



**UNIVERSIDADE  
DO ESTADO DE MINAS GERAIS**



**ESCOLA DE DESIGN**

Programa de Pós-graduação em Design (PPGD)  
MESTRADO EM DESIGN

**PAULA GLÓRIA BARBOSA**

**UMA CONTRIBUIÇÃO PARA O DESIGN DO CONFORTO:  
AVALIAÇÃO DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA DE BLOCOS  
CERÂMICOS E DE CONCRETO UTILIZANDO  
TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA**

**Belo Horizonte  
2014**



UNIVERSIDADE  
DO ESTADO DE MINAS GERAIS



ESCOLA DE DESIGN

Programa de Pós-graduação em Design (PPGD)  
MESTRADO EM DESIGN

**PAULA GLÓRIA BARBOSA**

**UMA CONTRIBUIÇÃO PARA O DESIGN DO CONFORTO:  
AVALIAÇÃO DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA DE BLOCOS  
CERÂMICOS E DE CONCRETO UTILIZANDO  
TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Design da Universidade do Estado de Minas Gerais - UEMG como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Design, na linha de pesquisa Design, Materiais, Tecnologia e Processos.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Rosemary do Bom Conselho Sales, Dr<sup>ª</sup>  
(UEMG)

Coorientadora: Prof<sup>ª</sup>. Maria Teresa Paulino Aguilár, Dr<sup>ª</sup>  
(UFMG)

**Belo Horizonte  
2014**

B238c Barbosa, Paula Glória.

Uma contribuição para o design do conforto : avaliação da difusividade térmica de blocos cerâmicos e de concreto utilizando a termografia infravermelha [manuscrito] / Paula Glória Barbosa. - 2014.

137 f. il. color. grafs. tabs. fots. ; 31 cm.

Orientadora: Rosemary Bom Conselho Sales

Coorientadora: Maria Tereza Paulino Aguiar

Dissertação (mestrado) – Universidade do Estado de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Design.

Bibliografia: f. 129-137

1. Desenho (Projeto) – Conforto humano - Meio Ambiente - Teses. 2. Blocos (Materiais de construção) – Conforto Humano - Teses. 3. Blocos de concreto – Sentidos e sensações - Teses. 4. Termografia – Materiais de construção - Teses. I. Sales, Rosemary Bom Conselho. II. Aguiar, Maria Tereza Paulino. III. Universidade do Estado de Minas Gerais. Escola de Design. III. Título.

CDU: 624:536

Ficha Catalográfica: Cileia Gomes Faleiro Ferreira CRB 236/6

Programa de Pós-graduação em Design (PPGD)  
MESTRADO EM DESIGN

**UMA CONTRIBUIÇÃO PARA O DESIGN DO CONFORTO: AVALIAÇÃO DA  
DIFUSIVIDADE TÉRMICA DE BLOCOS CERÂMICOS E DE CONCRETO  
UTILIZANDO TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA**

Autora: Paula Glória Barbosa

Esta dissertação foi julgada e aprovada em sua forma final para a obtenção do título de Mestre em Design no Programa de Pós-Graduação em Design da Universidade do Estado de Minas Gerais.

Belo Horizonte, 23 de julho de 2014.

 *Sebastiana Lana*  
Coordenação do Mestrado em Design  
MASP: 1034263-2  
Escola de Design / UEMG

Profª Sebastiana Luiza Bragança Lana, PhD.  
Coordenadora do PPGD

BANCA EXAMINADORA



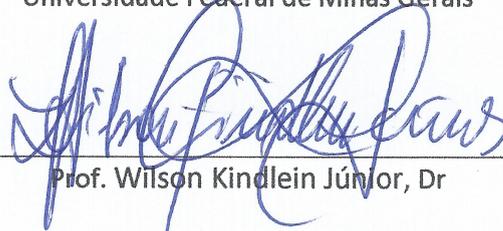
Profª. Rosemary Bom Conselho Sales, Drª.  
Orientadora  
Universidade do Estado de Minas Gerais



Profª. Maria Teresa Paulino Aguilar, Drª.  
Coorientadora  
Universidade Federal de Minas Gerais



Prof. Roberto Márcio de Andrade, Dr.  
Universidade Federal de Minas Gerais



Prof. Wilson Kindlein Júnior, Dr  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul



Prof. Carlos Alberto Silva de Miranda, Dr.  
Universidade do Estado de Minas Gerais

*Aos meus avós. Aos meus pais. Às minhas irmãs. Ao Henrique.*

## AGRADECIMENTOS

À minha carinhosa e dedicada mãe, por me dar a vida e por ser meu exemplo de mulher forte, humana, perseverante e amável, capaz de modificar pessoas e contribuir para um mundo melhor. Obrigada por me ensinar a ter fé!

Ao meu carinhoso e dedicado pai, de uma inteligência rara, por ser meu exemplo de homem trabalhador, humano, responsável e persistente. Sem você esta pesquisa não seria possível. Sem as suas habilidades manuais e os seus conhecimentos eu não teria a tranquilidade e o prazer de concluir este trabalho. Obrigada pela maravilhosa parceria.

Ao Henrique, meu mais lindo amor, por ser o meu companheiro de todas as horas, por estar sempre disponível a me ouvir, por ser o meu conselheiro, amigo, confidente, revisor, tradutor e, principalmente, por ser a melhor parte da minha vida.

À doce Maria Eugênia, pelos almoços de domingo, pelo filho maravilhoso, pela revisão do trabalho e por me ajudar, com uma encantadora empolgação, a conhecer a termodinâmica de uma forma leve e prazerosa.

Às amigas Mara Penna e Samantha Cidaley, pela essencial ajuda com o projeto de pesquisa, por serem meus ícones do design e pelo apoio e carinho diários.

Às minhas queridas orientadoras, pela dedicação e pela oportunidade de dividir este trabalho. Rose, obrigada por me apresentar ao diálogo entre o design e a engenharia e por me mostrar que sou capaz. Maria Teresa, obrigada por me ensinar o que é ciência e por ser meu grande exemplo de educadora.

Ao professor Roberto Márcio, por me apresentar ao LabTerm e por disponibilizar toda a sua estrutura à realização da pesquisa. Obrigada por contribuir de uma forma excepcional com o trabalho e por me desafiar com a engenharia a cada encontro.

Aos colegas do LabTerm, Cris, Selson, Flávio, Bené e Willian, por me receberem de braços abertos e por estarem sempre dispostos a me ajudar a descobrir o fascinante mundo da termografia. Em especial, aos amigos Caroline Rodrigues e Rafael Ferreira, pelo apoio incondicional e pela ajuda essencial ao desenvolvimento deste trabalho.

Às amigas que fiz com o mestrado, Ana, Akemi, Aline, Najla e Claudia, pela força do dia a dia, pelos momentos de descontração e pelas reflexões sobre "o que é ser designer".

À Escola de Design, por possibilitar a minha formação. Aos professores do PPGD, pelo conhecimento dividido e por ampliar o meu olhar de pesquisadora e de designer. Em especial, ao Rodrigo Stenner, pela presteza e pelo suporte de todos os dias.

À Deus, pelas graças que abençoam a minha vida, por permitir que tudo isso fosse possível e por dar sentido às coisas deste mundo.

*Se podes olhar, vê. Se podes ver, repara.*

(SARAMAGO, 1995)

## RESUMO

O conforto térmico do ambiente construído é um tema comumente discutido no design, na arquitetura e na engenharia, áreas do conhecimento diretamente relacionadas com planejamento, com o projeto, com a construção e com a manutenção das habitações. No que se refere à sustentabilidade ambiental, o aludido tema é constantemente relacionado com os elevados índices de consumo de energia elétrica decorrentes do uso de sistemas de condicionamento artificial de ar para se alcançar o conforto térmico desejado. Esse consumo, por sua vez, é consequência, principalmente, da inadequação dos elementos arquitetônicos aos aspectos climáticos locais e às demandas de conforto humano. A determinação das propriedades térmicas de materiais construtivos é, portanto, um relevante campo de estudo. Em análises de problemas que envolvam regime não estacionário, como nos processos de trocas térmicas que ocorrem no envelope construtivo, a difusividade térmica é uma importante propriedade a ser considerada, pois mede a capacidade de condução de calor de um material em relação à sua capacidade de armazenamento de energia térmica. Nesse contexto, este trabalho propõe um método teórico-experimental para avaliação da difusividade térmica de blocos maciços cerâmicos e blocos vazados de cerâmica e de concreto, usualmente utilizados para a conformação de alvenarias no Brasil. O método considera a condução transiente unidimensional e utiliza a termografia infravermelha para monitoramento de temperaturas e o modelo matemático para sólido semi-infinito na análise dos dados. Os resultados indicam a pertinência do uso da termografia, aliada ao mencionado modelo matemático, na avaliação da difusividade térmica de componentes planos, especialmente os construtivos, cujos valores não são facilmente obtidos na literatura. Para o design do conforto, esta pesquisa contribui com o repertório teórico, fundamentando escolhas e possibilitando vislumbrar novos estudos referentes ao design de materiais, de tecnologias e de processos construtivos com foco no conforto térmico de edificações. Ademais, este estudo pode contribuir para incitar o diálogo entre o design e a engenharia e entre o design e a arquitetura, munindo o designer de conhecimentos que lhe possibilitem trabalhar em uma equipe multidisciplinar e, sobretudo, que lhe deem subsídio para o planejamento e a projeção do conforto ambiental para além das questões simbólicas e estéticas, evidenciando a importância dos aspectos técnico-práticos que permeiam a temática.

Palavras-chave: Design do conforto. Conforto térmico. Ambiente construído. Blocos cerâmicos. Blocos de concreto. Difusividade térmica. Termografia infravermelha.

## **ABSTRACT**

*The thermal comfort of the built environment is a theme usually discussed in design, in architecture and in engineering, knowledge areas directly related to planning, to projecting, to building and to the housing maintenance. Concerning environmental sustainability, the above-mentioned theme is constantly related to the high rates of electrical energy which results from the use of artificial conditioning systems to achieve the desired thermal comfort. This consumption, in turn, is consequence, mainly, of the inappropriateness of the architectonic elements to the local climatic aspects and to the human's comfort demands. The determination of the thermal properties of the constructive materials is, therefore, a relevant field of study. In analysis of problems that involved a non-stationary regime, as in the process of thermal exchanges that take place in the building envelope, the thermal diffusivity is an important property to be considered because it measures the thermal conductivity of a material related to its capacity of storing thermal energy. In this context, this dissertation proposes an experimental and theoretical method to evaluate the thermal diffusivity of solid clay blocks, hollow clay blocks and hollow concrete blocks, usually used to conform masonries in Brazil. The method considers the one-dimensional transient conduction and uses the infrared thermography to monitor temperatures and the mathematical model to semi-infinite solid in the data analysis. The results indicate the pertinence of the use of the infrared thermography allied with the above-mentioned mathematical model to evaluate the thermal diffusivity of flat components, especially the building ones, the values of which are not easily obtained in the literature. To the comfort design, this research contributes to the theoretical repertoire, being the fundament of choices and making it possible to envisage new studies that refer to the design of materials, technologies and building process focused on the thermal comfort of the construction. Besides, this study can contribute to incite the dialogue between design and engineering and between design and architecture, providing the designers with knowledge that allows them to work in a multidisciplinary team and, above all, giving them foundation to plan and to project the environmental comfort more than the aesthetic and symbolic questions, showing the importance of the technical and practical aspects involved in this subject matter.*

*Keywords: Comfort design. Thermal comfort. Built environment. Clay blocks. Concrete blocks. Thermal diffusivity. Infrared thermography.*

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	17
2	OBJETIVO .....	21
3	REVISÃO DE LITERATURA.....	22
3.1	Design com foco no conforto.....	22
3.1.1	Considerações sobre design .....	22
3.1.2	Design do conforto.....	25
3.2	Conforto térmico do ambiente construído .....	27
3.2.1	Trocas térmicas .....	28
3.2.1.1	Condução .....	29
3.2.1.1.1	Condução unidimensional em regime permanente .....	29
3.2.1.1.2	Condução unidimensional em regime transiente .....	33
3.2.1.2	Convecção.....	38
3.2.1.3	Radiação.....	39
3.2.2	Fatores que influenciam o conforto térmico do ambiente construído.....	41
3.2.3	Conforto térmico e eficiência energética .....	49
3.2.4	Considerações sobre blocos cerâmicos e de concreto .....	51
3.3	Termografia aplicada ao conforto térmico do ambiente construído .....	56
3.3.1	Considerações sobre a termografia infravermelha.....	56
3.3.2	Aplicações da termografia infravermelha ao estudo do conforto térmico do ambiente construído .....	61
3.3.3	Incertezas associadas à medição indireta de temperatura por termografia .....	66
4	MATERIAIS E MÉTODOS .....	72
4.1	Materiais .....	73
4.2	Métodos .....	74
4.2.1	Proposição do método teórico-experimental .....	74

4.2.1.1	Cálculo do fluxo de calor.....	76
4.2.1.2	Cálculo da condutividade térmica equivalente dos blocos vazados .....	78
4.2.2	Validação do método teórico-experimental e análise de incertezas .....	79
4.2.2.1	Primeiro ensaio para validação do método teórico-experimental.....	80
4.2.2.2	Segundo ensaio para validação do método teórico-experimental.....	87
4.2.2.3	Análise de incertezas .....	92
4.2.3	Aplicação do método teórico-experimental no estudo da difusividade térmica de blocos vazados.....	96
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	99
5.1	Ensaio para validação do método teórico-experimental.....	99
5.1.1	Primeiro ensaio para validação do método .....	100
5.1.2	Segundo ensaio para validação do método .....	105
5.2	Análises de incertezas .....	109
5.2.1	Análise da incerteza da temperatura .....	109
5.2.2	Análise da incerteza da difusividade.....	111
5.3	Avaliação da difusividade térmica de blocos vazados.....	113
6	CONCLUSÕES .....	128
7	REFERÊNCIAS.....	130

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Uma possibilidade de relação entre design e conforto ambiental. ....	26
Figura 2 – Transferência de calor unidimensional por condução em uma parede plana.....	31
Figura 3 – Resistência térmica de uma parede em analogia a um circuito elétrico.....	32
Figura 4 – Exemplificação da distribuição de um componente plano em seções. ....	33
Figura 5 – Distribuições de temperatura transiente em um sólido semi-infinito para três condições de superfície.....	36
Figura 6 – Comportamento do vidro em relação à radiação solar.....	47
Figura 7 – Diagrama simplificado de uma câmera infravermelha. ....	57
Figura 8 – Imagens térmicas da fachada de um edifício e de um braço humano.....	58
Figura 9 – Configuração básica de um termovisor.....	59
Figura 10 – Medição indireta de temperatura por termografia.....	69
Figura 11 – Esquema de uso do IMT. ....	71
Figura 12 – Etapas da pesquisa.....	73
Figura 13 – Blocos maciços cerâmicos. ....	73
Figura 14 – Blocos vazados cerâmicos e de concreto. ....	74
Figura 15 – Esquema da proposta do método teórico-experimental. ....	75
Figura 16 – Caixa de diálogo do EES com relação matemática para determinação do fator de forma. ....	77
Figura 17 – Bancada de testes existente no LabTerm. ....	80
Figura 18 – Dispositivos de medição utilizados no primeiro ensaio.....	81
Figura 19 – Esquema da montagem do primeiro ensaio da segunda etapa. ....	83
Figura 20 – Fixação das hastes do termopar nas superfícies externa e interna do bloco. ....	83
Figura 21 – Montagem do primeiro ensaio da segunda etapa. ....	84
Figura 22 – Termocâmera posicionada de frente à bancada de testes.....	84
Figura 23 – Interface do <i>QuickReport</i> em análise da área superficial do bloco.....	85

Figura 24 – Interface do ESS preparado para receber os dados experimentais.....	86
Figura 25 – Interface do ESS com a tabela função erro de Gauss.....	86
Figura 26 – Túnel térmico: nova bancada experimental. ....	88
Figura 27 – Vistas frontal e posterior do túnel térmico.....	88
Figura 28 – Incorporação de trincos ao túnel térmico. ....	89
Figura 29 – Estrutura para suporte e vedação do bloco maciço cerâmico. ....	90
Figura 30 – Inserção do bloco maciço cerâmico no túnel térmico.....	91
Figura 31 – Posição da termocâmara em relação ao túnel térmico. ....	91
Figura 32 – Fixação de fita crepe no centro do bloco para determinação da incerteza da emissividade. ....	94
Figura 33 – Interface do software <i>QuickReport</i> , utilizado na determinação da incerteza da emissividade. ....	94
Figura 34 – Preparação dos ensaios da terceira etapa. ....	97
Figura 35 – Posicionamento do termovisor.....	98
Figura 36 – Variação de temperatura das superfícies interna e externa do bloco maciço cerâmico, registrada pelo termopar. ....	101
Figura 37 – Situação da fixação da haste na superfície interna após o primeiro ensaio da segunda etapa.....	101
Figura 38 – Variação da temperatura da superfície externa do bloco maciço cerâmico, observada pelo termopar.....	102
Figura 39 – Análise do comportamento do bloco maciço cerâmico como um sólido semi-infinito. ....	102
Figura 40 – Comportamento da temperatura média da superfície externa do bloco maciço cerâmico, via análise dos termogramas. ....	103
Figura 41 – Comportamento da difusividade térmica do bloco maciço cerâmico ao longo do tempo (primeiro ensaio). ....	104
Figura 42 – Termogramas do segundo ensaio com bloco maciço cerâmico da segunda etapa.....	106

Figura 43 – Variação da temperatura do bloco maciço cerâmico verificada por termografia. ....	107
Figura 44 – Interface do EES com dados de entrada para o cálculo da difusividade térmica do bloco maciço cerâmico. ....	108
Figura 45 – Comportamento da difusividade térmica do bloco maciço cerâmico ao longo do tempo (segundo ensaio). ....	108
Figura 46 – Interface do IMT para o cálculo de incerteza para o ponto (331,249) do 15° termograma do segundo ensaio com o bloco maciço cerâmico. ....	110
Figura 47 – Variação da temperatura ao longo do tempo e respectiva faixa de incerteza. ....	110
Figura 48 – Caixa de diálogo do EES com os dados de entrada necessários ao cálculo da incerteza da difusividade térmica do bloco maciço cerâmico. ....	111
Figura 49 – Variação da difusividade térmica ao longo do tempo e respectiva faixa de incerteza. ....	113
Figura 50 – Termogramas dos ensaios dos blocos cerâmicos durante a terceira etapa. ....	115
Figura 51 – Termogramas dos ensaios dos blocos de concreto durante a terceira etapa. ....	116
Figura 52 – Variação da temperatura dos blocos vazados cerâmicos medida por termografia ao longo do tempo. ....	117
Figura 53 – Variação da temperatura dos blocos vazados de concreto medida por termografia ao longo do tempo. ....	118
Figura 54 – Variação da temperatura medida por termografia em função do tempo: blocos com 9cm de espessura. ....	118
Figura 55 – Variação da temperatura medida por termografia em função do tempo: blocos com 14cm de espessura. ....	119
Figura 56 – Variação da temperatura medida por termografia em função do tempo: blocos com 19cm de espessura. ....	119
Figura 55 – Dimensões consideradas dos blocos de concreto. ....	120
Figura 56 – Dimensões consideradas dos blocos cerâmicos. ....	121
Figura 57 – Cálculo da condutividade térmica equivalente do bloco de concreto de 9cm. ...	122
Figura 60 – Comportamento da difusividade térmica do bloco cerâmico vazado de 9cm. ....	124

Figura 61 – Comportamento da difusividade térmica do bloco cerâmico vazado de 14cm. ....	124
Figura 62 – Comportamento da difusividade térmica do bloco cerâmico vazado de 19cm. ....	124
Figura 63 – Comportamento da difusividade térmica do bloco de concreto vazado de 9cm. ....	125
Figura 64 – Comportamento da difusividade térmica do bloco de concreto vazado de 14cm. ....	125
Figura 65– Comportamento da difusividade térmica do bloco de concreto vazado de 19cm. ....	126
Figura 66 – Difusividade térmica em função do tempo dos blocos cerâmicos de 9cm, 14cm e 19cm.....	127
Figura 67 – Difusividade térmica em função do tempo dos blocos cerâmicos de 9cm, 14cm e 19cm.....	127

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de condutividade térmica para o ar, a cerâmica e o concreto. ....	78
Tabela 2 – Fases do primeiro ensaio para validação do método. ....	82
Tabela 3 – Fases do segundo ensaio para validação do método.....	90
Tabela 4 – Fases da análise de incertezas do segundo ensaio. ....	93
Tabela 5 – Fases da aplicação do método-teórico experimental. ....	96
Tabela 6 – Valores teóricos para a difusividade térmica do bloco maciço cerâmico.....	99
Tabela 7 – Parâmetros de entrada da termocâmara para o primeiro ensaio. ....	100
Tabela 8 – Parâmetros de entrada da termocâmara para o segundo ensaio.....	105
Tabela 9 – Variação da difusividade térmica do bloco maciço cerâmico ao longo do tempo e respectivos valores de incerteza.....	112
Tabela 10 – Temperatura ambiente e umidade relativa do ar para os ensaios da terceira etapa.....	113
Tabela 11 – Duração e variação de temperatura de cada ensaio da terceira etapa. ....	114
Tabela 12 – Valores para resistência térmica total e condutividade térmica equivalente das amostras.....	122
Tabela 13 – Valores para as constantes do modelo matemático para sólido semi-infinito....	123
Tabela 14 – Últimos valores de difusividade térmica encontrados para cada uma das amostras.....	126

## SÍMBOLOS

A	Área, m <sup>2</sup>
c <sub>p</sub>	Calor específico a pressão constante, J/kg.K
d	Distância, m
E	Poder emissivo
e	Espessura do bloco, m; espessura da camada, m
F <sub>ij</sub>	Fator de forma
G	Radiação absorvida
h <sub>c</sub>	Coefficiente de transferência de calor por convecção, W/m <sup>2</sup> .K
h <sub>r</sub>	Coefficiente de transferência de calor por radiação, W/m <sup>2</sup> .K
k	Condutividade térmica, W/m.K
L	Comprimento característico, m
Pot	Potência, W
q	Taxa de transferência de calor, W
q''	Fluxo de calor, W/m <sup>2</sup>
R	Resistência térmica, m <sup>2</sup> .K/W
R <sub>t</sub>	Resistência térmica total (ou equivalente), m <sup>2</sup> .K/W
S	Sinal da termocâmara
T	Temperatura, °C ou K
T <sub>e</sub>	Temperatura da superfície externa, °C ou K
T <sub>i</sub>	Temperatura da superfície interna, °C ou K
t	Tempo, s
U	Incerteza-expandida
u	Incerteza-padrão
u <sub>c</sub>	Incerteza-combinada
x, y, z	Coordenadas retangulares, m
α	Difusividade térmica, m <sup>2</sup> /s; absorptância
ε	Emissividade
λ	Comprimento de onda, m
ρ	Massa específica, kg/m <sup>3</sup> ; refletância
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
τ	Transmitância

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil, devido à sua grande extensão territorial com diferenças de relevo, altitude e dinâmica das massas de ar e das correntes marítimas, possui ampla diversidade climática. Entretanto, verifica-se, na construção civil, a predominância de certas tipologias construtivas independentemente das condições climáticas locais, privilegiando-se, muitas vezes, aspectos como a estética, exemplificado pelas cortinas de vidro de edifícios empresariais, e o menor custo, principalmente nas construções de interesse social. Em consequência, são utilizados sistemas artificiais de climatização para se alcançar o conforto térmico desejado, culminando em elevados índices de consumo de energia elétrica em todo o país.

