



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE PERNAMBUCO
MESTRADO PROFISSIONAL EM GESTÃO AMBIENTAL

MICHELL PONTES DE QUEIROZ SILVA

ANÁLISE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM PRISMA COMPOSTOS POR
BLOCOS DE CONCRETO COM REVESTIMENTO INTERNO DE GESSO:
SUBSÍDIOS PARA CONSTRUÇÕES SUSTENTÁVEIS

Recife - PE

2022

MICHELL PONTES DE QUEIROZ SILVA

**ANÁLISE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM PRISMA COMPOSTOS POR
BLOCOS DE CONCRETO COM REVESTIMENTO INTERNO DE GESSO:
SUBSÍDIOS PARA CONSTRUÇÕES SUSTENTÁVEIS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Gestão Ambiental, para obtenção do grau de Mestre em Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco.

Prof. Dr. Ronaldo Faustino da Silva
Orientador

Prof^a. Dr^a. Renata M^a Caminha M.O
Carvalho
Coorientadora

Prof^a. Dr. João Manoel de F.
Mota
Coorientador

Recife - PE

2022

S586a

Silva, Michell Pontes de Queiroz.

Análise de transferência de calor em prisma composto por blocos de concreto com revestimento interno de gesso: subsídios para construções sustentáveis. / Michell Pontes de Queiroz Silva. – Recife, PE: O autor, 2022.

93 f.: color. ; il. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Faustino da Silva.

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Renata Maria C. Mendes de O. Carvalho.

Dissertação (Mestrado) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco - IFPE, Campus Recife, Coordenação de Pós-Graduação - Mestrado Profissional em Gestão Ambiental, 2022.

Inclui referências e apêndices.

Inclui guia informativo.

1.Blocos de Concreto. 2. Termografia. 3. Construção Sustentável. 4. Gestão Ambiental. I. Silva, Ronaldo Faustino da. (Orientador). II. Carvalho, Renata Maria C. Mendes de O. (Coorientadora). III. Título.

691

CDD (22 Ed.)

MICHELL PONTES DE QUEIROZ SILVA

**ANÁLISE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM PRISMA COMPOSTOS
POR BLOCOS DE CONCRETO COM REVESTIMENTO INTERNO DE GESSO:
SUBSÍDIOS PARA CONSTRUÇÕES SUSTENTÁVEIS**

Dissertação submetida ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco como parte integrante dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Gestão Ambiental.

Data da aprovação: 01 / 12 / 2022

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ronaldo Faustino da Silva
Orientador – MPGA-IFPE

Prof. Dra. Renata M. Caminha M de O Carvalho
Coorientadora – MPGA-IFPE

Prof. Dr. João Manoel de Freitas Mota
Coorientador – IFPE

Prof. Dr. Hernande Pereira da Silva
Examinador Interno – MPGA

Prof. Dr. Romilde Almeida de Oliveira
Examinador Externo – UFPE

Recife

2022

APRESENTAÇÃO

Formado em Engenharia Química (2001) e Química Industrial (2002) pela Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP). Ademais, o pesquisador fez pós-graduação (*Lato sensu*) na Universidade de Pernambuco (UPE) nas áreas de Engenharia de Segurança do Trabalho (2002) e Gestão e Controle Ambiental (2004). No IFPE, Especialização em Docência para Educação Profissional, Científica e Tecnológica (2021). Nesse contexto, o autor foi galgando sua trajetória profissional e acadêmica relacionado à escolha e elaboração do tema da pesquisa. Assim, o autor da pesquisa trabalhou em diversos seguimentos industriais, dos quais indústria de cerâmica, louças sanitárias, alimentos e construção civil. Dessa forma, foi construindo conhecimentos relacionado a sua carreira profissional voltada à construção civil, estudando os aspectos relacionados as edificações buscando soluções para os problemas encontrados.

O trabalho do pesquisador está em constante transformação em um movimento que necessita um olhar cuidadoso por meio de estudo, problematização e acompanhamento de sua prática no ambiente construtivo em que está inserido. Assim, a reflexão teórica e prática a respeito desse tema representa uma tentativa de analisar como o mercado construtivo vem se adaptando com as novas tecnologias, novos métodos e os novos materiais da obra dentro da sua rotina de trabalho.

O estudo foi desenvolvido com o objetivo de ampliar o conhecimento nas pesquisas científicas acerca dos aspectos relacionados à Análise de Transferência de Calor em Prisma Compostos por Blocos de Concreto com Revestimento Interno de Gesso. Outrossim, a pesquisa apresenta uma oportunidade de análise que parte do princípio da engenharia civil relacionado aos aspectos de conforto ambiental das construções habitacionais, permitindo que as unidades habitacionais possam utilizar da engenharia dos materiais para construir ambientes confortáveis visando garantir o conforto térmico dos usuários.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me ajudar a superar as dificuldades que surgiram;

Aos Professores, Dr. Ronaldo Faustino da Silva, Dr. João Manoel de Freitas Mota, Dra. Renata Maria Caminha Mendes de Oliveira Carvalho, Dra. Sófia Suely Brandão Ferreira Rodrigues, Dr. Romilde Almeida de Oliveira, Dr. Hernande Pereira da Silva pelas orientações seguras e responsáveis;

Aos meus pais, Rogéria Pontes de Queiroz e Ailton José da Silva (*in memoriam*), a minha esposa amada Adriana Maria Tenório Lima Pontes e aos meus filhos Vitor Petrócio Tenório Vidal e Maria Lúcia Tenório Pontes, por todo sacrifício que fizeram por mim.

RESUMO

As questões ambientais e o desenvolvimento sustentável têm pautado o crescimento das cidades. A sustentabilidade na construção civil possui grandes desafios no segmento industrial da construção. Um dos maiores está relacionado à eficiência energética, ou seja, o setor industrial precisa reduzir, de forma eficiente, o impacto ambiental, buscando utilizar práticas sustentáveis, e com isso reduzir o uso de recursos de origem fóssil, permitindo a plena reciclabilidade, a conformidade com os padrões de qualidade, a eficiência energética combinadas com abordagens voltadas à evolução tecnológica, desenvolvimento econômico e social. A vedação vertical junto com o piso e a cobertura são responsáveis pela interação entre os ambientes internos e externos da edificação aos quais estão inseridos. Dentre esses elementos, a fachada possui fundamental importância e relevância no sistema construtivo, principalmente por ser grande receptor de insolação solar. O objetivo deste trabalho é avaliar a transferência de calor em prismas compostos por blocos de concreto (estrutural e celular maciço) com revestimentos internos de gesso. A metodologia desta pesquisa consiste na confecção de 02 prismas de blocos, construídos a partir de blocos de concreto estrutural e de blocos maciços de concreto celular. Os compósitos receberam um reboco externo com argamassa industrializada com 2,5 cm de espessura. Ademais, foram acrescentados na parte interna das paredes novas camadas de revestimento de gesso com diferentes configurações de espessuras 1, 1,5 e 2,0 cm. Assim, foram confeccionados os prismas com diferentes densidades de massa aparente para estudo da transferência de calor. Para que isso fosse possível, utilizou-se como fonte de estudo uma condição artificial ativa com fluxo de calor contínuo na parte externa do prisma com variações de temperaturas em torno de $65 \pm 2^\circ\text{C}$, incidindo sobre as paredes para avaliar as condições de temperaturas durante 4 h de ensaios e posteriormente, determinar o fluxo de calor. Dessa forma, os valores de transferência de calor que foram obtidos nos testes dos prismas com e sem revestimentos apontam um maior fluxo térmico na composição do prisma formado por blocos de concreto estrutural- BCE sem revestimento e um menor fluxo termal no compósito formado por blocos de concreto celular - BCC com revestimento externo composto por 0,5 cm de chapisco mais 2,0 cm de emboço. Nas avaliações dos prismas com revestimento interno, os resultados demonstraram que, a transferência de calor diminui quando houve um aumento das espessuras dos revestimentos internos de gesso. O prisma BCC com revestimento interno de gesso com 2,0 cm de espessura, apresentou um menor fluxo térmico, quando comparado com o prisma BCC com revestimentos de gesso com espessuras de 1,0 e 1,5 cm, respectivamente. O prisma BCE quando possuiu uma menor espessura interna de revestimento, obteve um valor maior de fluxo de calor. Os estudos experimentais demonstraram uma significativa redução na temperatura interna no prisma BCE por volta de $2,82^\circ\text{C}$, quando houve a adição da camada de 1,0 cm de gesso. Em outro resultado expressivo, houve uma excelente redução de $3,13^\circ\text{C}$ com relação à espessura interna de 2,0 cm de gesso e de $4,33^\circ\text{C}$, melhor resultado obtido, quando houve o incremento do revestimento cerâmico externo mais 2,0 cm de gesso interno. Os prismas BCC demonstraram boa redução na temperatura interna, em média de $1,4^\circ\text{C}$ entre as camadas de gesso com espessuras 1, 1,5 e 2,0 cm, entretanto o melhor resultado ocorreu na comparação entre o prisma BCC com 1,0 cm relacionado com o prisma com espessura de 2,0 cm de gesso, mais revestimento cerâmico externo, houve uma diferença de $3,6^\circ\text{C}$, obtendo valor muito relevante e satisfatório para a pesquisa. Por fim, foram calculados os principais parâmetros de desempenho térmico: resistência, transmitância, capacidade e atraso térmico, conforme a NBR 15220 (ABNT, 2005). A capacidade térmica encontrada nos prismas BCE e BCC foi compatível com o valor sugerido pela norma de desempenho térmico, exceto no prisma BCC sem revestimento que apresentou valor abaixo. Os ensaios com termografia infravermelha permitiram analisar a transferência do calor qualitativamente e as variações de temperaturas.

Palavras-chave: Blocos de concreto, transferência de calor, termografia infravermelha.

ABSTRACT

Environmental issues and sustainable development have guided the growth of cities. Sustainability in civil construction has major challenges in the industrial construction sector. One of the biggest is related to energy efficiency, that is, the industrial sector needs to efficiently reduce the environmental impact by seeking to use sustainable practices to reduce the use of fossil resources, allowing full recyclability, compliance with quality standards, energy efficiency combined with approaches aimed at technological evolution, economic and social development. The vertical fence along with the floor and roof are responsible for the interaction between the internal and external environments of the building to which it is inserted. Among these elements, the facade has fundamental importance and relevance in the constructive system, mainly because it is a great receiver of solar insolation. The objective of this work is to evaluate the heat transfer in prisms composed of concrete blocks (structural and solid cellular) with plaster internal coatings. The methodology of this research consists of making 02 prisms of blocks built from structural concrete blocks and solid blocks of cellular concrete. The composites received an external render with industrialized mortar 2.5 cm thick. In addition, new layers of plaster were added to the inside of the walls with different configurations of thicknesses of 1, 1.5 and 2.0 cm. Thus, prisms with different apparent mass densities were made for the study of heat transfer. For this to be possible, an active artificial condition was used as a source of study with continuous heat flow on the outside of the prism with temperature variations around $65 \pm 2^{\circ}\text{C}$, focusing on the walls to evaluate the temperature conditions during 4 h of tests and later, determine the heat flux. In this way, the heat transfer values that were obtained in the tests of the prisms with and without coatings point to a greater thermal flux in the composition of the prism formed by structural concrete blocks - BCE without coating and a smaller thermal flux in the composite formed by blocks of cellular concrete - BCC with external coating composed of 0.5 cm of roughcast plus 2.0 cm of plaster. In the evaluations of the prisms with internal coating, the results showed that the heat transfer decreases when there was an increase in the thickness of the internal plaster coatings. The BCC prism with 2.0 cm thick internal plaster coating presented a lower thermal flux, when compared to the BCC prism with plaster coatings with thicknesses of 1.0 and 1.5 cm respectively. When the BCE prism had a smaller internal coating thickness, it obtained a higher heat flux value. Experimental studies have shown a significant reduction the internal temperature of the BCE prism around 2.82°C , when a layer of 1.0 cm of plaster was added. In another expressive result, there was an excellent reduction of 3.13°C in relation to the internal thickness of 2.0 cm of plaster and of 4.33°C , the best result obtained, when there was an increment of the external ceramic coating plus 2, 0 cm of internal plaster. The BCC prisms showed a good reduction in the internal temperature, an average of 1.4°C between the plaster layers with thicknesses of 1, 1.5 and 2.0 cm, however the best result occurred in the comparison between the BCC prism with 1, 0 cm related to the prism with a thickness of 2.0 cm of plaster plus external ceramic coating, there was a difference of 3.6°C , obtaining a very relevant and satisfactory value for the research. Finally, the main thermal performance parameters were calculated: resistance, transmittance, capacity and thermal delay, according to NBR 15220 (ABNT, 2005). The thermal capacity found in the BCE and BCC prisms was compatible with the value suggested by the thermal performance standard, except for the uncoated BCC prism, which presented a lower value. The tests with infrared thermography allowed the qualitative analysis of heat transfer and temperature variations.

Keywords: Concrete blocks, heat transfer, infrared thermography.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxo de calor por condução no prisma de concreto.	26
Figura 2 - Zoneamento bioclimático brasileiro	37
Figura 3 – Vista de câmara térmica desenvolvida por Batista (2019).....	43
Figura 4 - Espectro eletromagnetico.....	45
Figura 5 - Termograma da fachada de uma edificação	45
Figura 6 – Imagens após a inserção de água na Parede: (a) termograma; (b) fotografia	46
Figura 7 - Termograma de fachada da edificação	48
Figura 8 - Fluxograma simplificado do programa metodológico.....	51
Figura 9 - Argamassa industrializada industrializada.....	54
Figura 10 – Blocos de concreto BCE e BCC	55
Figura 11 – Construção do prisma de blocos de concreto estrutural- BCE.....	56
Figura 12 – Construção do prisma de blocos de concreto celular maciço- BCC	57
Figura 13 – Prisma dos blocos de concreto estrutural-BCE e de concreto celular-BCC	57
Figura 14 – Processo de revestimento externo dos prismas de concreto BCE e BCC	58
Figura 15 – Processo de revestimento interno dos prismas de concreto BCE e BCC.....	59
Figura 16 - Detalhamento da fixação dos termopares nos prismas BCE e BCC.....	60
Figura 17 – Câmara térmica, antecâmara e painel de controle.....	61
Figura 18 – Vista do ensaio na câmara térmica com a prisma BCC	62
Figura 19 – Quadro de comando e controle	62
Figura 20 – Fluxo do ensaio em câmara térmica.....	63
Figura 21 – Câmera termográfica FLIR E-60	63
Figura 22 – Método da fita preta para determinação da emissividade	64
Figura 23 – Ensaio de termografia infravermelha durante o resfriamento dos prismas.....	64
Figura 24 – Fluxo dos cálculos dos parâmetros térmicos – NBR 15220	65
Figura 25 – Medições dos elementos de teste	65
Figura 26 – Gráfico da resistência térmica para os prismas BCE e BCC sem revestimento ...	68
Figura 27 – Gráfico da Transmitância térmica (U) e capacidade térmica (CT).....	69
Figura 28 – Gráfico da transmitância e capacidade térmica com emboço 2,5cm	70
Figura 29 – Gráfico da transmitância e capacidade térmica dos prismas com revestimentos..	73
Figura 30 – Gráfico do comportamento térmico dos prismas BCE e BCC sem revestimento	76
Figura 31 – Gráfico do comportamento térmico dos prismas BCE e BCC com revestimento interno em gesso	76
Figura 32 – Relação entre as temperaturas e o valor de U dos prismas BCC e BCE.....	77
Figura 33 – Detalhe da relação entre as temperaturas e o valor de U dos prismas BCE.....	78
Figura 34 – Detalhe da relação entre as temperaturas e o valor de U dos prismas BCC	78
Figura 35 – Gráfico da evolução da temperatura de aquecimento térmico interno dos prismas BCE e BCC.....	78
Figura 36 – Relação entre as temperaturas de resfriamento e o valor de U dos prismas BCE	78
Figura 37 – Relação entre as temperaturas de resfriamento e o valor de U dos prismas BCC	79
Figura 38 – Termogramas de aquecimento dos primas BCE e BCC sem revestimentos.....	80
Figura 39 – Termogramas de aquecimento dos primas BCE e BCC com revestimentos externo-emboço 2,5cm.....	80
Figura 40 – Termogramas de aquecimento dos primas BCE e BCC com revestimentos externo de 2,5cm e revestimento interno de gesso 1,0cm	81
Figura 41 – Termogramas de aquecimento dos primas BCE e BCC com revestimentos externo de 2,5cm e revestimento interno de gesso 1,5cm	81

Figura 42 – Termogramas de aquecimento dos primas BCE e BCC com revestimentos externo de 2,5cm e revestimento interno de gesso 2,0cm	82
Figura 43 –Gráfico da temperatura de resfriamento dos primas BCE e BCC.....	83
Figura 44 – Termogramas visto em perspectivas do resfriamento dos primas BCE e BCC sem revestimentos	84
Figura 45 – Termogramas visto em perspectivas do resfriamento dos primas BCE e BCC com revestimentos externo – emboço e chspisco de 2,5cm	84
Figura 46 – Termogramas visto em perspectivas do resfriamento dos primas BCE e BCC com revestimentos externo de 2,5cm e revestimento interno de gesso 1,0cm	84
Figura 47 – Termogramas visto em perspectivas do resfriamento dos primas BCE e BCC com revestimentos externo de 2,5cm e revestimento interno de gesso 1,5cm	85
Figura 48 – Termogramas visto em perspectivas do resfriamento dos primas BCE e BCC com revestimentos externo de 2,5cm e revestimento interno de gesso 2,0cm	86
Figura 49 – Termogramas visto em perspectivas do resfriamento dos primas BCE e BCC com rev. ext. 2,5cm mais revestimento cerâmico externo e revestimento interno de gesso 2,0cm	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resistência térmica superficial interna e externa	31
Tabela 2 - Absortância e emissividade de materiais e componentes.....	35
Tabela 3 - Transmitância térmica de paredes externas.....	40
Tabela 4 - Capacidade térmica de paredes externas.....	40
Tabela 5 - Requisitos físicos e mecânicos dos blocos de concreto	52
Tabela 6 - Requisitos físicos e mecânicos dos blocos de concreto celular maciço	53
Tabela 7 - Ensaio de resistência a compressão dos blocos de concreto	55
Tabela 8 - Dados para cálculo dos parâmetros térmicos	66
Tabela 9 - Parâmetros térmicos dos prismas BCE e BCC sem revestimento – NBR 15220 ...	67
Tabela 10 - Parâmetros térmicos dos prismas BCE e BCC com revestimento externo – NBR 15220	69
Tabela 11 - Parâmetros térmicos dos prismas BCE e BCC com revestimentos interno e externo – NBR 15220	71

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação das densidades para blocos de concreto.....	53
Quadro 2 - Classificação das densidades aparente para blocos de concreto celular maciço....	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BCC	Prisma compostos por blocos maciços de concreto celular
BCE	Prisma compostos por blocos de concreto estrutural
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
NBR	Norma Brasileira
SVVI	Sistemas de vedações verticais internas
SVVE	Sistemas de vedações verticais externas
SVVIE	Sistemas de vedações verticais internas e externas

LISTA DE SÍMBOLOS

c	Calor específico
φ	Atraso térmico
FSO	Fator solar
CT	Capacidade térmica
U	Transmitância térmica
R	Resistência térmica
R _t	Resistência térmica da parede
RSE	Resistência térmica superficial externa
RSI	Resistência térmica superficial interna
RT	Resistência térmica total (R _t + RSI + RSI)
q	Densidade de fluxo de calor
Q	Fluxo de calor
ε	Emissividade da superfície
α	Absortância à radiação solar
λ	Condutividade térmica
°C	Graus Celsius
°F	Graus Fahrenheit
K	Graus Kelvin
W	Watt
MPa	Mega Pascal – 10 ⁶ Pa
Mt	Mega tonelada – 10 ⁶ toneladas
nm	Nanômetro – 10 ⁻⁹ m
dX	Distância entre duas partículas
dθ	Diferença de temperatura entre duas partículas
e	Espessura de um elemento
ΔT	Diferença de temperatura entre dois pontos
ρ	Densidade de massa aparente
σ	Constante de Stefan-Boltzman
W/(m . K)	Watt por metro vezes Kelvin – unidade de condutividade térmica
W/m ² . K	Watt por metro quadro vezes Kelvin – Unidade de transmitância térmica
W/m ²	Watt por metro quadrado – unidade de densidade de fluxo de calor
(m ² . K)/W	Metro quadrado vezes Kelvin sobre Watt – Unidade de resistência térmica
J/K	Joule sobre Kelvin – unidade de capacidade térmica
J/(m ² . K)	Joule sobre Kelvin vezes metro quadrado – unidade de capacidade térmica de componente

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Objetivos.....	18
1.1.1 Objetivo geral	18
1.1.2 Objetivos específicos.....	18
1.2 Justificativa.....	19
1.3 Estrutura da dissertação	20
2. REVISÃO DE LITERATURA	21
3. METODOLOGIA.....	49
3.1 Materiais	52
3.1.1 Blocos de concreto.....	52
3.2 Argamassa de assentamento e revestimento.....	54
3.3 Preparação e caracterização dos materiais cimentícios	54
3.3.1 Prismas dos blocos de concreto	54
3.3.2 Prisma de concreto estrutural	56
3.3.3 Prisma de concreto celular maciço	57
3.3.4 Preparação da argamassa de chapisco e emboço dos prismas BCE e BCC	58
3.3.5 Preparação do revestimento interno das minis paredes BCE e BCC	59
3.4 Instalação dos termopares nos prismas BCE e BCC	60
3.5 Câmara térmica.....	60
3.6 Procedimento experimental	61
3.6.1 Ensaios na câmara térmica dos prismas BCE e BCC	61
3.6.2 Análise com termografia infravermelha dos prismas BCE e BCC	63
3.7 Cálculo de parâmetros térmicos conforme NBR 15220 (ABNT, 2005)	64
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	67
4.1 Parâmetros de desempenho térmico: R, U e CT - NBR 15220 (ABNT, 2005)	67
4.1.1 Elementos de teste sem revestimento - prismas de blocos de concreto BCE e BCC	67
4.1.2 Elementos de teste dos prismas de blocos de concreto BCE e BCC com 2,5 de revestimento externo (Chapisco (0,5cm) mais emboço (2,0 cm)).....	69
4.1.3 Elementos de teste dos prismas de concreto BCE e BCC com revestimento externo de 2,5cm mais revestimento interno de gesso com espessuras de 1, 1,5 e 2,0 cm.....	71
4.2 Medição do fluxo de calor câmara térmica	73
4.2.1 Prismas BCE e BCC	73
4.2.2 Temperaturas de aquecimento e resfriamento interno dos prismas BCE e BCC	77
4.2.3 Utilização da câmara termográfica nos prismas BCE e BCC	79
4.2.3.1 Termogramas de aquecimento dos primas BCE e BCC.....	80
4.2.3.2 Termogramas de resfriamento dos prismas BCE e BCC	83
5. CONCLUSÃO.....	87
6. REFERÊNCIAS	90

1 INTRODUÇÃO

Durante muitos anos, ou até mesmo no início da humanidade, uma sensação térmica agradável sempre foi algo almejado. Na busca desse bem-estar o homem utilizou-se dos abrigos naturais, como cavernas, evoluindo gradualmente até as modernas formas de construção com os mais variados tipos de materiais empregados, como pode ser visto no mundo contemporâneo.

Atualmente, além da utilização de abrigo, o ser humano também encontrou formas de conseguir conforto térmico em seu interior, utilizando dispositivos como lareiras, isolantes térmicos, ventilação natural, ventilação artificial através de condicionadores de ar. Esses elementos têm por objetivo gerar uma condição ambiental agradável para o indivíduo. No entanto, trocas térmicas ocorrem entre os ambientes externo e interno, causando impacto no tempo de utilização desses recursos para manter o conforto térmico no nível desejado.

Diante desse cenário, as edificações no mundo estão sendo projetadas e construídas com um outro olhar, visando uma maior interação entre o consumidor final e o projeto de edificações. Desta forma, é possível obter uma maior satisfação dos habitantes relacionada a fatores térmicos e um maior bem-estar do usuário. A qualidade de uma edificação não é apenas avaliada de forma isolada, restrita a um olhar dos projetos arquitetônicos, estruturais e das instalações. A componente do conforto térmico dos usuários é cada vez mais exigida tanto pelos próprios usuários quanto por conselhos e órgãos fiscalizadores, sobretudo através de normas e regulações (PEREIRA, 2014).

De acordo com Siqueira *et al.*, (2005), enfatizam que as condições climáticas têm fatores importantes na construção dos edifícios, visto que têm bastante relevância na troca térmica das edificações, interagindo com os ambientes internos e externos das construções. Estudos preliminares aprofundados dos projetos arquitetônicos, antes do início da obra, ajudam antecipadamente nas avaliações do desempenho térmico de uma edificação.

Para Brugnera *et al.*, (2019), quando há mudança da fachada tradicional (alvenaria) para uma fachada tipo cortina (totalmente envidraçada) existe um aumento no desempenho energético devido as alterações dos materiais das fachadas, gerando um maior consumo de energia elétrica oriundo dos ar-condicionados. Esses parâmetros servem de suporte para que os projetistas possam criar edifícios energeticamente mais eficientes com uma maior economia energética atrelada a um maior conforto dos usuários nas edificações.

Nesse sentido, a NBR 15220 (ABNT, 2005) estabelece um zoneamento bioclimático Brasileiro o qual abrange um conjunto de recomendações e estratégias construtivas, sem caráter normativo, destinadas às habitações unifamiliares de interesse social, voltadas para adequação climática de habitações unifamiliares com até três pavimentos.

No Brasil, existem normas brasileiras relacionadas ao desempenho térmico: NBR 15220 (ABNT, 2005) e NBR 15575 (ABNT, 2013) as quais buscam determinar parâmetros sobre comportamento térmico de sistemas de vedação vertical das edificações. No entanto, as próprias NBR não fazem referências a outras situações, ou seja, ficando o texto da norma restrito à utilização de alguns materiais de construção civil. Diante disso, considerando o exposto, a realização de simulações do desempenho térmico de materiais empregados na construção civil tem se mostrado uma ferramenta útil para indicar a solução ideal em diversos sistemas construtivos. Nesse contexto, será realizado um estudo sobre transferência de calor em prismas compostos por blocos de concreto estrutural - BCE e por blocos maciços de concreto celular-BCC, ambos com revestimento interno de gesso com espessuras variando entre 1, 1,5 e 2,0 cm, a fim de contribuir com os estudos relacionados ao conforto térmico em unidades habitacionais.

Segundo a NBR 15220 (ABNT, 2005), os produtos que possuem baixa condutividade térmica melhoram sensivelmente o isolamento térmico das paredes. Isso se dá em função do seu baixo coeficiente de condutividade térmica, em torno de $0,17 \text{ W/(m.K)}$ para o concreto celular e $1,75 \text{ W/(m.K)}$ para concretos normais, ambos materiais amplamente utilizados para vedações verticais. Ainda, segundo estudos científicos, para ser considerado um bom isolante térmico, o material precisa reduzir em até 4°C a sensação térmica de um ambiente. O gesso desenvolve muito bem essa função, pois ao utilizar essa técnica em ambientes voltados ao poente, o gesso tem a capacidade de reduzir em até 5°C . Neste contexto de percepção, o gesso possui um coeficiente de condutibilidade térmica equivalente a $0,46 \text{ W/}^{\circ}\text{C}$, logo, esse material é considerado um isolante térmico (INCROPERA, 2008).

Para Incropera *et al.*, (2008), a condutividade térmica oscila com a variação da temperatura, principalmente nos casos em que ocorrem grandes variações de temperatura, tornando-se mais sensível à mudança de variações para a maioria dos materiais. As pesquisas demonstraram um aumento da condutividade térmica quando houve uma diminuição da densidade de massa aparente.

Segundo o estudo de Souza (2015), foi possível concluir que o aumento da porosidade do material ocasionou uma diminuição na condutividade térmica. Nessa

perspectiva, o autor concluiu que a transferência de calor conduzida através dos poros é um processo muito lento e que as bolhas de ar estagnadas dentro dos compósitos formam uma camada isolante, sendo um mau condutor de calor ($\lambda=0,02$ W/m.K), dificultando assim, a convecção gasosa em seu interior.

