22%	0,83%
C3P3	63,48%	35,25%	1,27%	61,54%	37,49%	0,97%	57,20%	40,43%	2,36%	56,30%	42,80%	0,90%

**Apêndice E - Conforto térmico adaptativo médio dos edifícios
condicionados artificialmente na ZB1**



**Apêndice F - Conforto adaptativo térmico médio dos edifícios
condicionados artificialmente na ZB2**



**Apêndice G - Conforto térmico adaptativo médio dos edifícios
condicionados artificialmente na ZB3**