Segundo o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável – CBCS –, a operação dos edifícios brasileiros é responsável por aproximadamente 50% do consumo total de energia elétrica do país (CBCS, 2013). Conforme o Balanço Energético Nacional, que tem como ano base o de 2011, 14% da energia consumida no Brasil, o que inclui as fontes renováveis e não renováveis, é destinada ao uso de edificações residenciais e de serviços (BRASIL, 2012). É interessante destacar que, segundo a mesma fonte, a eletricidade corresponde a 87,4% da energia total consumida pelo setor público brasileiro, 89,4% da consumida pelo setor comercial e 41,7% da consumida pelo setor residencial. Ademais, apontam Bribián *et al.* (2011) que a construção civil consome aproximadamente 2/3 da eletricidade mundial, além de ser responsável pela emissão de metade dos gases de efeito estufa, pelo despejo de grande parte das águas residuais e pela grande geração de resíduos. Conclui-se, pois, que a construção civil é um setor promissor para a aplicação de medidas de menor impacto ambiental (CALKINS, 2009; CBCS, 2007).

As edificações elaboradas com a consciência do seu poder de minimizar em grande escala os desconfortos térmicos provocados pelo clima evitam, por conseguinte, o uso excessivo de sistemas de condicionamento artificial de ar, tanto para refrigeração quanto para aquecimento. Somente com a adoção de práticas sustentáveis de conservação e uso racional no setor da construção civil é possível reduzir, segundo a CBCS (2007), entre 30% e 40% o seu consumo de energia elétrica.

Para que isso efetivamente ocorra, faz-se necessário, notadamente, conferir maior atenção ao planejamento e ao projeto dos ambientes construídos (CBCS, 2007; GONZÁLES CRUZ, 2003; LAMBERTS *et al.*, 1997). Nesse processo, áreas do conhecimento como o design, a arquitetura e a engenharia apresentam-se como de extrema relevância, uma vez que tais

atividades são responsáveis pelo planejamento, pela projeção, pela construção e pela manutenção dos ambientes em que o homem passa grande parte de sua vida (AKUTSU; SATO; PEDROSO, 1987; FROTA; SCHIFFER, 2007).

O design do conforto, em especial, é aqui entendido como uma especialidade do design destinada a compreender as demandas humanas físicas e psicológicas de conforto, bem como os seus fatores influenciadores, com o objetivo de planejar soluções nos âmbitos dos espaços, dos objetos, dos produtos de vestuário, das comunicações, dos serviços, entre outros, que satisfaçam os anseios dos usuários, proporcionando-lhes maior qualidade de vida e bem-estar. Ao focar a atenção no ambiente construído, o design do conforto trata do estudo do conforto ambiental, fortemente influenciado pelas suas condições térmicas.

As etapas de planejamento e de projeção de uma edificação são postas como relevantes por serem o momento no qual as informações sobre as características climáticas locais, as exigências humanas de conforto e os aspectos arquitetônicos podem ser cruzados em prol de uma construção eficiente do ponto de vista energético (FROTA; SHIFFER, 2001; GONZÁLES CRUZ, 2003; LAMBERTS *et al.*, 1997).

Nesse cenário, os materiais construtivos se apresentam como um interessante campo de pesquisa no que diz respeito ao seu comportamento térmico e à sua contribuição para o conforto no interior da edificação. Pesquisas que avaliam e caracterizam os materiais de construção segundo critérios ambientais analisam, de modo geral, os impactos nas fases de extração e produção do material, desconsiderando, muitas vezes, o desempenho térmico dos mesmos na etapa de uso da edificação. Em longo prazo, a utilização de sistemas de condicionamento artificial de ar, decorrente da busca por um conforto térmico adequado, acarreta prejuízos para o meio ambiente e para a qualidade da habitação, evidenciando o quão relevantes se fazem pesquisas que analisem o comportamento térmico dos materiais durante a sua fase útil.

Normas de desempenho térmico existem desde os anos 1970 para definir parâmetros e requisitos que garantam construções baseadas em características climáticas locais e desempenho térmico mínimo adequado à sua ocupação com conforto. A norma brasileira NBR 15220-3 (ABNT, 2005) apresenta uma categorização em oito zonas bioclimáticas para os climas de 330 cidades do país e sugere diretrizes construtivas para cada uma dessas zonas. Para as vedações externas, o que inclui as paredes externas e as coberturas, a referida norma propõe que sejam avaliadas três propriedades térmicas para especificação adequada dos

materiais às diretrizes construtivas pertinentes à zona bioclimática em questão: a transmitância térmica, o atraso térmico e o fator de ganho de calor solar.

Acredita-se, entretanto, que a difusividade térmica também seja uma relevante propriedade térmica associada à caracterização de um material construtivo. Essa afirmação se justifica pelo fato de as propriedades térmicas acima citadas tomarem como base regimes permanentes para análise de suas influências durante o uso do material, ao passo que um envelope construtivo está constantemente submetido a um regime transiente. O estudo da difusividade térmica de um material construtivo permitiria melhor avaliação da sua capacidade de condução de calor em relação à sua capacidade de armazenamento de energia térmica. (GONZÁLEZ CRUZ, 2003).

Neste trabalho, essa temática é abordada a partir da termografia infravermelha, técnica de ensaio não destrutivo de larga aplicação, “que consiste na captura, sem contato físico, da radiação térmica infravermelha emitida pela superfície dos corpos através de um equipamento que transforma a energia térmica em pulsos elétricos que, depois de tratados, são exibidos na forma de uma imagem digital que representa o perfil de temperatura de uma determinada região do espaço” (CALADO, 2013, p.13). A termografia técnica vem sendo empregada para mensurar, avaliar e/ou analisar as características de materiais em uma variedade de investigações que envolvem os fenômenos de transferência de calor. Estudos e aplicações práticas estão sendo direcionados ao trato do conforto térmico do ambiente construído. Na literatura brasileira, porém, os trabalhos ainda são incipientes.

Dentre os materiais mais utilizados na construção civil brasileira para a conformação de estruturas e de vedações das edificações, destacam-se os blocos de cerâmica e os de concreto, acompanhados da argamassa de ligação, sistemas então denominados alvenaria estrutural ou de vedação, respectivamente. Nesse contexto, esta pesquisa propõe um método teórico-experimental para avaliação da difusividade térmica de componentes planos, o que inclui os blocos maciços e os vazados, cujos valores de difusividade não são facilmente obtidos na literatura. O método considera a condução transiente unidimensional e utiliza a termografia infravermelha para monitoramento de temperaturas e o modelamento matemático para sólido semi-infinito na análise dos dados.

Para o design do conforto, esta pesquisa contribui com o seu repertório teórico, fundamentando escolhas e possibilitando vislumbrar novos estudos referentes ao design de materiais, de tecnologias e de processos construtivos com foco no conforto térmico do ambiente construído.

Ademais, este estudo pode contribuir para incitar o diálogo entre o design e a engenharia e entre o design e a arquitetura, munindo o designer de conhecimentos que lhe possibilitem trabalhar em uma equipe multidisciplinar e, sobretudo, que lhe deem subsídio para o planejamento e a projeção do conforto ambiental para além das questões simbólicas e estéticas, evidenciando a importância dos aspectos técnico-práticos que permeiam a temática.

## 2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é avaliar a difusividade térmica de blocos maciços cerâmicos e blocos vazados de cerâmica e de concreto, utilizando termografia infravermelha e modelamento matemático para sólido semi-infinito. Para se atingir o mencionado objetivo, arrolam-se os seguintes objetivos específicos:

- propor um método para avaliar a difusividade térmica de componentes planos, utilizando a termografia infravermelha e o modelamento matemático para sólido semi-infinito;
- projetar e confeccionar um túnel térmico (bancada experimental) a partir das premissas do método proposto, para avaliar a difusividade térmica de componentes planos;
- validar o método teórico-experimental proposto confrontando os resultados obtidos com valores da literatura, utilizando o túnel térmico e blocos maciços cerâmico;
- analisar as incertezas metrológicas associadas ao processo de validação do método proposto, assegurando maior confiabilidade aos resultados experimentais;
- aplicar o método experimental validado para avaliar a difusividade térmica de blocos vazados de cerâmica e de concreto;
- analisar a contribuição da difusividade térmica para o conforto térmico do ambiente construído.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

A revisão de literatura objetiva o aprofundamento no estudo dos conteúdos relevantes ao entendimento do contexto da pesquisa experimental. Este trabalho, por seu caráter multidisciplinar, tem suporte teórico de diferentes áreas do conhecimento, como o design, a arquitetura e a engenharia.

#### 3.1 Design com foco no conforto

Este tópico aborda uma discussão em torno do design e de sua relação com o conforto, apresentando considerações sobre o seu significado como atividade capaz de influenciar o ambiente humano no tocante ao conforto ambiental.

##### 3.1.1 Considerações sobre design

O termo design tem ambiguidade em sua etimologia. *Designare*, do latim, origem mais remota do termo, abrange os sentidos de designar e de desenhar (CARDOSO, 2008; HOUAISS, 2012b; OXFORD, 2010). Segundo Schneider (2010, p.195), em 1588, o termo foi mencionado pela primeira vez no *Oxford English Dictionary*, definido “como um plano elaborado por uma pessoa ou um esquema de algo a ser realizado, além de um primeiro esboço para uma obra de arte (ou) um objeto de arte aplicada, necessário para a realização de uma obra”. Para o Houaiss (2012b), o design era definido, também em 1588, como intenção, propósito, arranjo de elementos ou detalhes num dado padrão artístico.

Hoje, conforme apresentado no *Longman Dictionary of Contemporary English* (2014) e no *Oxford Advanced Learner's Dictionary* (2010), o termo design, como substantivo, designa: (1.) a arte ou o processo de decidir o funcionamento, a aparência, etc. de algo por meio de desenhos (plantas, esboços, diagramas, gráficos, projeto), modelos, etc.; (2.) a forma como algo foi planejado e executado, incluindo sua aparência, funcionamento, etc.; (3.) o arranjo, a organização, a configuração, o padrão de linhas e formas para decorar algo; (4.) o desenho detalhado de como algo será feito ou como se parecerá; e (5.) o plano (intenção) que alguém tem em mente.

Do inglês, a palavra foi apropriada pelo português, mantendo a ideia de: (1.) intenção, projeto, concepção de algo no que se refere à sua forma física e funcionalidade; (2.) produto dessa concepção; e (3.) desenho, representação, forma do ponto de vista estético e utilitário, planta, risco, traçado, representação de objetos executada para fins científicos, técnicos, industriais, ornamentais. (HOUAISS, 2012b).

Nesse sentido, o design, na sua acepção de substantivo que determina uma profissão ou área do conhecimento, pode ser entendido, como apresenta Cardoso (2008), como uma atividade destinada a atribuir forma material a conceitos intelectuais. Moura (2005), em seus estudos, discute o design a partir do significado de desígnio, projeto e desenho, três conceitos que, inter-relacionados, dizem da intenção de levar algo da não presença à presença. Nesse processo, o projeto, visualizado principalmente por desenhos, configura-se como o meio pelo qual é possível levar uma ideia do imaterial ao tangível, possibilitando a concretização da intenção.

O *International Council of Societies of Industrial Design* (Icsid), organização internacional dedicada à discussão e ao reconhecimento do design e de sua comunidade, apresenta uma definição para o termo relacionando-o com algumas das principais temáticas presentes no debate contemporâneo da disciplina, como as novas tecnologias e seus impactos socioculturais e ambientais:

Design é uma atividade criativa cujo o objetivo é estabelecer as qualidades multifacetadas dos objetos, processos, serviços e seus sistemas em seus ciclos de vida completos. Portanto, design é o fator central de inovadora humanização das tecnologias e fator crucial de trocas culturais e econômicas.<sup>1</sup> (ICSID, 2013).

As qualidades multifacetadas dos objetos podem ser entendidas como os aspectos estruturais, funcionais, estéticos, psicológicos, organizacionais, sociais, políticos, econômicos e outros, que compreendem o contexto de projeto, cabendo ao designer o papel de interpretá-los e relacioná-los de forma holística. Essas interpretação e relação são, em suas essências, complexas, exigindo desse profissional uma abordagem criativa e multidisciplinar na busca por soluções pertinentes, viáveis e eficientes às demandas em questão. Ressalta-se, nesse processo, conforme enfatiza Cara (2010), o usuário como centro das atenções do projeto, posta a necessidade de trazer significado e coerência à complexidade instituída.

---

<sup>1</sup> Tradução da autora. Texto original: *Design is a creative activity whose aim is to establish the multi-faceted qualities of objects, processes, services and their systems in whole life cycles. Therefore, design is the central factor of innovative*

Para Schneider (2010), o design, de um modo geral, expressa-se por meio de suas três funções: a prático-técnica, a estética e a simbólica. A primeira, conhecida também como funcional, refere-se às características intrínsecas do objeto, como durabilidade, confiabilidade, qualidade técnica, segurança e manuseabilidade, ou seja, aos aspectos que podem ser avaliados e mensurados de forma racional pela percepção humana. A função estética, ao contrário, é emocional e subjetiva, tratando do aspecto formal do objeto a partir da composição de cores, materiais, formas e superfícies. Essa composição dá ao objeto a conotação de signo, tornando-o “legível” e dando indicações visuais para o seu uso. Por fim, a função simbólica diz respeito ao significado do objeto, codificado e transmitido pelo proprietário às pessoas de seu convívio social. Refere-se, portanto, a estilos e a filosofias de vida. Assim, os objetos identificam personalidades e se configuram como uma forma de expressão decodificável, possibilitando integração social, diferenciações e classificações. Os objetos de design refletem, portanto, formas de vida e de produção de uma sociedade, de uma época. Para o mesmo autor, essas funções seriam definidas levando-se em consideração o contexto social e político do projeto. Entretanto, acredita-se, com base na definição apresentada pelo Icsid (2013), que os contextos cultural e econômico também sejam relevantes ao planejamento das funções expostas por Schneider (2010).

Em complemento, o design é visto por diferentes autores (CARA, 2010; CARDOSO, 2012; KRUCKEN, 2008; MORAES, 2008) como uma atividade destinada a solucionar problemas em diferentes âmbitos da sociedade contemporânea, marcada, principalmente, pelo incentivo à inovação, pela diversidade de materiais e tecnologias, pelo processo de globalização e pela necessidade do consumo sustentável. Aos diferentes âmbitos da sociedade referem-se, em destaque, os lugares do viver humano (design de interiores) e os objetos que os compõem (design de produtos), a informação e a comunicação (design gráfico) e os produtos de vestuário (design de moda), passíveis de planejamento e de projeção de seus aspectos funcionais, estéticos e simbólicos.

Para esses mesmos autores, o designer se posiciona como um profissional habilitado a responder, a partir de uma perspectiva sistêmica de gestão da complexidade<sup>2</sup>, pelo desenvolvimento de projetos centrados nos usuários, sob a perspectiva da abertura à pesquisa, do diálogo interdisciplinar, do apoio à diversidade cultural e da capacidade de articular

---

<sup>2</sup> “Por ‘complexidade’, entende-se aqui um sistema composto de muitos elementos, camadas e estruturas, cujas inter-relações condicionam e redefinem continuamente o funcionamento do todo” (CARDOSO, 2012, p.25).

inovação e sustentabilidade, posicionando-se como uma disciplina capaz de moldar o ambiente humano e influenciar os padrões de vida em sociedade.

Em outros termos, o designer é tido como um profissional tecnicamente capacitado e hábil na compreensão das demandas contemporâneas, na interpretação dos modos de vida e na proposição de soluções que promovam conforto, bem-estar e qualidade de vida aos usuários de seu objeto de trabalho.

### **3.1.2 Design do conforto**

Sentir-se confortável é uma das necessidades primárias do ser humano, o que vale, por exemplo, para a sua relação com artefatos ou com o ambiente que o envolve. Segundo o dicionário Houaiss (2012a), o conforto está relacionado tanto a uma experiência agradável e à sensação de prazer e plenitude, quanto à satisfação em relação a uma comodidade física, aconchego e bem estar material.

Ao se estabelecer um paralelo entre o design e o conforto, é possível que se vinculem as questões subjetivas de conforto aos estímulos proporcionados pelos caracteres estéticos e simbólicos dos espaços, dos objetos, dos produtos de vestuário, das comunicações e dos serviços. Segundo Sales *et al.* (2010), as características dos produtos que dependem de certas particularidades do processo de percepção são denominadas características intangíveis. Qualidades essas que, por sua vez, relacionam-se à experiência de uso, ao repertório cultural do usuário, à percepção, interpretação e assimilação de estímulos, à identificação e à apropriação dos produtos<sup>3</sup> como parte de uma individualidade, sendo, portanto, consequência do que se enxerga, do que se respira, do que se escuta, do que se toca e do que se prova em uma determinada situação de tempo e espaço (RHEINGANTZ, 2001). Em paralelo, o conforto, em seu aspecto objetivo, está diretamente atrelado aos atributos tangíveis do projeto, que dizem respeito, especialmente, às características prático-técnicas.