Conforme Ferreira, Souza e Assis (2017), as construções devem avaliar a influência dos limites das propriedades térmicas dos elementos, tais como: resistência térmica, transmitância térmica, capacidade térmica, fluxo de calor, atraso térmico, fator solar das diferentes normas nacionais no desempenho de edificações residenciais multifamiliares nas cidades brasileiras. Dessa forma, buscar garantir edificações com desempenho mínimo que atenda a necessidade dos usuários.

Novas tecnologias computacional vem crescendo no Brasil nos últimos anos. Nesse contexto, diversos estudos empregam simulações com programas computacionais buscando estimar o desempenho térmico e energético das edificações. Inúmeras simulações são realizadas buscando determinar o melhor desempenho térmico atrelado ao menor custo dos materiais a serem implementados na obra (FONSECA, 2017).

Segundo Fonseca *et al.*, (2017), é possível utilizar recursos e programa computacional para realizar modelagem paramétrica para encontrar a melhor forma de uma edificação residencial levando em consideração os critérios de desempenho térmico e custo dos materiais construtivos.

Para Silva, Almeida e Ghisi (2017), deve-se avaliar as incertezas quanto às propriedades térmicas e físicas dos materiais das edificações nas simulações computacionais e a influência disso na predição de desempenho térmico das edificações. Dessa forma, buscou-se determinar a influência de uma edificação no seu desempenho térmico através da sensibilidade das variáveis com coeficientes de regressão e correlação.

De acordo Pachla *et al.*, (2019), a utilização de outros compósitos misturados aos concretos, argamassas e pastas de cimento torna-se um produto com maior desempenho térmico. Os materiais de construção civil com baixa densidade e elevada porosidade apresentam bons resultados frente ao desempenho térmico.

Para Martins *et al.*, (2019), são inúmeros os benefícios do uso do concreto celular. Esse compósito denominado de concreto leve, aerado ou poroso é composto por uma pasta de cimento com ar incorporado. A partir deste material pode-se elaborar produtos que oferecem maior desempenho térmico. A utilização dos blocos de concreto celular garantem uma maior agilidade, um menor peso nas edificações e consequentemente um menor custo da obra quanto às fundações das edificações.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar a transferência de calor em prismas compostos por blocos de concreto (estrutural e celular maciços) com revestimento interno de gesso com espessuras que variam entre 1,1,5 e 2,0 cm nas suas camadas internas do prisma.

1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliar o fluxo termal nas diversas configurações dos revestimentos aplicados a esses compósitos a partir dos valores das transferências de calor dos prismas construídos por blocos de concreto celular maciços e por blocos de concreto convencional;
- Verificar o atendimento aos parâmetros das normas técnicas vigentes NBR 15.575 e 15.520;
- Avaliar qualitativamente o comportamento térmico dos prismas com a utilização da termografia infravermelha;
- Elaborar um guia técnico educativo.

1.2 Justificativa

Diante do elevado nível de consumo energético mundial, usar com eficiência os recursos disponíveis deve ser uma aspiração de todas as sociedades e organizações que buscam o progresso. Isso se dá especialmente no caso de recursos como a energia elétrica, não só pelo valor despendido por ela, mas também pelos impactos ambientais necessários para produzi-la. Assim, levando-se em consideração que as edificações são tidas por muitos como um dos principais itens a serem analisados na busca pela sustentabilidade do planeta, sabe-se que a procura por edificações sustentáveis, que proporcionem bons índices de conforto ambiental aos seus usuários sendo energeticamente eficientes, tem se tornado cada vez maior.

Diante disso, considera-se de extrema importância a incorporação de soluções relacionadas à transferência de calor nas construções. Nesse sentido, fatores relacionados às temperaturas internas e externas das edificações são parâmetros mais influentes nas avaliações de desempenho térmico de ambientes e quase sempre são desconsiderados quando são projetadas as edificações. Por isso, é necessário avaliar essa influência devido à interação da radiação solar com a edificação, pois a transferência de calor através de paredes compostas por blocos de concreto com revestimentos interno de gesso tem uma extensão significativa na carga térmica total de uma edificação.

Assim, a proposta deste trabalho visa uma análise comparativa relacionada à transferência de calor em prismas compostos por blocos maciços de concreto celular e blocos convencionais, ambos com revestimentos internos de gesso com camadas que variam entre 1, 1,5 e 2 cm de espessuras, utilizados analogicamente como alvenaria de vedação. Dessa forma, torna-se interessante um estudo da sua contribuição não apenas nos benefícios que este material pode proporcionar a uma edificação e ao meio ambiente, mais também no estudo do desempenho térmico das edificações de forma a avaliar a transferência de calor através da equação da lei de Fourier, assim como avaliar outras propriedades térmicas dos elementos, tais como: resistência térmica, transmitância térmica, capacidade térmica e atraso térmico dos prismas de blocos de concreto.

1.3 Estrutura da dissertação

A pesquisa acerca do objeto de estudo foi desenvolvida no laboratório avançado de materiais de construção civil da Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco. Durante o desenvolvimento dessa pesquisa foi realizado um estudo abrangente acerca da análise de transferência de calor em prismas compostos por blocos de concreto com revestimento interno de gesso envolvendo etapas do processo, principais materiais utilizados, procedimentos aplicados, métodos e ensaios realizados. Nesse sentido, primeiramente foi apresentado uma introdução com justificativa sobre o tema de estudo, objetivos gerais e específicos. Por conseguinte, foram apresentados conceitos básicos de transferência de calor aplicados nas edificações, meios de condução, convecção e radiação. Além disso, foi realizado uma abordagem referente às principais normas brasileiras acerca de desempenho térmico nas edificações, especificamente as NBR 15220 e NBR 15575. Ademais, foram avaliados pela termografia infravermelha os prismas de concreto, objeto de estudo desta pesquisa, para verificar de forma qualitativa o comportamento térmico. Por fim, foram abordados os resultados, discussões e as considerações finais, bem como, suas interpretações e comparações com as referidas normas brasileiras. Dessa forma, os resultados da pesquisa foram avaliados, julgados e validados frente aos objetivos específicos, assim como, propostos novos estudos futuros.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Certamente, a maior fonte energética de calor que temos é o sol. Assim, a radiação advinda dele é responsável por aquecer todo nosso planeta. Dessa forma, o principal vilão do conforto térmico é a radiação, fonte primária de calor, influenciando na convecção e na condução no que diz respeito à construção civil. Inegavelmente, no campo da construção civil a zona climática, bem como a exposição ao sol durante o dia são fatores que influenciam muito na temperatura interna de uma edificação.

A utilização de recursos, como a energia elétrica, para manter o ambiente interno de uma edificação numa condição desejada não deve ser utilizada de forma indiscriminada nem tão pouco usada com desperdícios. Nesse sentido, buscar uma maior eficiência energética nas construções está relacionada à necessidade de desenvolver soluções ecologicamente sustentáveis. Nesse contexto, garantir uma boa eficiência energética nas edificações está relacionada ao menor consumo de energia elétrica necessário para manter e garantir condições ambientais melhores que outras construções habitacionais.

As normas brasileiras relacionadas ao comportamento e desempenho térmico nas edificações são limitadas frente às inúmeras possibilidades de soluções ecologicamente sustentáveis que podem trazer resultados expressivos para as edificações. Nesse contexto, uma grande parte das edificações não são projetadas visando garantir um conforto térmico de forma natural. Nesse sentido, grande parte dos projetos arquitetônicos não aproveitam, de forma eficiente e natural, os recursos materiais adequados de construções utilizados nas obras. Assim, diante dessa ineficiência dos projetos é necessário utilizar equipamentos artificiais consumidores de energia elétrica para garantir o bem-estar dos seus ocupantes.

Buscar atender os regulamentos técnicos de eficiência energética nas edificações visa garantir um melhor bem-estar dos usuários. Nesse contexto, para que isso aconteça, se faz necessário realizar estudos iniciais dos projetos das edificações buscando alternativas que visem melhorar os índices de conforto. Dessa forma, pequenos ajustes nos projetos iniciais melhoram a troca térmica, como exemplo disso podemos citar: a instalação de um isolamento térmico nas paredes externas; inserção de um revestimento isolante nas tabulações de água quente; aumento das dimensões das esquadrias. Assim, esses artifícios de engenharia ajudam a garantir que todas as unidades habitacionais obtenham um ótimo desempenho térmico e com isso uma maior eficiência energética. (BIGOLIN, 2019).

2.1 Propriedades dos materiais de construção civil

O setor da construção civil vem se destacando no Brasil nos últimos anos e as construtoras tiveram que se adequar às necessidades dos seus clientes. Assim, houve a necessidade dos projetos arquitetônicos utilizarem métodos construtivos adequados para minimizar os impactos ambientais decorrentes dessas atividades.

De acordo com Kuba *et al.*, (2021), as propriedades térmicas dos materiais de construção civil referentes à fachada das edificações devem considerar não apenas as questões estéticas, mas também o desempenho térmico. Nesse contexto, para se obter uma melhor transferência de calor entre os ambientes externos e internos das edificações se faz necessário utilizar materiais com baixa condutividade térmica visando contribuir para um melhor conforto térmico. Dessa forma, na fase dos projetos construtivos se faz necessário realizar estudos acerca das características térmicas de componentes construtivos, visando buscar materiais com melhores resistência térmica.

Conforme Lilge *et al.*, (2021), são inúmeros os benefícios ambientais promovidos pela adição de fibras vegetais ao concreto, visto que, uma grande parte desses resíduos não possuem um destino ecologicamente correto. Concomitantemente a isto, os mesmos podem trazer a redução do consumo de energia, pois a incorporação de alguns tipos de fibras naturais ou sintéticas em compósitos de matriz cimentícia diminui a condutividade térmica do produto em consequência do aumento da porosidade, o que pode gerar uma redução na utilização de equipamentos mecânicos para refrigeração das edificações.

Segundo Oliveira *et al.*,(2018), a larga escala mundial de extração dos minerais necessários para produzir concreto tem gerado inúmeros impactos ambientais. Diante disso, outros agregados estão sendo estudados com o objetivo de minimizar os impactos ambientais no setor da construção civil , como exemplo disso, podemos citar o uso do poliestireno expandido (EPS) adicionado às dosagens de concreto convencional visando garantir uma maior leveza à mistura, uma baixa massa específica e uma melhor capacidade de isolamento térmico.

Conforme Junior Rui (2019), no campo da engenharia civil são inúmeros os casos de ineficiência energética dos quais as unidades habitacionais são afetadas devido aos problemas associados à termodinâmica, à troca de calor e à troca de massa, ou seja, a processos de interações entre massa, energia e seus componentes. Portanto, se faz necessário adquirir conhecimentos de engenharia dos materiais na busca de se conhecer bem a sua dinâmica, suas propriedades e suas características, visando buscar alternativas

e soluções para os problemas encontrados no mundo atual. Assim, a compreensão dos princípios básicos da termodinâmica, além das propriedades afins dos materiais e elementos construtivos. Ademais, é necessário o entendimento de como ocorrem as transferências de calor em construções, especialmente na envolvente de uma edificação. Dessa forma, estudos relacionados à análise de cargas aerodinâmicas, do movimento do ar ao redor dos prédios, isolamento térmico das paredes, como também, estudos sobre hidráulica e hidrologia tem aplicações no conforto térmico em edificações. Além disso, a térmica das edificações depende dos fatores climáticos de cada região do Brasil, sendo necessário conhecer as variações das temperaturas de cada região, como também, conhecer a taxas de irradiação e de convecção.

2.2 Blocos de concreto

A alvenaria de vedação pode ser definida como aquela que não seja dimensionada para resistir a cargas além do próprio peso. As vedações verticais externas das construções respondem pela proteção contra agentes intempéries, tais como: sol, chuva, vento, entre outros agentes. Na grande maioria dos edifícios com sistema construtivo convencional utiliza-se paredes de alvenaria para o fechamento de vãos e divisão de ambientes internos (ROMEIRO, 2019).

Atualmente, devido ao avanço da tecnologia atrelado a novos modelos de construções, novos materiais de construção civil estão sendo pesquisados e estudados. Assim, a construção civil está passando por inúmeras mudanças no sistema construtivo e precisa adaptar-se a um novo modelo de concepção. A alvenaria de vedação nas obras é muitas das vezes deixada em segundo plano, não sendo dada a sua devida importância (WITZKE , 2015).

Segundo a norma NBR 6136 (ABNT, 2016) define os blocos de concreto como sendo:

“Blocos vazados de concreto simples, destinados à execução de alvenaria com ou sem função estrutural. Esses blocos devem ser constituídos de cimento Portland, agregados e água. Assim, são componente de alvenaria de vedação vertical cuja área líquida- área média da seção perpendicular aos eixos dos furos, descontadas as áreas médias dos vazios - é igual ou inferior a 75% da área bruta- área da seção perpendicular aos eixos dos furos, sem desconto das áreas dos vazios”, (ABNT, 2016).

Já o concreto celular, pode ser definido pela NBR 3438 (ABNT, 2021), como sendo:

“Concreto leve, obtido através de um processo industrial, constituído por materiais calcários e materiais ricos em sílica, granulados finamente. Esta mistura é expandida através da formação de produtos formadores de gases, água e aditivos, e se for o caso, sendo submetidos à pressão e temperatura através de vapor saturado. O concreto celular autoclavado contém células fechadas, aeradas e uniformemente distribuídas”, (ABNT, 2021).

A NBR 6136 (ABNT, 2016) apresenta requisitos físicos e mecânicos dos blocos de concreto, suas características referentes às famílias dos blocos, suas dimensões relacionadas à altura, espessura, largura, comprimento e resistência à compressão. Assim, da mesma forma, a NBR 13438 (ABNT, 2021) faz referência aos requisitos dimensionais dos blocos de concreto celular utilizados como objeto de estudo desta pesquisa acadêmica.

Para Santos (2019), o uso do concreto de cimento portland possui destaque frente aos diversos materiais de construção. Esse compósito possui uma boa versatilidade podendo ser utilizado em diversas condições da engenharia civil. Devido a essas características é o segundo material mais consumido no mundo depois da água. Segundo projeções, esse material poderá ocupar o primeiro lugar a partir de 2025, superando a geração de água potável, tornando-se muito importante na construção de diversas obras de engenharia, sejam espaços públicos, moradias ou infraestruturas diversas. Outrossim, esse alto consumo está relacionado diretamente à expansão da sociedade moderna, ao aumento da população e à necessidade de moradias.

Batista (2019), realizou uma pesquisa com objetivo de analisar os enfoques das temperaturas referentes aos blocos cerâmicos e aos blocos de concreto, ambos com revestimento externo em argamassa de cimento Portland com espessuras de 2,0 cm e com revestimento interno de gesso com espessura inicial de 0,5, 1,0 e 1,5 cm, sucessivamente. Observou-se que essa configuração de camadas sobrepostas de revestimento interno em gesso acrescido de 0,5 cm em cada teste obteve um efeito positivo no comportamento térmico. Dessa forma, os estudos de Batista (2019) demonstraram que houve um melhoramento dos parâmetros térmicos após a adição de camadas de revestimento em gesso e que foi possível utilizá-las como uma alternativa para substituição de emboços em cimento Portland ou como uma possível solução para vedações verticais existentes onde se deseja aumentar o desempenho térmico.

2.3 Prisma de blocos de concreto

O prisma é definido como a união composta pela justaposição de dois ou mais blocos unidos por argamassas com 1 cm. Nesse contexto, a utilização desse compósito geométrico confeccionado por blocos de concreto foi utilizado como objeto dessa pesquisa para compor os ensaios do estudo com base no projeto estrutural das edificações, substituindo a escala de utilização real que é de difícil preparação, onerosa e precisa de uma estrutura laboratorial muito sofisticada e avançada. Os ensaios com prismas possuem diversas vantagens pois são testes mais rápidos e mais econômicos do que os ensaios de paredes. Entretanto, vale salientar que tais similaridades não se obtêm ao real comportamento da alvenaria, mas, pode se fazer uma analogia com o concreto, pois o prisma é o corpo de prova utilizado para o ensaio de compressão, transferência de calor e demais ensaios, assim como, o cilindro é utilizado para realizar ensaios do concreto à compressão.

2.4 Blocos de Gesso

De acordo com Peres *et al.* (2008) o polo gesseiro do Araripe, localizado no estado de Pernambuco, possui aproximadamente 90% da toda produção brasileira de gesso atual, estimada em mais de dois milhões de toneladas de gesso. Assim, esse compósito, segundo afirma Baltar *et al.* (2004) é um material de melhor qualidade do mundo, entretanto, ainda há dificuldades no aumento do seu aproveitamento por conta da falta de conhecimento de tecnologias. Esse material apresenta diversas vantagens, dentre elas um custo mais baixo, um excelente isolamento térmico devido à sua composição química e um tempo de execução e acabamento menor em relação a outros materiais. Nessa circunstância, dentro de um cenário da construção civil, ele é bastante utilizado em forma de blocos em execução de paredes e divisórias internas (PERES *et al.*, 2001), que se comparadas à alvenaria de blocos cerâmicos, além de ser mais resistente, possui um maior isolamento térmico de acordo com Pires Sobrinho *et al.*, (2010), além disso possui uma condutividade térmica equivalente a 0,46 W/°C, classificando-o com um material que pode ser utilizado como isolante térmico (INCROPERA, 2008).

2.5 Processos de transferência de calor

A transmissão de calor parte do princípio da diferença de temperaturas entre dois corpos. Essa é a condição essencial para que haja a troca de calor entre os componentes de uma edificação. Nesse contexto, conforme Lamberts e Duarte (2016), o processo de transmissão de calor está associado diretamente aos climas de cada região, a fisiologia térmica dos usuários e aos materiais e processos construtivos. O processo de transmissão de calor nas edificações ocorre segundo as leis e princípios básicos da termodinâmica. Dessa forma, uma superfície que possui uma maior temperatura irá trocar calor com a outra superfície que possui menor temperatura, assim os corpos tendem a se equalizar com o passar do tempo, bancando a estabilização das trocas térmicas. Isso ocorre devido a processo de transmissão de calor, nas formas de condução, convecção e radiação.

Ainda segundo o autor, a transmissão de calor parte do princípio da diferença de temperaturas entre dois corpos. Essa é a condição essencial para que haja a troca de calor entre os componentes de uma edificação.

“Numa situação entre dois corpos A e B, com temperaturas (T) tal que $T_A > T_B$, o corpo A cede parte de sua energia térmica, o que provoca uma redução de sua temperatura enquanto que o B, ao assimilar esta energia térmica, aumentará sua temperatura e o processo continua até que as temperaturas se igualem ($T_1 = T_2$), ou seja, até que se atinja o equilíbrio térmico”. (LAMBERTS; DUARTE, 2016)

A Figura 1 apresenta o sentido do fluxo de calor por condução aplicado no prisma de concreto com diferentes temperaturas (Equação 1).

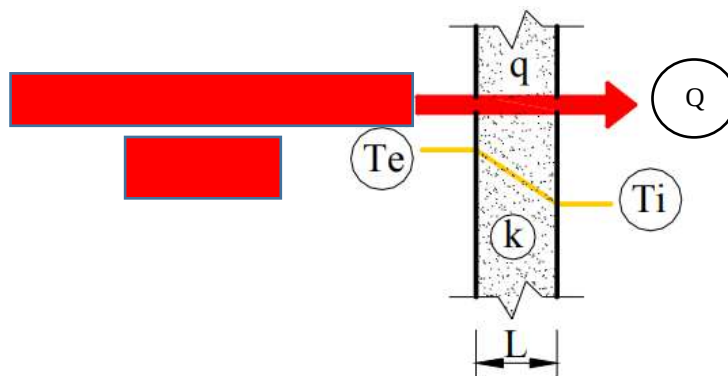


Figura 1 - Fluxo de calor por condução no prisma de concreto.

Fonte: Adaptado de Batista (2019).

$$q = k.(T_{EXT} - T_{INT})/L = U.\Delta T/L \quad (1)$$

Em que:

q = Intensidade de fluxo de calor, em W/m^2 ;

Q = Intensidade total de fluxo de calor, em W (J/s);

E = Energia (calor), em J ;

k = Condutibilidade térmica do material, em $W/m.K$;

ΔT = Diferença de temperatura entre exterior e interior, em Kelvin (K);

Δt = Intervalo de tempo;

S = Área atravessada pelo fluxo de calor, em metro quadrados (m^2);

L = Espessura da parede, em metros (m)

U – Transmitância térmica ($W/m^2.K$);

T_e = Temperatura externa (K);

T_i = Temperatura interna (K).

2.6 Transferência de calor por condução

Conforme Lamberts e Duarte (2016), o processo de condução é realizado por contato entre as partes materiais entre cada molécula, ou seja, por contato entre as moléculas dos corpos. Esse processo, podem ocorrer em matérias nos estados sólidos, líquidos e gasosos. Em regra geral, os processos de condução acontecem nos sólidos, visto que nas superfícies líquidas pode haver interferência nos fluidos convectivos. No entanto, se forem em líquidos, os mesmos devem estar em movimentos não convectivos para que não alterem o processo original de condução de calor.

Para Marques (2014), “os parâmetros da resistência térmica superficial surgem devido ao efeito da transmissão de calor por convecção e radiação, cujo efeito combinado dá origem a zonas onde o fluxo de calor encontra resistência no contato com a superfície”.

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, NBR 15220, 2005), “Fluxo de calor (q) ou Taxa de fluxo de calor é o quociente da quantidade de calor que atravessa uma superfície durante um intervalo de tempo pela duração desse intervalo”. No entanto, pode ser matematicamente calculado pela Lei de Fourier a qual determina que

o fluxo de calor é analisado pela multiplicação da condutividade térmica de cada material, a diferença de temperaturas interna e externa da parede dividida pela espessura da parede.

Ainda de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, NBR 15220, 2005), “Densidade de fluxo de calor ou Densidade de taxa de fluxo de calor é o quociente do fluxo de calor que atravessa uma superfície pela área dessa superfície”.

Da mesma forma, matematicamente é possível calcular a densidade do fluxo de calor através da Lei de Fourier, sendo possível realizar os cálculos com a multiplicação da área versus o fluxo de calor. Nesta conjuntura, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, NBR 15220, 2005) determina que: “a condutividade térmica é a propriedade física de um material homogêneo e isotrópico, no qual se verifica um fluxo de calor constante, com densidade de 1 W/m^2 , quando submetido a um gradiente de temperatura uniforme de 1 Kelvin por metro quadrado (m^2)”.

$$Q = k.A.(d\theta/dX) \text{ ou } Q = A.q \quad (2)$$

Em que:

Q – Fluxo de calor (W);

q = Intensidade de fluxo de calor, em W/m^2

k – Condutividade térmica do material ($\text{W}/(\text{m.K})$);

A – Área da superfície (m^2);

$d\theta$ – Diferença de temperatura entre duas partículas (K);

dX – Distância entre as partículas (m).

2.6.1 Transferência de calor por convecção

A transferência de calor por convecção se dar quando os corpos estão em contato molecular sendo fluidos líquidos e gases. O processo de transferência de calor possui duas fases distintas, na primeira fase é utilizado o processo de condução e na segunda fase é realizada alteração na densidade do material ocasionada pelo aumento da temperatura do fluido junto ao movimento convectivo. (LAMBERTS; DUARTE, 2016).

Para Marques (2014), “a convecção pode ocorrer devido a diferença de pressão originada por diferença de densidade do fluido devido ao gradiente térmico (convecção natural) ou diferença de pressão originadas de causas externas, como uma bomba,

ventilador, etc. (convecção forçada) ”. A determinação do fluxo de calor por convecção ar-sólido pode ser determinada pela Lei de Newton (Equação 3).

$$Q = hc.A.(\theta_s - \theta_f) \quad (3)$$

Em que:

Q – Fluxo de calor (W);

hc – Condutância térmica do material ($W/(m^2.K)$);

A – Área da superfície em contato com o fluido (m^2);

θ_s – Temperatura da superfície da envolvente (K);

θ_f – Temperatura do ar (K).

Para o caso de convecção ar-ar, o fluxo de calor é dado pela Equação (4).

$$Q = \rho.C.N_v.V.(\theta_f - \theta_s) [W] \quad (4)$$

Em que:

Q – Fluxo de calor (W);

ρ – Massa específica do ar (kg/m^3);

C – Calor específico do ar ($J/(kg.K)$);

N_v - Taxa de renovação do ar do local (Renovações/hora);

V – Volume do ambiente (m^3);

$(\theta_f - \theta_s)$ – Diferença de temperatura entre os ambientes interior e exterior (K).

2.6.2 Transferência de calor por radiação

Para Lamberts *et al.*, (2016), o processo de transferência de calor por radiação ocorre quando um corpo possui uma maior temperatura e com isso uma maior energia radiante frente a outro corpo com menor energia, o qual irá absorver a energia radiante. O processo de absorção depende das características e propriedade física de cada superfície receptora, sendo transformada a energia radiante em calor. As propriedades das superfícies receptoras são representadas pela emissividade do corpo.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, NBR 15220, 2005), define emissividade como sendo “quociente da taxa de radiação emitida por uma superfície pela taxa de radiação emitida por um corpo negro, à mesma temperatura”.

Batista (2019), faz referência sobre a utilização da expressão de Stefan e Boltzmann, utilizada para realizar os cálculos de calor radiante tanto para emissões livres (Equação 5) como para radiação em corpos e temperaturas distintos (Equação 6).

$$Q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (5)$$

$$Q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T^4 - T_c^4) \quad (6)$$

Em que:

Q – Fluxo de calor (W);

ε – Emissividade da superfície;

σ – Constante de Stefan-Boltzman ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$);

A – Área da superfície emissora (m^2);

T – Temperatura absoluta da superfície emissora (K);

T_c - Temperatura absoluta da superfície receptora (K).

2.7 Propriedades térmicas dos materiais de construção

A parte externa de uma edificação possui suma importância quando relacionada não somente aos aspectos estéticos, mas também a transferência de calor entre os ambientes externos e internos das edificações. A escolha dos materiais com baixa condutividade térmica contribui para um melhor conforto térmico das construções. Dessa forma, na fase de projetos construtivos se fazem necessários estudos acerca das características térmicas dos componentes construtivos, visando buscar materiais com melhor resistência térmica (R), baixa transmitância térmica (U), melhor capacidade térmica (C_t), maior atraso térmico (ϕ) e um menor fator solar (F_{so}).

2.7.1 Resistência térmica (R)

Para a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, NBR 15220, 2005) a resistência térmica (R) é definida por :

“Resistência térmica (R), obtida através de medições baseadas em ensaios normalizados, devem ser usados sempre que possível. Na ausência de valores medidos, conforme ISO 6946, recomenda-se que a resistência térmica, R , de uma camada homogênea de material sólido seja determinada pela expressão 1”. (ABNT, NBR 15220, 2005)

$$R_T = R_{SI} + \sum_j R_j + R_{SE} \quad (1)$$

$$R = e / \lambda$$

Em que:

R_T – Resistência térmica total ((m².K)/W);

R_j – Resistência térmica de cada camada do componente ((m².K)/W);

R_{SI} – Resistência térmica superficial interna ((m².K)/W);

R_{SE} – Resistência térmica superficial externa ((m².K)/W);

e – espessura da camada (m);

λ – Condutividade térmica (W/(m.K)).

Assim, conforme o anexo B da NBR 15220 (ABNT, 2005) são citados diversos parâmetros que devem ser utilizados nos cálculos de resistência térmica. Dessa forma é possível obter valores de condutividade térmica (λ), calor específico (c) e a densidade de massa aparente (ρ) dos materiais utilizados na pesquisa.

Segundo Marques (2014), “os parâmetros da resistência térmica superficial surgem devido ao efeito da transmissão de calor por convecção e radiação, cujo efeito combinado dá origem a zonas onde o fluxo de calor encontra resistência no contato com a superfície”.

Conforme (ABNT, NBR 15220, 2005) a qual determina que:

“A resistência térmica superficial varia de acordo com vários fatores, tais como emissividade, velocidade do ar sobre a superfície e temperatura tanto da própria superfície em avaliação quanto do ar e de outras superfícies próximas”.

Na Tabela 1 são observados os valores médios recomendados para R_{SI} e R_{SE} .

Tabela 1 - Resistência térmica superficial interna e externa

R _{SI}			R _{SE}		
(m².K)/W					
Direção do fluxo de calor					
Horizontal	Ascendente	Descendente	Horizontal	Ascendente	Descendente
					
0,13	0,10	0,17	0,04	0,04	0,04

Fonte: BATISTA (2019), ABNT, 2005, adaptado).