A partir do conteúdo exposto sobre design e das premissas de conforto humano levantadas, parece-nos acertado o uso do termo “design do conforto”, tal como, ao que tudo indica, pioneiramente empregado por Pedra (2011). É que, segundo a referida autora, essa expressão pode ser entendida como uma especialidade do design destinada a compreender as demandas

---

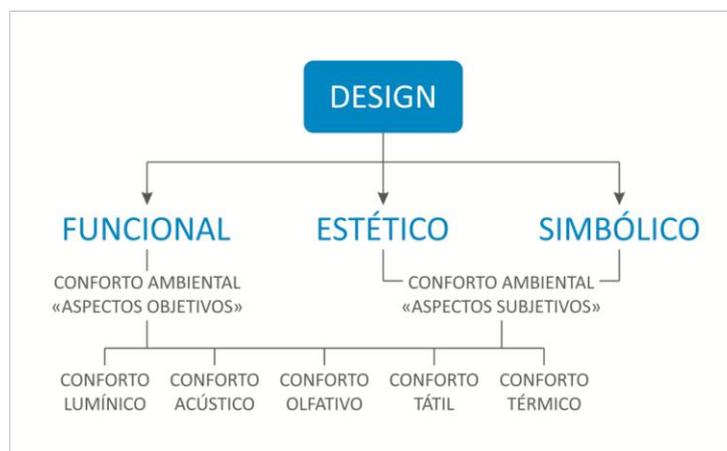
<sup>3</sup> O uso do termo produto, neste trabalho, faz menção aos espaços, aos objetos, aos itens de vestuário, às comunicações e aos serviços.

humanas físicas e psicológicas de conforto, bem como os seus fatores influenciadores, com o objetivo de planejar soluções nos âmbitos dos espaços, dos objetos, dos produtos de vestuário, das comunicações, dos serviços, entre outros, que satisfaçam os anseios dos usuários, proporcionando-lhes maior qualidade de vida e bem-estar.

No que se refere à disciplina dedicada ao estudo da relação entre o clima e as edificações, Rheingantz (2001) discute o conforto ambiental com base em seus aspectos objetivos e quantificáveis (o que o homem sente) e em seus aspectos emocionais, inconscientes e simbólicos (como o homem se sente). Para Souza (2006), o conforto ambiental refere-se à adequação da envolvente da edificação aos condicionantes ambientais e, embora esse conforto seja normalmente apresentado como funcional, há situações em que ele está associado, também, aos aspectos estéticos e simbólicos do ambiente construído.

Assim, ao focar a atenção nesse ambiente construído, o design do conforto é direcionado ao estudo do conforto ambiental, conforme ilustrado na Figura 1, fazendo-se relevante compreendê-lo em seus sentidos subjetivos e objetivos, ambos avaliados segundo seus aspectos lumínico, acústico, olfativo, tátil e térmico. Entretanto, o presente trabalho se atém à discussão dos aspectos objetivos do conforto ambiental.

**Figura 1 – Uma possibilidade de relação entre design e conforto ambiental.**



Conceitualmente, o conforto lumínico está relacionado à qualidade da luz, o que abrange a intensidade luminosa, a reprodução de cor, a percepção de formas, contornos e texturas e a acuidade necessária para o desenvolvimento de cada tipo de tarefa visual com a máxima capacidade de percepção e precisão, somados a reduzidos níveis de esforço, de prejuízo à vista e de acidentes. Está, também, relacionado à ausência de ofuscamento e de contrastes

excessivos, bem como à distribuição homogênea de luz no ambiente (LAMBERTS *et al.*, 1997; RHEINGANTZ, 2013; SAMPAIO; CHAGAS, 2010; SOUZA, 2006).

O conforto acústico, por sua vez, responde pela saúde auditiva no sentido de um planejamento que considere níveis toleráveis de ruído e uma satisfatória reprodução do som no ambiente (RHEINGANTZ, 2013; SAMPAIO; CHAGAS, 2010; SOUZA, 2006). Já o conforto olfativo, refere-se à gestão do ar, o que engloba o planejamento e o controle de odores, de níveis de poluição presentes no ambiente, da qualidade do ar (umidade, pureza e olfação), entre outros. É, portanto, indispensável à higiene e à saúde dos ocupantes das construções. Já o conforto tátil está relacionado às características das superfícies, como aspereza, suavidade, macieza, dureza, temperatura (frio/quente), polimento, assepsia, rugosidade e textura, que constituem, dentre outros, a previsão de quedas, o favorecimento do escoamento/absorção da água da chuva ou a orientação para deslocamento/identificação de deficientes visuais (RHEINGANTZ, 2013).

Por fim, o conforto térmico é definido, segundo Lamberts *et al.* (1997; 2011) e Souza (2006), como o estado mental que expressa a satisfação do homem com o ambiente térmico que o circunda. Segundo Sampaio e Chagas (2010), o conforto térmico é definido como a sensação de bem-estar ambiental em relação à temperatura, à umidade relativa e à movimentação do ar, à radiação solar e à radiação infravermelha emitida pelo entorno.

O conforto ambiental, comumente tratado pela arquitetura e pela engenharia, é uma disciplina que pode ser estudada sob o ponto de vista de diferentes áreas do conhecimento, assim como o design, o que se conclui a partir das definições apresentadas sobre os confortos lumínico, acústico, olfativo, tátil e térmico. Este trabalho de design, em especial, procura contribuir para as discussões em torno do conforto térmico do ambiente construído.

### **3.2 Conforto térmico do ambiente construído**

Este item trata, em especial, dos fenômenos de trocas térmicas por condução, convecção e radiação, conteúdo fundamental para o entendimento sobre o comportamento térmico das edificações. Em sequência, discutem-se os aspectos que diretamente influenciam o conforto térmico do ambiente construído, bem como se apresentam considerações sobre a relação entre a temática e a eficiência energética. Por fim, são expostas relevantes propriedades dos blocos cerâmicos e de concreto, materiais de estudo deste trabalho.

### 3.2.1 Trocas térmicas

A termodinâmica é o ramo da física que estuda a relação entre o calor e outras formas de energia. Sempre que houver diferença de temperatura entre dois sistemas colocados em contato, haverá transferência de energia com fluxo na direção do corpo de menor temperatura, até que o sistema atinja o equilíbrio térmico. A essa energia em trânsito dá-se o nome de calor. Desse modo, um sistema pode perder ou receber calor, mas nunca armazená-lo. (KREITH, 1977).

O estudo da termodinâmica se atém aos estados iniciais e finais de equilíbrio de um corpo e à determinação da quantidade de calor necessária ao sistema para transição entre estados de equilíbrio. O entendimento dos fenômenos de transferência de calor, em complemento, estende a análise termodinâmica para o estudo dos meios pelos quais esse calor é transferido e para o cálculo das taxas nas quais essa transferência ocorre. (INCROPERA; DEWITT, 2003).

Os processos de transmissão de calor são universais e, em muitas situações, ocorrem de forma simultânea. Existem, basicamente, duas condições que propiciam a troca de energia térmica: a) a diferença de temperatura entre dois corpos, conhecida como troca seca ou calor sensível; e b) a mudança de estado de agregação, troca úmida ou calor latente, associada à transferência de massa. Os mecanismos de troca seca são conhecidos por condução, convecção e radiação e os de troca úmida são, basicamente, a condensação e a evaporação. (KREITH, 1977; LAMBERTS *et al.* 2011).

O calor, responsável pela variação da energia interna de um sistema, não pode ser medido ou observado diretamente. No entanto, Incropera e DeWitt (2003) afirmam que os processos de transferência de calor podem ser quantificados em termos de equações de taxas de transferência de calor apropriadas. Para o tratamento de problemas que envolvam essas questões, fazem-se necessárias as definições de hipóteses, idealizações e aproximações, que devem ser levadas em consideração durante a análise dos resultados finais (KREITH, 1977).

A seguir, são expostas considerações sobre os mecanismos de trocas secas, bem como as respectivas equações de taxas de transferência de calor acompanhadas de suas condições de uso associadas aos processos de idealização atinentes.

### 3.2.1.1 Condução

A condução (ou difusão) envolve o fluxo de calor entre dois meios (sólidos, líquidos ou gasosos) que se tocam ou mesmo entre partes de um meio que estejam a diferentes temperaturas. Em nível microscópico, a condução se dá pela comunicação molecular direta, processo no qual há transferência de energia cinética entre as moléculas constituintes do(s) meio(s). Quanto maior a temperatura, maior a energia interna molecular e, conseqüentemente, maior a agitação das partículas que, por colisão elástica ou por difusão de elétrons de movimento rápido, transferem energia para as moléculas adjacentes de menor energia interna até que as temperaturas sejam equalizadas. (INCROPERA; DEWITT, 2003; KREITH, 1977).

É ela o único processo pelo qual o calor pode ser transmitido em meios sólidos. Nos meios não sólidos, ela é geralmente combinada com a convecção e/ou radiação. A transferência de calor por condução pode ocorrer em diferentes direções do meio (multidimensional), seja em um regime permanente (estacionário), no qual o perfil de temperatura ao longo do meio se mantém constante com o passar do tempo, seja em um regime transiente (não estacionário), em que se observa a variação do perfil de temperatura em função do tempo.

Este trabalho considera apenas as situações de condução unidimensional em regime permanente e em regime transiente descritas a seguir.

#### 3.2.1.1.1 Condução unidimensional em regime permanente

A equação de transferência de calor por condução que descreve a distribuição de temperatura no meio é regida pela Lei de Fourier, estabelecida a partir de evidências experimentais.

No caso de um meio em que há uma distribuição de temperatura  $[T(x)]$  em ( $^{\circ}\text{C}$ ), o fluxo de calor  $[q_x'']$ , em ( $\text{W}/\text{m}^2$ ), correspondente à taxa de transferência de calor  $[q_x]'$  em ( $\text{W}$ ) na direção  $[x]$  por unidade de área  $[A]$  em ( $\text{m}^2$ ) perpendicular à direção de transferência, é dado, segundo a Lei de Fourier, pela Equação (1).

$$q_x'' = \frac{q_x'}{A} = -k \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

---

<sup>4</sup> Taxa de transferência de calor = calor transmitido por unidade de tempo:  $1\text{W} = 1\text{J/s}$  (KREITH, 1977).

Observa-se que a Lei de Fourier define a constante de proporcionalidade [k], denominada condutividade térmica. Essa importante propriedade<sup>5</sup> de transporte, cuja unidade de medida é (W/m.K), está relacionada à habilidade de uma substância em conduzir calor, e expressa a taxa pela qual a energia é transferida pelo processo de difusão. Ressalta-se que a condutividade térmica depende dos elementos estruturais<sup>6</sup> da matéria e da temperatura. (CALLISTER, 2006; INCROPERA; DEWITT, 2003).

Como pode ser observado na Equação (1), o fluxo de calor por condução aumenta com o aumento da condutividade, sendo ela, em geral, maior nos sólidos do que nos líquidos e, por sua vez, maior nos líquidos do que nos gases, tendência essa decorrente das diferenças no espaçamento intermolecular dos estados.

Considerando o caso de condução unidimensional sem geração de calor em regime estacionário em uma parede plana que faz divisa entre meio externo e meio interno, em que a temperatura da superfície externa é maior do que a temperatura da superfície interna, a intensidade da taxa temporal de transferência de calor [ $q_x$ ], com unidade de medida (W), é dada pela Equação (2),

$$q_x = \frac{Ak}{L} (T_e - T_i) \quad (2)$$

onde [k] representa a condutividade térmica do material da parede (W/m.K); [A] a área da seção através da qual o calor flui por condução (m<sup>2</sup>), medida perpendicularmente à direção do fluxo; [L] representa a espessura da parede em análise (m); [ $T_e$ ] a temperatura da superfície externa (°C ou K); e [ $T_i$ ] a temperatura da superfície interna (°C ou K). (INCROPERA; DEWITT, 2003; KREITH, 1977).

O fluxo de calor [ $q_x''$ ], assim, pode ser dado pela Equação (3), cujas variáveis estão ilustradas na Figura 2.

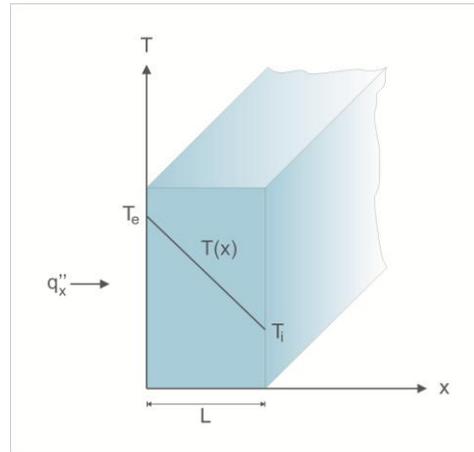
$$q_x'' = \frac{k}{L} (T_e - T_i) \quad (3)$$

---

<sup>5</sup> “Uma propriedade consiste em uma peculiaridade de um dado material em termos do tipo e da intensidade da sua resposta a um estímulo específico que lhe é imposto. Geralmente, as definições de propriedades são feitas de uma maneira independente da forma e do tamanho do material.” (CALLISTER, 2006, p.2).

<sup>6</sup> A estrutura de um material refere-se ao arranjo dos seus componentes internos em nível subatômico, atômico (molecular), microscópico e macroscópico. Essa estrutura é consequência da técnica utilizada no processamento do material (CALLISTER, 2006).

**Figura 2 – Transferência de calor unidimensional por condução em uma parede plana.**



**FONTE: adaptado de Incropera e DeWitt, 2003, p. 3.**

Há, nesse ponto, de se observar a existência de uma analogia entre o fluxo de calor e o fluxo de corrente elétrica, de modo que uma resistência térmica possa estar associada à condução de calor (INCROPERA; DEWITT, 2003; KREITH, 1977). Definida como a razão entre o potencial motriz e a taxa correspondente de transferência, a resistência térmica [R], de unidade de medida ( $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ), é, para condução em uma parede plana em regime permanente, dada por:

$$R = \frac{(T_e - T_i)}{q_x} = \frac{L}{Ak} \quad (4)$$

Assim, a Equação (2), segundo Incropera e DeWitt (2003) e Kreith (1977), pode ser reescrita como:

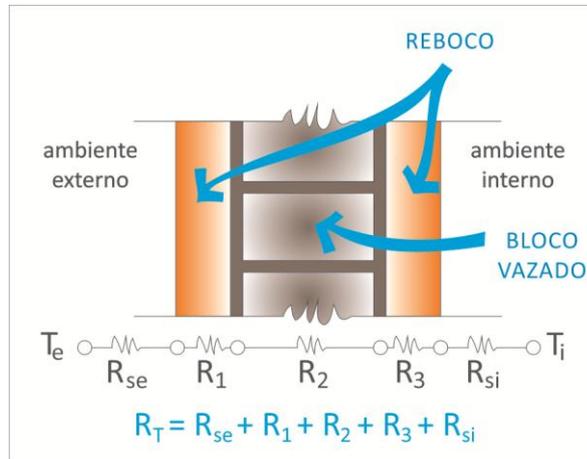
$$q_x = \frac{(T_e - T_i)}{R} \quad (5)$$

Para o caso do cálculo da taxa de calor conduzida através de uma parede plana composta (Figura 3), em que essa taxa é constante (ou seja, independe do tempo) e a temperatura em cada ponto do sistema não varia (regime estacionário), tem-se que:

$$q_x = \frac{(T_e - T_i)}{\sum R} \quad (6)$$

onde  $[\Sigma R]$  representa a soma das resistências térmicas dos materiais integrantes da parede composta, em analogia a um circuito elétrico correspondente.

**Figura 3 – Resistência térmica de uma parede em analogia a um circuito elétrico.**



**FONTE: adaptado de Lamberts *et al.*, 1997, p.60.**

Na Figura 3,  $[T_e]$  representa a temperatura da superfície externa ( $^{\circ}\text{C}$  ou  $\text{K}$ );  $[R_{se}]$  a resistência térmica para convecção<sup>7</sup> da superfície externa da parede ( $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ );  $[R_1]$  a resistência térmica para a condução da camada de reboco externa ( $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ );  $[R_2]$  a resistência térmica equivalente do bloco – já que, neste exemplo, é constituído de camadas de ar e camadas de material sólido – ( $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ );  $[R_3]$  representa a resistência térmica para a condução da camada de reboco interna ( $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ );  $[T_i]$  a temperatura da superfície interna ( $^{\circ}\text{C}$  ou  $\text{K}$ ); e  $[R_{si}]$  a resistência térmica para da superfície interna da parede ( $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ ). A soma das resistências térmicas dos materiais integrantes da parede composta é simbolizada por  $[R_T]$ .

Para determinar a resistência térmica total (ou equivalente)  $[R_t]$  de um componente plano constituído de camadas homogêneas e não homogêneas perpendiculares ao fluxo de calor, como é o caso dos blocos vazados, a NBR 15220-2 (2005) sugere a Equação (7),

$$R_t = \frac{A_a + A_b + \dots + A_n}{\frac{A_a}{R_a} + \frac{A_b}{R_b} + \dots + \frac{A_n}{R_n}} \quad (7)$$

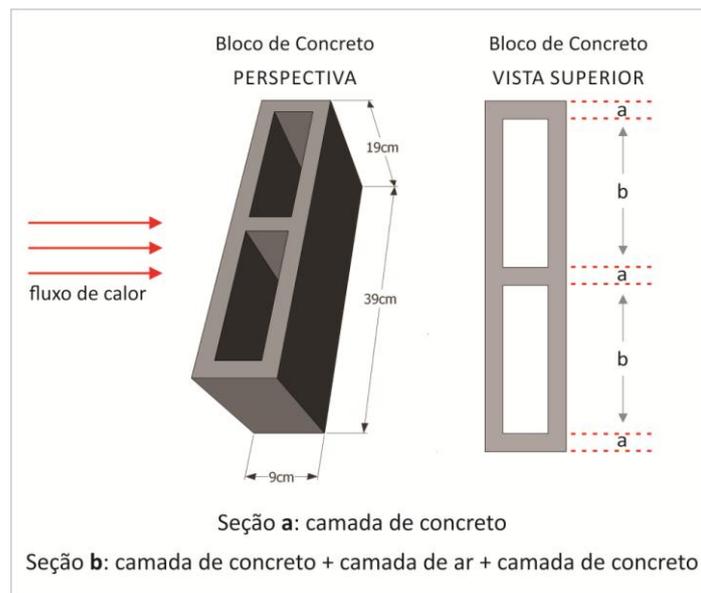
<sup>7</sup> Assim como há a resistência térmica para a condução, há a resistência térmica para o processo de transferência de calor por convecção. Dado o caráter ilustrativo da imagem, a resistência térmica para convecção não será abordada em profundidade neste item. Para maiores informações sobre o fenômeno da convecção, ver item 3.2.1.2.

em que  $A_a, A_b, \dots, A_n$  são as áreas ( $m^2$ ) de cada seção perpendicular ao fluxo de calor, e  $R_a, R_b, \dots, R_n$  são as resistências térmicas ( $m^2.K/W$ ) de superfície a superfície para cada seção (a, b, ..., n), determinadas pela Equação (8):

$$R = \frac{e}{k} \quad (8)$$

sendo [e] a espessura da camada (m) e [k] a condutividade térmica do material da camada ( $W/m.K$ ). A Figura 4 exemplifica a distribuição de um componente plano, formado por camadas homogêneas e não homogêneas, em seções.

**Figura 4 – Exemplificação da distribuição de um componente plano em seções.**



No caso de seções não homogêneas, como a [b] da Figura 4, a sua resistência térmica é dada pela soma das resistências de cada camada, calculadas pela Equação (8).

#### 3.2.1.1.2 Condução unidimensional em regime transiente

Existem vários problemas de transferência de calor que são dependentes do tempo. Esses problemas transientes são determinados pela alteração das condições de contorno de um sistema, como ocorre diariamente com o envelope construtivo. Se a temperatura da superfície

externa de uma parede é alterada, a temperatura em cada ponto da parede também começará a mudar, até que a distribuição de temperatura atinja o regime estacionário.

A distribuição de temperatura nessas condições não é óbvia. Entretanto, existem inúmeros procedimentos para determinar a distribuição de temperatura em função do tempo e da posição no sólido durante um processo de condução transiente.

Em condições nas quais os gradientes de temperatura não são desprezíveis, mas a transferência de calor no interior do sólido é unidimensional, soluções exatas para a equação de calor podem ser utilizadas para calcular a dependência da temperatura na posição e no tempo (INCROPERA; DEWITT, 2003). A equação da difusão de calor para uma condução unidirecional transiente que considera a condutividade térmica constante é dada por:

$$\frac{\partial}{\partial x^2} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (9)$$

onde [T] corresponde à temperatura do sólido (°C ou K), [x] à direção através da qual ocorre a transferência de calor por condução, [k] à condutividade térmica do material (W/m.K), [ $\rho$ ] à massa específica (kg/m<sup>3</sup>), [ $c_p$ ] ao calor específico a pressão constante (J/kg.K) e [t] ao tempo (s). Sendo [k], [ $\rho$ ] e [ $c_p$ ] constantes, a Equação (9) pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}, \text{ onde } \alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (10)$$

onde [ $\alpha$ ] corresponde à difusividade térmica do material (m<sup>2</sup>/s). A difusividade térmica [ $\alpha$ ], como pode ser observado na Equação (10), é uma importante propriedade do material utilizada na análise de transferência de calor transiente por condução. Expressa em (m<sup>2</sup>/s) e dada pela relação entre a condutividade térmica e a capacidade calorífica volumétrica, a difusividade é definida como a capacidade do material de conduzir energia térmica em relação à sua capacidade de armazená-la, ou seja, ela avalia a rapidez com que um corpo se ajusta por inteiro à temperatura de seu entorno. (INCROPERA; DEWITT, 2003; MORAN *et al.*, 2011).

A capacidade calorífica volumétrica de um material é uma propriedade relacionada à sua habilidade em armazenar energia térmica. É expressa em (J/m<sup>3</sup>.K) e dada pelo produto entre a

massa específica [ $\rho$ ] e o calor específico [ $c_p$ ]. A massa específica, ou massa específica ( $\text{kg/m}^3$ ), mede o grau de concentração de massa de um material em determinado volume. O calor específico, ou capacidade calorífica específica, por sua vez, é uma propriedade relacionada à habilidade do material em absorver calor de sua vizinhança, representando a quantidade de energia exigida para produzir um aumento unitário na temperatura para uma unidade de massa da substância, tendo como unidade de medida ( $\text{J/kg.K}$ ). Há de se mencionar que substâncias de grande massa específica são tipicamente caracterizadas por baixo calor específico. (CALLISTER, 2006; INCROPERA; DEWITT, 2003; SHACKELFORD, 2008).

Assim, a equação que define a difusividade térmica [ $\alpha$ ], como apresentado na Equação (10), é dada por:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (11)$$

onde [ $k$ ] corresponde à condutividade térmica ( $\text{W/m.K}$ ), [ $\rho$ ] à massa específica ( $\text{kg/m}^3$ ) e [ $c_p$ ] ao calor específico a pressão constante ( $\text{J/kg.K}$ ). Com relação à condutividade térmica, é relevante destacar, como foi dito, que essa é uma propriedade dos materiais que varia com a temperatura. Entretanto, em problemas de transferência de calor por condução transiente, é plausível considerá-la constante (INCROPERA; DEWITT, 2003).

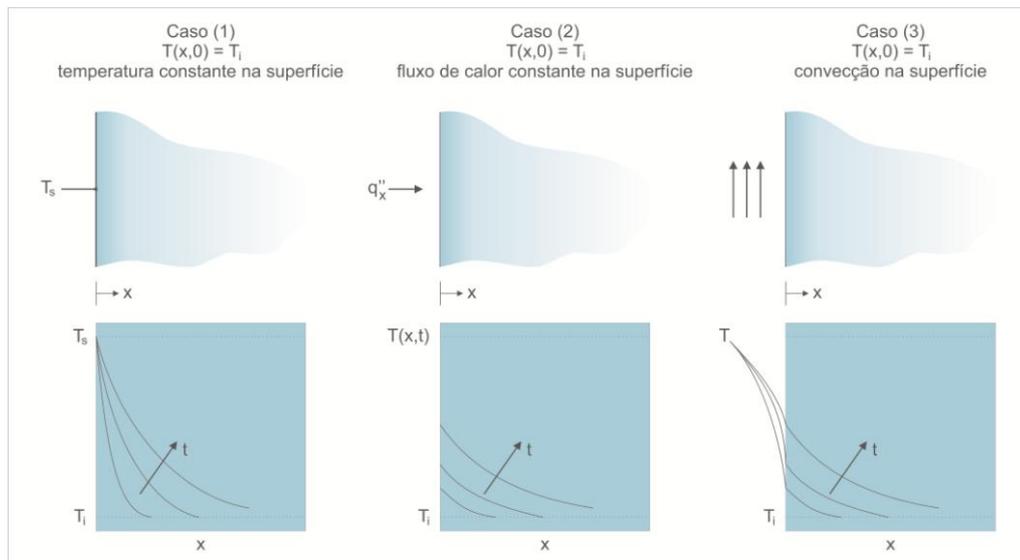
Apesar de a condutividade térmica, a massa específica e o calor específico serem as três propriedades elementares de qualquer material do ponto de vista térmico, o estudo do comportamento desses materiais em regime transiente obriga a introdução da difusividade térmica, propriedade complexa dada, como visto, pela combinação das citadas propriedades elementares (CONZÁLES CRUZ, 2003).

Voltando-se às soluções analíticas para a equação de calor, há de se destacar as consideradas para os sólidos semi-infinitos, idealizações com as quais se pode associar as paredes planas. A geometria de um sólido semi-infinito é simples e baseia-se na hipótese de que esse sólido se estenda infinitamente em todas as direções exceto em uma, sendo caracterizado por uma única superfície identificável, de modo que qualquer distúrbio de temperatura nessa superfície nunca atinja sua extremidade oposta. A resposta transiente ocorre quando uma mudança súbita de condições é imposta na superfície identificável do material, gerando uma condução unidirecional transiente. (INCROPERA; DEWITT, 2003).

Nesses processos, a temperatura no interior do sólido é expressa por  $[T(x,t)]$ , sendo  $[x]$  a posição na direção do fluxo de calor e  $[t]$  o tempo. A condição inicial para análises de condução unidimensional transiente em um sólido semi-infinito é expressa por  $[T(x,0) = T_i]$ , o que significa que qualquer posição  $[x]$  no sólido, no instante  $[t = 0]$ , deve possuir a mesma temperatura  $[T_i]$ . Como condição de contorno interna tem-se que  $[T(x \rightarrow \infty, t) = T_i]$ , ou seja, quando a espessura do sólido  $[x]$  tende ao infinito, deve apresentar, em qualquer instante de tempo  $[t]$ , a temperatura constante e igual à temperatura inicial  $[T_i]$ .

A partir da Equação (10), Incropera e DeWitt (2003) apresentam três soluções analíticas para diferentes condições impostas à superfície identificável de um sólido semi-infinito. A Figura 5 ilustra essas condições: de temperatura constante da superfície, de fluxo de calor constante na superfície e de convecção na superfície.

**Figura 5 – Distribuições de temperatura transiente em um sólido semi-infinito para três condições de superfície.**



**FONTE:** adaptado de Incropera e DeWitt, 2003, p.185.

O método teórico-experimental desenvolvido na presente pesquisa considera a distribuição de temperatura transiente unidimensional em um sólido semi-infinito em sua condição de contorno de segunda espécie (fluxo constante aplicado em sua superfície identificável). Nesse caso, a solução analítica dada por Incropera e DeWitt (2003) é apresentada na Equação (12),

$$T(x,t) - T_i = \frac{2q_x'' \sqrt{\frac{\alpha t}{\pi}}}{k} \exp\left(\frac{-x^2}{4\alpha t}\right) - \frac{q_x'' x}{k} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \quad (12)$$

onde  $[T(x,t)]$  representa a temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) de certa posição ( $x$ ) em determinado tempo ( $t$ ),  $[T_i]$  a temperatura da superfície identificável no instante inicial ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $[q_x]$  o fluxo de calor constante aplicado na superfície identificável ( $\text{W}/\text{m}^2$ ),  $[\alpha]$  a difusividade térmica do sólido ( $\text{m}^2/\text{s}$ ),  $[t]$  o tempo ( $\text{s}$ ),  $[k]$  a condutividade térmica do sólido ( $\text{W}/\text{m.K}$ ),  $[x]$  a posição ( $\text{m}$ ) e  $[erfc(w)]$  a função erro complementar.

A função erro complementar, por sua vez, é calculada a partir da Equação (13), onde  $[erf(w)]$  é a função erro de Gauss.

$$erfc(\omega) = 1 - erf(\omega), \quad \text{sendo } \omega = \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \quad (13)$$

Como se pode observar, a resolução do sistema de equações do modelamento matemático para sólido semi-infinito em sua condição de contorno de segunda espécie é extremamente complexa, pois requer interpolação e iteração. A interpolação, ou ajustamento, refere-se a qualquer processo de obtenção dos valores de uma função dentro de um intervalo mediante o conhecimento do comportamento dessa função nos extremos desse intervalo. No caso, a interpolação está associada à função erro de Gauss. Por outro lado, a iteração está relacionada ao processo de resolução de uma equação mediante operações em que, sucessivamente, o objeto de cada uma é o resultado da que a precede.

Desse modo, em análises de problemas de condução unidimensional transiente que utilizem essa solução analítica, faz-se necessário o auxílio de ferramentas computacionais para resolução das Equações (12) e (13) e, neste trabalho, optou-se por utilizar o *Engineering Equation Solver* (EES).

Criado pela estadunidense *F-Chart Software*, trata-se de um programa especializado em solucionar equações da área das ciências térmicas, podendo resolver numericamente sistemas de equações diferenciais e não lineares, equações diferenciais e integrais, estimar análises de incertezas, realizar regressões lineares e não lineares, converter unidades de medida, gerar gráficos, entre outros. Uma importante característica desse *software* é o seu banco de dados com propriedades termodinâmica e de transporte, fornecidas para inúmeras substâncias, de maneira a permitir o seu uso junto à solução das equações. Além disso, o EES possui funções matemáticas e propriedades termofísicas embutidas em suas ferramentas para cálculos de

engenharia, bem como uma biblioteca de transferência de calor desenvolvida em conjunto com o livro *Heat Transfer*<sup>8</sup>. (F-CHART SOFTWARE, 2014; SILVA *et al.*, 2009).

De modo geral, o EES permite que o usuário insira as funções em estudo de três formas diferentes: a) possibilita a entrada e interpolação de dados tabulados, de modo que esses dados possam ser utilizados na solução do conjunto de equações; b) suporta funções, procedimentos, módulos e subprogramas escritos pelo usuário; e c) funções compiladas e procedimentos, escritos em uma linguagem como Pascal, C ou FORTRAN, podem ser dinamicamente ligadas com EES. (F-CHART SOFTWARE, 2014).

Feitas essas breves considerações sobre o *Engineering Equation Solver*, acredita-se que o mencionado *software* seja apropriado ao desenvolvimento da presente pesquisa.

### 3.2.1.2 Convecção

A convecção é o modo de transmissão de calor entre uma superfície de um corpo sólido (como paredes e pisos) e um corpo fluido em movimento (líquido ou gás) quando os dois se encontram a diferentes temperaturas. Tal mecanismo envolve, simultaneamente, a condução de calor e o movimento global do fluido. Considerando uma superfície de maior temperatura envolvida por um fluido de menor temperatura, a energia, em um primeiro instante, será transferida por condução da superfície para as partículas de fluido adjacentes a ela. Assim, essas partículas experimentarão elevação de suas temperaturas internas, deslocar-se-ão para regiões de menor temperatura e transferirão parte da energia para outras partículas do fluido que tenham menor energia interna. (INCROPERA; DEWITT, 2003; KREITH, 1977).

É importante perceber que, nesse processo, há, além do deslocamento de energia, deslocamento de massa, em virtude da diferença de massa específica entre regiões do fluido<sup>9</sup>. Essa transferência de energia, portanto, não é consequência apenas da diferença de temperatura entre dois pontos do sistema. Mas, pelo fato de o fluxo de calor acontecer na

---

<sup>8</sup> NELLIS, Gregory; KLEIN, Sanford. *Heat Transfer*. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.

<sup>9</sup> Quanto maior a temperatura do fluido, menos partículas ele tem por unidade de volume, uma vez que elas estão com elevada energia cinética e tendem ao deslocamento. Assim, a região do fluido com maior temperatura tem menor massa específica, enquanto que a de menor temperatura tem maior massa específica. Dessa forma, a região de menor massa específica tende a subir (empuxo) e a de maior massa específica tende a descer (influxo), o que caracteriza o deslocamento de massa (INCROPERA; DEWITT, 2003).

direção do gradiente de temperatura, a convecção é classificada como um modo de transmissão de calor (KREITH, 1977).

A transferência de calor por convecção pode ser natural ou forçada. Na situação em que o movimento de mistura é consequência apenas da diferença de massa específica entre regiões do fluido – causada, repete-se, pela variação de temperatura –, a convecção é classificada como natural. Do contrário, se há interferência de um agente externo, como um ventilador, uma bomba ou ventos atmosféricos, a convecção é induzida e recebe o nome de forçada. (INCROPERA; DEWITT, 2003; KREITH, 1977).

A Equação (13) apresenta a intensidade do fluxo por convecção [ $q_c''$ ], em (W/m<sup>2</sup>), envolvida nesse processo,

$$q_c'' = \frac{q_c}{A} = h_c \Delta T \quad (14)$$

onde [ $q_c$ ] representa a intensidade da taxa de transferência de calor por convecção (W), [ $A$ ] a área de transmissão de calor (m<sup>2</sup>), [ $h_c$ ] o coeficiente de transferência por convecção (W/m<sup>2</sup>.K) e [ $\Delta T$ ] a variação de temperatura (°C ou K) entre a superfície e um ponto do fluido, geralmente muito afastado da superfície (INCROPERA; DEWITT, 2003; KREITH, 1977).

É importante ressaltar que a definição de [ $h_c$ ] depende da geometria da superfície, da natureza do movimento do fluido e de uma série de propriedades termodinâmicas e de transporte do fluido. Todo estudo de convecção, em última análise, reduz-se ao estudo dos procedimentos pelos quais o coeficiente de transferência por convecção pode ser determinado. (INCROPERA; DEWITT, 2003; KREITH, 1977).

### 3.2.1.3 Radiação

Todo corpo com temperatura finita emite energia em forma de radiação, seja por ondas eletromagnéticas ou por fótons (INCROPERA; DEWITT, 2003). A radiação térmica é definida como uma troca térmica entre dois corpos<sup>10</sup>, situados a certa distância, que têm a

---

<sup>10</sup> O enfoque é dado à radiação emitida por superfícies sólidas. No entanto, é importante ressaltar que podem ocorrer emissões a partir de líquidos e gases (INCROPERA; DEWITT, 2003).

capacidade de emitir e absorver energia, mesmo que exista vácuo entre eles. Nesse mecanismo, a energia em trânsito recebe o nome de calor radiante (KREITH, 1977).

A intensidade da radiação emitida pelos corpos é influenciada pela temperatura absoluta de suas superfícies e por seus aspectos físicos e geométricos. Um irradiador perfeito, conhecido como corpo negro, emite energia radiante de sua superfície à razão  $[q_b]$ , ( $\text{W}/\text{m}^2$ ), dada pela Equação (15),

$$q_b = \sigma T^4 \quad (15)$$

onde  $[T]$  representa a temperatura da superfície em *kelvins* (K) e  $[\sigma]$  corresponde a uma constante dimensional com o valor de  $5,67 \times 10^{-8}$  ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$ ), chamada de constante de Stefan-Boltzmann (INCROPERA; DEWITT, 2003).

Se a energia emitida por um irradiador perfeito (corpo negro), a uma certa temperatura, é dada por  $[q_b]$  e a emitida por um objeto real, à mesma temperatura, é dada por  $[q_{obj}]$ , então a relação entre esses dois valores descreve a emissividade  $[\varepsilon]$  do objeto, expressa pela Equação (16).

$$\varepsilon = \frac{q_{obj}}{q_b} \quad (16)$$

A emissividade  $[\varepsilon]$  é uma propriedade das superfícies, sendo dependente do seu material e do acabamento dado a ela. A partir da Equação (16) é possível inferir que  $[\varepsilon]$  é sempre um número entre 0 e 1, e quanto maior for a energia emitida pelo objeto, maior será o valor de  $[\varepsilon]$ . (INCROPERA e DEWITT, 2003).

No que se refere à capacidade de absorção de radiação, o corpo negro também estabelece um limite superior, representado por  $[G]$  (KREITH, 1977). O poder de absorção de radiação  $[G_{obj}]$ , em ( $\text{W}/\text{m}^2$ ), da superfície de um corpo real depende de sua absorvidade  $[\alpha]$ , definida pela relação entre  $[G]$  e  $[G_{obj}]$  apresentada na Equação (17).

$$G_{obj} = \alpha G \quad (17)$$

A absorvidade [ $\alpha$ ], assim, é uma propriedade das superfícies e está relacionada à capacidade de absorção de radiação de corpos reais em relação ao corpo negro, tendo valores que variam de 0 a 1 (INCROPERA; DEWITT, 2003).

Em alguns contextos, faz-se interessante o cálculo da troca líquida de calor por radiação entre uma superfície e as paredes de uma sala (vizinhança) que se mantém a uma temperatura constante. Se essa superfície apresenta [ $\alpha = \epsilon$ ], a sua taxa líquida de transferência de calor por radiação [ $q_r$ ], em (W/m<sup>2</sup>), pode ser expressa por:

$$q_r = h_r (T_s - T_{viz}) \quad (18)$$

em que [ $T_s$ ] representa a temperatura da superfície, [ $T_{viz}$ ] a temperatura da vizinhança e [ $h_r$ ] o coeficiente de transferência de calor por radiação, dado por [ $h_r = \epsilon\sigma(T_s + T_{viz})(T_s^2 + T_{viz}^2)$ ] (INCROPERA; DEWITT, 2003).

Os corpos reais, além da capacidade de absorver [absortância  $\alpha$ ] e emitir [emissividade  $\epsilon$ ] radiação, possuem a propriedade de refletir [refletância  $\rho$ ] e de transmitir [transmitância  $\tau$ ] radiação segundo a proporção apresentada na Equação (19):

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (19)$$

A partir dessa relação, pode-se verificar que, ao incidir radiação sobre um corpo real, parte dessa radiação é absorvida, parte é refletida e parte é transmitida, de modo que a soma dessas partes correspondam ao total da radiação incidente. As radiações absorvidas, em consequência, promovem o aumento da energia térmica do corpo, enquanto as radiações emitidas influenciam na sua diminuição. Por outro lado, a energia térmica da matéria não sofre variação em decorrência das radiações transmitidas e refletidas pela superfície.

### ***3.2.2 Fatores que influenciam o conforto térmico do ambiente construído***

O conforto térmico, como discutido no item 3.1.2, é definido como o estado mental que expressa a satisfação do homem com o ambiente térmico que o circunda, estando relacionado, principalmente, ao equilíbrio térmico do corpo como um todo. Segundo diversos autores, o

homem tem melhores condições de vida e de saúde quando o seu organismo pode funcionar sem ser submetido à fadiga térmica, evidenciando o quanto o conforto térmico influencia diretamente a qualidade e o desempenho das atividades humanas. (FROTA; SHIFFER, 2001; ISO 7730, 2005; LAMBERTS *et al.*, 1997; LAMBERTS *et al.*, 2011, SOUZA, 2006).

A sensação de conforto térmico é consequência de, basicamente, três aspectos: a) os de funcionamento do corpo humano, relacionados ao nível de trabalho e às vestimentas; b) os climáticos, principalmente a temperatura, a velocidade e a umidade relativa do ar; e c) os arquitetônicos, como a forma e o volume das construções, a orientação e o tamanho dos fechamentos e o comportamento térmico dos materiais utilizados. (FROTA; SHIFFER, 2001; ISO 7730, 2005; LAMBERTS *et al.*, 1997; LAMBERTS *et al.* 2011; SOUZA, 2006).

Quanto aos aspectos fisiológicos, o conforto térmico está atrelado ao fato de o homem ser um animal homeotérmico, característica relacionada à manutenção de sua temperatura interna sensivelmente constante, na ordem de 37°C, embora a temperatura ambiental varie dentro de limites apreciáveis (FROTA; SHIFFER, 2001; LAMBERTS *et al.*, 1997).

A energia térmica responsável pela homeotermia é resultante de reações metabólicas que transformam parte da energia advinda dos alimentos em calor<sup>11</sup>. Reações metabólicas também possibilitam a formação de energia mecânica para que os seres humanos desempenhem as suas atividades. (FROTA; SHIFFER, 2001; LAMBERTS *et al.*, 1997).

Os mecanismos de termorregulação atuam como controladores das perdas de energia térmica pelo corpo humano. Apesar de serem mecanismos naturais, representam um esforço extra e, conseqüentemente, uma queda de potencialidade de trabalho. Se o organismo encontra dificuldades durante o processo de dissipação de energia para o ambiente, ocorre o desconforto por sensações de “frio” ou de “calor”, seja em todo o corpo ou em uma região.

Na exposição a altas temperaturas, o corpo humano sente dificuldade em perder a quantidade de energia necessária para manter a temperatura corporal constante. O organismo, assim, reage por meio da vasodilatação, do suor – incrementando as perdas energéticas – e da redução automática do metabolismo – diminuindo a produção energética interna. De maneira

---

<sup>11</sup> Cabe, no ponto, um esclarecimento. Há, no mínimo, duas relevantes acepções do termo calor, uma dita vulgar e outra tida por científica, da termodinâmica. Desse modo, quando, neste trabalho, utilizar-se “calor”, valendo-se da palavra entre aspas, a referência é a seu sentido comum, ou seja, à sensação de alta temperatura, daquilo que é quente. Quando, por outro lado, empregar-se calor, sem aspas, o termo terá seu aludido sentido científico, definido por Kreith (1977) e Incropera e DeWitt (2003) como a energia em trânsito decorrente da diferença de temperatura entre dois meios – no caso, o corpo humano e o exterior que o circunda.

inversa, na presença do frio, há perda de energia interna além do necessário. Assim, o organismo reage por meio da vasoconstrição, do arrepio – dificultando tais perdas –, e também do tiritar, que representa o aumento do metabolismo corporal e é manifestado pelo tremor involuntário dos músculos. (FROTA; SHIFFER, 2001; LAMBERTS *et al.*, 1997; LAMBERTS *et al.*, 2011).