2.7.2 Transmitância térmica (U) e capacidade térmica (C_T)

Para Lamberts *et al.*, (2016), a transmitância térmica (U) está relacionada às características e às propriedades térmicas de cada material. Assim, podemos afirmar que é o inverso da resistência térmica, ou seja, quanto maior for a resistência, menor será a transmitância térmica. Assim, quanto menor for a densidade do material, menor será o fluxo de calor. Da mesma forma que, materiais mais densos possuem um maior fluxo de calor. Além disso, a transmitância térmica está relacionada às espessuras dos materiais.

A Equação 7 determina o valor da transmitância térmica (U)

$$U = 1 / R_T \quad (7)$$

Em que::

U – Transmitância térmica (W/(m².K));

R_T – Resistência térmica total ((m².K)/W).

Ainda segundo Lamberts *et al.*, (2016), a capacidade térmica (C_T) está relacionada com a quantidade de calor necessária para elevar um grau de temperatura numa unidade de área. Dessa forma, podemos afirmar que, a capacidade térmica do material construtivo está relacionada a fatores de resistência, densidade, calor específico e condutividade térmica. Logo, quando possuímos maiores valores nesses parâmetros, maior será a capacidade térmica do material, pois haverá uma maior interação com as trocas térmicas entre os ambientes edificados.

Batista (2019), enfatizou a importância e a necessidade de compartimentação dos ambientes quanto aos aspectos térmicos, destacando a necessidade do conhecimento das propriedades dos blocos como componentes de um sistema de vedações externas ou internas. O autor fez um destaque quanto à necessidade de se obter um melhor desempenho térmico das vedações, destacando que foram necessários maiores valores de capacidade térmica e menores valores de transmitância térmica, ambos parâmetros não são proporcionais. Nesse contextualização, na sua pesquisa referente aos testes com os blocos cerâmicos de 8 furos, blocos maciços e blocos de concreto, ambos sem revestimentos, foram encontrados valores de transmitância térmica U = 2,75 ; 3,78 e 3,28 W/m²K, sucessivamente.

Conforme (ABNT, NBR 15220, 2005) determina, “A capacidade térmica de um componente plano constituído de camadas homogêneas perpendiculares ao fluxo de calor é determinada pela expressão”. Assim, a Equação 8 determina o valor da Capacidade térmica (C_T)

$$C_T = \sum_j \lambda_j \cdot R_j \cdot c_j \cdot \rho_j = \sum_j e_j \cdot c_j \cdot \rho_j \quad (8)$$

Em que::

C_T – Capacidade térmica do componente (J/K);

λ_j – Condutividade térmica do material da camada j (W/(m.K));

R_j – Resistência térmica da camada j ((m².K)/W);

c_j – Calor específico do material da camada j (kJ/(kg.K));

ρ_j – Densidade de massa aparente do material da camada j (kg/m³);

e_j – Espessura da camada j (m).

2.7.3 Atraso térmico (ϕ)

Conforme (ABNT, NBR 15220, 2005) determina que o atraso térmico é o “tempo transcorrido entre uma variação térmica em um meio e sua manifestação na superfície oposta de um componente construtivo submetido a um regime periódico de transmissão de calor”.

Segundo Lamberts e Duarte (2016), o atraso térmico (ϕ) ou inércia térmica, está diretamente ligado à capacidade do edifício de reduzir o calor transferido em suas maiores temperaturas e liberá-lo posteriormente, ou seja, quanto tempo será necessário para que um ambiente possa interferir nos outros ambientes com temperaturas diferentes.

As Equações 9, 10 e 11 deverão ser utilizadas para componentes formados por diferentes camadas sobrepostas com vários tipos de materiais nas respectivas camadas (ABNT, 2005).

$$\phi = 1,382 \cdot R_t \cdot \sqrt{B1 + B2} \quad (9)$$

$$B1 = 0,226 \cdot \frac{C_T - C_{EXT}}{R_t} \quad (10)$$

$$B2 = 0,205 \cdot \left(\frac{(\lambda \cdot \rho \cdot c)_{EXT}}{R_t} \right) \cdot \left(R_{EXT} - \frac{R_t - R_{EXT}}{10} \right) \quad (11)$$

Em que:

ϕ – Atraso térmico (h);

R_t – Resistência térmica de superfície a superfície ((m².K)/W);

λ – Condutividade térmica do material (W/(m.K));

c – Calor específico do material (kJ/(kg.K));

ρ – Densidade de massa aparente do material (kg/m³);

R_{EXT} – Resistência térmica da camada externa do componente ((m².K)/W).

Ainda conforme ABNT (NBR 15220, 2005) determina: “ nas equações onde consta o texto “EXT” se refere à última camada do componente, junto à face externa. Se a Equação B2 possuir valor negativo, este deve ser considerado nulo”.

2.7.4 Fator solar de elementos opacos (F_{so})

Segundo ABNT (NBR 15220, 2005) o fator de ganho de calor solar dos elementos transparentes ou translúcidos ou fator solar de elementos transparentes ou translúcidos, são: “Quociente da taxa de radiação solar diretamente transmitida através de um componente transparente ou translúcido, sob determinado ângulo de incidência, mais a parcela absorvida e posteriormente retransmitida para o interior, pela taxa da radiação solar total incidente sobre a superfície externa” .

O fator solar de elementos opacos está relacionada à quantidade de energia radiante incidente sobre um corpo opaco e quanto ela é absorvida ou refletida. Assim, a energia radiante refletida não sofre alterações nem modificações, entretanto a energia absorvida é transformada em energia térmica. Outrossim, as superfícies mais escuras possuem um maior valor de absorvância e emissividade (LAMBERTS; DUARTE, 2016).

A Equação 12 (ABNT, 2005) descreve como deve ser calculado o fator solar.

$$F_{so} = 100 \cdot U \cdot \alpha \cdot R_{SE} \quad (12)$$

Ainda conforme (ABNT, NBR 15220, 2005) determina que “Como R_{SE} é admitido constante e igual a 0,04, a expressão 12 pode ser reescrita na forma da expressão 13”.

$$F_{so} = 4 \cdot U \cdot \alpha \quad (13)$$

Em que:

F_{so} – Fator solar (%);

U – Transmitância térmica do componente (W/(m².K));

α – Absortância à radiação solar – função da cor.

Na Tabela 2 são observados valores indicativos para absortância (α) e emissividade (ϵ) (ABNT, 2005).

Tabela 2 - Absortância e emissividade de materiais e componentes

Absortância (α) e emissividade (ϵ) dos materiais e componentes		
Tipo de superfície	α	ϵ
Ciação nova	0,12 / 0,15	0,90
Chapa de aço galvanizada (nova)	0,25	0,25
Concreto aparente	0,65 / 0,80	0,85 / 0,95
Telha de barro	0,75 / 0,80	0,85 / 0,95
Tijolo aparente	0,65 / 0,80	0,85 / 0,95
Reboco claro	0,30 / 0,50	0,85 / 0,95
Revestimento asfáltico	0,85 / 0,98	0,90 / 0,98
PINTURA		
Branca	0,2	0,9
Amarela	0,3	0,9
Verde clara	0,4	0,9
Verde escuro	0,7	0,9
Vermelha	0,74	0,9
Preta	0,97	0,9

Fonte: Batista (2019) adaptado da NBR 15220, ABNT , 2005)

2.8 Normatização do desempenho térmico de edificações

No Brasil, o setor residencial é responsável pelo segundo maior consumo de energia elétrica. Diante dessa situação, foram criadas políticas públicas que buscam através de normas e procedimentos normativos contribuir na busca por uma melhor eficiência energética nesse setor (ROMEIRO, 2019).

Para a NBR 15220 (ABNT 2005) que faz menção às diretrizes construtivas quanto ao desempenho térmico, das quais a referida norma cita:

“A avaliação de desempenho térmico de uma edificação pode ser feita tanto na fase de projeto, quanto após a construção. Em relação à edificação construída, a avaliação pode ser feita através de medições in-loco de variáveis representativas do desempenho, enquanto que na fase de projeto esta avaliação pode ser feita por meio de simulação computacional ou através da verificação do cumprimento de diretrizes construtivas”. (ABNT 2005)

Segundo Romeiro (2019), as normas atuais de desempenho térmico, NBR 15220, NBR 15575 e o relatório técnico da qualidade, possuem limitações quando são realizados estudos relacionados à análise exterior das edificações. Dessa forma, pode-se verificar que existem alguns componentes construtivos com maior influência nos ganhos e perdas de calor, além da falta de considerações relacionadas aos vãos envidraçados quanto aos ganhos e perdas energéticos. Além disso, verificou-se que essas normatizações restringem a análise da fachada exterior, especificamente relacionadas com paredes e cobertura externas.

De acordo com Batista (2019), devido ao desenvolvimento tecnológico, que é uma tendência mundial, a construção civil no Brasil tem passado por processos de mudanças. Dessa forma, novas pesquisas são necessárias para atender aos requisitos das regulamentações normatizadas quanto ao desempenho térmico. Assim, a indústria da construção civil tem buscado desenvolver novos produtos, novas tecnologias que visam contribuir com o mercado.

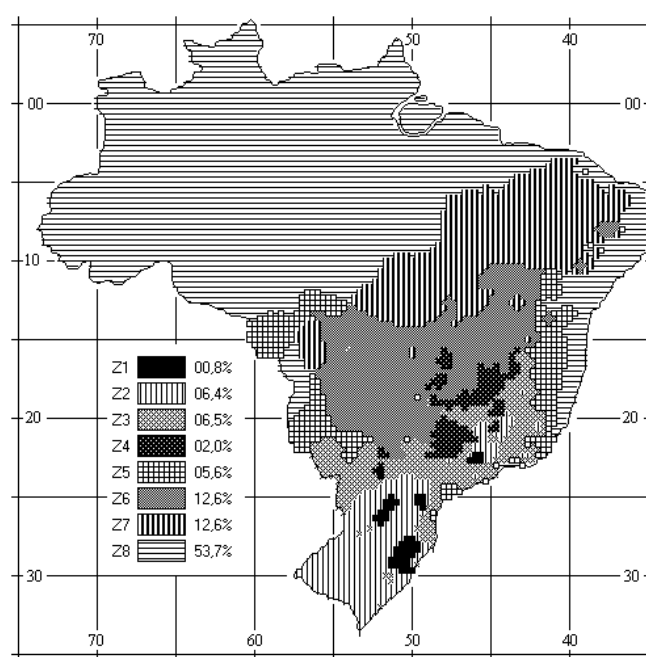
Na busca de requerer melhores tecnologias para atender ao conceito de desempenho térmico, a norma brasileira de desempenho térmico de edificações – NBR 15220 (ABNT, 2005), criou requisitos para serem atendidos pela indústria da construção civil. Na primeira parte, a norma aborda as definições e os correspondentes símbolos e unidades de termos relacionados com o desempenho térmico de edificações. Entretanto, na segunda parte, ela estabelece formas de se realizar o cálculo das propriedades térmicas de elementos e componentes de edificações. Logo, é possível calcular a resistência, transmitância, capacidade térmica, atraso térmico e fator de calor solar. Ademais, a terceira parte da norma (ABNT, NBR 15220, 2005):

“Estabelece um Zoneamento Bioclimático Brasileiro abrangendo um conjunto de recomendações e estratégias construtivas destinadas às habitações unifamiliares de interesse social. Outrossim, estabelece recomendações e diretrizes construtivas, sem caráter normativo, para adequação climática de habitações unifamiliares de interesse social, com até três pavimentos” (Figura 2). (ABNT, NBR 15220, 2005)

O Zoneamento bioclimático brasileiro (Figura 2) possui diretrizes construtivas para habitações unifamiliares voltadas para o interesse e desenvolvimento social. A norma apresenta recomendações quanto ao desempenho térmico de habitações unifamiliares de interesse social aplicáveis na fase de projeto. O zoneamento bioclimático

brasileiro possui 4 anexos, dos quais o anexo A representa um texto normativo relacionado ao clima de 330 cidades; O anexo B do referido texto normativo, faz uma abordagem sobre o zoneamento bioclimático brasileiro; Já o anexo C, tem caráter informativo, com recomendações e diretrizes construtivas para adequação de uma edificação ao clima da região; por fim, o anexo D, informativo, no qual versa sobre valores de transmitância térmica, capacidade térmica e atraso térmico de alguns tipos de paredes e coberturas usuais.

Figura 2 - Zoneamento bioclimático brasileiro



Fonte: NBR 15220 (ABNT, 2005).

Conforme a Figura 2, retirada da NBR 15220 (ABNT, 2005) tem, como caráter orientador, algumas diretrizes construtivas relativas a aberturas, paredes e coberturas, além de estratégias de condicionamento térmico passivo para cada uma das oitos zonas bioclimáticas. Para formulação dessas estratégias e diretrizes, a norma considerou os seguintes parâmetros e condições de contorno: tamanho das aberturas para ventilação; proteção das aberturas; vedações externas (tipo de parede externa e tipo de cobertura) – baseado na transmitância térmica, atraso térmico e fator solar); e estratégias de condicionamento térmico passivo.

2.8.1 NBR 15575 – Desempenho de edificações habitacionais

Buscando atender às exigências dos usuários foram criadas normas que compõem

edificações habitacionais, independente da forma de construção das edificações e dos materiais empregados na obra. O principal objetivo dessa norma é atender aos usuários nos aspectos de segurança, habitabilidade e sustentabilidade. Para que isso fosse alcançado, foram estabelecidos critérios relativos ao desempenho térmico, acústico, lumínico e ao fogo, que devem ser atendidos individual e isoladamente conforme cada situação encontrada nas edificações. Assim, essa norma trouxe um processo de mudanças na construção, no qual alavancou o processo por novas pesquisas, novos materiais, novos processos e novos métodos de trabalho no setor de construção civil, sendo possível verificar os requisitos e critérios determinados pela NBR 15575 (ABNT, 2013), no qual determina que :

“As exigências do usuário relativas à segurança, habitabilidade e sustentabilidade são expressas pelos seguintes fatores: segurança estrutural; segurança contra o fogo; segurança no uso e na operação; estanqueidade; desempenho térmico; desempenho acústico; desempenho lumínico; saúde, higiene e qualidade do ar; funcionalidade e acessibilidade; conforto tátil e antropodinâmico. Durabilidade; manutenibilidade e impacto ambiental”. (ABNT, 2013)

2.8.2 Desempenho térmico na NBR 15575

Sendo uma das mais importantes normas devido à sua relação com as questões de conforto térmico das edificações, esta norma visa atender especificações e requisitos gerais referente ao desempenho térmico do sistema da edificação.

Segundo Berndt Shin (2016), os parâmetros de desempenho são classificados de acordo com três níveis de desempenho: mínimo, intermediário e superior. Assim os fornecedores, as construtoras e os profissionais da área devem atender aos parâmetros e exigências mínimas dos usuários, garantindo, dessa forma, melhores condições de habitabilidade.

O Atendimento aos requisitos de desempenho térmico deve ser aplicado no sistema de edificações com um todo, ou seja, não deve ser avaliado de forma individual. O sistema de desempenho térmico deve ser testado e avaliado como um conjunto pertencente às edificações (BERNDT SHIN, 2016). Nessa perspectiva, segundo o autor, com a entrada das especificações dos itens das normas de desempenho houve um impulsionamento na cadeia de fornecedores. Dessa forma, as empresas e os fornecedores de elementos de vedação precisaram investir em novas tecnologias para que seus produtos fossem ensaiados e atendessem aos requisitos da referida norma de desempenho. Assim, foi

possível desenvolver novos materiais e novos produtos para atender às necessidades dos usuários.

Devido à abrangência desses requisitos de desempenho, a NBR 15.575 (ABNT, 2013) apresenta um grande potencial de impacto sobre todos os atores da cadeia produtiva, tais como: incorporadores, projetistas, construtores, fabricantes de insumos da construção civil e responsáveis pelo controle tecnológico (BERNDT SHIN, 2016).

Na busca, não somente por melhor conforto térmico dos usuários, mas também para o atendimento legal regido pela NBR 15575 (ABNT, 2013), objetiva-se uma maior interação entre as partes externas da edificação, visando satisfazer as necessidades dos usuários, associadas a uma melhor eficiência energética da edificação (MARQUES, 2014).

2.8.3 Desempenho térmico do sistema de vedações verticais na NBR 15575

A aplicação da NBR 15575 (ABNT, 2013) é referente aos sistemas de vedações verticais internas e externas (SVVIE) das construções dos edifícios habitacionais com até cinco pavimentos.

Segundo Lamberts *et al.*, (2016), o volume de cada edificação atrelada aos seus espaços internos tem interferência com o lado externo da edificação, influenciando assim, no desempenho térmico da edificação. As vedações externas, mesmo sem função estrutural, devem ser tratadas e consideradas com um conjunto de fatores que podem influenciar no desempenho térmico da edificação.

De acordo com Westphal (2015), estudos relacionados ao desempenho de vidros tem sido apresentado por fornecedores buscando melhorar o performance através de vidros de controle solar. Dessa maneira, visa-se reduzir o calor incidente pelo sol nas edificações, ou seja, especificamente nas janelas, e com isso trazer um menor índice de transmitância de calor entre o exterior e o interior da edificação.

Na elaboração dos projetos é importante que sejam consideradas as especificações dos conjuntos de materiais e componentes, pois de nada adianta ter um produto com alta qualidade se o seu conjunto possui materiais de péssima qualidade, comprometendo o sistema térmico das edificações verticais como um todo. Portanto, é importante que seja avaliada a combinação dos componentes, de acordo com as características de utilização (BERNDT SHIN, 2016).

Segundo Berndt Shin (2016), as avaliações dos projetos devem levar em consideração fatores climáticos referentes a cada região do Brasil. Dessa forma, será

possível obter um melhor atendimento aos projetos de desempenho térmico estabelecidos pela NBR 15.575 (ABNT, 2013).

Dentre os requisitos, método de avaliação e critérios estabelecidos para verificação dos níveis mínimos de desempenho térmico das vedações verticais, sejam elas externas ou internas, está relacionado ao nível de critério de transmitância térmica e da capacidade de cada material de conduzir calor, ou seja, quanto maior for a transmitância térmica do material, maior será o fluxo de calor. Da mesma forma que, a capacidade térmica de cada material está relacionada com a quantidade de troca térmica que cada material pode interagir, ou seja, a quantidade de calor necessária para variar em uma unidade a temperatura de um sistema. O método de avaliação é feito através de cálculos conforme procedimentos apresentados na NBR 15220-2. Assim, os valores máximos admissíveis para a transmitância térmica (U) e de capacidade térmica (C_T) das paredes externas estão apresentados nas Tabela 3 e 4.

Tabela 3 - Transmitância térmica de paredes externas

Transmitância Térmica U		
$W/m^2.K$		
Zonas 1 e 2	Zonas 3, 4, 5, 6, 7 e 8	
$U \leq 2,5$	$\alpha^1 \leq 0,6$	$\alpha^1 > 0,6$
	$U \leq 3,7$	$U \leq 2,5$
¹ α é a absorptância à radiação solar da superfície externa da parede		

Fonte: NBR 15575-4 (ABNT, 2013)

Tabela 4 - Capacidade térmica de paredes externas

Capacidade Térmica C_T	
$kJ/m^2.K$	
Zona 8	Zonas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7
sem exigência	≥ 130

Fonte: NBR 15575-4 (ABNT, 2013)

2.8.4. Outros métodos experimentais de desempenho térmico

Existem inúmeros métodos e ensaios que determinam de forma experimental o processo de utilização de uma câmara térmica. Essas pesquisas buscam determinar o comportamento térmico das edificações de uma maneira experimental, visando contribuir com os estudos e as normas de desempenho térmico das edificações.

Segundo Silva, Melo e Queiroga (2013), realizaram estudos sobre o desempenho mecânico dos blocos com utilização do resíduos. Os resultados apontam que os blocos podem ser utilizados sem função estrutural, podendo ser utilizados em alvenaria de vedação. A utilização desse material na construção civil pode melhorar o conforto térmico, o desempenho térmico e a eficiência energética das edificações.

O experimento de Silva, Melo e Queiroga (2013) deu-se com mini paredes de 1m² na qual foi utilizada uma câmara térmica composta por dois espaços, um aquecido e outro refrigerado. Entre os ambientes havia uma parede divisória produzida de gesso acartonado onde eram colocados os elementos a serem testados. Utilizou-se como fonte de aquecimento um conjunto de 12 lâmpadas (150W) que compõe um valor total de 1.800W de potência posicionada a uma distância de um metro da mini parede. As principais conclusões do experimento a respeito do desempenho térmico foram corroboradas pelos cálculos complementares propostos pela NBR 15220 (ABNT, 2005).

Conforme os estudos de Allam *et al.*, (2018), utilizou-se uma câmara climática para realizar testes de fluxo de calor e de umidade para mini paredes de tijolos de argila sob condições de contorno controladas. Foram instalados sensores higrotérmicos nas superfícies, no interior das minis paredes e no ambiente da câmara. O autor concluiu que seu experimento foi muito positivo e convergente, quando comparados com os modelos matemáticos propostos e os resultados das leituras da câmara térmica do seu experimento.

Nas pesquisas de Ottelée e Perinib (2017), foram realizadas análises quanto ao desempenho térmico de fachadas com jardins verticais. Nesse sentido, a pesquisa foi desenvolvida durante um longo período com uma câmara térmica ativa controlada por uma fonte de aquecimento infravermelho, termopares de contato e equipamento automático de coleta de dados. Além disso, foi garantida na pesquisa uma condição similar ao ambiente real externo. Os autores concluíram que conseguiram simular, do ponto de vista físico, as condições de uma fachada e observaram de forma precisa as diferenças de temperatura em paredes com ou sem o jardim vertical.

Lakatos (2017), em seus estudos construiu uma câmara climática para testar mantas de aerogel, na qual foram realizados ensaios através de uma câmara térmica que possuía equipamentos para controle da ventilação, umidade do ar e temperatura. Dessa maneira, o autor analisou o efeito da umidade na condutividade térmica e na transmitância térmica desses materiais, bem como o efeito na edificação através do consumo de energia para climatização.

De acordo com a pesquisa de Specht *et al.*, (2010), foram avaliadas diversas

configurações de paredes de tijolos maciços, sob a ótica da térmica dos edifícios. Para que isso fosse possível, foi necessária a realização das medições de temperaturas das paredes. Utilizou-se uma câmara térmica em madeira, com revestimento interno em poliestireno expandido, revestida com papel laminado. Foi utilizada como fonte de calor uma lâmpada incandescente de 250 W e reostato para regulagem da temperatura. Dessa forma, utilizou-se de modelagem matemática para calcular a transferência de calor, fluxo de calor e o custo total de cada alternativa. Os resultados demonstraram que a relação termoeconômica para cada configuração de parede foi relativamente maior nas paredes mais espessas e/ou com isolamento térmico, no entanto, estas apresentam um comportamento térmico muito superior às tradicionais.

No seu estudo, Batista (2019) criou uma câmara térmica (Figura 3) composta por uma caixa de madeira tipo compensado com 1,0 cm de espessura possuindo uma área de seção de 45 x 45 cm e profundidade de 80 cm. Além disso, foram inseridas barras de madeira com 4,5cm de largura a uma distância de 30 cm da abertura da caixa, dividindo-a em duas partes e servindo de borda para evitar perdas de calor em frestas entre a parede da câmara e os elementos de teste. Esse aparato visa obter duas câmaras que simulam o ambiente quente (externo) e o ambiente frio (interno). Para fornecer o calor no lado quente, foi instalado um bocal de porcelana na parte central do fundo da caixa à espera da lâmpada infravermelha de secagem com potência máxima equivalente a 250 W.

Batista (2019), realizou uma pesquisa com objetivo de analisar os enfoques das temperaturas referente a mini parede em blocos cerâmicos e blocos de concreto, ambos com revestimento externo em argamassa de cimento Portland com espessuras de 2,0 cm e com revestimento interno de gesso com espessura inicial de 0,5, 1,0 e 1,5 cm, sucessivamente. Nesse sentido, foi observado que essa configuração de camadas sobrepostas de revestimento interno em gesso acrescido de 0,5 cm em cada teste obteve um efeito positivo no comportamento térmico. Dessa forma, os estudos de Batista (2019) demonstraram que houve um melhoramento dos parâmetros térmicos após a adição de camadas de revestimento em gesso e que foi possível utilizá-las como uma alternativa para substituição de emboços em cimento Portland ou apenas como uma possível solução para vedações verticais existentes onde se deseja aumentar o desempenho térmico.

Ainda, segundo os estudos de Batista (2019) foram encontrados valores de resistência térmica total $R_T = 0,36; 0,26; 0,30$ referentes aos resultados do estudo comparativo entre o desempenho de tijolo cerâmico de 8 furos, tijolos cerâmicos maciços e bloco de concreto. Dessa forma, foram apresentadas curvas maiores de temperaturas para

o bloco de cerâmico maciço, devido a sua alta densidade de massa aparente. A pesquisa do autor obteve um resultado satisfatório no valor de capacidade térmica para o bloco maciço, porém como esse produto possuiu uma alta condutividade térmica foi reduzida a sua resistência térmica e consequentemente aumentou-se a sua transmitância térmica, obtendo valor fora das normas técnicas. Segundo o autor, os valores que foram obtidos no bloco cerâmico de 08 furos, apesar de possuírem alta densidade, foram favorecidos pelas camadas vazadas dos furos preenchidas por camadas de ar, servindo como isolante térmico, favorecendo a contribuição à resistência térmica. Segundo os parâmetros calculados, o ensaio em câmara térmica refletiu o esperado, possuindo desempenho térmico inferior a todos os demais, atendendo apenas aos parâmetros normativos da norma de desempenho térmico no quesito de transmitância térmica. Por conseguinte, foram obtidos valores de transmitância térmica e capacidade térmica para os blocos de concreto, no entanto, apenas foram atendidos os requisitos referentes às zonas bioclimáticas 3 e 4 referentes à transmitância térmica, possuindo uma capacidade térmica um pouco bem próxima do recomendado pela norma técnica NBR 15220 (ABNT, 2005). Para Batista (2019), os ensaios em câmara térmica permitiram analisar as temperaturas e o comportamento de aquecimento e resfriamento dos blocos de gesso com diversas configurações de espessuras. Dessa forma, o autor pode comparar os resultados obtidos nos ensaios com as respectivas normas de desempenho térmico.

Figura 3 – Vista de câmara térmica desenvolvida por Batista (2019)



Fonte: Batista (2019)

2.9 Termografia infravermelha

Segundo Bagavathiappan *et al.*, (2013), a utilização da termografia está inserida nas diversas atividades, seja ela no campo industrial, seja ela no campo das engenharias ou até mesmo em pesquisas tecnológicas, sendo inúmeros os casos de utilização da termografia infravermelha. A termografia pode ser utilizada em inspeções preditivas no qual podem ser realizados monitoramentos para constatar a presença de falhas ou irregularidades dos materiais ou processos de trabalho. Dessa forma é possível distinguir áreas de diferentes temperaturas em um corpo através da visualização artificial dentro do espectro infravermelho.

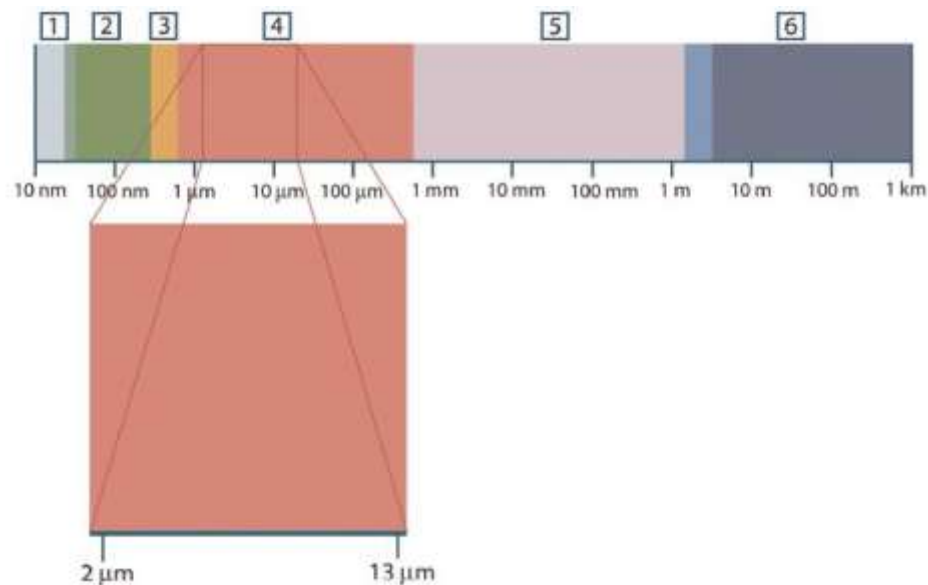
A termografia infravermelha possui dois tipos de avaliações: A termografia quantitativa e a qualitativa. A primeira requer que sejam determinados os valores, enquanto que a segunda, apenas requer uma avaliação da qualidade dos materiais.

De acordo com Comitti (2012), diversos fatores influenciam nas análises dos resultados dos termogramas, principalmente aqueles relacionados a fatores externos. Possíveis variações nas condições térmicas do objeto e do meio em que se encontra, antes e durante, podem induzir nos resultados. Além disso, a presença de fontes externas de calor e o ângulo de medição podem também influenciar nos resultados.

Conforme Viégas (2015), a termografia infravermelha possui duas técnicas primordiais em relação à existência de fonte de calor artificial. A técnica passiva, na qual os objetos possuem energia térmica própria ou são estimulados a armazenar energia por uma fonte natural de calor (energia solar). Assim, para que isso aconteça, deve haver diferença de temperaturas entre o material e o ambiente. A outra técnica denominada ativa, requer uma fonte externa de energia, utilizada para aquecer ou resfriar de forma intencional os materiais.

Como princípio para entendimento da termografia infravermelha tem-se que todos os objetos com temperatura acima do zero absoluto (0 K) emitem radiação na faixa infravermelha do espectro eletromagnético. De acordo com o comprimento de onda, a radiação infravermelha está na faixa de 0,75 a 1000 μm , localizado entre a faixa visível e microondas (Figura 4). A faixa infravermelha pode ser dividida em três sub-regiões: infravermelho próximo (0,76 -1,5 μm), infravermelho médio (1,5 – 5,6 μm) e infravermelho distante (5,6 – 1000 μm) (BAGAVATHIAPPAN *et al.*, 2013).

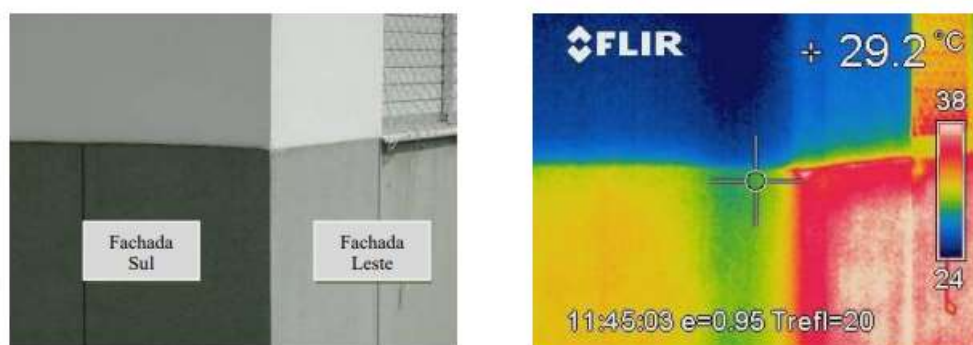
Figura 4 - Espectro eletromagnético. 1: Raio-X; 2: Ultravioleta; 3: Visível; 4: Infravermelho; 5: Microondas; 6: Ondas de rádio



Fonte: (FLIR, 2014).

A termografia é utilizada para realizar observação do comportamento térmico de materiais com diferentes texturas e cores conforme demonstra a Figura 5. Dessa forma, o uso de imagens térmicas geradas a partir da detecção da radiação infravermelha permite mapear os gradientes de temperatura na superfície dos objetos analisados (LAMBERTS; DUARTE, 2016).

Figura 5 - Termograma da fachada de uma edificação

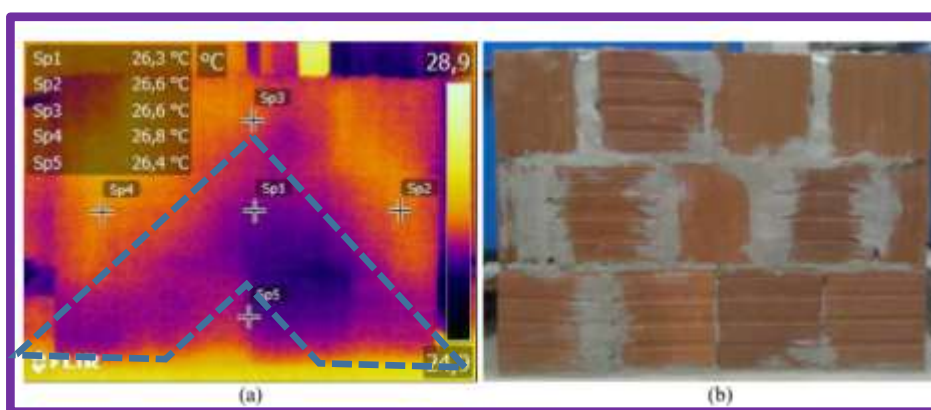


Fonte: Lamberts; Duarte, (2016)

Segundo Santos *et al.*, (2019), é crescente o uso da termografia infravermelha nas áreas de construção civil. A termografia pode ser utilizada para detectar a presença de umidade ou vazamentos nas fachadas das edificações. Segundo estudos do autor, foi utilizada uma câmara termográfica para avaliar um vazamento proposital dentro de uma parede através de uma tubulação furada. Dessa forma, foram avaliadas as imagens dos

termogramas durante o período de 2 h, 48 h e 7 dias. A Figura 6 representa a imagem dos ensaios realizados na parede com o respectivo termograma. A coloração violeta demonstrada na figura 6(a) representa o local onde houve o vazamento da tubulação, que foi intencionalmente furada, com suas respectivas temperaturas. Já a coloração laranja, representa os pontos onde não houve interferência da umidade pelo vazamento da tubulação de água.

Figura 6 – Imagens da leitura após a inserção de água na Parede: (a) termograma da parede demonstrando os pontos de infiltração de água representado na cor violeta; (b) fotografia da parede antes de ser realizada a termografia.



Fonte: Santos; Rocha; Póvoas, (2019)

De acordo com Batista (2019), através da termografia infravermelha foi possível verificar, na prática, o comportamento térmico dos componentes da pesquisa. Os ensaios realizados permitiram analisar e comparar o comportamento térmico de aquecimento e resfriamento, a transferência do calor qualitativamente e a variação de temperatura da face oposta à fonte de calor. Nesse contexto, o autor concluiu que os resultados corroboraram com a tendência apontada pelos parâmetros calculados, apresentando pouca variação entre todos os elementos de teste sem revestimento.

Ainda, segundo os estudos de Batista (2019), foram coletados termogramas que permitiram enxergar a distribuição de calor pelo elemento de teste durante um período de 6h de aquecimento. Os três elementos de teste que foram construídos de blocos cerâmicos com revestimento interno de gesso, e apresentaram comportamento similar desde o início do aquecimento, e finalizaram as 6 horas com uma diferença de 0,5 °C. O menos aquecido foi aquele com revestimento interno de gesso com espessura de 1,5 cm, seguido daquele com 1,0 cm e o mais aquecido aquele com apenas 0,5 cm de revestimento em gesso. Dessa forma,

os termogramas demonstraram que a adição das camadas de revestimento melhorou o comportamento térmico destes elementos de teste. Outrossim, o autor destaca que foi possível inferir que uma adição mais espessa de revestimento interno de gesso tende a tornar esse melhoramento mais sensível. Além disso, foi possível visualizar as pontes térmicas através das juntas estruturais das alvenarias.

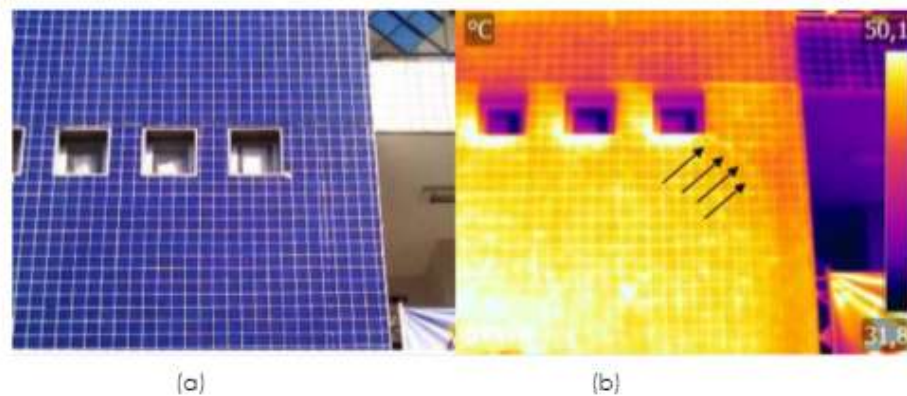
Para Danielski e Fröling (2015), obtiveram bons resultados na sua pesquisa utilizando o método de termografia infravermelha o qual foi aplicado numa análise qualitativa de desempenho térmico de edificações para obtenção de parâmetros de propriedades térmicas dos elementos construtivos voltados ao setor da construção civil. Assim, segundo os autores, a termografia infravermelha pode ser amplamente utilizada na inspeção térmica das edificações para identificação de diversas manifestações patológicas.

Meola (2012) utilizou aparelhos termográficos para captar a radiação térmica e converter em termograma, visando demonstrar a temperatura superficial de um corpo em tempo real. Através de uma escala policromática (cores) ou monocromática (cinza) foi possível identificar as temperaturas presentes na fachada de uma edificação. Dessa forma, foi possível verificar a diferença nas tonalidades decorrente de diferentes temperaturas dos elementos de testes.

Diversos estudos experimentais utilizando a termografia infravermelha demonstraram qual seria o melhor posicionamento do termopar nos prismas. Os testes que foram realizados demonstraram que os termogramas corroboraram com a necessidade de apenas utilizar termopares de contato na parte central do elemento de teste, quando este for aquecido por fonte pontual, como foi mencionado em trabalhos similares com ensaios em câmara térmica (SILVA, 2013; BATISTA, 2019; SPETCH *et al.*, 2010).

Conforme os estudos de Silva *et al.*, (2016), utilizou-se da termografia infravermelha para realizar ensaios não destrutivos através de imagens das fachadas revestidas com placas cerâmicas. Foram realizadas medições a cada hora durante o período de um dia e os resultados demonstram que as fachadas apresentaram problemas patológicos a partir da diferença de temperatura. Dessa forma, a utilização da termografia demonstrou ser um método rápido e eficaz no diagnóstico de manifestações patológicas das edificações. Na Figura 7, pode ser observado o termograma da fachada de uma edificação, exemplificando a diferença nas tonalidades decorrente de diferentes temperaturas dos elementos (a) e (b).

Figura 7 - Termograma de fachada da edificação



Fonte: (Silva, Viégas; Póvoas, 2016).

Nas pesquisas de Lamberts *et al.*, (2016), a termografia foi utilizada para realizar observação do comportamento térmico de materiais com diferentes texturas e cores. Foram desenvolvidos estudos com câmara termográfica para demonstrar imagens térmicas geradas a partir da detecção da radiação infravermelha a qual permitiu mapear os gradientes de temperatura na superfície dos objetos analisados.

Bagavathiappan *et al.*, (2013), em seu trabalho de revisão da literatura, apresentou vários trabalhos relacionados à aplicação da termografia utilizada para monitoramento de desempenho em estruturas civis, inspeção de equipamentos elétricos, monitoramento de deformações plásticas, inspeção de deformação em tração, avaliação de danos decorrentes da fadiga de materiais, inspeção de máquinas, inspeção de solda e monitoramento de circuitos de placas eletrônicas. O autor ainda fez referência ao uso da termografia infravermelha em armas nucleares, serviços e produtos aeroespaciais, alimentos, madeira e indústrias de papel e celulose.

3. METODOLOGIA

Esta pesquisa foi desenvolvida no laboratório avançado de materiais de construção civil (LACC), da Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco. Iniciou-se o procedimento experimental com o ajuste do controle da temperatura do ambiente da sala do laboratório de pesquisa, assim como, na uniformização da temperatura dos elementos de teste. Inicialmente foi ligado o aparelho de ar condicionado no ambiente de teste com 60 minutos antes do início do experimento, onde foi mantida a temperatura dentro do intervalo de $26 \pm 1^\circ\text{C}$. Após esse tempo, os elementos de teste foram colocados com a face “externa” voltada para o lado quente da câmara térmica, desenvolvida por Batista no ano de 2019, sob ação da temperatura fornecida pela lâmpada incandescente, enquanto que a face “interna” ficou voltada para o lado frio da câmara, ou seja, para o ambiente da sala climatizada. Nas Figuras 17 e 18 representaram o momento dos ensaios dos elementos de teste compostos por prismas de blocos de concreto convencional (BCE) e por prismas dos blocos de concreto celular maciços (BCC).

Nesse contexto, para o desenvolvimento dessa pesquisa foram realizadas avaliações de temperaturas nos prismas BCE e nos prismas BCC, ambos com camadas internas de gesso, visando calcular a transferência de calor e a termografia infravermelha em cada situação estudada, aplicando a equação da lei de Fourier.

Foi utilizada como fonte de estudo uma condição artificial ativa similar à de um aquecimento solar incidindo sobre os prismas de blocos de concreto, denominado de prismas BCE e BCC, para avaliar as condições de temperaturas, internas e externas, e posteriormente determinar a transferência de calor e a avaliação termográfica relativa aos prismas de concreto. Nesse aspecto, foi utilizada uma câmara térmica com a finalidade de reproduzir aproximadamente as condições de aquecimento em paredes expostas ao sol, na qual o fluxo na Terra (constante solar) é de 1367 watts/m^2 . Dessa forma, foram avaliadas as condições de temperaturas e posteriormente foram determinadas a transferência de calor e a avaliação termográfica infravermelha nos respectivos artefatos de concreto.

Para esse fim, foi utilizada uma câmara térmica ativa confeccionada em caixa de madeira com área de seção internas de $45 \text{ cm} \times 45 \text{ cm}$ e profundidade de 80 cm com paredes de compensado com espessura de $1,0 \text{ cm}$. Associada à câmara térmica ativa, existiu uma antecâmara construída com barras de madeira instalada a uma distância de 30 cm da abertura da caixa principal. A câmara térmica foi dividida em duas partes - ambiente quente e frio. Na parte interna do equipamento foi acoplada uma lâmpada incandescente, com potência 250 W ,

cuja intensidade era controlada por um reostato de modo a ajustar manualmente a corrente elétrica. Foram atrelados à câmara térmica, termopares de contato associado ao termômetro digital com função *datalogger* do fabricante Minipa® MT – 1044, integrado com termômetro com 4 canais, resolução 0,1°C, precisão $\pm 1^\circ\text{C}$ e temperatura de armazenamento -200°C $\sim 1370^\circ\text{C}$ (BATISTA, 2019). Foram realizados testes com termografia infravermelha, utilizando para esse fim uma câmera termográfica FLIR E-60 com faixa de temperatura -20 e 650°C , precisão $\pm 2^\circ\text{C}$ ou $\pm 2\%$ de leitura, resolução IR 320 x 240 pixels, sensibilidade térmica $< 0,05^\circ\text{C}$ e resolução IR 320x240 pixels (BATISTA, 2019).

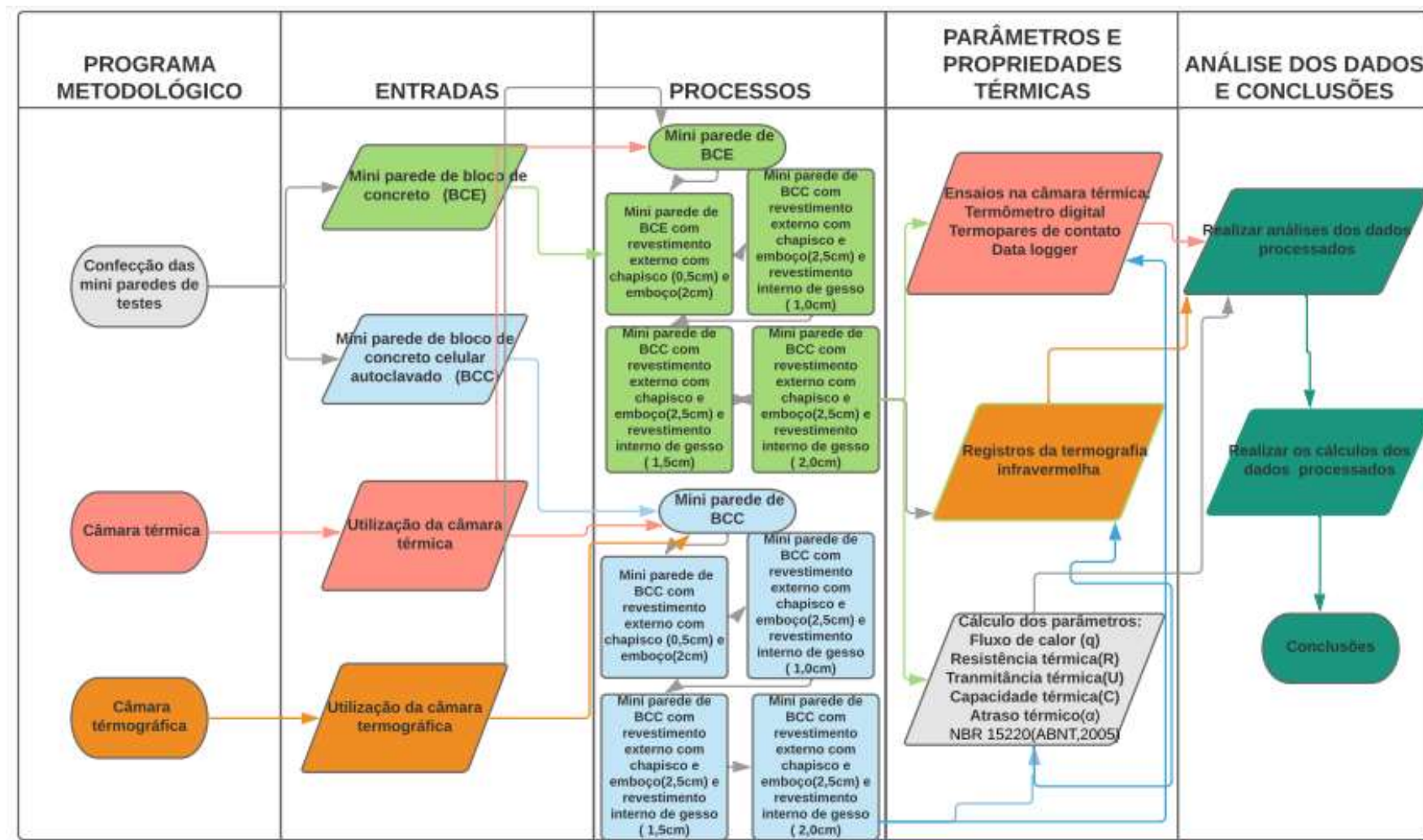
Nesse sentido, para realizar a pesquisa foi necessária a confecção de dois prismas a partir de blocos de concreto convencional e de blocos maciços de concreto celular com diferentes configurações internas de gesso. Inicialmente os prismas dos blocos de concreto foram confeccionados sem revestimentos e, por conseguinte foram realizados os respectivos ensaios na câmara térmica. Nesse sentido, foram realizados ensaios durante o período de aquecimento referente a 240 minutos e depois por 120 minutos referente ao período de resfriamento, tempo esse necessário para que fosse atingido o equilíbrio das temperaturas durante os testes de resfriamento dos prismas de concreto. Dessa forma, foram calculadas as transferências de calor observando o comportamento térmico dos prismas através das análises comparativas entre as diferentes configurações dos prismas BCE e BCC.

Nessa contextualização, foram coletados os dados de forma automática, minuto a minuto, pelo termômetro digital. O aquecimento foi iniciado na posição mínima do regulador de temperatura de modo a alcançar a temperatura máxima de $65^\circ\text{C} \pm 2$ no lado quente da câmara durante o ensaio.

Posteriormente foram acrescentados externamente, em um dos lados, um revestimento com argamassa industrializada envolvendo toda parte externa do prisma com chapisco com espessura de 0,5 cm mais o emboço com uma espessura de 2,0 cm e por último, foi colocado um revestimento externo cerâmico com argamassa industrializada, buscando uma similaridade com uma fachada de uma edificação. Após os testes na câmara térmica, foi acrescentado na outra face do prisma um revestimento interno com camadas de gesso com espessuras que variaram entre 1, 1,5 e 2,0 cm. Posteriormente, foram analisados os efeitos dos revestimentos internos de gesso quanto ao comportamento do fluxo termal. Por fim, foram realizados os cálculos definidos pela norma de desempenho térmico de edificações NBR 15220 (ABNT, 2005) e a observação qualitativa da termografia infravermelha.

De maneira simplificada, foi apresentado o fluxograma da metodologia da pesquisa na Figura 8, a ser detalhada a seguir.

Figura 8 - Fluxograma simplificado do programa metodológico



Fonte: Autor (2022)

3.1 Materiais

3.1.1 Blocos de concreto

A alvenaria de vedação pode ser definida como aquela que não seja dimensionada para resistir a cargas além do próprio peso. A vedação vertical externa das construções responde pela proteção contra os agentes relacionados com as intempéries, tais como: sol, chuva, vento, maresias. Na grande maioria dos edifícios com sistema construtivo convencional se utiliza de paredes de alvenaria para o fechamento de vãos.

Atualmente, devido ao avanço da tecnologia atrelado a novos modelos de construções, novos materiais de construção civil estão sendo estudados e pesquisados. Assim, a construção civil está passando por inúmeras mudanças no sistema construtivo e precisa adaptar-se a um novo modelo de concepção. A alvenaria de vedação nas obras é muitas das vezes deixada em segundo plano, não sendo dado a sua devida importância (Witzke , 2015).

De forma análoga, a Tabela 5 adaptada da NBR 6136 (ABNT,2006), apresenta requisitos físicos e mecânicos dos blocos de concreto, suas características referentes às famílias dos blocos, suas dimensões relacionadas à altura, espessura, largura e comprimento. Além disso, possui informações e características a resistência a compressão. Assim, da mesma forma, a Tabela 6 da NBR 13438 (ABNT, 2013) faz referência os requisitos dimensionais dos blocos de concreto celular utilizado como objeto de estudo desta pesquisa acadêmica.

Tabela 5 - Requisitos físicos e mecânicos dos blocos de concreto convencional

Características	Nominal Unidade	Família dos blocos de concreto				
		20	15	12,5	10	7,5
		M-20	M-15	M-12,5	M-10	M-7,5
Espessura da parede	mm	25,0 ± 0,5	25,0 ± 0,5	18,0 ± 0,5	18,0 ± 0,5	15,0 ± 0,5
Altura	mm	190 ± 3,0	190 ± 3,0	190 ± 3,0	190 ± 3,0	190 ± 3,0
Largura	mm	190,0 ± 2,0	140,0 ± 2,0	115,0 ± 2,0	90,0 ± 2,0	65,0 ± 2,0
Comprimento	mm	390,0 ± 2,0	390,0 ± 2,0 240,0 ± 2,0	390,0 ± 2,0 240,0 ± 2,0	390,0 ± 2,0 190,0 ± 2,0	390,0 ± 2,0
Resistência à compressão	MPa	≥ 6,0	≥ 6,0	≥ 3,0	≥ 3,0	≥ 2,0

Fonte: NBR 6136 (ABNT, 2006, adaptado).

Tabela 6 - Requisitos físicos e mecânicos dos blocos maciços de concreto celular

		Família dos blocos de concreto celular	
Características	Nominal	Classe	
	Unidade	C-12	C-15
Densidade aparente seca	(kg/m ³)	≤ 450,0	≤ 500,0
Altura	mm	200 ± 3,0	200 ± 3,0
Largura	mm	75,0 ± 3,0	75,0 ± 3,0
Comprimento	mm	200,0 ± 3,0	200,0 ± 3,0
Resistência à compressão (Valor médio mínimo)	MPa	≥ 1,2	≥ 1,5
Resistência à compressão (Valor mínimo por bloco)	MPa	≥ 1,0	≥ 1,2

Fonte: NBR 13438 (ABNT, 2013, adaptado).

Os valores de densidade são apresentados na NBR 13440 (ABNT, 2013) em faixas relativas as densidades dos blocos de concreto celular. Para o bloco de concreto celular de alta densidade, o valor deve ser superior a 500 kg/m³ e 650,0 kg/m³, já o de baixa densidade deve estar entre 450,0 e 500,0 kg/m³, enquanto o de média densidade, mais utilizado na construção civil, deve possuir densidade entre 450,0 kg/m³ e 650,0 kg/m³, como apresentado no Quadro 2. O processo de produção dos blocos de concreto celular influencia diretamente sua densidade final, pois, conforme o tipo e a dosagem dos constituintes, pode-se obter diversas densidades, variando entre 400 kg/m³ e 650 kg/m³.

Quadro 1 - Classificação das densidades dos blocos de concreto convencional

Ensaio	Densidade - Kg/m³
Blocos construídos com concreto normal	2200 - 2400
Blocos construídos com concreto cavernoso	1700 - 2100
Blocos construídos com pozolana ou escória	1400 - 1600

Fonte: NBR 15220 (ABNT, 2005, adaptado).

Quadro 2 - Classificação das densidades aparente dos blocos de concreto celular

Ensaio	Densidade - Kg/m³
C12	≤ 650,0
C15	≤ 500,0
C25	≤ 450,0
C45	≤ 650,0

Fonte: NBR 13440 (ABNT, 2013, adaptado).

3.2 Argamassa de assentamento e revestimento

Foi utilizada argamassa do tipo industrializada, comercializada em embalagens de papel de 20 kg, para o assentamento dos elementos de testes dos prismas dos blocos BCE e BCC. Sua composição é de cimento, agregados minerais e aditivos especiais (Figura 9). Além disso, foi adicionado a quantidade de água conforme especificações do fabricante. Da mesma forma, foi utilizado gesso de revestimento fornecido por empresa fabricante em embalagem de 10 kg e preparada conforme orientação expressa.

Figura 9: Argamassa industrializada



Fonte: Autor (2022)

3.3 Preparação e caracterização dos materiais cimentícios

3.3.1 Prismas dos blocos de concreto

Foram utilizados blocos de concreto para realizar a construção dos prismas nominados de mini paredes, esses elementos possuem características diferente quando a sua composição física e química. Assim, os blocos de concreto celular maciço possuem baixa densidade quando comparados com os blocos de concreto convencional. Na figura 10 são apresentados os elementos de testes que foram confeccionados e denominados de BCE (Bloco de Concreto Estrutural) e BCC (Bloco Maciços de Concreto Celular).

Os blocos de concreto celular maciços foram preparados com o auxílio de um equipamento modelo IBS-08. Essa máquina foi utilizada para produção de blocos de concreto celular com densidade média. Para isso, foram misturados 250 kg de cimento, 150 kg de areia, 95 l de água e 1 kg de agente espumante. Após essa etapa, os blocos foram deixados sob condições naturais durante um período de 28 dias.

A densidade desse bloco possuiu uma resistência característica do prisma (fbk) estimado de 1,3 MPa cuja dimensões foram 10 x 19 x 38,4 cm (largura, altura e comprimento), respectivamente. Entretanto, os blocos de concreto estrutural foram preparados com o auxílio de um equipamento denominado de Menegotti MBP – 3.8 semi-automática, nas dimensões de formas para blocos de 14 x 19 x 39 cm. Para isto, foram misturados 20 kg de cimento, 50 kg de pó de pedra, 140 kg de areia e 6 l de água em um misturador de 600 l. Em seguida, os blocos foram deixados sob condições ambientes durante um período de 28 dias, de forma a obter a cura dos mesmos. Esses blocos tiveram um fbk de 5,9 MPa e dimensões de 14 x 19 x 39 cm. Além disso, para ratificar as estimativas dos blocos foram realizados ensaios a compressão e os resultados demonstram que os blocos de concreto possuiu uma média de 5,9 Mpa. Na Tabela 7 foi demonstrado o ensaio de resistência a compressão dos blocos após 28 dias de cura e aptos para ruptura.