A fadiga termo-higrométrica (relativa ao “calor” ou ao “frio”) é resultante do trabalho excessivo dos mecanismos de termorregulação, influenciados, basicamente, pela temperatura e pela umidade do ar. As trocas térmicas entre o organismo e o ambiente podem ocorrer de dois modos: a) por troca seca – convecção, radiação ou condução; e b) por troca úmida – evaporação. (FROTA; SHIFFER, 2001; LAMBERTS *et al.*, 1997; LAMBERTS *et al.*, 2011).

Na atividade de troca de calor entre corpo e ambiente, a pele é tida como o principal órgão termorregulador. A temperatura da pele é regulada pelo fluxo sanguíneo que a percorre – quanto mais intenso o fluxo, mais elevada a sua temperatura. Nesse sentido, a vestimenta tem papel significativo nos processos de transferência de calor, pois funciona como um isolante térmico que possibilita a criação de uma camada de ar parado entre ela e a pele, dificultando as trocas por convecção e radiação. “A vestimenta reduz o ganho de calor relativo à radiação solar direta, as perdas em condições de baixo teor de umidade e o efeito refrigerador do suor. Reduz, ainda, a sensibilidade do corpo às variações de temperatura e de velocidade do ar” (FROTA; SHIFFER, 2001, p.23).

Os fatores climáticos, segundo aspecto apontado como relevante ao conforto térmico, dizem respeito, principalmente, à temperatura, à velocidade e à umidade do ar, e podem ser analisados sob três diferentes escalas: o macroclima, o mesoclima e o microclima. O macroclima refere-se às características gerais de uma extensa região, normalmente medidas em estações meteorológicas e oferecidas em séries de dados calculados para períodos de 30 em 30 anos. O mesoclima é caracterizado pela altitude, vegetação, topografia, tipo de solo e presença de obstáculos que influenciam as condições locais do clima. Por fim, o microclima está para a escala da edificação e seu entorno imediato, podendo ser concebido ou alterado pelo projeto do ambiente construído. (LAMBERTS *et al.*, 1997; LAMBERTS *et al.*, 2011).

A inclinação de  $23^{\circ}27'$  do eixo da Terra em relação ao plano de sua órbita em torno do Sol traz consequências que diferenciam o clima em escala macro. Devido a essa inclinação e ao movimento de translação, varia-se, ao longo do ano, a incidência dos raios solares nos diferentes pontos do globo, definindo as quatro estações e influenciando na distribuição da temperatura pelo planeta: quanto maior for a latitude de uma região menor será a quantidade

de radiação solar recebida e, conseqüentemente, a temperatura do ar tende a ser menor. (FROTA; SHIFFER, 2001; LAMBERTS *et al.*, 1997; LAMBERTS *et al.*, 2011).

É importante entender que a temperatura do ar, principal variável do conforto térmico, não é consequência da ação direta dos raios solares. Em um processo indireto, ela atinge o solo onde é absorvida em parte e refletida em outra fração. Desse modo, a temperatura do solo aumenta e, por convecção, aquece o ar (LAMBERTS *et al.*, 2011).

No que se refere aos ventos globais, tal fenômeno é consequência, principalmente, do desequilíbrio de radiação recebida e emitida entre as baixas e altas latitudes. Esse desequilíbrio térmico provoca um transporte de energia dos trópicos para as regiões polares, induzindo a circulação da atmosfera e dos oceanos. Essas transferências de energia, entretanto, ocorrem de diferentes formas, que variam com a latitude. (LAMBERTS *et al.*, 2011; PROCLIRA, 2007).

A umidade atmosférica, por sua vez, é regulada pela vegetação e pelo ciclo hídrico. A contribuição da umidade atmosférica para o conforto térmico está fortemente associada à amplitude térmica diária. Quanto mais úmido estiver o ar, maior será a quantidade de partículas de água em suspensão. Essas partículas têm a propriedade de reter grande parte da energia solar, amenizando a sensação de “calor” durante o dia. No período da noite, a energia térmica armazenada é liberada lentamente, contribuindo para uma suave oscilação de temperatura, mantendo, assim, uma baixa amplitude térmica.

O litoral, o campo, a floresta, o vale e a cidade são exemplos de mesoclima. Dentre os fatores que influenciam o clima em escala local, destacam-se o relevo, a vegetação e a altitude. A influência do relevo acontece na medida em que, quando acidentado, constitui-se em barreira aos ventos, modificando as condições de umidade e de temperatura do ar em relação ao macroclima. Quanto à vegetação, ela é responsável por interceptar de 60% a 90% da radiação solar, causando uma redução substancial da temperatura do solo. Ademais, ela contribui para regulação da umidade do ar de uma região. A carência de vegetação no ambiente urbano, por exemplo, caracterizado por ocupação e pavimentação excessivas, provoca redução da umidade relativa do ar. E, sobre a altitude, quanto maior ela for, menor será a temperatura do ar e maior será a velocidade do vento. (LAMBERTS *et al.*, 1997; LAMBERTS *et al.*, 2011).

É importante ressaltar que as variáveis climáticas sofrem mutua interferência e, por isso, devem ser pensadas sob essa ótica em análises de conforto térmico. Regiões que apresentam uma mesma temperatura, por exemplo, podem possuir sensações de conforto distintas em

função da velocidade e da umidade do ar. Essas variáveis devem, também, ser analisadas sob a ótica de indivíduos aclimatados, saudáveis e adequadamente vestidos. Para tal, existe uma série de índices que determinam as condições de conforto térmico e oferecem os vários graus de conforto ou desconforto por frio ou por “calor”. (FROTA; SHIFFER, 2001; LAMBERTS *et al.*, 1997; LAMBERTS *et al.*, 2011).

Como apresentam Frota e Shiffer (2001) e Lamberts *et al.* (2011), esses índices são desenvolvidos fixando-se tipos de atividade e vestimenta do indivíduo para, aí, relacioná-los com as variáveis ambientais e reunir, sob a forma de cartas ou nomogramas, as diversas condições climáticas que proporcionam respostas iguais por parte dos indivíduos.

Esses estudos apresentam as chamadas zonas de conforto, que são o resultado do cruzamento de variáveis como a temperatura do bulbo seco e a umidade e a velocidade do ar. Essas ‘zonas de conforto’, no entanto, devem ser entendidas como uma indicação, devendo-se, portanto, analisá-las sob a ótica de sua aplicabilidade em relação às condições ambientais locais e às especificidades de projeto. (FROTA; SHIFFER, 2001). As principais normas internacionais sobre conforto térmico foram desenvolvidas pela *International Organization for Standardization (ISO)* e pela *American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers (ASHRAE)*. A NBR 15220 – Desempenho Térmico das Edificações – é uma norma brasileira sobre o assunto.

Os dados obtidos por meio dos índices de conforto térmico devem, durante a etapa de planejamento e de projeção do ambiente construído, ser cruzados com os dados referentes às variáveis arquitetônicas (FROTA; SHIFFER, 2001; LAMBERTS *et al.*, 1997; LAMBERTS *et al.*, 2011).

Nesse processo, são lançadas estratégias para que a estrutura arquitetônica e o seu entorno imediato possam contribuir com o microclima. O uso de vegetação e massas de água, por exemplo, contribui sobremaneira para a umidade diária do ar. A vegetação pode, também, alterar, juntamente com construções e outros anteparos, as condições do vento local, sendo ele passível de canalização ou obstrução para a edificação a partir de análise do perfil topográfico do terreno. (LAMBERTS *et al.*, 1997).

O projeto do ambiente construído para uma região que apresente, por exemplo, clima seco e quente – e, conseqüentemente, alta amplitude térmica – deve dar atenção a essa alta variação de temperatura diária, possibilitando, durante o dia, que a temperatura no interior da

edificação seja menor que a externa e que, durante a noite, seja maior que a externa. (FROTA; SHIFFER, 2001; LAMBERTS *et al.*, 1997; LAMBERTS *et al.*, 2011).

Nesses contextos, o vento é um elemento que se opõe ao conforto térmico, já que, durante o dia, está mais quente que o interior da construção e, durante a noite, mais frio. Somado a isso, há o inconveniente de esse vento carregar consigo partículas de poeira. Assim, a edificação pode ser planejada com aberturas pequenas. Há, também, a opção de se trabalhar com massas de água, que ajudariam a elevar os índices locais de umidade do ar, e com vegetação, que funcionariam, principalmente, como barreiras ao vento. (FROTA; SHIFFER, 2001).

Para o clima quente e úmido, as estratégias se diferem das mencionadas acima. Nesse caso, em que se percebe uma baixa amplitude térmica diária, as aberturas devem ser suficientemente grandes para permitir a ventilação do ar, principalmente no período noturno, quando a temperatura externa está mais baixa que a interna. Devem, também, receber bloqueadores solares, sem, contudo, atrapalhar o deslocamento do vento. Em relação à vegetação, deve ser escolhida com base em suas dimensões, já que, ao mesmo tempo, não pode obstruir a circulação do ar e deve servir para projetar sombra. (FROTA; SHIFFER, 2001).

A quantidade de radiação solar recebida pelas superfícies externas de uma construção é variável de acordo com a sua orientação e a época do ano, demonstrando o quão relevante se faz a forma da estrutura arquitetônica para as condições de conforto térmico em seu interior. Os iglus, por exemplo, possuem formas arredondadas (hemisféricas) para diminuir a região de contato com o exterior, diminuindo as perdas de calor do interior, enquanto que os chalés de regiões frias possuem cobertura inclinada para evitar o acúmulo de neve, aumentando a superfície de exposição aos raios solares (LAMBERTS *et al.*, 1997).

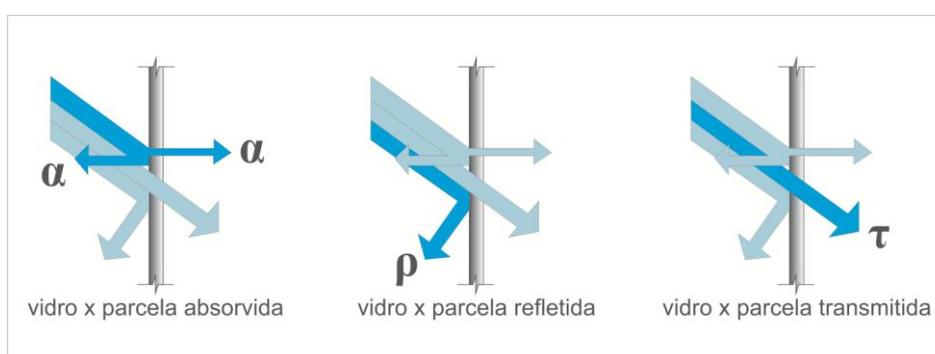
Neste ponto, há de se destacar que, em pé de igualdade com a forma arquitetônica, as relações entre homem e espaço também devem ser consideradas no planejamento dos interiores das construções. As funções das edificações, como empresarial, residencial, pública ou industrial, são distintas e, conseqüentemente, pedem por planejamento e projeto igualmente distintos, sendo fator influente na definição das estratégias bioclimáticas a serem adotadas.

O sol representa o maior ganho térmico de uma edificação. Os fatores que contribuem para o ganho de calor solar são a incidência de radiação e as características térmicas dos materiais da edificação (FROTA; SHIFFER, 2001; GONZÁLES CRUZ, 2003; LAMBERTS *et al.*, 1997). Em relação às propriedades dos materiais, os fechamentos arquitetônicos são, basicamente,

divididos em translúcidos e opacos, caracterizados, respectivamente, pela capacidade de transmitir radiação solar para o interior das construções (LAMBERTS *et al.*, 1997).

Os fechamentos em vidro (transparentes) comportam-se da seguinte maneira: absorvem  $[\alpha]$ , refletem  $[\rho]$  e transmitem  $[\tau]$ , para o interior, parte da radiação solar incidente na proporção dada pela Equação (19), como pode ser observado na Figura 6. Ao mesmo tempo em que transmitem a radiação no comprimento de onda solar (proveniente de alta temperatura – ondas curtas) para o interior do envelope construtivo, bloqueiam a radiação na faixa de comprimento de ondas emitida pelo interior da construção (proveniente de baixa temperatura – ondas longas)<sup>12</sup>, culminando no efeito estufa (KREITH, 1977; LAMBERTS *et al.*, 1997).

**Figura 6 – Comportamento do vidro em relação à radiação solar**



**FONTE: adaptado de Lamberts *et al.*, 1997, p.67.**

Dessa forma, fatores como a orientação e o tamanho desses fechamentos (exposição ao sol), o tipo de vidro (referente à sua transmitância térmica) e o uso de proteções solares internas (cortinas e persianas) e externas (como brises) são relevantes quanto ao planejamento do conforto térmico do ambiente construído.

Quanto aos fechamentos opacos, comportam-se refletindo  $[\rho]$  e absorvendo  $[\alpha]$  a radiação solar incidida na proporção  $[\alpha + \rho = 1]$ , sendo seletivos à radiação de ondas curtas e, conseqüentemente, apresentando transmissividade  $[\tau]$  nula. Como não transmitem diretamente a radiação solar para o interior da edificação, a energia solar incidente é parcialmente refletida e absorvida. A transferência de calor entre meio externo e meio interno se dá pelo seguinte processo: as paredes opacas recebem calor do meio externo por condução, convecção e radiação, o que representa um incremento de temperatura da superfície externa, e, por condução, dada a diferença de temperatura entre superfície externa e interna, conduzem o

<sup>12</sup> O sol tem uma temperatura efetiva da superfície de aproximadamente 5.773,15K e emite maior parte de sua energia abaixo de  $3 \times 10^{-6}$  m, enquanto, por exemplo, um filamento de lâmpada a 1.273,15K emite mais de 90% de sua radiação entre  $1 \times 10^{-6}$  m e  $10 \times 10^{-6}$  m (KREITH, 1977).

calor à superfície interna. Por fim, a energia térmica da superfície interna é transmitida ao interior da edificação pelos processos de condução, radiação e convecção. O inverso ocorre quando a temperatura no interior da edificação é maior do que a do exterior.

A temperatura interior de uma edificação é resultante do equilíbrio entre ganhos e perdas de calor através de sua envolvente. Na ausência de sistema de climatização, a evolução da temperatura interna depende, em grande medida, dos fluxos de calor transferidos por condução através dos materiais opacos que constituem teto, parede e piso. A condutividade térmica e a capacidade calorífica volumétrica dos materiais, além das características superficiais dos revestimentos, determinam o ganho de calor no interior do ambiente construído. (GONZÁLES CRUZ, 2003).

Toda edificação está submetida ao efeito periódico da radiação solar incidente e da temperatura ambiente externa. Sendo essas condições exteriores variáveis, a difusividade térmica dos materiais utilizados contribui para regular a entrada e a saída de calor do envelope construtivo, uma vez que expressa a noção de velocidade de propagação do calor em regimes não estacionários sendo, portanto, um indicador útil para análise do comportamento térmico dinâmico de uma construção.

González Cruz (2003) e Pereira (2004) alertam para o fato da necessidade de se correlacionar a difusividade térmica e a efusividade térmica<sup>13</sup> para obtenção de uma efetiva ferramenta para especificação de materiais durante as etapas de planejamento e projeto do ambiente construído.

As recomendações para o uso de materiais, quando se trata do acondicionamento natural ou passivo das edificações, devem referir-se sempre ao conjunto de características térmicas dos materiais, às tensões térmicas externas e às condições de contorno internas, ou seja, ao modo de uso do espaço. Para especificações quanto à adequação térmica de determinado tipo de material, com um enfoque bioclimático e de eficiência energética, essas devem, preferencialmente, ser formuladas em termos de parâmetros como a difusividade e a efusividade. (GONZÁLES CRUZ, 2003, p.19-20)<sup>14</sup>.

---

<sup>13</sup> A efusividade térmica, segundo González Cruz (2003), está relacionada com a efusão de uma potência térmica dentro de um material, com o conhecimento do fluxo de calor que um material absorve de acordo com o seu estado térmico. Em outros termos, a efusividade caracteriza a rapidez com que um determinado material absorve ou libera calor. Assim como a difusividade, a efusividade também depende da condutividade térmica e da capacidade calorífica volumétrica, mas é diretamente proporcional a ambos. O fato de, por exemplo, a capacidade calorífica volumétrica ser alta, há redução da difusividade e aumento da efusividade de um material.

<sup>14</sup> Traduzido pela autora. Texto original: *Las recomendaciones en el uso de materiales, cuando se trata de acondicionamiento natural o pasivo de edificaciones, deben estar siempre referidas al conjunto de características térmicas de los materiales, a las solicitaciones térmicas externas y a las condiciones límites internas, es decir, al modo de utilización del espacio. Para atender indicaciones en cuando a la conveniencia*

A presente pesquisa, nesse contexto, tem foco no desenvolvimento de um método teórico-experimental que possibilite estimar a difusividade térmica de componentes planos construtivos, como os blocos cerâmicos e de concreto.

No que se refere à contribuição da difusividade térmica para o conforto térmico das construções, acredita-se que os materiais utilizados para a conformação das alvenarias devam ter baixa difusividade, pois quanto menor for a rapidez com que o interior de um ambiente construído perceber as alterações externas de temperatura, menor será a amplitude térmica nesse interior.

### ***3.2.3 Conforto térmico e eficiência energética***

Desde a sua existência, o homem procura reorganizar o ambiente natural mediante uma intervenção consciente em busca de segurança, salubridade e comodidade (RHEINGANTZ, 2001). Na medida em que fixou moradia, a convivência com as condições climáticas locais tornou-se um desafio, sendo-lhe interessante usufruir daquelas favoráveis e se proteger das não tão favoráveis.

Com a evolução das formas de se abrigar que proporcionassem maior bem-estar, desenvolveram-se soluções arquitetônicas que propiciaram melhor aproveitamento das condições climáticas locais. No entanto, durante o Renascimento, quando o arquiteto se desvinculou do trabalho em conjunto com o artesão e passou a se responsabilizar exclusivamente pelo projeto, deu-se o afastamento entre o profissional projetista e o conhecimento de tais soluções práticas, o que, mais tarde, colaboraria para a concretização de um problema de sustentabilidade ambiental (LAMBERTS *et al.*, 1997). Segundo Rheingantz (2001), o avanço do conhecimento propiciado pela ciência e pela tecnologia contribuiu para um maior afastamento entre o homem e as suas tradições culturais, o que significou, dentre outros, a concepção de abrigos despersonalizados, desconfortáveis e, no entanto, “civilizados” e climatizados artificialmente.

O Estilo Internacional, que surgiu no período entre as duas grandes guerras mundiais, é posto como o movimento que revolucionou por completo os conceitos da arquitetura. Conforme apresentam Lamberts *et al.* (1997, p.18):

---

*térmica de determinado tipo de materiales, con un enfoque bioclimático y de eficiencia energética, estas deberán estar formuladas de preferencia en términos de parámetros tales como la difusividad y la efusividad.*

Mies van der Rohe, com suas cortinas de vidro, criou um verdadeiro ícone de edifícios de escritórios. Seu formalismo *clean* foi seguido por várias gerações de profissionais que internacionalizaram o que era distinto para algumas economias. O consequente edifício “estufa” foi então exportado como símbolo de poder, assim como sistemas sofisticados de ar condicionado e megaestruturas de aço e concreto, sem sofrer readaptações às características culturais e climáticas do local de destino.

As soluções projetuais giravam, então, em torno do uso indiscriminado de sistemas de iluminação e climatização artificiais, na medida em que os edifícios passaram a ser tratados como objetos estéticos desprovidos de contexto histórico dentro dos quais se deveria criar, artificialmente, uma temperatura agradável, elevando, a altos níveis, o consumo de energia elétrica em todo o mundo. Questões como o conforto ambiental, as necessidades individuais dos usuários e a posterior manutenção da edificação eram (e ainda são), muitas vezes, suplantadas em função de valores como o custo da construção e os aspectos estéticos vanguardistas (RHEINGANTZ, 2001).