Figura 10 – Blocos de concreto BCE e BCC



Fonte: Autor (2022)

Tabela 7 – Ensaio de resistência à compressão dos blocos de concreto estrutural

Exemplar	Massa (g)	Comprimento (mm)	Largura	Altura	Área (mm ²)	Leitura Manômetro (N)	Resistência à compressão (MPa)
1	13.200	391	141	194	54.953,8	499.649	9,1
2	12.940	390	140	194	54.553,3	359.316	6,6
3	13.480	390	140	193	54.730,3	525.635	9,6
4	13.120	390	140	193	54.553,3	494.158	9,1
5	13.180	391	140	193	54.740,0	534.855	9,8
6	13.180	390	140	191	54.600,0	425.609	7,8
Média de resistência à compressão (MPa)							8,7
Desvio padrão conhecido da produção em fábrica (MPa)							1,2
Coeficiente de variância (%)							7,1
Resistência à compressão característica estimada do lote (MPa)							5,9

Fonte: Autor (2022)

3.3.2 Prisma de concreto estrutural

Os blocos de concreto adquiridos foram montados um sobre o outro na posição horizontal e permitiram obter elementos de teste retangulares com medidas compatíveis com a câmara térmica utilizada.

Nesse contexto, foi utilizado argamassa industrializada para realizar o assentamento dos blocos de concreto com espessura das juntas entre os blocos de 0,5 a 0,7 cm. Nessa perspectiva, foi montado a prisma de BCE com o vazado na posição vertical fechado com polipropileno e revestido com argamassa industrializada. Sendo assim, foi obtido um prisma de bloco de concreto estrutural com as seguintes dimensões: 39,0 x 39,1 x 14,0 cm (Figura 11).

Figura 11 – Construção do prisma de blocos de concreto estrutural- BCE



Fonte: Autor (2022)

3.3.3 Prisma de concreto celular maciço

Os blocos de concreto celular maciço foram cortados com a utilização de um equipamento tipo serra industrial automática. Assim, visando obter dimensões e tamanhos compatíveis com as dimensões da câmara térmica, realizou-se o corte dos blocos com as seguintes dimensões: 10,0 x 19,2 x 38,4 cm. A partir disso, foi confeccionado o prisma em blocos de concreto celular assentados com argamassa industrializada com espessura entre os blocos de 0,5cm. O prisma dos blocos de concreto celular maciço possuiu as seguintes dimensões: 10,0 x 39,3 x 38,4 cm (Figura 12). Outrossim, na Figura 13 demonstrou-se as vistas dos prismas BCC e BCE construídos para a realização do estudo desta pesquisa.

Figura 12 – Construção do prisma de blocos de concreto celular maciço- BCC



Fonte: Autor (2022)

Figura 13 – Prisma dos blocos de concreto estrutural-BCE e de concreto celular maciço-BCC

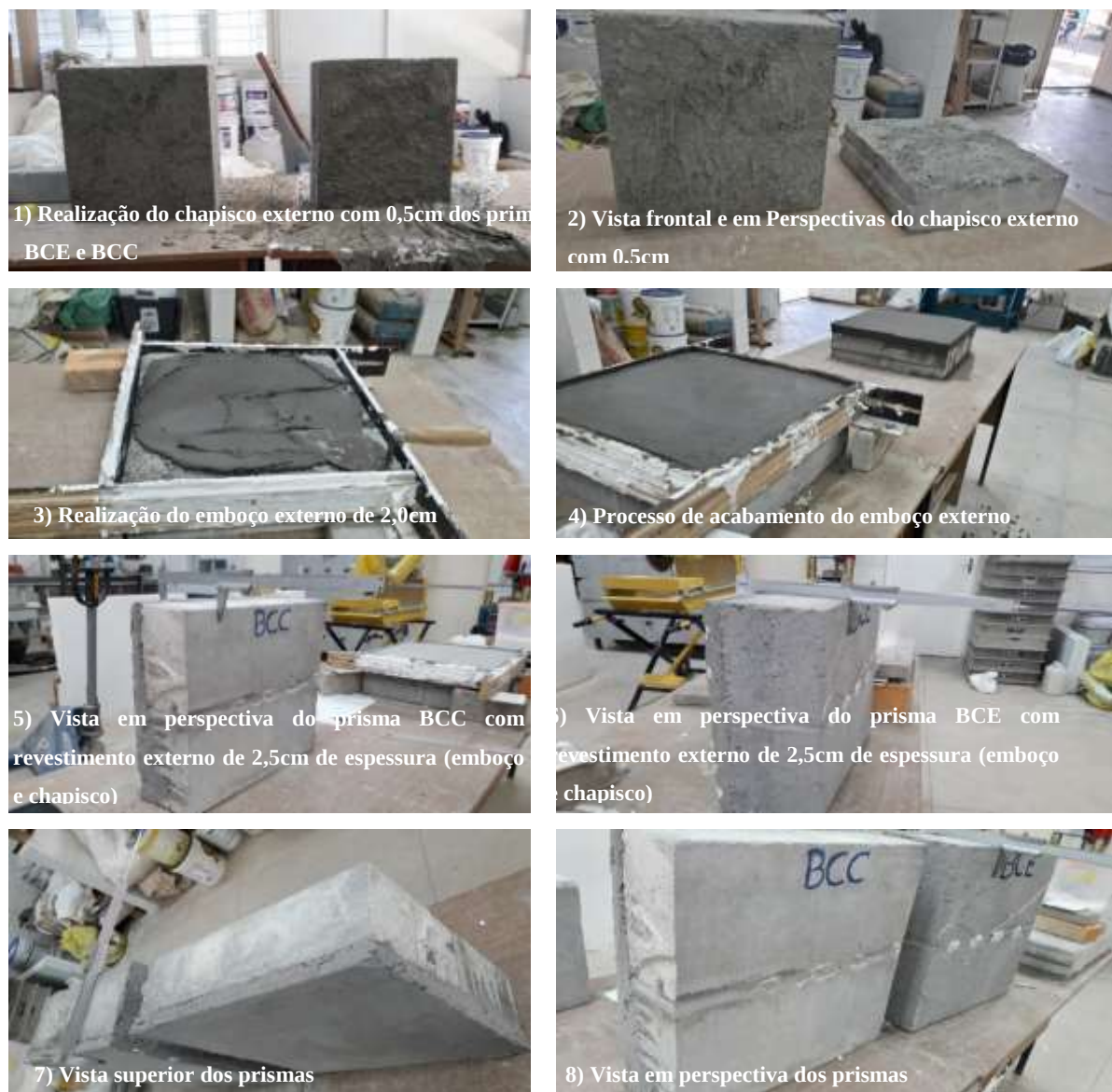


Fonte: Autor (2022)

3.3.4 Preparação da argamassa de chapisco e emboço dos prismas BCE e BCC

Nessa etapa do processo foi projetado, com argamassa industrializada, na parte externa das minis paredes uma camada de chapisco com espessura de 0,5 cm e posta em processo de secagem durante um período de 07 dias. Em seguida, sobreposto ao chapisco foi lançado uma camada de emboço com espessura de 2,0 cm no qual foi utilizado a mesma argamassa anteriormente citada. Após o preparo do emboço foi realizado o processo de secagem e a cura do concreto durante o período de 28 dias. Assim, apresentou-se na Figura 14 o processo de revestimento externo dos prismas.

Figura 14 – Processo de revestimento externo dos prismas de concreto BCE e BCC

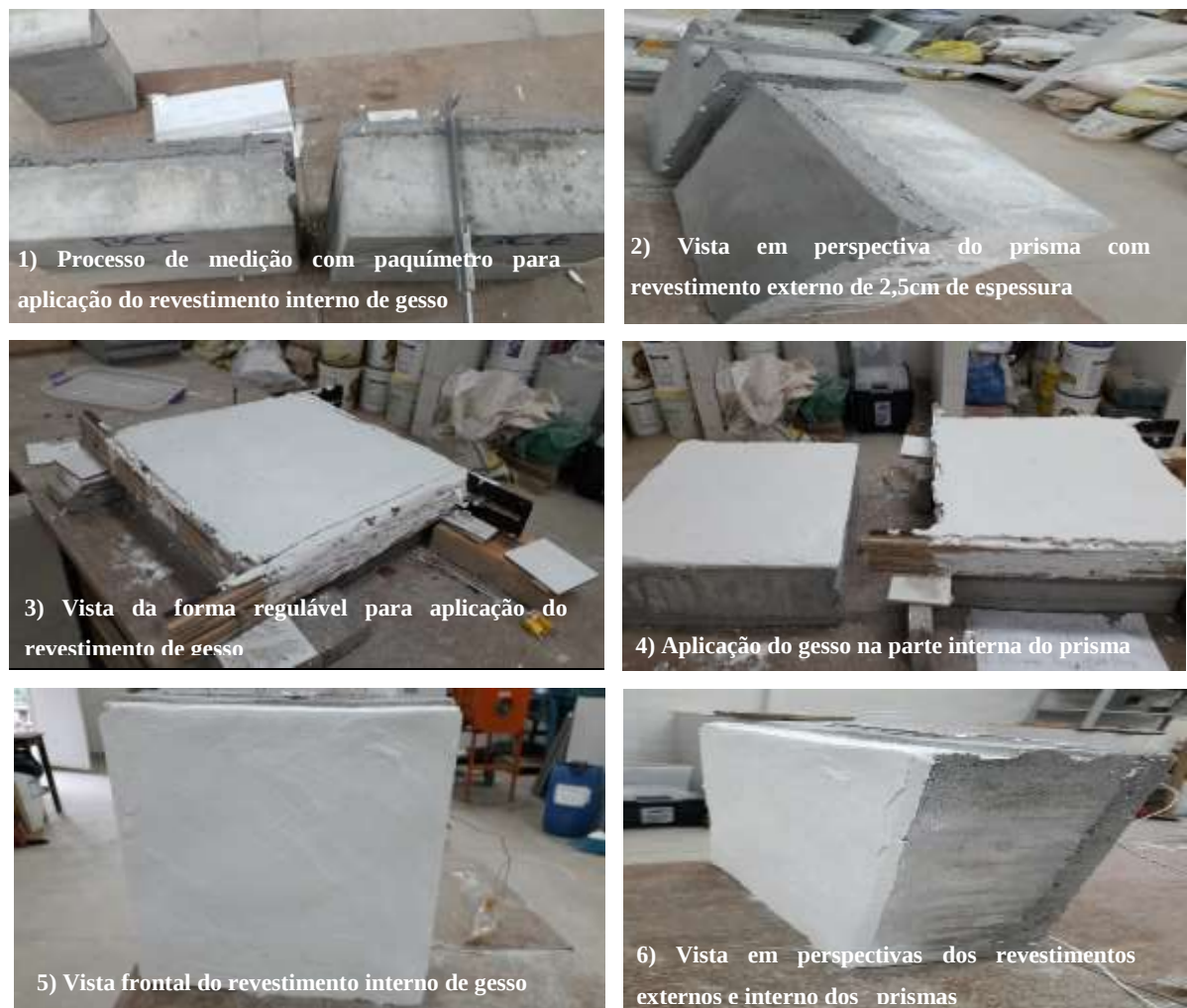


Fonte: Autor (2022)

3.3.5 Preparação do revestimento interno das minis paredes BCE e BCC

Após a elaboração dos prismas de concreto com revestimento externo em argamassa de cimento Portland com espessura final de 2,5 cm (chapisco + emboço), foi realizado, do lado interno, o revestimento em argamassa de gesso em três configurações: A primeira configuração do prisma teve um revestimento interno com espessura inicial de 1,0 cm; a segunda configuração foi adicionado mais 0,5 cm de gesso o qual ficou com uma camada de gesso de 1,5 cm e por último foi feito a terceira configuração, a qual foi adicionado mais 0,5 cm de gesso sobreposto nas camadas anteriores, totalizando uma espessura final de 2,0 cm de gesso. Neste cenário, a Figura 15 apresenta o processo de confecção dos revestimentos internos de gesso dos prismas BCE e BCC.

Figura 15 – Processo de revestimento interno dos prismas de concreto BCE e BCC



Fonte: Autor (2022)

3.4 Instalação dos termopares nos prismas BCE e BCC

Foram instalados dois termopares em ambos os lados dos prismas, dois do lado interno e mais dois do lado externo, totalizando 04 termopares por cada configuração a ser estudada. A fixação dos termopares foi realizada no centro de cada superfície interna e externa da parede do prisma. Outrossim, foi realizado a fixação dos termopares com o auxílio de uma cola plástica adesiva. Posteriormente, foi realizado um “micro furo” no centro da parede para ser inserido, dentro da cavidade da parede, o filamento magnético do termopar com o objetivo de coletar os dados das temperaturas da cada extremidade do prisma (Figura 16).

Figura 16 - Detalhamento da fixação dos termopares nos prismas BCE e BCC



Fonte: Autor (2022)

3.5 Câmara térmica

Com a finalidade de reproduzir aproximadamente as condições de aquecimento em paredes expostas ao sol, na qual o fluxo na Terra (constante solar) é de 1367 watts/m^2 foi utilizada uma câmara térmica ativa simulando uma condição artificial de aquecimento solar incidindo sobre os prismas de blocos de concreto BCE e BCC. Foram avaliadas as condições de temperaturas e posteriormente foram determinadas a transferência de calor e a avaliação termográfica infravermelha nos respectivos artefatos de concretos denominado BCE e BCC. Assim, a verificação experimental do comportamento térmico dos prismas foi realizada em uma câmara térmica (Figura 17).

Para esse fim, utilizou-se uma câmara térmica ativa, confeccionada em caixa de madeira com área de seção interna de $45 \text{ cm} \times 45 \text{ cm}$ e profundidade de 80 cm com paredes de compensado com espessura de $1,0 \text{ cm}$. Associada à câmara térmica ativa, existiu uma antecâmara construída com barras de madeira instalada a uma distância de 30 cm da abertura da caixa principal. Assim, a câmara térmica ficou dividida em duas partes - ambiente quente e frio. Ademais, na parte interna do equipamento foi acoplada uma lâmpada incandescente, com potência 250 W , cuja intensidade foi controlada por um reostato de modo a ajustar manualmente a corrente elétrica (BATISTA, 2019).

Figura 17 – Câmara térmica, antecâmara e painel de controle desenvolvido por Batista (2019)



Fonte: Autor (2022)

3.6 Procedimento experimental

3.6.1 Ensaios na câmara térmica dos prismas BCE e BCC

Antes do início dos procedimentos de trabalho foi realizado ajuste na temperatura interna da sala do laboratório, garantindo uma temperatura de $(26 \pm 1)^\circ\text{C}$ no ambiente. Em

seguida foi posicionado o prisma na câmara térmica. Ademais foram colocadas tiras de poliestireno para vedar as laterais e evitar perda de temperaturas pelas frechas laterais e superior da câmara. Por fim, foram conectados os termopares no dispositivo de coleta e armazenamento de dados das temperaturas (Figura 18).

Figura 18 – Vista do ensaio na câmara térmica com a prisma BCC



Fonte: Autor (2022)

Os ensaios foram realizados mantendo a temperatura máxima do lado externo variando entre 60 e 65°C. Dessa forma, os ensaios foram realizados durante um período de aquecimento de 240 minutos, tempo necessário para que as temperaturas se mantivessem constantes, ou seja, com poucas variações de temperaturas, algo em torno de -0,5°C (Figura 19). Foram coletados os dados das temperaturas nos 2 sensores instalados tanto do lado interno quanto do lado externo da superfície central dos prismas.

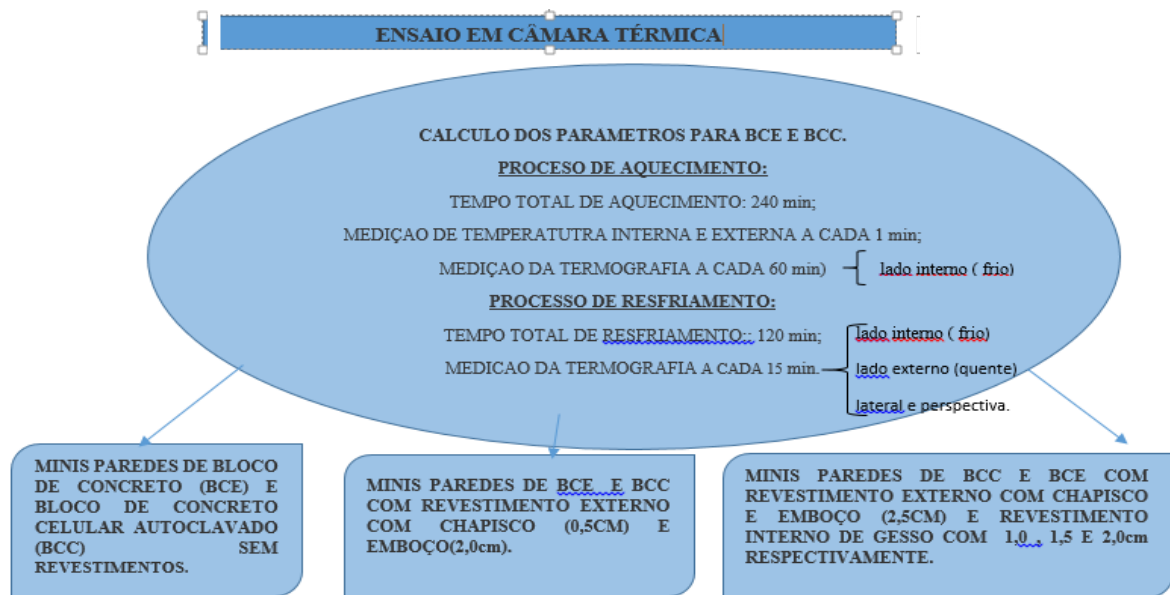
Figura 19 – Quadro de comando e controle



Fonte: Autor (2022)

Na Figura 20 é apresentado o fluxo do processo para realização do ensaio em câmara térmica.

Figura 20 – Fluxo do ensaio em câmara térmica



Fonte: Autor (2022)

3.6.2 Análise com termografia infravermelha dos prismas BCE e BCC

Foram realizadas avaliações dos termogramas com utilização da câmara termográfica FLIR® E-60, (Figura 21) sendo precedido de ajustes nos parâmetros do equipamento. Dessa forma, foram ajustados os valores de emissividade, refletividade, umidade relativa e distância do objeto (Figura 22). Assim, durante a realização dos ensaios de aquecimento foram registradas as temperaturas da parede interna, a cada 60 min, durante 240 minutos de ensaio. Além disso, foram também registrados os termogramas do resfriamento a cada 60 min, durante um período de 120 min de repouso em temperatura controlada (Figura 23).

Figura 21 – Câmera termográfica FLIR E-60



Fonte: Autor (2022)

Figura 22 – Método da fita preta para determinação da emissividade



Fonte: Autor (2022)

Figura 23 – Ensaio de termografia infravermelha durante o resfriamento do prisma



Fonte: Autor (2022)

3.7 Cálculo de parâmetros térmicos conforme NBR 15220 (ABNT, 2005)

Foram realizados os cálculos conforme determinação da norma NBR 15220 – 2 (ABNT, 2005). Utilizou-se como referências os parâmetros térmicos prescritos na própria norma. Assim, foram realizadas medições nos prismas BCE e BCC, tais como: densidade (ρ), volume e dimensões (Figura 23). Ademais, foram calculados os valores da Resistência Térmica (R); Transmitância Térmica (U); Capacidade Térmica (CT) e Atraso Térmico (ϕ).

Na Figura 24 é apresentado fluxo do processo para realização dos cálculos dos parâmetros térmicos conforme NBR 15220 (ABNT, 2005).

Figura 24 – Fluxo dos cálculos dos parâmetros térmicos – NBR 15220



Fonte: Autor (2022)

Na Figura 25, demonstrada a utilização do paquímetro para determinar as dimensões dos prismas BCE e BCC. A tabela 8 apresentou o resultado dos dados para cálculo dos parâmetros térmicos

Figura 25 – Medições dos elementos de teste



Fonte: Autor (2022)

Tabela 8 – Dados para cálculo dos parâmetros térmicos referentes à densidade, calor específico, condutividade térmica e absorptância à radiação solar

MATERIAL	DENSIDADE DE MASSA APARENTE ρ (kg/m ³)		CALOR ESPECÍFICO c (kJ/kg.K)	CONDUTIVIDADE TÉRMICA λ (W/m.K)	ABSORPTÂNCIA À RADIAÇÃO SOLAR (α)
Bloco de concreto	2200,0	1973,0	1,00	1,750	0,65
Bloco de concreto celular	500,0	890,0	1,00	0,170	-
Prisma de concreto BCE	-	2067,0	1,00	1,750	0,65
Prisma de concreto BCC	-	970,0	1,00	0,170	-
Argamassa de cimento Portland	2000,0	-	1,00	1,150	-
Argamassa de gesso	1200,0	1100,0	0,84	0,700	-
Placa cerâmica esmaltada	-	3000,0	0,92	1,050	-
Rejunte cimentício	-	1980,0	1,00	1,150	-
Fonte	NBR 15220 (ABNT, 2005)	Autor (2022)	NBR 15220 (ABNT, 2005)	NBR 15220 (ABNT, 2005)	NBR 15220 (ABNT, 2005)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados da pesquisa foram apresentados de acordo com os cálculos oriundo dos resultados da pesquisa obtidos através da utilização do software da Microsoft Excel que foi utilizado para realizar o cálculo, as tabelas dinâmicas e as ferramentas gráfica. Assim, nessa contextualização foram interpretados e comparados com os parâmetros da norma de desempenho térmico NBR 15220 (ABNT, 2005).

4.1 Parâmetros de desempenho térmico: R, U e C_T - NBR 15220 (ABNT, 2005)

4.1.1 Elementos de teste sem revestimento - prismas dos blocos de concreto BCE e BCC

Na Tabela 9 foram apresentados os resultados dos parâmetros térmicos calculados conforme prescrito na NBR 15220 (ABNT, 2005) para os prismas BCE e BCC, ambos sem revestimentos.

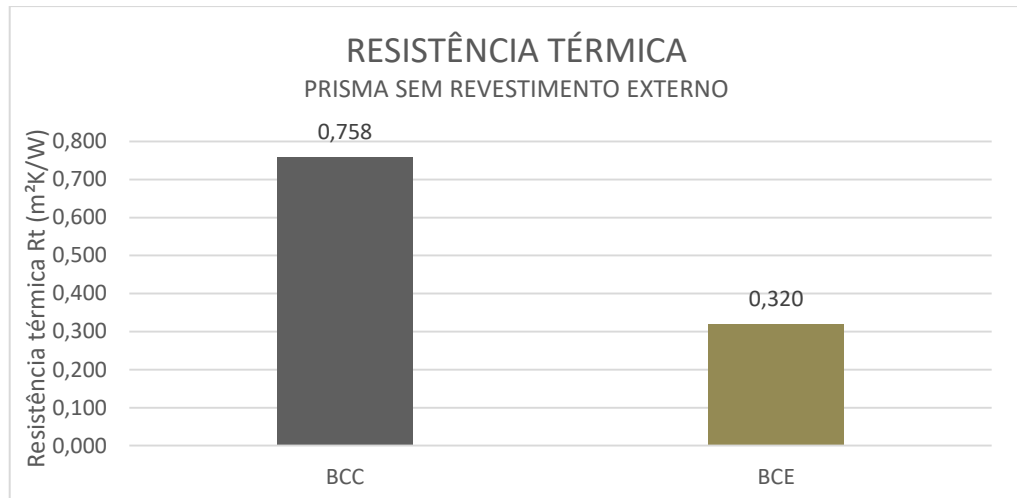
Tabela 9 – Parâmetros térmicos dos prismas BCE e BCC sem revestimento externo – NBR 15220 (ABNT, 2005)

ELEMENTO DE TESTE	RESISTÊNCIA TÉRMICA	RESISTÊNCIA TÉRMICA TOTAL ¹	TRANSMITÂNCIA TÉRMICA	CAPACIDADE TÉRMICA	ATRASO TÉRMICO
	R (m ² . K/W)	R _T (m ² . K/W)	U (W/m ² K)	C (kJ/m ² . K)	φ (h)
PRISMA BCE SEM REVESTIMENTO EXTERNO	0,08	0,32	3,12	155	5,10
PRISMA BCC SEM REVESTIMENTO EXTERNO	0,58	0,76	1,32	96	7,18

Consideram-se as parcelas de resistência superficial ($R_{SI} + R_{SE} = 0,170$): valor usado para cálculo de U.

Os valores os quais foram apresentados na Tabela 9 referentes aos resultados das análises dos prismas demonstraram que os resultados das análises dos prismas BCE e BCC são bastantes distintos, não sendo possível fazer nenhuma correlação entre os blocos devido à composição de cada material estudado. O prisma BCC possuiu uma resistência térmica muito inferior que a do prisma BCE, isso é obvio, pois, a baixa condutividade térmica do concreto celular devido ao seu coeficiente de condutividade (λ) que chega a ser 10 vezes menor que a do prisma de concreto convencional. Assim, a resistência térmica total (R_T) dos prismas entre os elementos de teste sem revestimento ficou claramente visualizada no gráfico da Figura 26.

Figura 26 – Gráfico da resistência térmica calculada para os prismas BCE e BCC sem revestimento externo



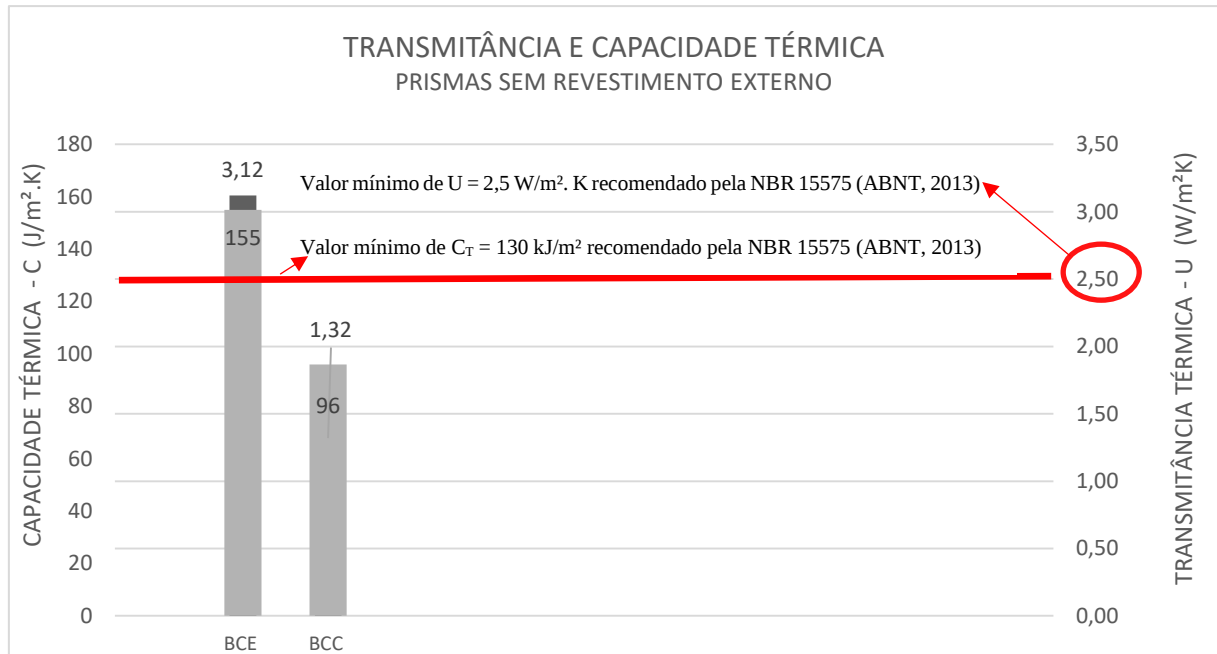
Fonte: Autor (2022)

A norma de desempenho de edificações – NBR 15575 (ABNT, 2013) determinou que fossem calculados os valores referentes à transmitância térmica (U) e a capacidade térmica (C_T). Nesse contexto, foram verificados que o prisma BCC sem revestimento apresentou valor de transmitância térmica abaixo do recomendado pela norma técnica, já o prisma BCE apresentou valor dentro do recomendado pela norma conforme apresentado na Figura 27. Além disso, foi verificado que o valor de capacidade térmica (C_T) foi atendido apenas no prisma BCE.

Conforme preceitos da norma de desempenho NBR 15575 (ABNT, 2013) para a zona bioclimática 8 (Figura 2) não se faz necessário valor mínimo de C_T enquanto que nas demais zonas o valor mínimo recomendado pela norma foi de 130 kJ/m^2 . Assim, todos os materiais construtivos deveriam atender aos requisitos mínimos de desempenho térmico, conforme determinou a NBR 15575 (ABNT, 2013). Nesse contexto, os prismas BCE e BCC apresentaram os seguintes resultados demonstrados na Figura 27: os valores de transmitância térmica (U) foram de 3,12 e 1,32 $W/m^2 \cdot K$ e o de capacidade térmica (C_T) foram de 155 e 96 $kJ/m^2 \cdot K$, respectivamente. Vale salientar que, o prisma BCC apresenta valor de U dentro dos requisitos de quaisquer zonas bioclimáticas ($U \leq 2,5$), mesmo ainda sem a presença dos revestimentos de gesso que tendem a melhorar significativamente esses valores. No entanto, o prisma BCE apresentou valor de U fora dos requisitos das zonas bioclimáticas ($U \leq 2,5$), pois apresentou resultado de transmitância térmica igual a 3,12 $W/m^2 \cdot K$. (Figura 26), no entanto possuiu uma $C_T = 155 \text{ kJ/m}^2$, atendendo a todos os requisitos da norma referentes à capacidade térmica. Da mesma forma que, o prisma BCC ficou com a capacidade térmica (C_t) fora das especificações, ou seja, com valores abaixo do recomendado pela norma técnica na qual atingiu

o valor de 96 kJ/m² contra o valor mínimo de 130 kJ/m² referenciado na norma NBR 15575 (ABNT, 2013) demonstrado na Figura 27.

Figura 27 – Gráfico da transmitância térmica (U) e capacidade térmica (C_T)



Fonte: Autor (2022)

4.1.2 Elementos de teste dos prismas de blocos de concreto BCE e BCC com 2,5 cm de revestimento externo (Chapisco (0,5cm) mais emboço (2,0cm)).

Na Tabela 10 foram apresentados os resultados dos parâmetros térmicos calculados conforme prescrito na NBR 15220 (ABNT, 2005) para os prismas BCE e BCC, com revestimento externo.

Tabela 1069 – Parâmetros térmicos dos prismas BCE e BCC com revestimento externo – NBR 15220 (ABNT, 2005)

ELEMENTO DE TESTE	RESISTÊNCIA TÉRMICA TOTAL	TRANSMITÂNCIA TÉRMICA	CAPACIDADE TÉRMICA	ATRASO TÉRMICO
	R (m².K/W)	U (W/m². K)	C (kJ/m². K)	φ (h)
PRISMA BCE COM REVESTIMENTO EXETRNO	0,33	3,03	208	6,0
PRISMA BCC COM REVESTIMENTO EXTERNO	0,77	1,29	150	4,7

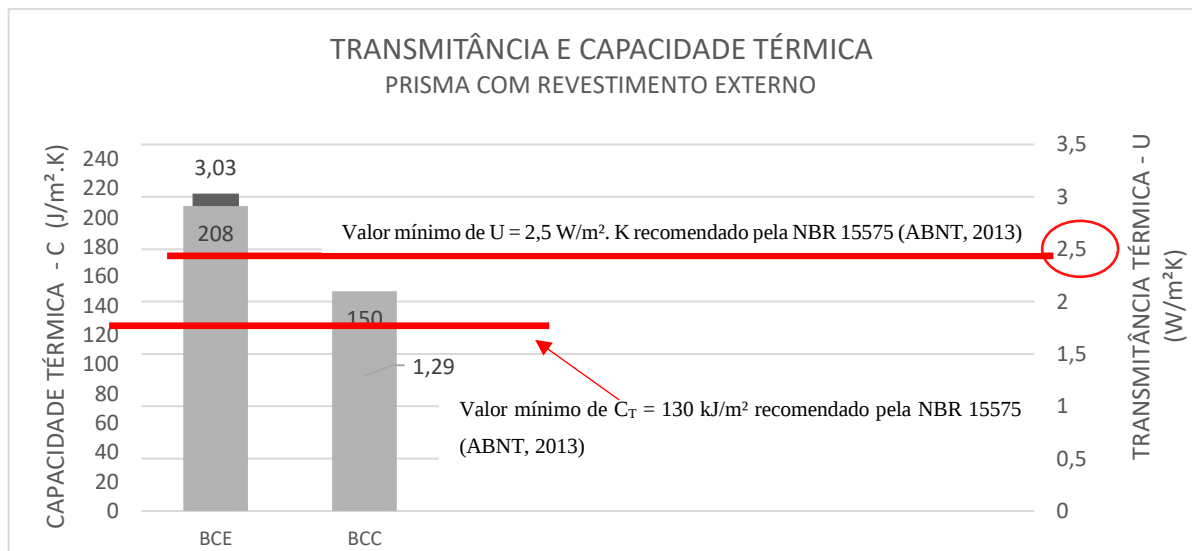
Fonte: Autor (2022)

Conforme a Figura 28, os prismas BCE e BCC apresentaram resultados sutilmente melhores de resistência e transmitância térmica apresentados na Tabela 10. Outrossim, os resultados obtidos de capacidade térmica foram satisfatórios pois todos os componentes dos prismas atenderam aos requisitos da norma de desempenho térmico. Após o incremento do revestimento externo na parede do prisma BCC foi possível melhorar o desempenho térmico. Devido a essa configuração foi possível atender a todos os requisitos para as zonas bioclimáticas (Figura 2). Ademais, o compósito BCC apresentou valores de C_T e U dentro das especificações recomendadas pela referida norma.

Cabe destacar que, os requisitos para U foram atendidos com valores bem abaixo dos recomendados pela norma, no qual foi encontrado o valor de $1,29 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ frente ao valor normativo bioclimático de $U \leq 2,5$. No entanto, os blocos BCE apenas atenderam aos requisitos de transmitância térmica (U) nas zonas 3 e 4.

Quanto ao atraso térmico, foi observado que o prisma BCE com 2,5 cm composto por emboço mais chapisco, apresentou um valor maior (Tabela 10) quando comparado com o prisma BCE sem revestimento (Tabela 9) e que o prisma BCC apresentou um valor menor (Tabela 10) frente ao prisma BCC sem revestimento.

Figura 28 – Gráfico da transmitância e capacidade térmica com revestimento externo (emboço mais chapisco totalizando 2,5cm de espessura)



Fonte: Autor (2022)

4.1.3 Elementos de teste dos prismas de concreto BCE e BCC com 2,5cm de espessura externa (0,5 cm chapisco + 2,0 cm emboço) mais revestimento interno de gesso com espessuras de 1,0 1,5 e 2,0 cm

Para os elementos de teste com a presença de revestimento interno e externo, os resultados dos cálculos dos parâmetros foram apresentados na Tabela 11. Esses resultados visavam colaborar com os estudos normativos sobre as configurações dos prismas BCE e BCC com revestimentos internos de gesso.

Tabela 11 – Parâmetros térmicos dos prismas BCE e BCC com revestimentos interno e externo – NBR 15220 (ABNT, 2005)

ELEMENTO DE TESTE	RESISTÊNCIA TÉRMICA TOTAL	TRANSMITÂNCIA TÉRMICA	CAPACIDADE TÉRMICA	ATASO TÉRMICO
	R (m ² .K/W)	U (W/m ² . K)	C (kJ/m ² . K)	φ (h)
PRISMA BCE-1cm gesso	0,35	2,85	219	6,3
PRISMA BCC-1cm gesso	0,79	1,26	160	8,2
PRISMA BCE-1,5cm gesso	0,36	2,77	224	6,5
PRISMA BCC-1,5cm gesso	0,80	1,24	165	8,3
PRISMA BCE-2cm gesso	0,37	2,70	229	6,7
PRISMA BCC-2cm gesso	0,81	1,23	170	8,5

Fonte: Autor (2022)

Os prismas BCE e BCC com 2,5 cm de revestimento externo (emboço mais chapisco) e revestimento interno de gesso com espessuras de 1, 1,5 e 2,0 cm apresentaram resultados significativamente melhores de resistência térmica, transmitância térmica e atraso térmico que os prismas BCE e BCC sem os revestimentos internos de gesso, indicando que a principal governança está na característica do tipo de bloco cerâmico utilizado e que o gesso tem uma contribuição no resultado final dos estudos. Na Figura 29, foi possível verificar os resultados relacionados às características térmicas das configurações de cada um dos prismas de concreto. Outrossim, existiu uma relação entre a densidade e a condutividade térmica do material, ou seja, quanto menor a densidade dos materiais, menor foi a sua condutividade térmica, e, por conseguinte, maior foi a resistência térmica atrelada a um valor menor de transmitância térmica de cada material.

Os resultados de capacidade térmica foram satisfatórios para todos os componentes, pois com o aumento da camada de revestimento de gesso ficou constatado um melhoramento no desempenho térmico. Assim, com essas novas configurações dos prismas BCE e BCC foi

possível atender a todos os requisitos para as zonas bioclimáticas contemplados entre a zona climática 1 até a zona 8 (Figura 2), abrangendo todas as capitais brasileiras. Ademais, todas as configurações do prisma BCC apresentaram atendimentos normativos quanto aos valores de C_T e U . Entretanto, o prisma BCE com espessura externa de 2,5 cm (emboço e chapisco) mais revestimento interno de 1, 1,5 e 2,0 cm apresentaram U com valores superiores nas respectivas zonas 1, 2, 5, 6, 7 e 8, ou seja, apenas atenderam aos requisitos das zonas 3 e 4 pois possuíam valores de U igual a 2,85; 2,77, e 2,70 W/m². K sucessivamente (Figura 29).

Nos ensaios realizados nos prismas BCE e BCC com revestimento interno de gesso, ficou constatado que a utilização de revestimentos internos em gesso contribuiu para o desempenho térmico de forma satisfatória.

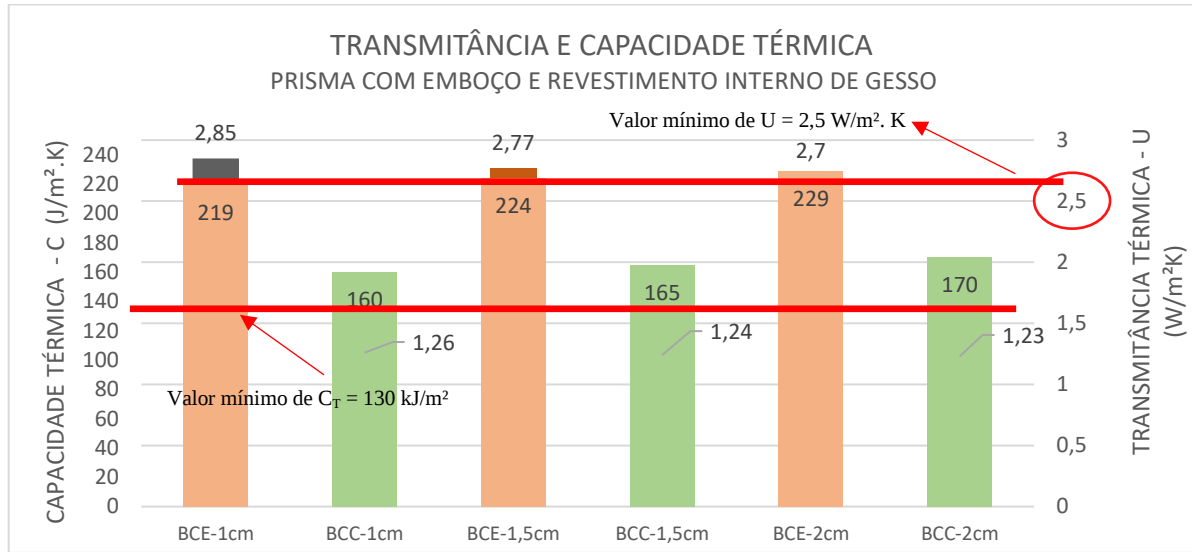
Os estudos experimentais demonstraram uma significativa redução na temperatura interna no prisma BCE por volta de 2,82 °C, resultado bastante importante quando houve a adição da camada de 1,0 cm de revestimento em argamassa de gesso. Em um outro resultado bastante expressivo, ocorreu uma excelente redução de 3,13 °C com relação à espessura interna de 2,0 cm de gesso e de 4,33 °C, melhor resultado obtido em todos os testes relacionados à redução de temperatura, quando houve o incremento do revestimento cerâmico externo no teste com o prisma BCE possuindo uma camada interna de gesso com 2,0 cm de espessura. Esses estudos dos comportamentos térmicos foram certificados pelo melhoramento dos parâmetros térmicos calculados para cada configuração (Figura 30).

Nesse contexto, os experimentos com os prismas BCC demonstraram uma boa redução na temperatura interna, em média de 1,4 °C entre as camadas de gesso com espessuras que variaram entre 1, 1,5 e 2,0 cm (Figura 30). Outrossim, quando foi realizada uma comparação entre o prisma BCC com a primeira camada de gesso com espessura de 1,0 cm com o outro prisma com espessura de 2,0 cm de gesso mais revestimento cerâmico externo, houve uma diferença de 3,6 °C, obtendo valor muito relevante e satisfatório para a pesquisa.

Dessa forma, ficou evidenciando que a camada de gesso aplicada na parede interna do prisma tem grande significância no comportamento térmico. Um dos fatores que contribuiu para o bom desempenho foi a composição química da camada de gesso, ou seja, esse material que foi aplicado possui sulfato de cálcio semi-hidratado na sua fórmula química, possuindo moléculas de água presentes no produto.

A utilização de gesso que foi usada como camada de revestimento interno apresentou algumas outras vantagens, tais como: menores prazos de cura, possibilidade de aplicação de acabamento direto sobre o revestimento de cimento, baixo custo e baixa densidade.

Figura 293 – Gráfico de transmitância e capacidade térmica dos prismas com revestimentos



Fonte: Autor (2022)

Com relação ao atraso térmico e a capacidade térmica (C_T), foi verificado que os prismas BCE e BCC aprestaram valores maiores quando comparados com as mesmas configurações de prismas estudados anteriormente, ratificando um efeito positivo no comportamento térmico quando é adicionado o revestimento interno de gesso.

4.2 Medição do fluxo de calor na câmara térmica

4.2.1 Prismas BCE e BCC

Inicialmente foram realizadas avaliações das temperaturas nos prismas compostos por blocos maciços de concreto celular e por blocos de cimento convencional para calcular a transferência de calor em cada situação na qual foi estudada, aplicando a equação da lei de Fourier. Assim, foi possível realizar uma comparação completa da densidade termal entre os diversos tipos de configurações dos prismas de concreto com os quais foram confeccionados os elementos de teste BCE e BCC. Nesse contexto, foi utilizado como fonte de estudo uma condição artificial ativa, similar a de um aquecimento solar, com fluxo de calor contínuo na parte externa e com variações de temperaturas em torno de $65 \pm 1^\circ\text{C}$, incidindo sobre os prismas dos blocos de concreto BCE e BCC o qual foi avaliado as condições das temperaturas, minuto a minuto, visando determinar o fluxo de calor dos respectivos compósitos. Na Figura 30 foi apresentado o gráfico com as curvas do período de aquecimento de 240 minutos (4 horas) para os quatros elementos de teste. Foram calculados os fluxos de calor dos prismas BCE e BCC

sem quaisquer revestimentos, assim como, posteriormente foi verificado o fluxo termal dos mesmos elementos de testes acrescidos de uma camada externa com 2,5cm de espessura (emboço mais chapisco). No gráfico da Figura 30, foi possível verificar um maior fluxo de transferência de calor no prisma BCE sem revestimento, entretanto, após decorrido o tempo de aproximadamente 25 minutos houve praticamente uma equiparação com o prisma BCE com revestimento externo. O prisma BCC com revestimento externo de 2,5 cm obteve resultados maiores quando comparados com o prisma BCC sem revestimento, no entanto após aproximadamente 70 minutos de ensaios os fluxos termais entre os compósitos tiveram uma equalização. Além disso, notou-se no gráfico que existiu uma grande diferença de fluxo termal entre os prismas BCE e BCC, isso se deu devido à resistência térmica dos materiais atrelados ao fator de condutibilidade térmica. O prisma de concreto celular possuiu um coeficiente de condutividade térmica igual a $\lambda=0,17\text{W/m.K}$, já o prisma de concreto convencional possuiu uma condutividade térmica igual a $\lambda=1,75\text{ W/m.K}$.

Da mesma forma, conforme ficou demonstrado na Figura 31, foram realizados aquecimentos dos 06 tipos de elementos de testes BCE e BCC com revestimento interno e externo durante aproximadamente 240 minutos. Os Prismas BCE e BCC foram revestidos com argamassa industrializada na parte externa com espessura de 2,5cm e na parte interna possuiu revestimento em gesso com diferentes composições de espessuras, 1, 1,5 e 2 cm. Dessa forma, buscou-se realizar as medições do fluxo de calor (q) das minis paredes BCE e BCC com revestimentos internos com variadas configurações de gesso. Na Figura 31, ficou demonstrado que os valores de transferência de calor obtidos nos testes dos prismas BCE com e sem revestimentos apontam um maior fluxo térmico médio de $114,7\text{ w/m}^2$ para o prisma BCE sem revestimento e um menor fluxo termal médio de $105,0\text{ w/m}^2$ para o prisma BCE com 2,5 cm de espessura de revestimento externo e com revestimento interno de gesso com 2,0 cm de espessura. Entretanto, quando foi comparado o prisma BCE sem revestimento com o mesmo compósito acrescido de revestimento externo com espessura de 2,5 cm (chapisco e emboço) mais 1,0 cm de espessura interna de gesso, foram poucas as alterações com relação ao fluxo de calor, os valores ficaram bem próximos uns dos outros, ou seja, o prisma de concreto convencional sem revestimento ficou com uma média de $114,7\text{ w/m}^2$ versus $114,5\text{ w/m}^2$ para o outro prisma. No entanto, com a adição de camada interna de 1,5 cm de gesso no prisma BCE foi obtido uma média de $111,2\text{w/m}^2$ e uma variação de 3,15% quando comparado com o prisma sem revestimentos. Esse valor foi bem maior quando foi comparado com a espessura de gesso 2,0 cm no prisma BCE, o resultado do fluxo de calor médio foi de 105w/m^2 com uma variação de 9,23% referente ao prisma BCE sem revestimentos.

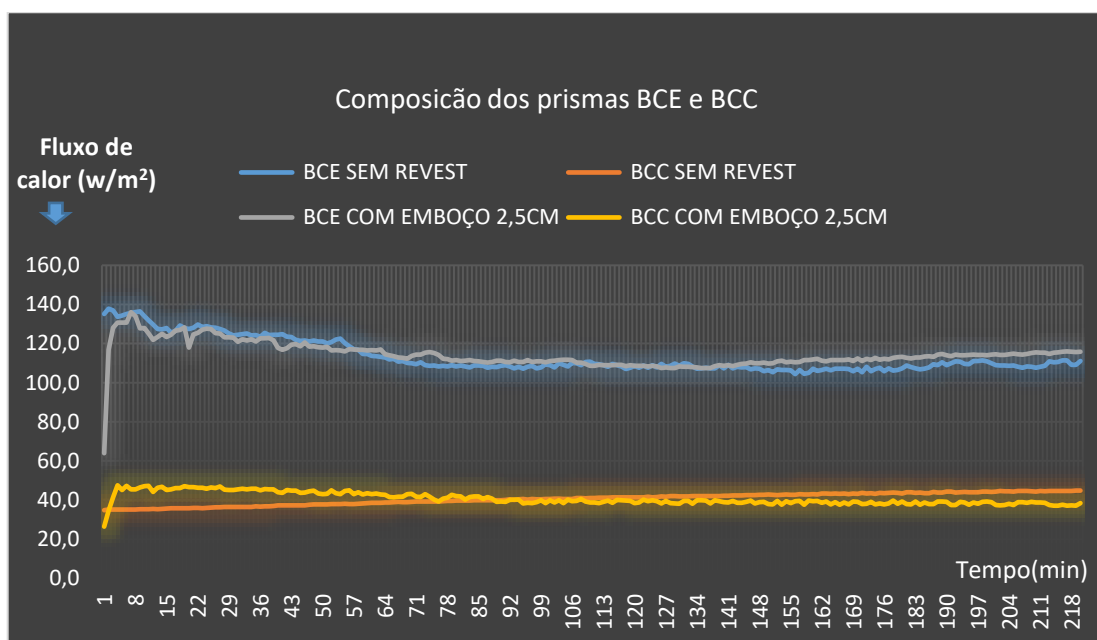
De acordo com a Figura 31, foram comparados os resultados dos ensaios entre as diversas configurações das camadas internas de gesso do prisma BCE. Os resultados demonstraram a comparação entre o prisma BCE com espessura de 1,0 cm de camada interna de gesso relacionado com o prisma BCE com espessura de 1,5 cm de camada interna de gesso, no qual houve um aumento na taxa do fluxo de calor de 2,96 %. Dessa mesma forma, quando foi relacionado o prisma BCE com 1,0 cm da espessura na parte interna com o prisma BCE com 2,0 cm de espessura interna de gesso, esse percentual foi de 9,05%. Por fim, foi comparado o prisma BCE com espessura interna de 1,5 cm de gesso com o prisma BCE com espessura interna de 2,0 cm de gesso, e o resultado foi de 5,9%.

Na avaliação do prisma BCC sem revestimento, o resultado demonstrou que o fluxo térmico médio foi de $40,3 \text{ w/m}^2$, no entanto quem apresentou uma maior taxa média de fluxo térmico, com valor médio de $41,8 \text{ w/m}^2$, foi o prisma BCC com emboço externo e revestimento em gesso com espessura de 1,0 cm, no qual foi obtido um acréscimo de 3,72% quando comparado com o prisma BCC sem revestimento. O prisma de concreto maciço celular que obteve um menor fluxo de calor foi o BCC com emboço externo e revestimento interno de gesso com espessura de 2,0 cm, alcançando uma média de fluxo termal de $37,0 \text{ w/m}^2$. Dessa forma, foram correlacionados os prismas BCC com as diversas configurações nas suas camadas internas de gesso que variaram entre 1, 1,5 e 2 cm, dos quais foram obtidos resultados dos fluxos termais de $41,8 \text{ w/m}^2$; $39,1 \text{ w/m}^2$ e $37,0 \text{ w/m}^2$, sucessivamente.

Demostrou-se na Figura 31, um aumento no fluxo de calor de 6,90% quando comparados o prisma BCC com 1,0 cm de espessura com o prisma BCC com 1,5 cm de espessura interna de gesso. Ademais, quando foi relacionado o prisma BCC com 1,0 cm com o prisma BCC 2,0 cm de gesso esse percentual foi de 13,0%. Entretanto, quando foi comparado o prisma BCC com 1,5 cm de gesso com o prisma BCC com 2,0 cm de revestimento interno de gesso, o valor foi de 5,7%. Por final, quando foram comparados o prisma BCC sem revestimento com a o prisma BCC com a adição da camada interna de 2,0 cm de gesso houve uma variação de 8,92% no fluxo térmico.

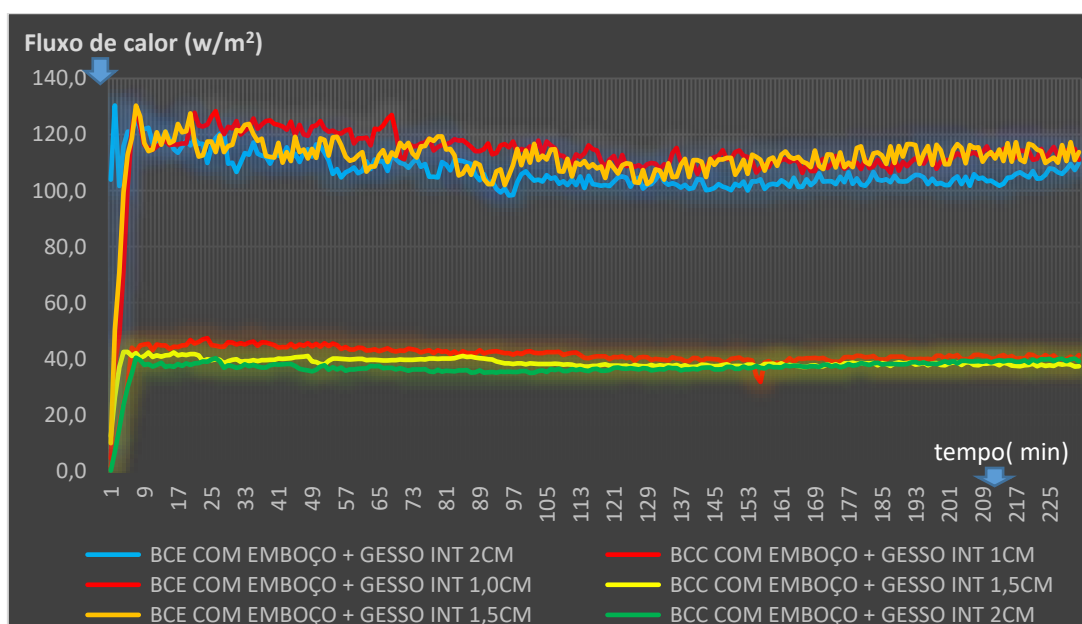
Nessa contextualização, foi apresentado na Figura 31 o gráfico do comportamento do fluxo de calor dos prismas BCE e BCC conforme cada fase do processo.

Figura 30 – Gráfico do comportamento térmico dos prismas BCE e BCC sem revestimento interno de gesso



Fonte: Autor (2022)

Figura 31 – Gráfico do comportamento térmico dos prismas BCE e BCC com revestimento interno em gesso



Fonte: Autor (2022)

4.2.2 Temperaturas de aquecimento e resfriamento interno dos prismas BCE e BCC

Nesta etapa do processo foram avaliados tanto o aquecimento quanto o resfriamento das minis paredes de blocos de concreto BCE e BCC. A Figura 32 demonstrou um esquema entre a temperaturas dos prismas BCE, BCC e o valor de transmitância térmica (U), na qual foi possível verificar os valores do período de aquecimento interno dos prismas de blocos de concreto durante 240 minutos (4 horas), medidos a cada hora. Nessa perspectiva, as Figuras 33 e 34 demonstraram o detalhadamente das configurações dos testes com diversos tipos de revestimentos aplicados nas paredes dos prismas. Dessa forma, foi possível verificar que os materiais com baixa densidade possuíam um coeficiente de condutividade térmica menor que ao mais densos, logo foi possível concluir que o prisma de concreto BCE possuiu uma transmitância térmica (U) maior que o prisma do bloco BCC. Outrossim, ficou evidente que, as temperaturas mais elevadas facilitam o fluxo de calor que atravessa a parede, principalmente nos compósitos que possuíam uma maior densidade, como também, nos prismas que obtiveram um valor maior de transmitância térmica. Além disso, foi possível verificar na Figura 35 que existe uma evolução nas temperaturas de aquecimento térmico interno das minis paredes BCE e BCC quando houve um aumento no tempo de aquecimento. Notou-se também que, a partir de 180 minutos, as temperaturas internas possuíam uma tendência de se estabilizar, mantendo-se valores constantes de temperaturas dos prismas BCE e BCC.