O resultado de tal displicência é cada vez mais posto em evidência, trazendo a lume a necessidade de se discutir e se explorar um importante aspecto durante o planejamento e a projeção do ambiente construído: a eficiência energética (LAMBERTS *et al.*, 1997; RHEINGANTZ, 2001). Tal termo, relacionado à utilização racional de energia – o que, portanto, engloba a exploração consciente dos recursos naturais –, encerra a ideia de se utilizar menos energia para fornecer a mesma quantidade de valor energético (CALKINS, 2009).

No âmbito da construção, o conceito de eficiência energética é traduzido pela capacidade de, com o menor consumo de energia, obterem-se as mesmas condições ambientais que antes seriam alcançadas. É também importante entender que, como pontua o Programa de Combate ao Desperdício de Energia Elétrica (ELETROBRAS, 2010), conservar energia elétrica significa melhorar a maneira de utiliza-la sem abrir mão do conforto e das vantagens que ela proporciona.

Segundo o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS, 2007), a construção civil se caracteriza como um dos setores que mais consome recursos naturais. Em termos numéricos, a participação dos edifícios brasileiros no consumo de energia elétrica é superior a 45%, correspondendo, principalmente, ao gasto com o uso e com a operação das construções.

Nesse cenário, é nítida a importância do planejamento e do projeto do ambiente construído a partir das premissas de conforto humano e de redução do impacto ambiental. Os setores residencial, empresarial e público representam o principal foco de atuação dos projetistas no

que se refere a soluções que minimizem o consumo de energia, uma vez que grande parte da energia consumida pelo setor industrial é proveniente do uso de máquinas, fugindo da alçada dos profissionais de projeção do ambiente construído (LAMBERTS *et al.*, 1997). Na atuação dos designers, arquitetos e engenheiros no âmbito residencial, empresarial e público da construção, as soluções para minimizar o consumo de energia elétrica partem da análise e identificação dos domínios responsáveis pelos maiores gastos e, posteriormente, do estabelecimento de estratégias que minimizem tal consumo.

Imprimir a um edifício características que proporcionem uma resposta térmica ambiental conveniente não implica em acréscimo obrigatório de custo de construção, mas, ao contrário, deve resultar em redução do custo de uso e de manutenção, além de propiciar condições ambientais internas aprazíveis aos ocupantes, de modo a aproveitar o que o clima oferece de agradável e amenizar seus aspectos negativos.

### **3.2.4 Considerações sobre blocos cerâmicos e de concreto**

O conforto térmico do ambiente construído, repetimos, está intimamente associado à especificação e à utilização adequada dos materiais. Essas definições, portanto, devem ser conscientemente analisadas a partir do objetivo em questão e de critérios específicos, como sugere Callister (2006). Primeiramente, o material deve ser definido a partir de suas propriedades. Em um segundo momento, deve-se levar em consideração o processo de deterioração do material decorrente do uso e, por último, o critério relacionado aos fatores financeiros. Acredita-se, sobretudo, na possibilidade de uma escolha equilibrada, capaz de abarcar os três critérios mencionados, evitando-se, assim, o privilégio do último em detrimento dos demais.

As propriedades dos materiais são consequência de seus elementos estruturais. Elas podem ser do tipo: a) mecânica, relacionada à deformação do material consequente da aplicação de uma carga ou uma força; b) elétrica, referente à resposta ao estímulo de um campo elétrico; c) térmica, relacionada à resposta do material à aplicação de calor; d) magnética, referente à resposta do material à ação de um campo magnético; e) óptica, relacionada ao estímulo da radiação eletromagnética ou luminosa; e f) deteriorativa, referente à reatividade química dos materiais. Em consequência, o desempenho do material está diretamente atrelado a essas propriedades. (CALLISTER, 2006; SHACKELFORD, 2008).

A ciência e a engenharia classificam os materiais com base em suas propriedades, dividindo-os em cinco categorias: a) os metálicos, materiais opacos com boa condutibilidade elétrica e térmica, resistentes e com grande capacidade de conformação; b) os cerâmicos, compostos, principalmente, por minerais argilosos, cimento e vidro, sendo tipicamente isolantes térmicos e elétricos e, apesar de duros, são frágeis e quebradiços; c) os polímeros, materiais comumente conhecidos como plásticos e borrachas, de baixa massa específica e alta flexibilidade; d) os compostos, formados pela combinação de dois ou mais materiais das três primeiras categorias, com o objetivo de evidenciar as melhores características de cada componente; e e) os semicondutores, que, extremamente utilizados na indústria eletrônica e de computadores, têm propriedades elétricas intermediárias às dos condutores e isolantes elétricos (CALLISTER, 2006; SHACKELFORD, 2008). Para Callister (2006), existem ainda os biomateriais, que englobam quaisquer materiais anteriormente citados passíveis de implantação no corpo humano.

A cerâmica e o concreto, como anteriormente mencionado, são materiais comumente utilizados na conformação das estruturas e vedações das edificações brasileiras e, por isso, configuram-se foco do presente trabalho, notadamente por serem materiais construtivos diretamente relacionados ao conforto térmico do ambiente construído, pelo que apresentaremos algumas de suas particularidades.

Os blocos cerâmicos pertencem ao grupo dos materiais cerâmicos, categorizados no subgrupo de produtos estruturais à base de argila (CALLISTER, 2006). Segundo a NBR 15270 (2005), partes 1 e 2, os blocos cerâmicos de vedação e estruturais devem ser fabricados por conformação plástica de matéria prima argilosa, contendo ou não aditivos, e queimados em elevadas temperaturas. Basicamente, o processo produtivo dos blocos cerâmicos é composto pelas seguintes etapas: a) após coleta da argila, mistura-se a matéria prima<sup>15</sup> com água até se obter uma massa com consistência suficiente para que as peças sejam moldadas e permaneçam intactas nas etapas de transporte, secagem e cozimento; b) passa-se, então, essa massa pela extrusora<sup>16</sup> para conformação das peças; c) posteriormente, os blocos são cortados e locados em ambiente fechado para secagem à temperatura ambiente e, em seguida, são

---

<sup>15</sup> A matéria prima, nesse processo, não se encontra no estado como fora extraída da natureza. Antes da adição de água para a etapa de conformação, tal matéria prima é submetida a uma operação de moagem ou trituração e posterior peneiramento para seleção da faixa desejada de granulometria das partículas. (CALLISTER, 2006).

<sup>16</sup> No processo de extrusão, a pasta cerâmica passa através de uma cavidade cujas paredes dão forma ao interior e à superfície exterior das peças (COSTA, 2013).

transportados para um forno, onde são queimados a alta temperatura; e d) após a queima, as peças são resfriadas e estão prontas para uso.

Segundo Costa (2013), os materiais cerâmicos de barro vermelho, por serem constituídos por partículas microscópicas misturadas com água, possuem plasticidade. Essa característica permite que o material seja facilmente conformado no processo de fabricação por extrusão, possibilitando que os blocos tenham formatos e dimensões variadas.

As etapas de secagem e cozimento conferem ao material melhora em sua massa específica e resistência. No processo de secagem, a peça experimenta uma contração de volume consequente de sua porosidade inicial, do teor de água existente e de sua espessura. Os blocos cerâmicos, cozidos normalmente a uma temperatura de aproximadamente 900°C, sofrem um processo de vitrificação, que resulta em um corpo denso, resistente e durável. (CALLISTER, 2006).

No que se refere à porosidade de um material, quanto mais ele o for, melhor isolante térmico será, pois a condutividade térmica do ar é muito menor do que a condutividade da matriz sólida e, quanto menores e fechados forem os poros, mais eficaz será o efeito da porosidade, pois é minimizada a transferência de calor por convecção. A condutividade térmica dos blocos cerâmicos pode ser modelada em seu processo de produção e, também, pela massa específica e disposição das furações internas. (COSTA, 2013).

O concreto, por outro lado, é um exemplo de compósito formado a partir de diferentes componentes de um único tipo de material. Por ser o resultado do reforço de uma matriz a partir de partículas, é denominado compósito agregado. Segundo Shackelford (2008), o concreto comum é formado por brita (agregado grosso) e areia (agregado fino) adicionadas a uma matriz de cimento<sup>17</sup>. Em geral, os agregados – sempre materiais naturais – são escolhidos a partir da disponibilidade local, e suas partículas são medidas e controladas por peneiras-padrão de acordo com a proporção e dimensões necessárias ao tipo de concreto desejado.

De modo geral, o processo de fabricação dos blocos de concreto constitui-se das seguintes etapas: a) após inspeção e recebimento da matéria prima, mistura-se, proporcionalmente, o cimento com água e agregados para produzir o concreto; b) em sequencia, as peças são moldadas e deixadas nas formas por determinado tempo para, posteriormente, serem desenformadas e passarem pelo processo de cura, ao ar livre ou em câmaras à vapor; e c) por fim, os blocos prontos para uso são estocados.

---

<sup>17</sup> O concreto moderno utiliza o cimento *portland*.

Para a fabricação de peças de concreto, como os blocos construtivos, são necessárias reações de hidratação para que haja o endurecimento do cimento. Trata-se de um processo complicado, no qual podem ser acrescentados aditivos para obtenção de comportamentos específicos. (SHACKELFORD, 2008). Quanto à moldação, procedimento de conformação dos blocos, é ela mais complexa para automatização. Assim como nos cerâmicos, a massa específica e a disposição das furações internas contribuem para a condutividade térmica dos blocos. O ciclo de produção, em geral, desenvolve-se à temperatura ambiente, sem necessidade de grandes dispêndios de eletricidade e criação de atmosferas quentes. (COSTA, 2013).

Em um envelope construtivo, os blocos, sejam cerâmicos ou de concreto, são os componentes mais importantes. Para uni-los e formar alvenarias (painéis), utiliza-se, conforme apresenta Camacho (2006), argamassa, constituída de cimento, agregado miúdo, água e cal, podendo, em algumas ocasiões, receber aditivos. A maioria das construções no Brasil utiliza blocos de concreto. Os blocos cerâmicos são mais utilizados na região Sul devido à abundância de matéria prima (argila) e à existência de mão de obra qualificada e *know how* na tecnologia de produção.

Na busca por maiores conhecimentos sobre o comportamento térmico dos materiais, relacionado com o conforto do ambiente construído e com a degradação do meio ambiente, Sansão (2011) desenvolveu uma análise ambiental de painéis de blocos cerâmicos e de concreto por meio da avaliação do ciclo de vida e do desempenho térmico de envoltórias a partir de modelamento matemático, utilizando, como unidade funcional, uma tipologia residencial unifamiliar de aproximadamente 42m<sup>2</sup> situada em Belo Horizonte, seguindo os parâmetros do projeto padrão de casas populares da Caixa Econômica Federal. Em seus estudos, a autora apontou que, na fase de fabricação<sup>18</sup>, os blocos de cerâmica impactam mais o meio ambiente do que os blocos de concreto. No entanto, para que os painéis em blocos de concreto tenham o mesmo desempenho térmico dos painéis em blocos cerâmicos<sup>19</sup> – propiciando, assim, maior conforto térmico durante a fase de uso da edificação –, há a necessidade de se aumentar consideravelmente a espessura das camadas internas e externas de reboco, material que, por ser constituído de cimento, impacta proporcionalmente mais o meio

---

<sup>18</sup> “A comparação das simulações dos impactos ambientais dos sistemas de vedação [...] indica que os ciclos de vida das vedações em blocos cerâmicos apresentam maiores danos ambientais em consequência das emissões atmosféricas liberadas durante o processo de queima presente na etapa de fabricação das peças” (SANSÃO, 2011, p.105).

<sup>19</sup> Sansão (2011) utilizou a resistência térmica como propriedade dos materiais para avaliação do desempenho térmicos de blocos cerâmicos e seus congêneres em concreto na fase de uso de uma edificação.

ambiente do que o sistema composto por cerâmica e reboco. Dessa forma, a autora concluiu ser mais adequada a utilização de envoltórias compostas por painéis de blocos cerâmicos. Somado a esse fato, Sansão (2011) acredita que o impacto ambiental verificado ao longo da vida útil dos painéis de cerâmica seria compensatório em relação à sua fase de fabricação, principalmente pela economia de energia decorrente da utilização de sistemas de condicionamento artificial de ar – que certamente seriam maiores se utilizados painéis formados por blocos de concreto de mesmas dimensões e espessuras de reboco.

Nessa mesma linha de pesquisa sobre o conforto térmico das edificações atrelado à eficiência energética, Costa (2013) apresenta os resultados de um estudo comparativo entre blocos cerâmicos e de concreto com o objetivo de discutir os pontos positivos e negativos de aplicação desses materiais na construção civil. Em seu trabalho, o referido autor também concluiu que, apesar de a produção dos blocos de concreto ser energeticamente mais favorável, mesmo com maiores quantidades de rejeição, os blocos cerâmicos são mais indicados para uso. Isso porque, de acordo com os resultados dos ensaios empreendidos, os cerâmicos: a) têm menores teores de umidade, conduzindo mais lentamente o calor e evitando a formação de fungos e micro-organismos; b) são mais resistentes ao fogo; c) são mais resistentes à compressão; d) possuem menor massa volumétrica aparente, o que significa que são ergonomicamente melhores para o manuseio e reduzem ação sobre a fundação; e e) apresentam melhor característica de isolamento térmico.

Moreno (2013), em seus estudos, também procurou avaliar o desempenho de uma unidade habitacional unifamiliar projetada segundo critérios e fomentos do Programa “Minha Casa Minha Vida”. A partir da definição de sete tipologias construtivas de parede a base de blocos cerâmicos ou de concreto e cinco de cobertura com base em cerâmica, concreto ou fibrocimento, tal autora realizou avaliações de desempenho dos sistemas construtivos para as oito zonas bioclimáticas brasileiras definidas na NBR 15220-3. Primeiramente, a pesquisadora avaliou o desempenho térmico das envoltórias a partir do recomendado pela NBR 15220-3, pela NBR 15575, pelo Selo Casa Azul e pelo Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R). Posteriormente, avaliou as mesmas envoltórias segundo o Método Prescritivo do RTQ-R e, por último, a avaliação se deu por simulação computacional das unidades habitacionais conforme Método de Simulação prescrito também pelo RTQ-R. Com a análise dos resultados, Moreno (2013) concluiu que os sistemas construtivos que possuem cerâmica em sua composição, sejam paredes ou coberturas, apresentam os melhores níveis de desempenho

térmico em todas as zonas analisadas. Os que possuíam concreto, ao contrário, apresentaram níveis inferiores.

Com o objetivo de analisar o desempenho térmico de blocos de cerâmica e de concreto a partir do estudo da difusividade térmica dos respectivos materiais, o presente estudo é parte da mesma linha de pesquisa dos trabalhos apresentados.

### **3.3 Termografia aplicada ao conforto térmico do ambiente construído**

Neste tópico, apresenta-se a revisão de literatura sobre a termografia por infravermelho, com foco em sua aplicação no estudo do conforto térmico do ambiente construído. São feitas, também, considerações sobre as incertezas atribuídas ao processo de medição indireta de temperatura por termografia.

#### **3.3.1 Considerações sobre a termografia infravermelha**

A termografia infravermelha, definida por Calado (2013, p.13) como uma técnica “que consiste na captura, sem contato físico, da radiação térmica infravermelha emitida pela superfície dos corpos através de um equipamento que transforma a energia térmica em pulsos elétricos que, depois de tratados, são exibidos na forma de uma imagem digital que representa o perfil de temperatura de uma determinada região do espaço”, é consideravelmente difundida em algumas áreas do conhecimento, seja em aplicações práticas corriqueiras, seja em pesquisas científicas que investigam a potencialidade de seu uso.

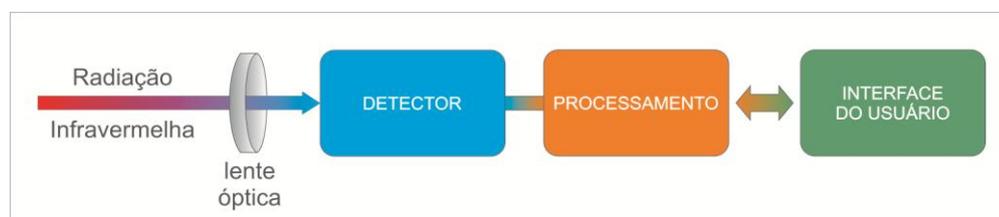
A aplicação da termografia na manutenção industrial para detecção de pontos de sobreaquecimento em dispositivos elétricos e no monitoramento de variação de temperatura em caldeiras, fornos e tubulações é bem consolidada. Na construção civil, em especial, o uso de tal técnica é recorrente e está comumente associado ao estudo de fachadas, à análise de isolamento térmico, à detecção de infiltrações, de corrosão de armaduras e de fendas estruturais, à manutenção preditiva e preventiva das edificações e às situações que envolvem a passagem de corrente elétrica ou desgaste mecânico. (ABREU *et al.*, 2012; MENDONÇA, 2005; MEOLA; CARLOMAGNO, 2004; MEOLA *et al.*, 2005; SALES, 2008).

Na arquitetura e nas artes, sua aplicação é voltada para avaliação de estruturas ocultas, de patologias nas fachadas, na identificação de fontes de fuga de calor, no mapeamento de áreas afetadas pela umidade, na análise do patrimônio histórico e da integridade de obras de arte, em especial os afrescos. Em áreas como a medicina, há relatos do seu uso para diagnóstico e monitoramento de câncer de mama, processos inflamatórios, disfunções vasculares e lesões neuro-músculo-esqueléticas. Na medicina veterinária, o estudo está voltado, por exemplo, para o diagnóstico e a avaliação da pododermatite em aves e de lesões dos cascos em ovinos. (ASENSIO *et al.*, 2010; CORTIZO, 2007; CORTIZO *et al.* 2008; ELISABETTA, 2013; LEHUGEUR, 2012; TAVARES, 2006;). Lima *et al.* (2007) afirmam que, apesar de ser uma técnica ainda pouco utilizada em algumas áreas de conhecimento, a termografia demonstra ser uma ferramenta importante na análise e no entendimento de efeitos encobertos à visão humana.

A termografia é uma técnica de ensaio não destrutivo, sendo que ensaios desse tipo, em geral, são qualificados por não prejudicarem e não causarem dano ao elemento em estudo. Podem ser realizados *in loco*, com rapidez e repetibilidade de forma prática. Possibilitam, também, o desenvolvimento de investigações mais abrangentes, com acompanhamento sistemático do objeto em estudo e com resultados imediatos (LEITE, 1966).

Os equipamentos de termografia (termocâmeras de infravermelho) são dotados de, basicamente, uma lente e sensores ou detectores de radiação, que captam a energia radiante na faixa do infravermelho e direcionam esse sinal para um amplificador onde um *software* o processa e o converte em imagens térmicas (termogramas), conforme esquematizado na Figura 7.

**Figura 7 – Diagrama simplificado de uma câmera infravermelha.**

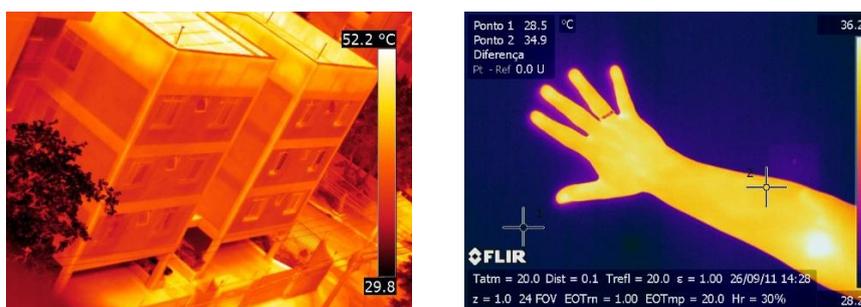


**FONTE: adaptado de FLIR, 2012, p.7.**

De um modo geral, o sinal decodificado é apresentado nos termogramas numa graduação entre tons escuros e claros, segundo os limites da escala de temperatura em uso, como exemplificado na Figura 8. O registro das imagens térmicas gerado pelos sistemas

infravermelhos é digital e permite a ligação desse sistema a televisores ou computadores para posterior análise e processamento das informações. (FLIR, 2012; MALDAGUE, 2002; SALES, 2008).