Figura 32 – Relação entre as temperaturas e o valor de U dos prismas BCC e BCE

ELEMENTO DE TESTE	TEMPO DE AQUECIMENTO (MINUTOS)					
	0	60	120	180	240	U
BCE SEM REVSTIMENTO	27,2	31,5	34,0	34,8	36,0	3,98
BCC SEM REVSTIMENTO	26,2	30,2	31,8	34,5	35,0	1,32
BCE COM REV. EXT. 2,5cm (EMBOÇO E CHAPISCO)	26,6	29,3	31,6	33,4	34,2	3,76
BCC COM REV. EXT. 2,5cm (EMBOÇO E CHAPISCO)	25,6	26,7	30,0	33,3	34,0	1,29
BCE COM REV. EXT. 2,5cm + REV. INT. DE GESSO 1,0cm	26,0	29,1	31,0	32,7	33,0	3,50
BCC COM REV. EXT. 2,5cm + REV. INT. DE GESSO 1,0cm	25,4	26,6	29,0	31,2	33,6	1,26
BCE COM REV. EXT. 2,5cm + REV INT DE GESSO 1,5cm	25,5	25,8	28,2	29,9	30,6	3,39
BCC COM REV. EXT. 2,5cm + REV INT DE GESSO 1,5cm	25,0	25,4	28,1	29,8	31,1	1,24
BCE COM REV. EXT. 2,5cm + REV. INT. DE GESSO 2,0cm	25,5	25,5	27,6	30,0	30,2	3,27
BCC COM REV. EXT. 2,5cm + REV. INT. DE GESSO 2,0cm	24,5	24,7	25,7	29,0	30,0	1,23
BCE COM REV. EXT. 2,5cm + REV. CERÂMICO + REV. INT. DE GESSO 2,0cm	24,5	24,5	25,5	29,0	29,5	3,16
BCC COM REV. EXT. 2,5cm +REV. CERÂMICO + REV INT DE GESSO 2,0cm	24,0	24,0	25,0	28,0	29,0	1,20

Fonte: Autor (2022)

Figura 33 – Detalhe da relação entre as temperaturas e o valor de U dos prismas BCE

ELEMENTO DE TESTE		TEMPO DE AQUECIMENTO (MINUTOS)					
		0	60	120	180	240	U
BCE SEM REVSTIMENTO	Temperaturas °C	27,2	31,5	34,0	34,8	36,0	3,98
BCE COM REV. EXT. 2,5cm (EMBOÇO E CHAPISCO)		26,6	29,3	31,6	33,4	34,2	3,76
BCE COM REV. EXT. 2,5cm + REV INT DE GESSO 1,0cm		26,0	29,1	31,0	32,7	33,0	3,50
BCE COM REV. EXT. 2,5cm + REV INT DE GESSO 1,5cm		25,5	25,8	28,2	29,9	30,6	3,39
BCE COM REV. EXT. 2,5cm + REV INT DE GESSO 2,0cm		25,5	25,5	27,6	30,0	30,2	3,27
BCE COM REV. EXT. 2,5cm +REV CERÂMICO + REV INT. GESSO 2,0cm		24,5	24,5	25,5	29,0	29,5	3,16

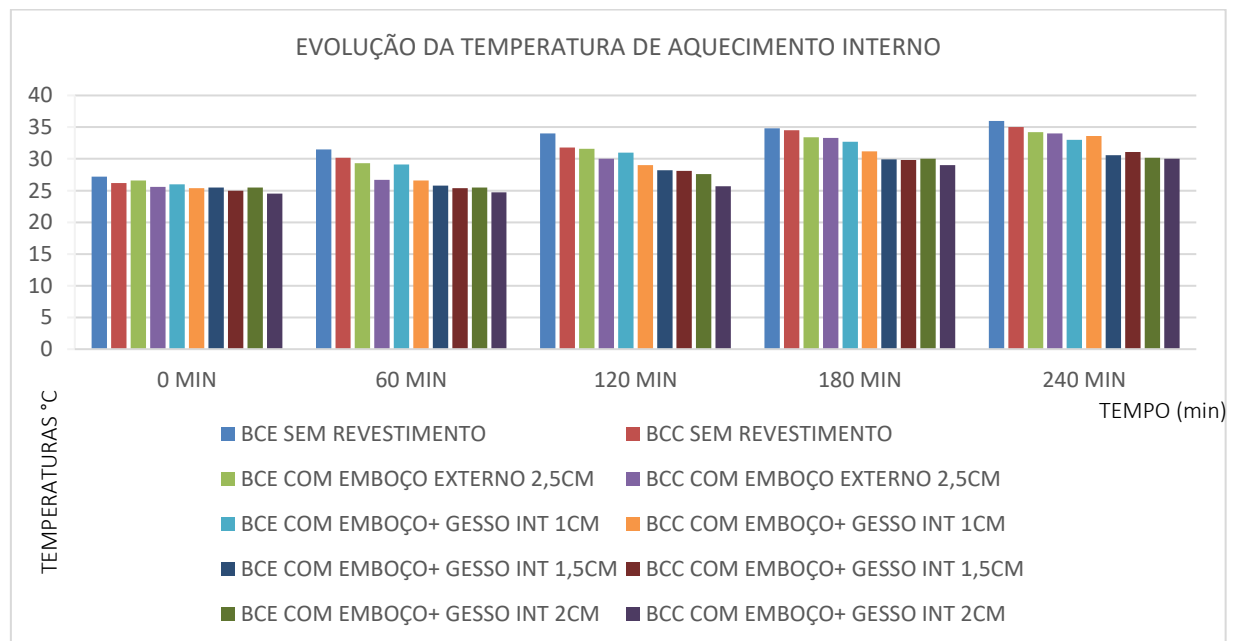
Fonte: Autor (2022)

Figura 34 – Detalhe da relação entre as temperaturas e o valor de U dos prismas BCC

ELEMENTO DE TESTE		TEMPO DE AQUECIMENTO (MINUTOS)					
		0	60	120	180	240	U
BCC SEM REVSTIMENTO	Temperaturas °C	26,2	30,2	31,8	34,5	35,0	1,32
BCC COM REV.EXT.2,5cm (EMBOÇO E CHAPISCO)		25,6	26,7	30,0	33,3	34,0	1,29
BCC COM REV. EXT. 2,5cm + REV INT DE GESSO 1,0cm		25,4	26,6	29,0	31,2	33,6	1,26
BCC COM REV. EXT. 2,5cm + REV INT DE GESSO 1,5cm		25,0	25,4	28,1	29,8	31,1	1,24
BCC COM REV. EXT. 2,5cm + REV INT DE GESSO 2,0cm		24,5	24,7	25,7	29,0	30,0	1,23
BCC COM REV. EXT. 2,5cm +REV CERÂMICO + REV INT. GESSO 2,0cm		24,0	24,0	25,0	28,0	29,0	1,20

Fonte: Autor (2022)

Figura 35– Gráfico da evolução da temperatura de aquecimento térmico interno dos prismas BCE e BCC



Fonte: Autor (2022)

Figura 36 – Relação entre as temperaturas de resfriamento e o valor de U dos prismas BCE

ELEMENTO DE TESTE		TEMPO DE RESFRIAMENTO (MINUTOS)			
		0	30	60	U
BCE SEM REVSTIMENTO	°C	47,4	30,4	23,8	3,98
BCE COM REV. EXT. 2,5cm (EMBOÇO E CHAPISCO)	Temperaturas	52,2	38,7	32,8	3,76
BCE COM REV. EXT. 2,5cm + REV. INT DE GESSO 1,0cm		49,5	37,2	31,7	3,50
BCE REV. EXT. 2,5cm + REV INT DE GESSO 1,5cm		50,1	36,0	31,3	3,39
BCE REV. EXT. 2,5cm + REV INT DE GESSO 2,0cm		51,2	38,2	33,1	3,27
BCE COM REV. EXT. 2,5cm +REV CERÂMICO + REV INT DE GESSO 2,0cm		-	-	-	3,16

Fonte: Autor (2022)

Figura 374 – Relação entre as temperaturas de resfriamento e o valor de U dos prismas BCC

ELEMENTO DE TESTE		TEMPO DE RESFRIAMENTO (MINUTOS)			
		0	30	60	U
BCC SEM REVESTIMENTO	°C	36,1	25,1	22,6	1,32
BCC COM REV.EXT.2,5cm (EMBOÇO E CHAPISCO)	Temperaturas	54,1	35,8	30,6	1,29
BCC COM REV. EXT. 2,5cm + REV INT DE GESSO 1,0cm		51,2	34,4	30,6	1,26
BCC COM REV. EXT. 2,5cm + REV INT DE GESSO 1,5cm		50,8	34,1	31,8	1,24
BCC COM REV. EXT. 2,5cm + REV INT DE GESSO 2,0cm		55,1	37,6	33,2	1,23
BCC COM REV. EXT. 2,5cm +REV CERÂMICO + REV INT DE GESSO 2,0cm		-	-	-	1,20

Fonte: Autor (2022)

4.2.3 Utilização da câmara termográfica nos prismas BCE e BCC

Para complementação dos dados coletados por termômetro digital, foram realizados testes com o uso da câmara termográfica aplicados nas diversas configurações dos prismas BCE e BCC, conforme foram demonstrados nas Figuras 38 a 42. Assim, através da técnica da termografia foi possível distinguir áreas de diferentes temperaturas em um corpo através da visualização artificial dentro do espectro infravermelho, localizado à direita do espectro visível (cor violeta a vermelho alaranjado). Dessa forma, todos os objetos com temperatura acima do zero absoluto (0 K) emitiram radiação na faixa infravermelha do espectro eletromagnético. Diante disso, foi possível analisar de forma qualitativa que as temperaturas nos prismas na cor violeta possuíram um menor valor de temperaturas quando comparadas com os prismas na cor vermelho alaranjado, onde a temperatura do prisma foi maior e consequentemente obteve um fluxo maior de calor.

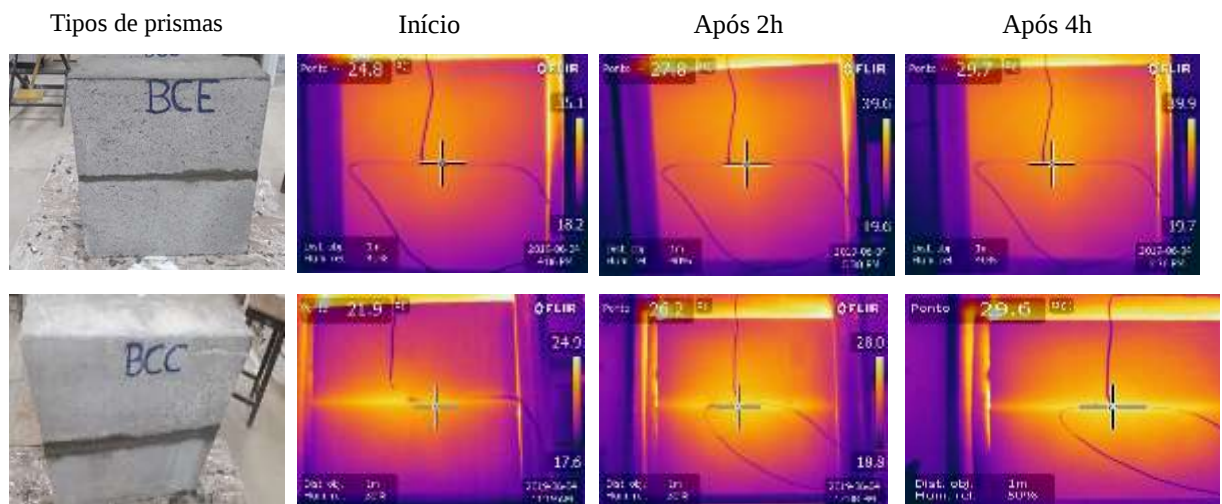
A utilização dos termogramas permitiu enxergar a distribuição de calor pelo elemento de teste durante o período de aquecimento e resfriamento dos compósitos de concreto denominados de BCE e BCC. Dessa forma, foi possível verificar na parte interna do prisma BCE e BCC, onde fica localizada na região mais fria, que a temperatura aumentou de forma gradativa partindo do centro da parede em direção as extremidades (Figuras 38 a 42).

Logo, a quantidade de calor que fluiu por condução, numa determinada área, entre dois corpos durante um certo intervalo de tempo foi definido como fluxo de calor (Φ). Assim, foi possível analisar através das Figuras 38 a 42 um aumento gradativo da temperatura, após 2h de teste, na parte interna dos prismas, expresso de forma qualitativa pela cor vermelho alaranjado. Entretanto, após 4h de teste notou-se que as temperaturas dos prismas BCE e BCC tenderam a ficar estabilizadas. Verificou-se que as temperaturas tenderam a diminuir com a utilização de diversas configurações internas de revestimentos de gesso nos prismas. Isso se deu, pelo fato da resistência térmica de cada compósito, que foi estudada, está relacionada com a razão entre a espessura da parede e a condutibilidade térmica de cada material empregado.

4.2.3.1 Termogramas de aquecimento dos prismas BCE e BCC

A seguir foram apresentados os termogramas dos ensaios realizados com os dois tipos de prismas BCE e BCC e suas respectivas configurações internas dos prismas com revestimento de gesso. A imagem que possuir uma coloração na cor vermelho alaranjado até a cor amarelo representa uma maior temperatura no prisma, assim como, a coloração na cor violeta representa uma temperatura menor dos prismas, conforme demonstrado na Figura 38.

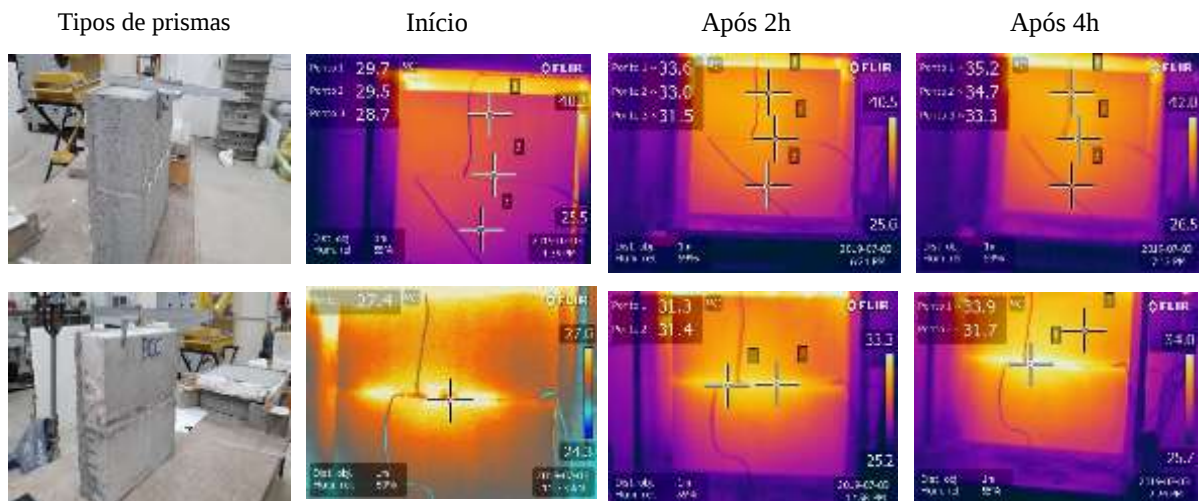
Figura 38 – Termogramas de aquecimento representado pelas cores vermelho alaranjado até o amarelo referente aos prismas BCE e BCC sem revestimentos



Fonte: Autor (2022)

Na Figura 39 são apresentados os termogramas de aquecimento dos prismas BCE e BCC com revestimentos externo.

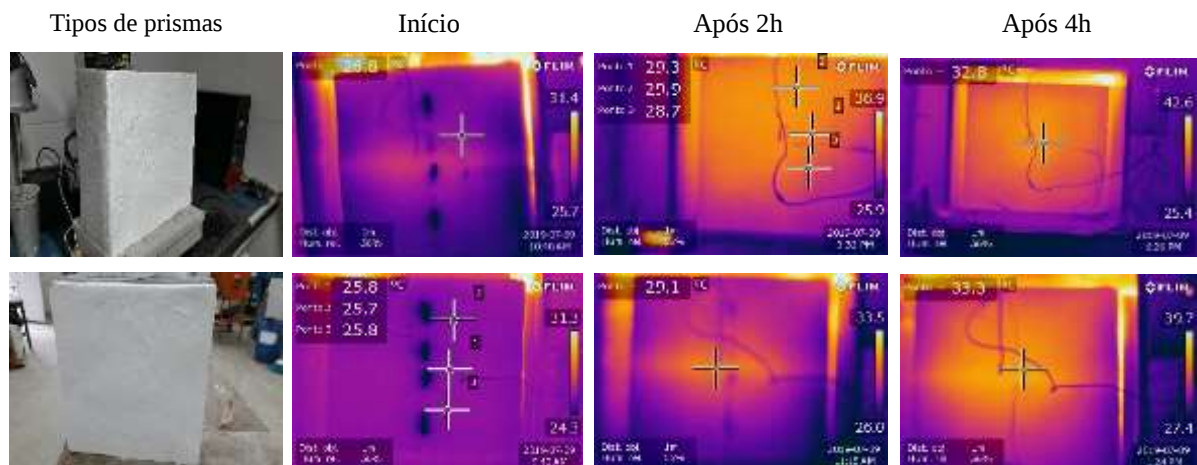
Figura 39 – Termogramas de aquecimento representado pelas cores vermelho alaranjado até o amarelo referente aos prismas BCE e BCC com revestimentos externo de 2,5 cm de espessura (emboço mais chapisco)



Fonte: Autor (2022)

Na Figura 40 são apresentados os termogramas de aquecimento dos prismas BCE e BCC com revestimentos externo mais revestimento interno de gesso com espessura de 1,0 cm.

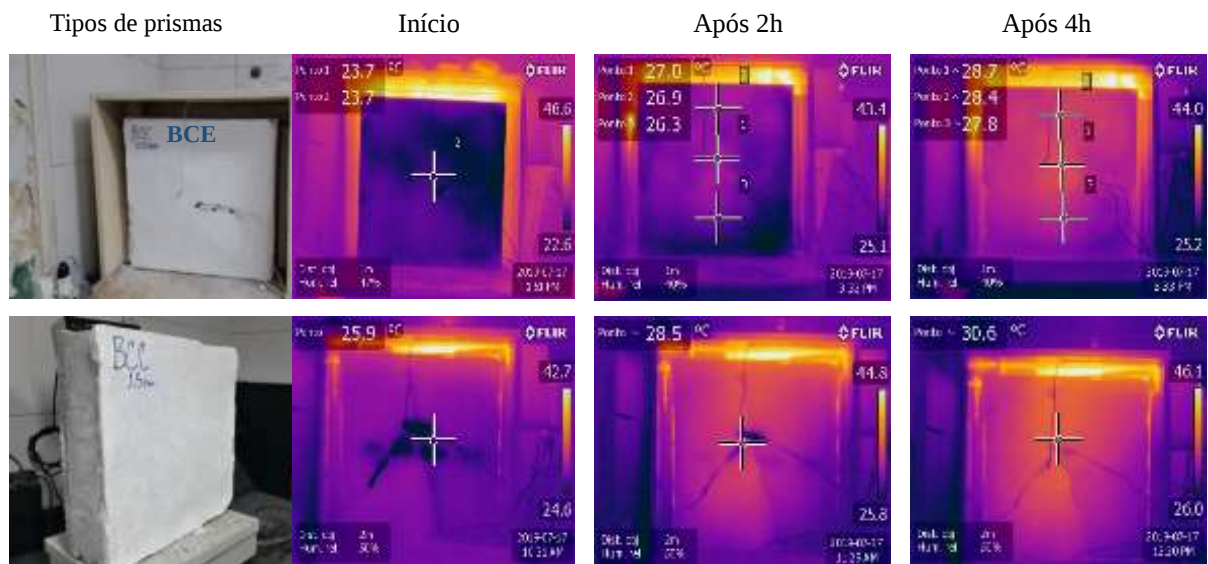
Figura 40 – Termogramas de aquecimento representado pelas cores vermelho alaranjado até o amarelo referente aos prismas BCE e BCC com revestimentos externo de 2,5 cm de espessura e revestimento interno de gesso com 1,0 cm de espessura



Fonte: Autor (2022)

Na Figura 41 são apresentados os termogramas de aquecimento dos prismas BCE e BCC com revestimentos externo mais revestimento interno de gesso com espessura de 1,5 cm.

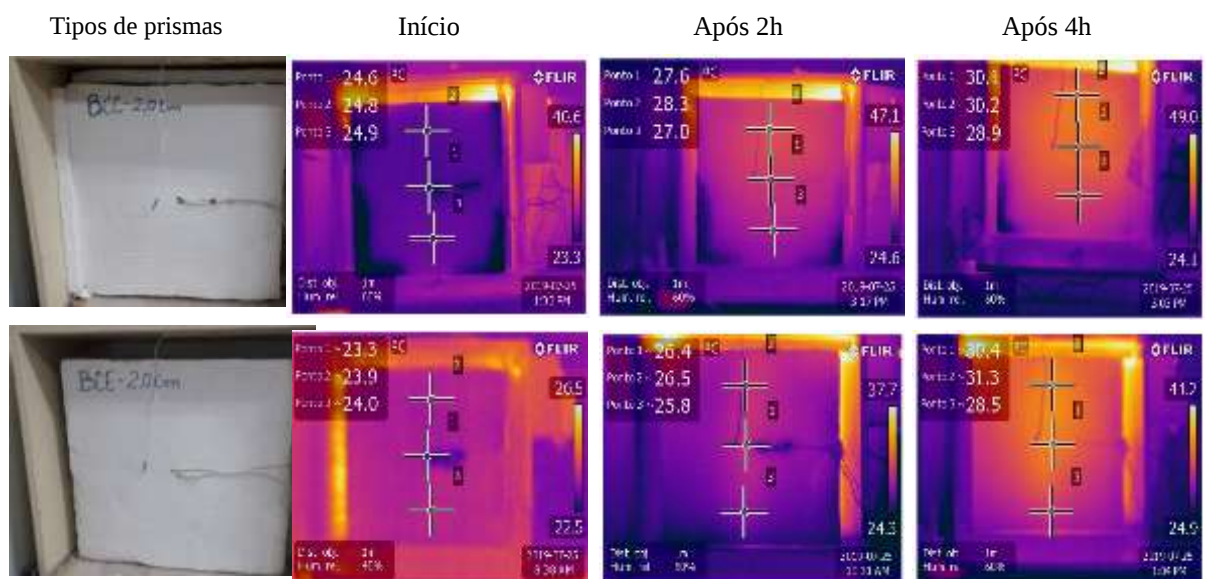
Figura 41 – Termogramas de aquecimento representado pelas cores vermelho alaranjado até o amarelo referente aos prismas BCE e BCC com revestimentos externo de 2,5 cm de espessura e revestimento interno de gesso com 1,5 cm de espessura



Fonte: Autor (2022)

Na Figura 42 são apresentados os termogramas de aquecimento dos prismas BCE e BCC com revestimentos externo mais revestimento interno de gesso com espessura de 2,0 cm.

Figura 42 – Termogramas de aquecimento representado pelas cores vermelho alaranjado até o amarelo referente aos prismas BCE e BCC com revestimentos externo de 2,5 cm de espessura e revestimento interno de gesso com 2,0 cm de espessura



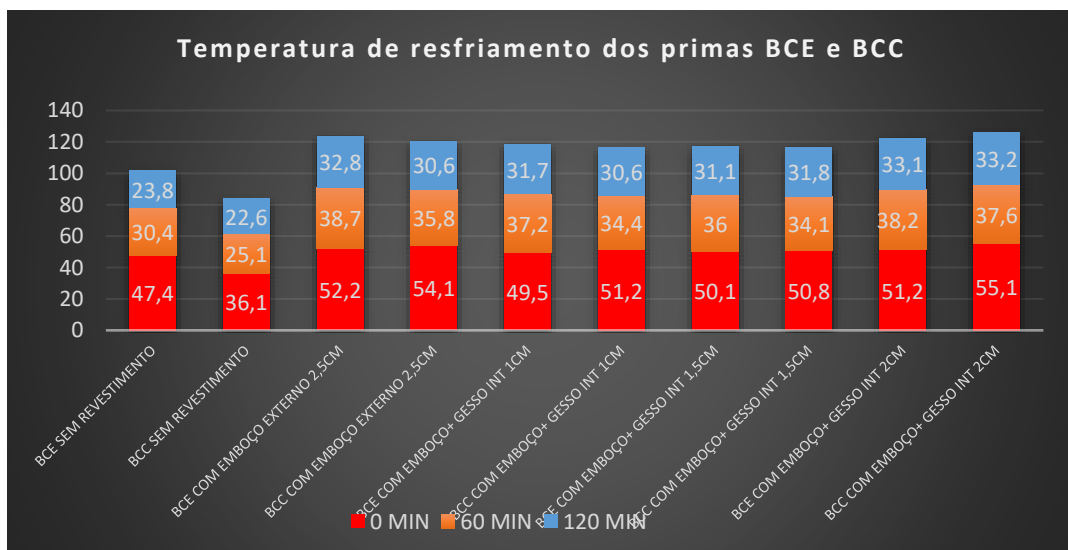
Fonte: Autor (2022)

4.2.3.2 Termogramas de resfriamento dos prismas BCE e BCC

Após realização dos testes de aquecimento dos prismas, iniciou-se o processo de resfriamento das paredes durante 2h. Esse processo se deu em um ambiente controlado com temperaturas do local de trabalho variando entre 26 ± 1 °C. Assim, com o auxílio da câmara termográfica foram realizados os registros das temperaturas de resfriamento dos prismas. A Figura 43 demonstra o gráfico com as temperaturas registradas pela câmara termográfica com as diversas composições dos prismas BCE e BCC. Verificou-se que as temperaturas externas dos prismas BCC possuíram maiores valores de temperaturas enquanto que as paredes de BCC possuíram, na grande maioria das vezes, valores menores. No entanto, verificou-se no gráfico que após 2h de testes, essas temperaturas, de ambas as paredes, tenderam a ficar bem próximas umas das outras, quando comparadas com os mesmos tipos e revestimentos aplicados. Nas Figuras 44 a 49, foi possível verificar as imagens dos termogramas com vistas a esta perspectiva. Nessas imagens, foram notadas diferenças de temperatura no rejunte dos prismas das demais partes, de uma forma mais nítida nos termogramas, pois estavam mais aquecidos e a diferença de temperatura foi causada pela diferença entre os dois materiais.

Através dos termogramas foi possível observar o fluxo de calor se deslocando com o passar do tempo em direção ao ponto com menor temperatura (Figuras 44 a 49). Ademais, foi observada uma tendência de equilíbrio térmico em todas as faces dos prismas BCE e BCC. Nesse processo, quanto maiores fossem as diferenças de temperaturas dos prismas, maiores seriam as trocas térmicas.

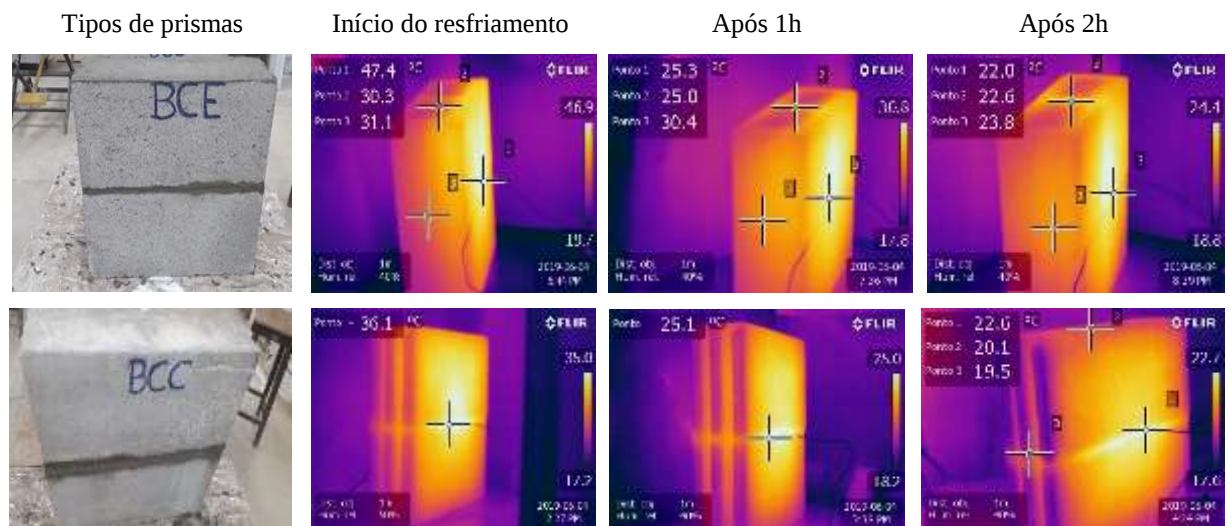
Figura 43 – Gráfico da temperatura de resfriamento dos prismas BCE e BCC



Fonte: Autor (2022)

Na Figura 44 são apresentados os termogramas de resfriamento dos prismas BCE e BCC sem revestimentos externo.

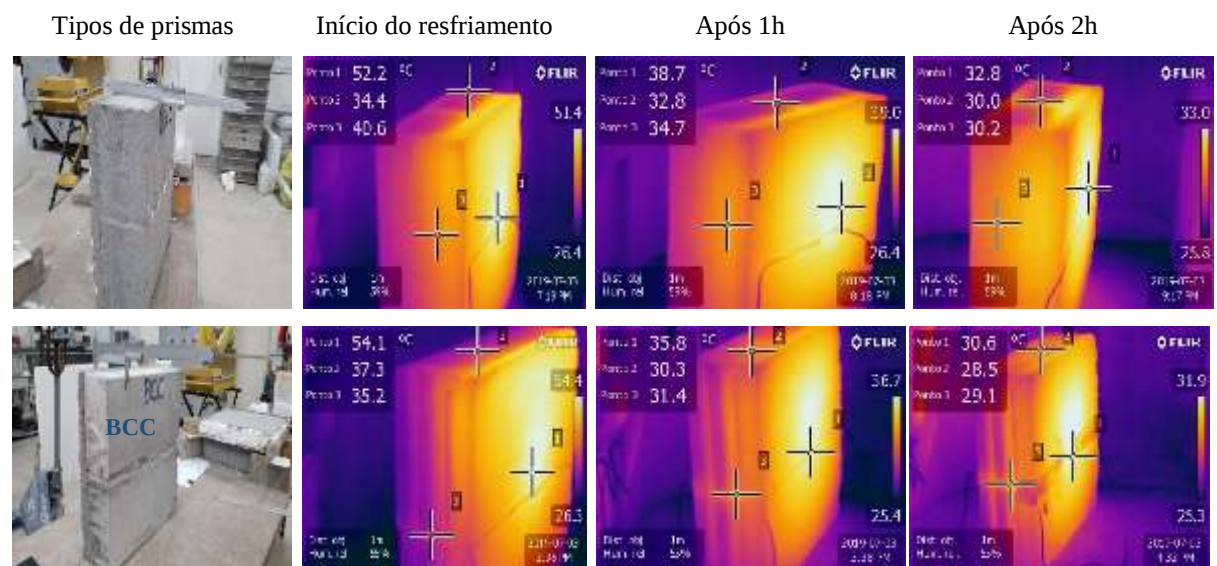
Figura 44 – Termogramas vistos em perspectivas do resfriamento representado pela cor violeta dos prismas BCE e BCC sem revestimentos



Fonte: Autor (2022)

Na Figura 45 são apresentados os termogramas de resfriamento dos prismas BCE e BCC com revestimentos externo.

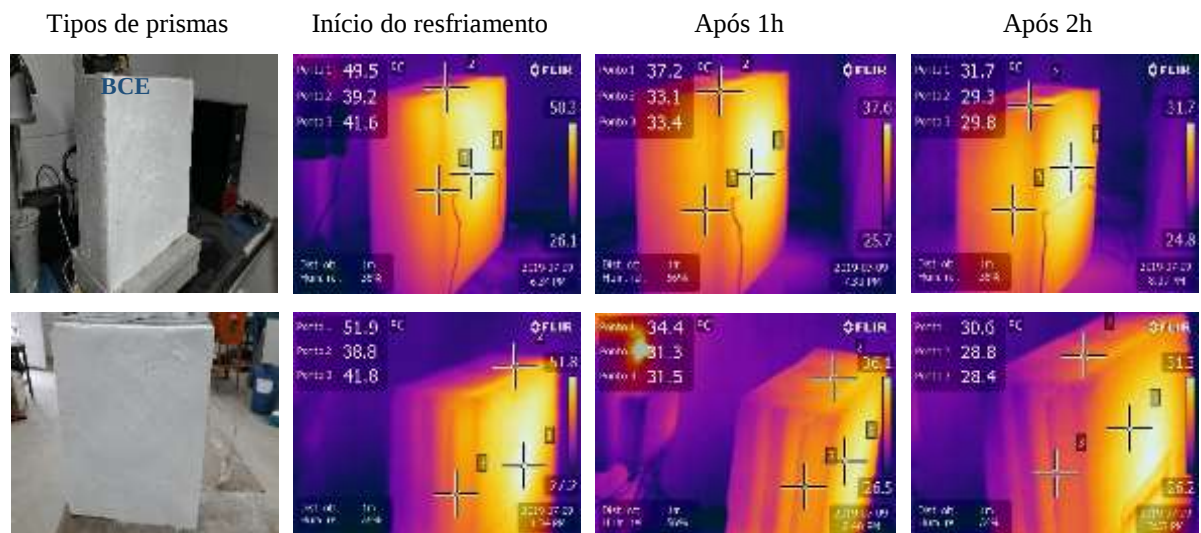
Figura 45 – Termogramas visto em perspectivas do resfriamento representado pela cor violeta dos prismas BCE e BCC com revestimento externo de 2,5 cm de espessura



Fonte: Autor (2022)

Na Figura 46 são apresentados os termogramas de resfriamento dos prismas BCE e BCC com revestimentos externo mais revestimento interno de gesso com espessura de 1,0 cm.

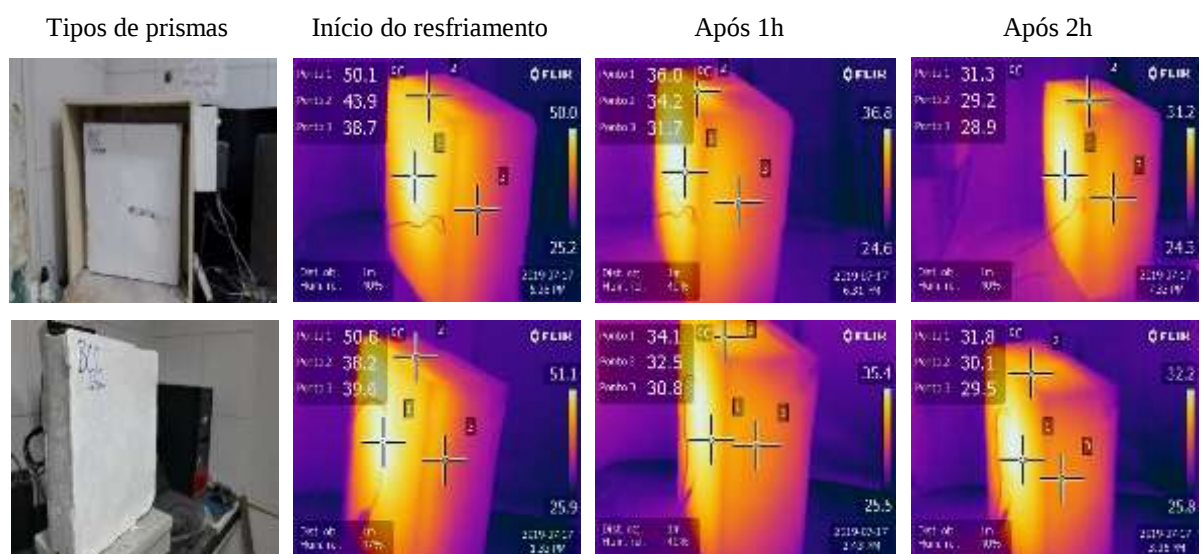
Figura 46 – Termogramas vistos em perspectivas do resfriamento representado pela cor violeta dos prismas BCE e BCC com revestimentos externo de 2,5 cm de espessura e revestimento interno de gesso com 1,0 cm de espessura



Fonte: Autor (2022)

Na Figura 47 são apresentados os termogramas de resfriamento dos prismas BCE e BCC com revestimentos externo mais revestimento interno de gesso com espessura de 1,5 cm.

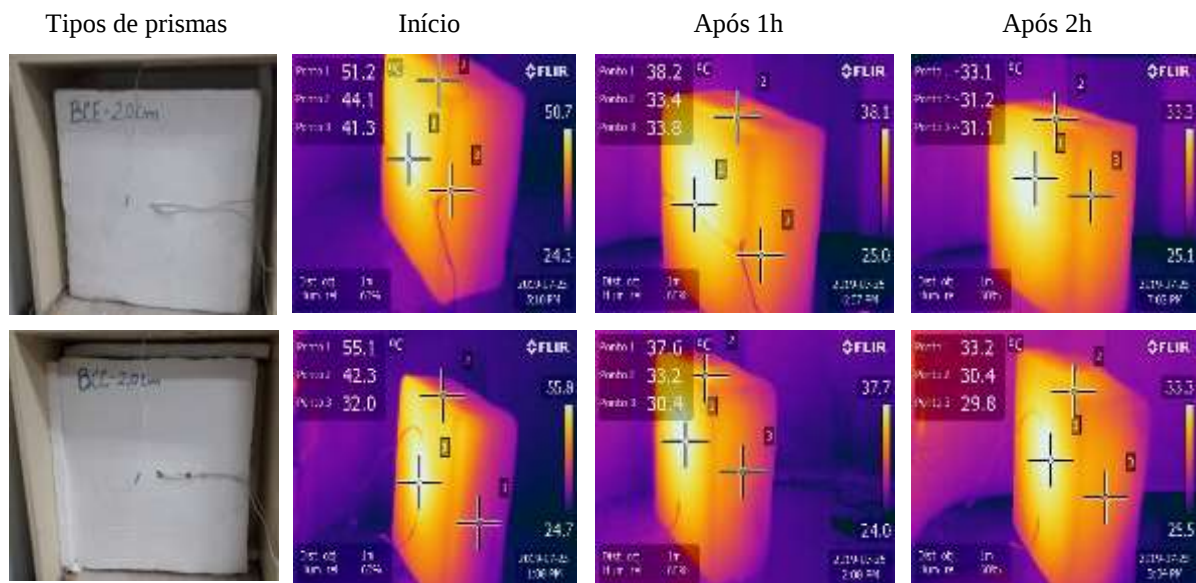
Figura 47 – Termogramas vistos em perspectivas do resfriamento representado pela cor violeta dos prismas BCE e BCC com revestimentos externo de 2,5 cm de espessura e revestimento interno de gesso com 1,5 cm de espessura



Fonte: Autor (2022)

Na Figura 48 são apresentados os termogramas de resfriamento dos prismas BCE e BCC com revestimentos externo mais revestimento interno de gesso com espessura de 2,0 cm.

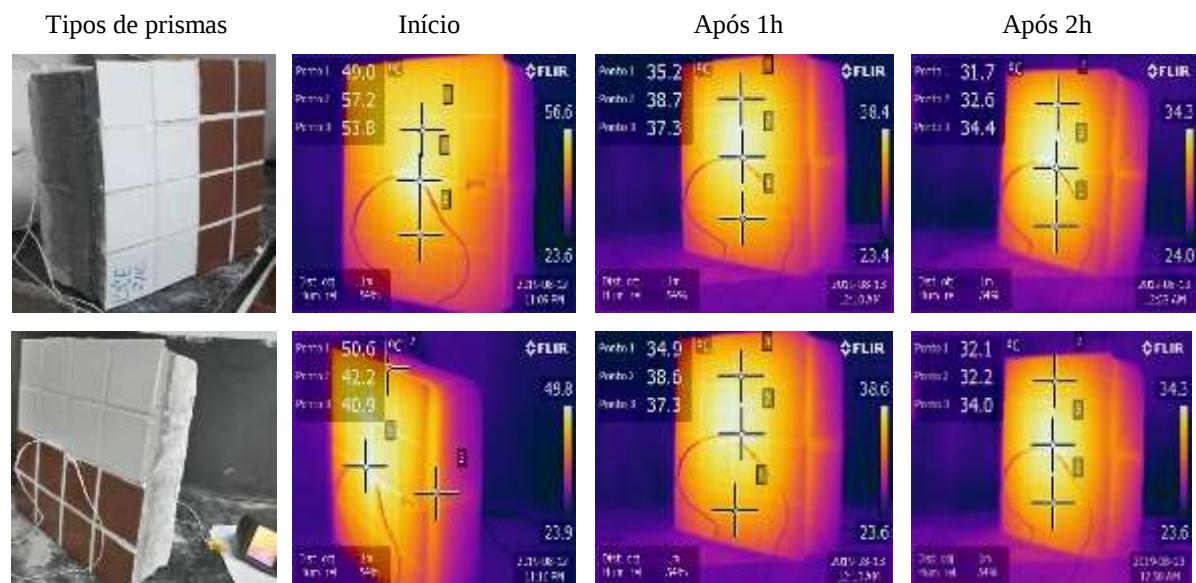
Figura 48 – Termogramas visto em perspectivas do resfriamento representado pela cor violeta dos prismas BCE e BCC com revestimentos externo de 2,5 cm de espessura e revestimento interno de gesso com 2,0 cm de espessura



Fonte: Autor (2022)

Na Figura 49 são apresentados os termogramas de resfriamento dos prismas BCE e BCC com revestimentos externo cerâmico mais revestimento interno de gesso com espessura de 2,0 cm.

Figura 496 – Termogramas vistos em perspectivas do resfriamento representado pela cor violeta dos prismas BCE e BCC de 2,5 cm de espessura mais revestimentos cerâmicos externos e revestimento interno de gesso com 2,0 cm de espessura



Fonte: Autor (2022)

5. CONCLUSÃO

Esta pesquisa teve como escopo de estudo os prismas BCE e BCC como componentes substituindo, analogicamente, a escala de utilização reais de sistema de vedação vertical da edificação. Os resultados dos testes dos prismas foram analisados e comparados com as respectivas normas técnicas. A utilização de câmara térmica e os parâmetros normativos serviram de base para realizar os cálculos de transmissão de calor em prismas compostos por blocos de concreto com revestimento interno de gesso.

O maior valor de transferência de calor foi obtido no teste com o prisma BCE sem revestimentos, obtendo um fluxo térmico médio de $114,7 \text{ w/m}^2$. Dentro dessa mesma configuração de prisma, o compósito BCE com 2,5 cm de espessura de revestimento externo e com revestimento interno de gesso com 2,0 cm de espessura obteve o resultado de $105,0 \text{ w/m}^2$ referente a menor taxa de fluxo termal. Ademais, foi possível verificar no gráfico que os prismas BCE quando possuíram uma menor espessura interna de revestimento de gesso, obtiveram um valor maior de fluxo de calor.

Nas avaliações dos prismas BCC com revestimento interno, os resultados demonstraram que a transferência de calor diminuiu quando houve um aumento das espessuras dos revestimentos interno de gesso. Entretanto, o estudo demonstrou que houve uma maior taxa média de fluxo térmico com valor médio de $41,8 \text{ w/m}^2$, demonstrado no ensaio com o prisma BCC com emboço externo e revestimento em gesso com espessura de 1,0 cm. O prisma BCC com revestimento interno de gesso com 2,0 cm de espessura, apresentou resultado de $37,0 \text{ w/m}^2$ obtendo o menor fluxo térmico quando comparados com os demais prismas de concreto celular maciço com revestimentos de gesso com espessuras variando entre 1,0 e 1,5 cm. Observou-se no gráfico, expresso na Figura 30, que o fluxo de calor das minis paredes BCC com revestimentos possuiu uma tendência de equilíbrio térmico dos prismas maciços de concreto celular após 2,5h de aquecimento.

Outro ponto importante foi com relação às análises dos dados, pois foi possível aferir a importância de não correlacionar os prismas BCE com BCC, pois foi verificada uma grande diferença de fluxo termal, situação essa que foi normalmente esperada devido à resistência térmica de cada compósito atrelado à condutibilidade térmica de cada material. No entanto, ficou concluído na pesquisa que tanto o prisma BCE quanto o prisma BCC, após a adição da camada interna de gesso, tiveram de uma forma geral um comportamento térmico mais eficiente que os compósitos utilizados sem revestimentos internos de gesso.

A capacidade térmica (C_T) encontrada nos prismas BCE e BCC foi compatível com o valor sugerido da norma de desempenho térmico, exceto o teste BCC sem revestimento que apresentou valor um pouco abaixo. Os resultados de capacidade térmica com o aumento da camada de revestimento interno com gesso melhoraram ainda mais o seu desempenho térmico, atendendo aos requisitos para todas as zonas bioclimáticas, a qual compreende todas as capitais do Brasil.

Todos os prismas BCC com revestimento interno de gesso apresentaram atendimentos às normas para valores de capacidade térmica (C_T) e transmitância térmica (U) cujos requisitos foram atendidos, entretanto, os prismas BCE com 2,5cm de espessura externa mais revestimento interno de 1, 1,5 e 2,0 cm apresentaram U com valores superiores às zonas bioclimáticas 1, 2, 5, 6, 7 e 8, ou seja, apenas atenderam aos requisitos das zonas bioclimáticas 3 e 4 pois possuíam valores de U igual a 2,87; 2,75 e 2,70 W/m². K sucessivamente.

Os ensaios com termografia infravermelha permitiram analisar a transferência do calor qualitativamente e as variações das temperaturas no decorrer do tempo. Observou-se o comportamento térmico e a distribuição do aquecimento a partir da fonte de calor e as perdas oriundas de pequenas frestas da câmara térmica. As temperaturas medidas pela câmara termográfica mostraram que durante a primeira hora de resfriamento, logo após a saída da câmara térmica, existiu uma perda de temperaturas em torno de 11 a 17,5 °C e que, logo após a segunda hora de resfriamento essa variação ficou entre 17,8 e 23,6 °C, mantendo-se estável a partir dessa hora.

No estudo complementar dos prismas com revestimento, concluiu-se que a utilização de revestimentos internos em gesso teve contribuição para o desempenho térmico de forma satisfatória. Nesse contexto, os estudos experimentais demonstraram uma redução de até 2,85 °C na temperatura interna do prisma BCE quando houve a adição de camada interna de gesso e de até 1,5 °C para o prisma BCC. Desta forma, concluiu-se que, tanto o prisma BCC quanto o prisma BCE têm, de uma forma geral, um comportamento térmico inferior quando utilizado o revestimento interno em argamassa de gesso.

Os resultados alcançados visaram contribuir para o avanço dos estudos sobre transferência de calor em prismas de blocos de concreto com revestimento interno de gesso. O estudo visou contribuir de forma ampla na sua inserção dentro do cenário da construção civil, gerando debates acerca dos novos materiais e novas técnicas de construção com foco no desempenho térmico das edificações.

Sugere-se ampliar os estudos dos blocos de concreto a partir da realização de novos experimentos com maior número de amostras, inclusive utilizando na parte externa da amostra

texturas acrílicas e revestimentos cerâmicos com diferente tonalidade, como por exemplos, fachada cerâmica na cor branca, preta, cinza e azul. Além disso, sugere-se que, novos estudos sejam realizados com utilização de câmaras térmicas utilizando termopares entre cada camada de revestimento adicionado na parede. Por fim, novos trabalhos podem avançar em diferentes configurações de vedações verticais visando o melhoramento das propriedades térmicas das edificações.

6. REFERÊNCIAS

- _____. **NBR 6136:** Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- _____. **NBR 13438:** Bloco de concreto celular maciço - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- _____. **NBR 13440:** Bloco de concreto celular maciço - Métodos de Ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- _____. **NBR 15220:** Desempenho térmico de edificações . Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- _____. **NBR 15575:** Edificações habitacionais – Desempenho . Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- ALLAM, R.; ISSAADI, N.; BELARBI R.; EL-MELIGY, M.; ALTAHRANY, A. Hygrothermal behavior for a clay brick wall. **Heat and Mass Transfer**. Berlim- Alemanha, v.49, n. 9, p. 4 -16, setembro 2018.
- BALTAR, C. A. M., BASTOS, F. F. E BORGES, L. E. P. **Variedades mineralógicas e processos utilizados na produção dos diferentes tipos de gesso**, in: XX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, p.769-776. 2004.
- BATISTA, P. I. B. **Parâmetros de desempenho térmico de blocos de gesso**. Dissertação de Mestrado – Universidade de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife – PE, p. 122. 2019.
- BIGOLIN, M. V. Estudo de caso: **Análise de Eficiência Energética em edificações através do método prescritivo**. Monografia – Universidade do Vale do Taquari. Lajeado – RS, p. 5. 2019.
- BERNDT SHIN, H. Os Desafios da Norma de Desempenho no Mercado da Construção Civil. **Gestão e Gerenciamento**, Rio de Janeiro, n.4, p. 1- 4, setembro 2016.
- BRUGNERA, R. R.; MATEUS, R.; ROSSIGNOLO, J. A.; CHVATAL, K.M.S. Open-plan offices: the impact of different facade solutions on energy efficiency. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v.19, n. 1, p. 295-315, julho 2019.
- BAGAVATHIAPPANB, S.; LAHIRIT, B.B.; SARAVANAN, T.; PHILIP J.; JAYAKUMAR , Infrared thermography for condition monitoring – **Elsevier**, Amsterdã– Holanda, v. 60, n. 1, p. 35-55, setembro 2013.
- COMITTI, A. Engenharia de manutenção: Uso da Termografia. **Saber Eletrônica**, São Paulo, v. 47,n. 459, p. 37-48, junho 2012.
- DANIESLKI, I.; FRÖLING, M. Diagnosis of buildings’ thermal performance: a quantitative method using thermography under non-steady state heat flow. **Energy Procedia**. London, UK. v. 83, n. e11055, p. 320 - 329, outubro 2015.

FERREIRA, C. C.; SOUSA, H.A.; ASSIS, E.S. Discussão dos limites das propriedades térmicas dos fechamentos opacos segundo as normas de desempenho térmico brasileiras. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v.17, n. 1, p. 183-200, março 2017.

FONSECA, L. P. G.; NUNES, V. D. L.; SANTANA, L. O.; CARLO, J.C. Otimização multiobjetivo das dimensões dos ambientes de uma residência unifamiliar baseada em simulação energética e estrutura. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v.17, n. 1, p. 267-287, março 2017.

INCROPERA, F.P, DEWITT, D.P. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**, 4ª edição, Guanabara Koogan, Rio de Janeiro-RJ, 2008.

JUNIOR, RUI H. S. **Análise computacional do conforto térmico em unidades habitacionais do programa casa popular do governo brasileiro: proposta de melhorias aplicáveis às edificações**. Dissertação de Mestrado – Universidade de UNIVILLE, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos. Joinville – PE, p. 110. 2019.

KUBA, J.C, A.J BOGO, AND M. VIEIRA. Avaliação Funcional e de Conforto Térmico em Edifícios Verticais em Blumenau SC. **Holos**, Natal, v. 3, n. e11055, p. 1-19, outubro 2020. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/11055/pdf>. Acesso em: 15 out. 2021.

LILGE, DANIELA SILVA, CLOVIS ROBERTO HASELEIN, AND ELIO JOSE SANTINI. Avaliação do desempenho de painéis cimento-madeira fabricados com duas espécies florestais em combinação com casca de arroz. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 31, n. 1, p. 20-42, janeiro 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/10859/pdf>. Acesso em: 17 nov. 2021.

LAKATOS, A. Investigation of the moisture induced degradation of the thermal properties of aerogel blankets: Measurements, calculations, simulations. **Energy and Buildings**. N. 139. 506 – 516 p. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.01.054. 2017.

LAMBERTS, R.; DUARTE, V. C. P. **Desempenho térmico de edificações**. Apostila de disciplina – Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil. Florianópolis – SC. 2016.

MARTINS, G. H. A.; MILAGRES, M. V.; ROSA, D. G. M. Alvenaria estrutural: análise sobre a empregabilidade de blocos de concreto celular maciços. **Petra**, Belo Horizonte, v.4, n. 2, p. 154 - 173, agosto 2019.

MARQUES, D. F. P. C. **Avaliação da qualidade térmica da envolvente de edifícios – Estudo de caso através da análise numérica e por termografia infravermelha**. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa. Porto – Portugal, p. 131. 2014.

MEOLA, C. Origin and theory of infrared thermography. In: C. Meola (ED). **Infrared thermography: recent advances and future trends**. Bentham eBooks. Sharjah. p. 3–28. 2012.

OLIVEIRA, R. D; SOUZA, R.V.G; SILVA, R. M. **Desempenho Térmico: qual valor devemos atender para a legislação brasileira.** Anais VII ENCAC – encontro nacional de conforto no ambiente construído. Brasília-DF. 2018.

OTTELÉA, M; PERINIB, K. Comparative experimental approach to investigate the thermal behaviour of vertical greened façades of buildings. **Ecological Engineering.** Amsterdã– Holanda, v.108, p. 152-161, novembro 2017.

PACHLA, E; SILVA, D.; JUCÁ, P.; CHONG, W; MARANGON, E. Desempenho térmico-acústico-mecânico de um compósito de matriz cimentícia leve reforçado com casca de arroz. **Matéria**, Rio de Janeiro, v.24, n. 2, outubro 2019.

PEREIRA, B. M. S. **A eficiência energética em edifícios: análise comparativa da regulamentação aplicável na península Ibérica.** Dissertação de Mestrado – Instituto Politécnico de Viana do Castelo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e do Ambiente. Viana do Castelo – Portugal, p. 127. 2014.

PERES, L.; BENACHOUR, M.; SANTOS, V. A. **O Gesso: produção e utilização na construção civil.** Bagaço, Recife-PE, 2001.

PERES, L.; BENACHOUR, M.; SANTOS, V. A. **Gesso: Produção e utilização na construção civil.** Sebrae, Recife-PE, 2008.

PIRES SOBRINHO, C. W. A., BEZERRA, N. M., Costa, T. C. T. e Silva, C. B. A. **Divisórias internas de edifícios em alvenaria de blocos de gesso**, in: Congresso Internacional De Tecnologia Aplicada Para A Arquitetura E Engenharia Sustentáveis, 2, p. 1 – 12. 2010.

ROMEIRO, N. A. S. **Melhoria do desempenho térmico dos edifícios de habitação no brasil: análise comparativa dos requisitos regulamentares Brasileiros e Portugueses.** Dissertação de Mestrado – Universidade de Coimbra. Porto – Portugal, p. 15. 2019.

SANTOS, C. F.; ROCHA, J.H.A.; PÓVOAS, Y.V. Utilização da termografia infravermelha para detecção de focos de umidade em paredes internas de edificações. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v.19, n. 1, p. 105-127, novembro 2019.

SILVA, A. S.; ALMEIDA, L.S.S.; GHISI, E. Análise de incertezas físicas em simulação computacional de edificações residenciais. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v.17, n. 1, p. 289-303, março 2017.

SIQUEIRA, T. C. P. A; AKUTSU, M.; LOPES, J.I.E.; SOUZA,H.A. Dados climáticos para avaliação de desempenho térmico de edificações. **Escola de Minas.** Ouro Preto, v.58, n. 2, p. 133-138, junho 2005.

SILVA, A. J.; VIÉGAS, D.J.A.; PÓVOAS, Y.V. **O uso da termografia infravermelha para detecção de manifestações patológicas.** Anais XVI encontro nacional de tecnologia do ambiente construído. São Paulo -SP. 2016.

SILVA, E. P.; MELO, A. B.; QUEIROGA, A. B. R. E. **Desempenho térmico de vedações: estudo comparativo com blocos de eva, tijolo cerâmico e gesso acartonado**. Anais VII ENCAC – encontro nacional de conforto no ambiente construído. Brasília-DF. 2013.

SOUZA, Carlos Roberto Nunes de. **Estudo da condutividade térmica do gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$) em função de sua porosidade**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Vale do São Francisco. Juazeiro/BA, p. 89. 2015.

SPECHT, L. P.; BORGES, P. A. P.; RUPP, R. F.; VARNIER, R. Análise da transferência de calor em paredes compostas por diferentes materiais. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v.10, n. 4, p. 7-18, outubro 2010.

VIÉGAS, D. J. A. **Utilização de termografia infravermelha em fachadas para verificação de descolamento de revestimentos**. Dissertação de Mestrado – Universidade de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife – PE, p. 164. 2015.

VIÉGAS, D. J. A.; PÓVOAS, Y. V. Uso de análise termográfica para detecção de manifestações patológicas na construção civil. **Construir Nordeste**, Recife, v. 77, n. 16, p. 33, maio 2015.

WESTPHAL, F.S.; MEUSEL, M.V. **Impacto do vidro no conforto térmico de usuários e no consumo de energia em ambientes típicos de escritórios**. Anais IV seminário nacional de construções sustentáveis. Passos Fundos-RS. 2015.

WITZKE, F. B. Análise técnico-econômica dos blocos de concreto celular maciço na alvenaria de vedação. **Engenharia de Construção Civil**, Curitiba, v. 3, n. 2, p. 20-33, julho 2015.