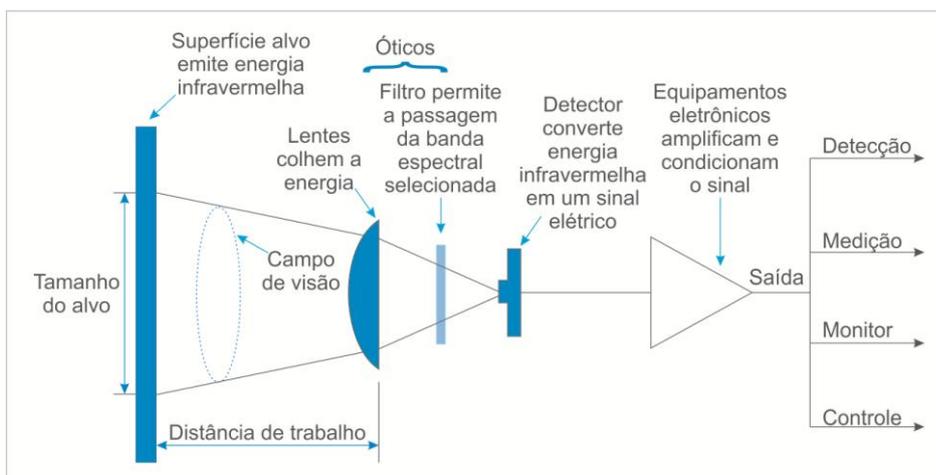
**Figura 8 – Imagens térmicas da fachada de um edifício e de um braço humano.**



É importante ressaltar que as câmeras de infravermelho são configuradas e calibradas para uma faixa específica do espectro infravermelho. Dessa forma, o material da lente deve ser selecionado de acordo com a faixa espectral desejada. Como opções de materiais para as lentes, usualmente utiliza-se o silício (Si), para comprimento de onda médio (MWIR –  $3\mu\text{m}$  a  $6\mu\text{m}$ ), e germânio (Ge), para comprimento de onda longo (LWIR –  $6\mu\text{m}$  a  $15\mu\text{m}$ ). Com uma configuração apropriada, a lente da câmera de infravermelho pode transmitir cerca de 100% da radiação incidente, tendo uma precisão da medição da temperatura, em geral, com erro menor do que  $1^\circ\text{C}$  (FLIR, 2012).

Quanto aos sensores, eles podem ser considerados como os dispositivos responsáveis por converter a energia térmica incidente em alguma outra forma de sinal mensurável, sendo classificados em detectores térmicos e fotodetectores. Os sensores térmicos, microbolômetros, feitos basicamente de metal ou de materiais semicondutores, reagem à radiação incidente em uma superfície, o que altera a sua temperatura e permite gerar um sinal elétrico de saída por meio do fenômeno físico denominado ferroelétrico. Esses detectores operam em situações nas quais exista um gradiente de temperatura. Possuem ampla resposta espectral e, no entanto, são mais lentos e menos sensíveis do que os fotodetectores. (CORTIZO *et al.*, 2008; FLIR, 2012; SALES, 2008). A Figura 9 apresenta, em esquema, a configuração básica de um termovisor, câmeras termográficas com sensores térmicos.

**Figura 9 – Configuração básica de um termovisor.**



**FONTE:** adaptado de Cortizo, 2008, p.176.

Para o uso dos sensores térmicos, há de se estimular o aquecimento ou o resfriamento do objeto ensaiado. Esse estímulo pode ser passivo ou ativo. Na primeira situação, nenhuma estimulação artificial é utilizada, sendo propriamente natural o gradiente de temperatura existente entre o objeto em observação e o meio no qual ele está inserido. Os resultados de análises de sistemas passivos são, basicamente, de caráter qualitativo, ou seja, por análise de diferenças em seus padrões de distribuição térmica. (MALDAGUE, 2002).

Por outro lado, os sistemas ativos permitem a obtenção de resultados quantitativos, pela possibilidade de mensurar e controlar os parâmetros do ensaio, como fonte, tempo, intensidade e distância. Nessa situação, há o aquecimento ou resfriamento artificial do objeto para se obter o gradiente de temperatura necessário ao ensaio. Assim, o fornecimento de energia pode variar segundo a intensidade (alta ou baixa), a posição (sobre a face frontal ou posterior da superfície observada), a fonte geradora (como lâmpadas ou resistores), a frequência (pulso, constante ou modulado), o tempo (instantâneo ou moderado) e o tipo (injeção de calor ou injeção de jatos de ar frio). (CORTIZO *et al.*, 2008; MALDAGUE, 2002).

A termografia infravermelha ativa como técnica de ensaio não destrutivo apresenta pontos positivos e negativos. Como pontos fortes, a técnica possibilita rápida inspeção sem a necessidade de contato com o objeto ensaiado, segurança do(s) pesquisador(es), resultados de fácil interpretação e grande variedade de aplicação. Os pontos fracos referem-se à dificuldade de obtenção de uma rápida, uniforme e alta estimulação térmica em superfícies muito grandes, aos efeitos de perdas térmicas que afetam a confiabilidade da interpretação, ao custo do

equipamento, à limitação no alcance de espessuras sob a superfície e aos problemas com a determinação da emissividade. (MALDAGUE, 2002).

A operação de um fotodetector, por sua vez, baseia-se na interação direta entre os fótons da radiação incidente e os elétrons do material detector. Maldague (2002) define tal princípio a partir da medição direta da excitação gerada por fótons incidentes, em virtude da mudança da condutividade elétrica ou pela tensão gerada. Sua sensibilidade, ao contrário dos detectores térmicos, está associada apenas à queda da temperatura de operação, havendo a necessidade, muitas vezes, de se atingir temperaturas criogênicas. (CORTIZO *et al.*, 2008; FLIR, 2012; SALES, 2008).

Como a maioria dos objetos de interesse para a termografia não são corpos negros, é preciso que haja alguns ajustes para que a câmera represente graficamente e corretamente a temperatura desses corpos. A emissividade, a absorção atmosférica e a distância entre câmera e objeto configura-se como importantes fatores. (FLIR, 2012; MALDAQUE, 2002).

A atmosfera que existe entre a câmera termográfica e o objeto alvo tende a atenuar a radiação devido à absorção de gases e ao espelhamento de partículas. Em analogia, embora a atmosfera normalmente transmita muito bem a luz visível, nevoeiro, nuvens, chuva e neve podem impedir a visualização de objetos distantes. O mesmo princípio aplica-se à radiação infravermelha. Dessa forma, se nenhuma correção para atenuação for aplicada, o erro associado à temperatura medida por termografia é proporcional à distância entre termovisor e objeto. O *software* da termocâmera é o componente responsável por essa correção. A intensidade da atenuação depende fortemente do comprimento de onda da radiação. Câmeras que operam na faixa espectral entre  $7,5\mu\text{m}$  e  $13,5\mu\text{m}$  trabalham bem em qualquer ambiente, pois a atmosfera tende a atuar como um filtro passa-alto para comprimento de onda acima de  $7,5\mu\text{m}$  (FLIR, 2012).

Além disso, durante o processo de varredura (escaneamento), a câmera infravermelha percebe a temperatura do objeto e de todos os pontos próximos a ele. Portanto, a leitura da temperatura do objeto será uma média aritmética das temperaturas de todos os pontos presentes na área de influência. Dessa maneira, há de se ter, novamente, um cuidado especial com a distância entre a câmera e o objeto durante o processo de leitura. (CORTIZO *et al.*, 2008).

Os termovisores mais recentes são dotados de alta tecnologia e possuem recursos como o ajuste de foco, opção de filmagem ou fotografia, lentes especiais e mira *laser* que possibilitam

adequar o campo de visão do aparelho às especificidades de cada ensaio termográfico. No entanto, para a obtenção de resultados precisos, o usuário deve ter uma compreensão dos princípios da radiação infravermelha, do comportamento óptico da câmera e dos métodos de calibração. Há, também, de se considerar a experiência e a capacitação técnica de quem manipula os equipamentos necessários aos ensaios e de quem avalia os respectivos resultados. (FLIR, 2012; SALES, 2008).

### ***3.3.2 Aplicações da termografia infravermelha ao estudo do conforto térmico do ambiente construído***

O uso da termografia infravermelha, em âmbito mundial, aumentou drasticamente nos últimos anos. Essa técnica vem sendo cada vez mais empregada para mensurar, avaliar ou analisar as características de superfícies em uma variedade de investigações que envolvem os fenômenos de transferência de calor. Estudos e aplicações práticas da termografia infravermelha estão sendo direcionados ao trato do conforto térmico do ambiente construtivo no que se refere à determinação das propriedades térmicas dos materiais de construção, à análise do comportamento térmico do envelope construtivos, à detecção de perdas de calor como em isolamento térmico de paredes e telhados, à avaliação do conforto térmico durante o contato com diferentes revestimentos e à localização de fontes de umidade (FOKAIDES; KALOGIROU, 2011; MAGNANI; SILVA, 2012). Na literatura brasileira, entretanto, pelo que pudemos constatar, os trabalhos, nesse sentido, ainda são incipientes.

Estudos recentes desenvolvidos por Pedra (2011) e Pedra *et al.* (2012) mostraram que o uso de resíduos de poliestireno expandido (EPS) associados à alvenaria em blocos cerâmicos e de concreto propiciam melhores condições de conforto ao ambiente construído. Os mencionados pesquisadores discutem o conforto térmico sob o ponto de vista da arquitetura bioclimática, na medida em que buscam uma alternativa para desenvolvimento de envelopes construtivos com maior inércia térmica. Para tal, utilizam a termografia infravermelha com o objetivo de avaliar o desempenho térmico de um modelo de alvenaria estrutural em blocos aos quais foram incorporados pérolas de EPS em sua cavidade interna, em paralelo a um modelo de alvenaria convencional. Nesse experimento, o estímulo para o aquecimento da face posterior do modelo foi passivo (exposição ao sol), e o equipamento de termografia captou os raios infravermelhos dessa mesma face. Os resultados indicaram o potencial de uso da termografia

para monitoramento qualitativo de superfícies de blocos cerâmicos e de concreto, com ou sem EPS. No entanto, os autores indicam a necessidade de maior controle em relação à incidência de calor e análise das duas faces do modelo, uma vez que as temperaturas elevadas na face anterior da alvenaria não garantem que os materiais utilizados no sistema estejam com temperaturas mais altas na superfície posterior.

Alvarenga, Pedra e Sales (2012) apresentaram um estudo em fachadas revestidas de cerâmicas de cores diferentes, evidenciando a influência da cor na absorvância do material. Partindo do pressuposto que a estrutura vertical do envelope construtivo seja o principal contribuinte para as condições de conforto no interior das edificações – e, conseqüentemente, o material empregado nas fachadas tem forte influência sobre isso –, que o sol seja a principal fonte de calor em construções residenciais e que a cor das superfícies seja um dos fatores que influenciam a absorvância do material, as pesquisadoras utilizaram a termografia infravermelha para verificar a temperatura superficial da fachada de três edifícios construídos com blocos de concreto de alvenaria estrutural e revestidos com cerâmica nas cores branca, verde escuro, verde claro e vermelho. As temperaturas superficiais das cerâmicas foram medidas sob influência da luz solar e comparadas entre si com a finalidade de avaliar se a termografia seria capaz de perceber as variações de temperatura entre as cores em estudo. Os resultados indicaram que as cores mais escuras influenciam mais a temperatura superficial das fachadas do que as cores claras, sendo fortemente recomendado o uso de acabamento cerâmico na cor branca para obtenção de um maior conforto térmico no interior da edificação. A termografia, em tal estudo, mostrou-se eficiente como técnica para avaliar ou validar resultados relacionados a estudos de temperatura nas fachadas de edificações.

Silva Júnior *et al.* (2012) apresentaram um estudo utilizando blocos construtivos de cerâmica associados à fibra de curauá, com o intuito de desenvolver um revestimento alternativo a partir de fontes renováveis e de baixo impacto ambiental disponíveis em território brasileiro, para maximizar a sensação de conforto térmico do ambiente construído e, conseqüentemente, diminuir o dispêndio de energia em função de sistemas de refrigeração. Para o estudo do comportamento térmico desse novo material, os pesquisadores confeccionaram corpos de prova ora com, ora sem fibras de curauá fixadas em suas faces frontais, e as monitoraram por termografia infravermelha após estimulação ativa por um sistema de aquecimento elétrico direcionado às suas faces posteriores. Os resultados indicaram que essa fibra natural, associada ao bloco cerâmico, representou um ganho na capacidade de retenção de energia térmica.

Dando continuidade à pesquisa, Silva Junior (2013) desenvolveu um compósito polimérico à base de amido termoplástico, polietileno de baixa massa específica e fibra de curauá, e o caracterizou por espectroscopia de infravermelho, análise térmica, análise mecânica, microscopias eletrônicas de varredura e microscopia ótica. Somado a isso, o pesquisador aplicou o compósito com diferentes percentuais de fibras sobre blocos cerâmicos, os submeteu à insolação natural e monitorou o comportamento térmico dos corpos de prova por termografia infravermelha. Os resultados mostraram que o compósito desenvolvido possui potencial para ser utilizado como revestimento térmico de elementos construtivos. A termografia também se mostrou eficiente para identificar diferenças de temperatura em amostras de compósitos poliméricos com distintos percentuais de fibras.

Monteiro e Leder (2011) desenvolveram uma pesquisa com o objetivo de analisar o efeito causado pela radiação solar sobre as superfícies urbanas, para diagnosticar as principais fontes acumuladoras de energia térmica e para avaliar o uso da termografia infravermelha como técnica de detecção do desempenho térmico de recintos urbanos. Com essa proposta, analisaram, durante dois dias, oito pontos do centro comercial de João Pessoa, Paraíba, locais esses que se diferenciam pela variação da presença da vegetação e de sombreamento. Em suas conclusões, os autores acreditam que a pavimentação de ruas e de calçadas tenha contribuição significativa para o armazenamento de energia térmica nas cidades, e que a condição de sombreamento ameniza a temperatura de superfícies de forma mais eficaz para mitigar o aquecimento do espaço urbano do que o uso de materiais de construção considerados “frescos”. Ademais, acreditam na potencialidade do uso da termografia para avaliação da carga térmica nas superfícies urbanas.

Também na busca pela contribuição com a sustentabilidade ambiental, Silveira *et. al* (2012) apresentaram um estudo com o objetivo de utilizar a termografia por infravermelho para estimar propriedades térmicas de blocos construtivos desenvolvidos para edificações de baixa renda de Minas Gerais a partir de refugo da construção civil – argamassa, concreto, agregados naturais convencionais, cimento, tijolos, placas de cerâmica e blocos – com adição de detritos da indústria alimentícia, como pó de casca de arroz e de café. Os testes experimentais foram implementados em três corpos de prova, utilizando termografia pulsada associada ao modelo matemático que considera condução unidimensional em regime transiente. Os corpos de prova foram: o primeiro com 15% do cimento substituído por pó de casca de arroz; o segundo, com 10% do cimento substituído por pó de casca de café; e o terceiro, com 15% do cimento também substituído por pó de casca de café. Para os autores, a adição de fibras

naturais altera as características térmicas e mecânicas dos materiais e, nesse contexto, consideraram o método teórico-experimental proposto pertinente para determinação da condutividade térmica, da difusividade térmica, da emissividade e do calor específico desses materiais.

Para Grossi *et al.* (2007), existem vários métodos para se estimarem as propriedades termofísicas dos materiais, métodos esses que podem ser divididos em duas classes: os que utilizam o fluxo de calor em regime permanente e os que se valem do fluxo de calor em regime transiente. O ponto comum de todos esses métodos é que uma adequada solução para equação de calor precisa ser conhecida para as condições iniciais e de contorno da situação em questão e, em cada um dos métodos, tenta-se reproduzir, em laboratório, essas condições para medições do campo de temperatura para o cálculo da propriedade requerida (PERKOWSKI, 2011).

No que se refere à difusividade térmica, propriedade dos materiais que é objeto de estudo do presente trabalho, sabe-se que é possível encontrar, na literatura, diferentes formas de se determiná-la. O primeiro dos métodos desenvolvidos para estimar a difusividade de um material se destaca, na atualidade, como o mais popular: o método *Flash Laser*. Para uma fina amostra cilíndrica homogênea e isotrópica, esse método consiste na medição do aumento de temperatura da sua face posterior, resultante de um pulso curto de energia em sua face frontal. O transiente de elevação de temperatura da face posterior é medido por um termômetro infravermelho e registrado em função do tempo. A difusividade térmica é, então, calculada comparando-se a curva experimental com a curva do modelo teórico para condução de calor. (CDTN, 2014; FLORES LARSEN; LESINO, 2004; GROSSI *et al.*, 2007).

Contudo, conforme aponta Perkowski (2011), estão cada vez mais presentes métodos que utilizam imagens de infravermelho para a determinação da difusividade térmica. Nesse sentido, o mencionado autor, em seu trabalho, questiona o fato de as especificidades dos métodos, em geral, no que se refere à preparação da amostra, às condições iniciais de contorno e aos equipamentos empregados, limitarem ou impossibilitarem o diagnóstico da difusividade térmica *in situ*. Assim, Perkowski (2011) apresenta as bases teóricas e as verificações numérica e experimental de um método que permite a determinação, *in situ*, da difusividade térmica de uma gama de materiais isotrópicos<sup>20</sup>. Esse método teórico-experimental consiste na análise – por meio de modelo matemático baseado na lei de resfriamento de Newton – da propagação de um fluxo de calor – monitorada por termografia –

---

<sup>20</sup> Um material é isotrópico se suas propriedades físicas e mecânicas são as mesmas em todas as direções.

em uma superfície plana da amostra, estimulada por uma fonte de impulso térmico de baixa energia, realizado, por exemplo, pelo contacto de curta duração com outro sólido de temperatura mais elevada. Para a aplicação do método, é preciso que haja um corpo homogêneo, isotrópico e sem fonte de calor, inicialmente em equilíbrio térmico e inserido em uma temperatura ambiente constante. O pesquisador desenvolveu uma simulação computacional e uma aplicação real para testar o método proposto e comparou o resultado experimental com o valor disponível na literatura para difusividade térmica da amostra em estudo, evidenciando a adequabilidade da proposta. Conforme levantado pelo autor, a necessidade de numerosas operações é uma desvantagem do método proposto, bem como o fato de ele poder ser utilizado apenas para sólidos isotrópicos e homogêneos com superfícies externas planas.

Flores Larsen e Lesino (2004) também propuseram um método teórico-experimental para medição, *in situ*, da difusividade térmica de materiais de construção, utilizando tecnologia laser e termografia infravermelha. No método proposto por eles, as medições termográficas são realizadas na superfície frontal da amostra, permitindo que o procedimento possa ser desenvolvido *in situ* e que a espessura do material não seja um fator limitante ao ensaio. O procedimento experimental consiste em irradiar um fluxo de calor (tecnologia laser) na amostra e monitorar a temperatura de um ponto central da superfície irradiada durante os primeiros segundos de aquecimento. Em seguida, espera-se que a distribuição de temperatura alcance o estado estacionário e se mede a temperatura média máxima alcançada na área irradiada. Como modelo matemático, utilizam o de um sólido semi-infinito, sobre o qual incide, perpendicularmente, um fluxo de calor que é absorvido por toda superfície e cuja equação é válida apenas nos primeiros segundos do aquecimento, em que ainda não são perceptíveis os efeitos da distribuição não uniforme de calor sobre a superfície. Nessa equação, a difusividade térmica é calculada a partir do conhecimento da inclinação da reta que melhor se ajusta aos valores de temperatura medidos e da temperatura média máxima. Utilizaram-se amostras de concreto, madeira e gesso, cujos resultados foram comparados aos disponibilizados na literatura, confirmando a validade do método.

Outros autores igualmente propuseram o uso da termografia para a determinação da difusividade e de outras propriedades térmicas de materiais. Boué e Holé (2012), por exemplo, sugerem um método teórico-experimental para determinação da difusividade e da condutividade térmica de um material uniforme – no caso, um polímero. Nesse método, um procedimento experimental que utiliza a termografia infravermelha estimulada é associado a

um modelo matemático que descreve a equação de difusão de calor adequada à condição inicial e de contorno em questão. No procedimento experimental, são utilizadas duas pequenas amostras simultaneamente: uma como referência e outra para análise de suas propriedades. Essas amostras foram posicionadas sobre uma fonte de calor plana, que provocou excitações térmicas periódicas em suas faces posteriores, e uma câmera de infravermelho, perpendicular ao plano do chão, foi utilizada para medir a evolução da temperatura das suas superfícies frontais, pintadas de preto para garantir que tivessem a mesma emissividade. A difusividade térmica foi, então, estimada por equação apropriada, utilizando-se as medições de fase de temperatura da amostra em estudo e das superfícies da fonte de calor. A condutividade, em sequência, foi determinada pela comparação de desempenho entre as amostras. Os valores obtidos pelo método estão, segundo as autoras, de acordo com valores reportados na literatura, ratificando a pertinência do método teórico-experimental proposto.

A aplicação da termografia por infravermelho foi utilizada nos estudos analisados para determinação da difusividade térmica de amostras de materiais homogêneos, o que não se aplica à caracterização da difusividade térmica de blocos vazados cerâmicos e de concreto, materiais compostos por camadas de material sólido e ar. Entretanto, percebe-se que todas as propostas consideram métodos teórico-experimentais que utilizam a termografia para mensurar gradientes de temperatura e um apropriado modelo matemático para a equação de calor, assim como foi desenvolvido na presente pesquisa.

### ***3.3.3 Incertezas associadas à medição indireta de temperatura por termografia***

O termo “metrologia” tem origem nas palavras gregas *metron* e *logos*, que significam, respectivamente, medida e ciência. Definida pelo Vocabulário Internacional de Metrologia (INMETRO, 2012) como a ciência da medição e suas aplicações, a metrologia se dedica ao estudo e à descrição de todos os aspectos teóricos e práticos relacionados a medições, qualquer que seja a incerteza e o domínio de aplicação.

O processo de medir é experimental, e consiste em um conjunto de operações que objetivam determinar um ou mais valores que podem ser, razoavelmente, atribuídos a uma grandeza, correspondentes a múltiplos ou a frações de uma unidade padrão (material de referência). (ANDRADE, 2013a; INMETRO, 2012). Um resultado de medição é expresso como o valor

central de uma faixa de incerteza, denominado resultado base, acrescido da incerteza e da unidade de medida.

A palavra incerteza é sinônima de dúvida e, segundo Gonçalves Jr. (2002, p.43), a incerteza de medição é tratada como a “dúvida acerca do resultado de uma medição”, ou seja, é o “parâmetro associado com o resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão de valores que podem razoavelmente ser atribuídos ao mensurando”. Gallas (s.d.) enfatiza que, mesmo quando todos os componentes de erro de um processo de medição já tenham sido avaliados e adequadamente corrigidos, sempre permanece uma incerteza sobre quão correto é o resultado declarado.

Por definição, o erro de medição corresponde à diferença entre o valor medido e o valor verdadeiro do mensurando, e possui três componentes: o erro grosseiro, o erro sistemático e o erro aleatório. O erro grosseiro é decorrente do mau uso ou mau funcionamento do sistema de medição, pode ser detectado com relativa facilidade e deve ser eliminado. Por sua vez, o erro aleatório é a componente que varia de maneira imprevisível em repetidas medições, sendo decorrente de fatores não controlados na realização de medidas e, por isso, não pode ser eliminado totalmente, mas pode ser minimizado com o aumento do número de medições que compõe o resultado. Já o erro sistemático se origina de um efeito reconhecido de uma grandeza de influência em um resultado de medição. Ele permanece constante ou varia de maneira previsível em medições repetidas, podendo, assim, ser compensado. (ANDRADE, 2013a; GALLAS, s.d.; INMETRO, 2012).

A incerteza, por sua vez, pode ser expressa em termos da incerteza-padrão [ $u$ ], definida como a estimativa equivalente a um desvio padrão da ação de um efeito aleatório sobre a indicação; da incerteza-combinada [ $u_c$ ], expressa pela ação simultânea de todas as fontes de incerteza, sendo obtida ao se utilizarem incertezas-padrão individuais associadas às grandezas de entrada do modelo de medição; e da incerteza-expandida [ $U$ ], estimada a partir da incerteza-combinada multiplicada pelo coeficiente t-Student<sup>21</sup> apropriado, cujo resultado corresponde à faixa de dúvida presente na medição para uma probabilidade de enquadramento de, geralmente, 95% (GONÇALVES JR., 2002; INMETRO, 2012).

---

<sup>21</sup> Em análises estatísticas, os conceitos de média e desvio padrão são válidos para uma função aleatória. Para que sejam caracterizados perfeitamente, torna-se necessário envolver os valores observados dessa função em toda a população. Na prática, é comum considerar apenas uma amostra desta população para que a média e o desvio padrão da população sejam estimados a partir da média, do desvio padrão e do tamanho da amostra. Entretanto, essas estimativas são confiáveis apenas para valores grandes de amostras. Se as amostras são pequenas (inferior a 200), faz-se necessário aplicar um coeficiente de correção conhecido como t-Student, função da probabilidade de enquadramento desejada e do tamanho da amostra. (GONÇALVES JR., 2002).

A medição da temperatura, em especial, pode ocorrer de forma direta, por contato com o sistema de medição, como o termômetro, ou de forma indireta, sem contato, onde o valor do mensurando é determinado a partir da combinação de duas ou mais grandezas por meio de equações matemáticas, como ocorre com a medição por termografia (ANDRADE, 2013a; GONÇALVES JR., 2002).

A medição indireta de temperatura por termografia está fundamentada na condição de que todo corpo com temperatura finita maior do que zero absoluto (0K) emite energia como função da temperatura na forma de onda eletromagnética (radiação térmica). O termovisor, em síntese, associa a radiação emitida pelo objeto e a converte em um sinal elétrico ou digital e, em seguida, em valor de temperatura.

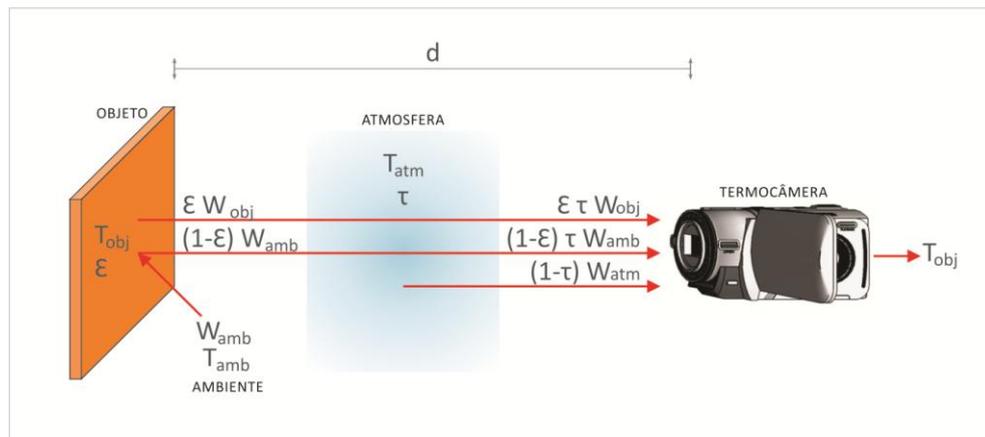
A radiação total incidente no termovisor é composta por três parcelas. A primeira refere-se à radiação emitida pela própria região de interesse, onde a medição está sendo realizada. A segunda é consequência da radiação proveniente de outras fontes que são refletidas na superfície do alvo. E a terceira corresponde à radiação proveniente da própria atmosfera. Todos esses sinais são atenuados pela atmosfera durante o percurso para se alcançarem os sensores da termocâmara. (FLIR, 2012).

Sendo  $[\epsilon]$  a emissividade do objeto,  $[1 - \epsilon]$  a refletividade do objeto,  $[\tau]$  a transmissividade da atmosfera e  $[1 - \tau]$  a emissividade atmosférica, a radiação emitida pelo objeto pode ser dada por  $[\epsilon\tau W_{obj}]$ ; a refletida pelo objeto, por  $[(1 - \epsilon)\tau W_{amb}]$ ; e a emitida pela atmosfera, por  $[(1 - \tau)W_{atm}]$ . Então, a radiação total recebida pela termocâmara  $[W_{tot}]$ , posicionada a uma distância  $[d]$  do objeto, pode ser escrita como na Equação 20 (ANDRADE, 2013b; FLIR, 2012).

$$W_{tot} = \epsilon\tau W_{obj} + (1 - \epsilon)\tau W_{amb} + (1 - \tau)W_{atm} \quad (20)$$

O esquema da Figura 10 ilustra esse processo, onde o termo  $[T_{amb}]$  refere-se à temperatura de todos os objetos inseridos no ambiente, podendo ser considerada a temperatura ambiente refletida.

**Figura 10 – Medição indireta de temperatura por termografia.**



**FONTE: adaptado de FLIR, 2012.**

A partir desse entendimento, é possível deduzir um modelo matemático para o cálculo da temperatura do objeto. Nesse modelo, a Lei de Planck (poder emissivo espectral do corpo negro) e a Lei de Stefan-Boltzman (poder emissivo total do corpo negro) configuram-se como os seus princípios fundamentais.

O modelo matemático para medição indireta de temperatura de um objeto [ $T_{obj}$ ] por termografia é, segundo Teixeira (2012), função da emissividade [ $\epsilon$ ] do objeto, da sua distância em relação ao termovisor [ $d$ ], da temperatura refletida de uma fonte externa [ $T_{amb}$ ], da temperatura atmosférica [ $T_{atm}$ ] e do sinal [ $S$ ] proporcional à radiação incidente, produzido pelo detector do termovisor.

$$T_{obj} = f(\epsilon, d, T_{amb}, T_{atm}, S) \quad (21)$$

Com exceção do sinal, todos os demais parâmetros devem ser ajustados pelo usuário no termovisor (*inputs*) para caracterizar o mensurando e as condições ambientais locais, possibilitando a estimativa da temperatura do objeto em análise (FLIR, 2012; TEIXEIRA, 2012).

O valor da emissividade, uma das principais fontes de erro, deve ser obtido de forma criteriosa – de preferência experimentalmente – para ser utilizado como *input* no cálculo de temperatura do mensurando. As demais variáveis também podem ser determinadas por medições diretas. Há de se destacar que à temperatura refletida pode-se atribuir o mesmo valor da temperatura ambiente, em situações nas quais não haja a presença de corpos vizinhos

com temperaturas contrastantes com o meio ou quando a fonte de radiação refletida puder ser obstruída. (TEIXEIRA, 2012).

A incerteza do resultado de uma medição indireta provém da propagação da incerteza de cada variável presente no modelo matemático adotado. No que se refere às incertezas atribuídas ao processo indireto de medição de temperatura por termografia, Teixeira (2012) relata que as principais fontes de incerteza são: o erro gerado por ruído, a estabilidade da temperatura, a repetitividade, a resolução digital da termocâmara, o mínimo erro, a resolução espacial da medição e a uniformidade da medição, denominadas fontes intrínsecas (próprias dos componentes internos do termovisor), bem como a emissividade, a distância entre o mensurando e o termovisor, a temperatura refletida, a temperatura atmosférica e o sinal, conhecidas como fontes externas de incerteza de medição.

Visando a contribuir para a melhoria da qualidade das medições termográficas e para o emprego do termovisor na indústria e setor de serviços, Teixeira (2012) desenvolveu, em ambiente *MatLab*, o *software* IMT – Incerteza de Medição Termográfica –, para avaliar a incerteza de medição em termografia aplicada ao setor elétrico. Os estudos foram realizados no Laboratório de Termometria da Escola de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais e, desde então, é também utilizado para aperfeiçoar a determinação da incerteza da temperatura lida por termografia em outros campos de uso do termovisor, como o desta pesquisa.

Dentre os dois métodos estatísticos para avaliação de incerteza de medição empregados por Teixeira (2012) no desenvolvimento do IMT, *Guide for the Expression of Uncertainty in Measurements* (GUM) e Método de Monte Carlo (MMC)<sup>22</sup>, destacamos o primeiro deles, utilizado na análise de incerteza do presente trabalho. O método GUM é, resumidamente, baseado na propagação das incertezas por meio da aproximação de uma série de Taylor ao modelo de medição e, conforme conclusão do mencionado autor, o seu uso mostrou-se satisfatório para medições indiretas de temperatura por termografia em que o mensurando possui alta emissividade.

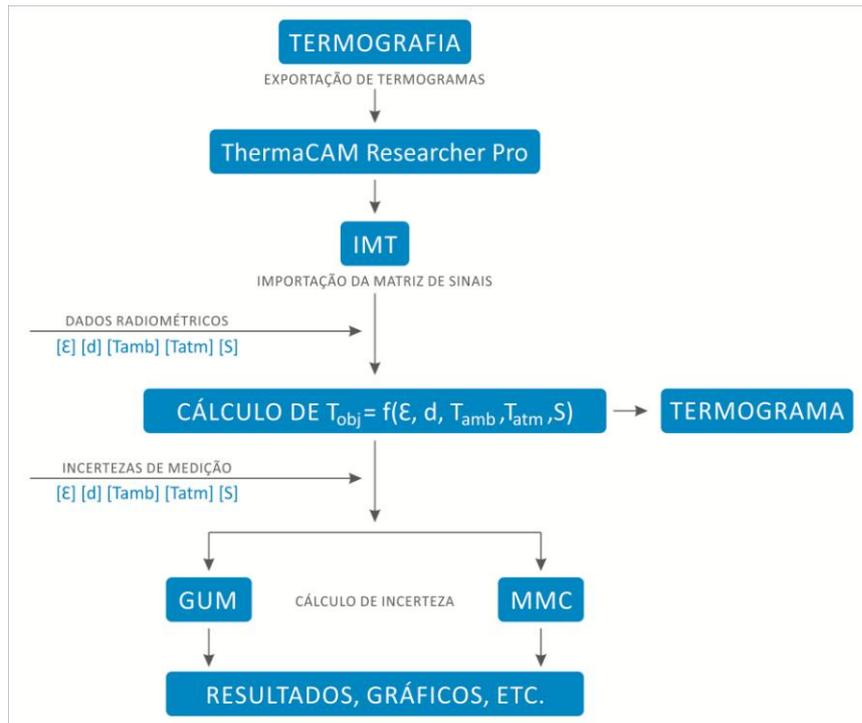
Para o uso do IMT, deve-se, primeiramente, exportar os termogramas obtidos para o *software ThermaCAM Researcher Pro* para que cada um seja convertido em uma matriz de sinais. Em sequência, esses arquivos devem ser importados pelo IMT, onde a matriz de sinais será

---

<sup>22</sup> “Baseado no conceito de propagação de distribuição de probabilidades o MMC é uma alternativa numérica para o cálculo de incerteza de medição onde o modelo matemático apresenta relativa complexidade, ou não atende aos critérios necessários para aplicação do GUM” (TEIXEIRA, 2012, p.45).

utilizada para calcular o perfil térmico do objeto a partir dos dados radiométricos fornecidos pelo usuário. Para efetuar o cálculo da incerteza de uma medição, deve-se adicionar, na *interface* do IMT, as funções massa específica de probabilidade assumidas para cada variável. Por fim, o programa fornece graficamente as distribuições obtidas e seus intervalos de abrangência. A Figura 11 apresenta, esquematicamente, a logística de uso do IMT.

**Figura 11 – Esquema de uso do IMT.**



**FONTE:** adaptado de Teixeira, 2012, p.75.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta pesquisa, desenvolveu-se o estudo da difusividade térmica de blocos maciços cerâmicos e de blocos vazados de cerâmica e de concreto, componentes planos comumente utilizados para a conformação de alvenarias no Brasil, estudo esse feito em três etapas.

Inicialmente foi proposto um método teórico-experimental para avaliação da difusividade térmica de componentes planos, utilizando a termografia infravermelha e considerando a geometria do sólido semi-infinito como modelamento matemático para uma situação de transferência de calor unidimensional em regime transiente (condução transiente unidimensional).

Na segunda etapa da pesquisa, o método proposto foi validado por meio de dois experimentos utilizando-se blocos maciços cerâmicos. Esse componente foi escolhido por existirem dados na literatura sobre a sua difusividade, o que permite validar, ou não, os resultados obtidos. Para cada um dos ensaios do processo de validação do método utilizou-se uma diferente bancada de testes. A partir dos resultados obtidos com o primeiro ensaio, foi possível estabelecer diretrizes para a confecção de uma nova bancada que melhor atendesse ao objetivo do estudo e que permitisse maior controle dos parâmetros do experimento. Além da validação do método, a segunda etapa da pesquisa envolveu a análise das incertezas atribuídas aos processos de medição das grandezas envolvidas.

Na terceira e última etapa, o método teórico-experimental foi utilizado para estimar a difusividade térmica de blocos vazados, cujos valores teóricos, para as geometrias estudadas, não foram encontrados na literatura consultada.

Todas as etapas da pesquisa foram desenvolvidas no Laboratório de Termometria da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (LabTerm). O contexto geral do trabalho pode ser visualizado no esquema da Figura 12.

**Figura 12 – Etapas da pesquisa.**



#### 4.1 Materiais

Para o desenvolvimento da segunda etapa, validação do método teórico-experimental e análise de incertezas, utilizaram-se duas amostras de blocos maciços cerâmicos (Figura 13) adquiridos no comércio de Belo Horizonte, cada um com dimensões de 225x110x55mm.

**Figura 13 – Blocos maciços cerâmicos.**



Durante a terceira etapa, aplicação do método teórico-experimental, foram analisados blocos vazados de cerâmica e de concreto fornecidos, respectivamente, pelas indústrias Braúnas e Bloco Sigma, ambas localizadas em Belo Horizonte. As amostras foram definidas em função de suas dimensões e por serem de tipologias comumente utilizadas para conformação de alvenarias brasileiras. Foram coletadas, aleatoriamente, uma amostra de cada um dos três tipos de blocos cerâmicos escolhidos dentre os produtos do fabricante, bem como os três congêneres em concreto. Com dimensões de 39x19x9cm, 39x19x14cm e 39x19x19cm, os blocos possuem mesmos comprimento e altura, havendo variação apenas de espessura, como pode ser observado na Figura 14.

**Figura 14 – Blocos vazados cerâmicos e de concreto.**



## 4.2 Métodos

A metodologia empregada na pesquisa, como apresentado na introdução deste capítulo, compreende a proposição do método teórico-experimental, sua validação e análise de incertezas e, por fim, a sua aplicação.

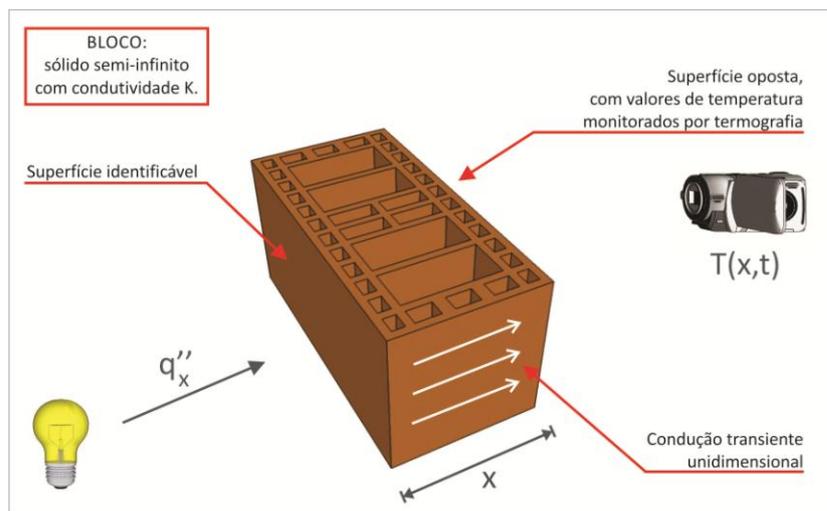
### 4.2.1 *Proposição do método teórico-experimental*

O método proposto para avaliação da difusividade térmica de componentes planos, como os blocos maciços e os vazados, considera a distribuição de temperatura transiente (quando o perfil de temperatura varia com o tempo e com a posição) unidimensional em um sólido semi-infinito em sua condição de contorno de segunda espécie. A geometria de um sólido semi-infinito é simples e baseia-se na hipótese de que esse sólido possui uma face identificável e dimensões infinitas, de modo que qualquer distúrbio de temperatura nessa face nunca atinge a

sua outra extremidade. As relações matemáticas que descrevem esse fenômeno na situação de aplicação de fluxo de calor constante em sua superfície identificável são dadas pelas Equações (12) e (13), apresentadas no item 3.2.1.1.2 deste trabalho.

A partir dessa fundamentação teórica, essa situação foi reproduzida em laboratório por meio de um procedimento experimental que considerou cada bloco como sendo um sólido semi-infinito. Assim, a posição de análise  $[x]$  correspondeu à espessura do bloco, possibilitando o monitoramento e os registros dos valores de temperatura para  $[T(x,t)]$  por termografia. Ao programar a termocâmera para gravar termogramas em intervalos de dez, vinte ou sessenta segundos, foi possível registrar, também, a variação do tempo  $[t]$ . O fluxo de calor constante  $[q_x'']$  foi gerado por uma lâmpada halógena, e pôde ser quantificado devido à uma condição de vedação que praticamente impediu a perda de energia térmica para o ambiente. Por fim, a condutividade térmica  $[k]$  dos blocos foi definida conforme a NBR 15220-2 (2005) e dados de Incropera e DeWitt (2003). O esquema da proposta experimental pode ser visualizado na Figura 15.

**Figura 15 – Esquema da proposta do método teórico-experimental.**



Para atender à condição inicial de condução transiente unidimensional em um sólido semi-infinito, onde qualquer posição  $[x]$  no sólido, no instante  $[t = 0]$ , deve possuir a mesma temperatura inicial  $[T_i]$  da superfície identificável, tomou-se o cuidado de deixar os blocos em repouso no laboratório para que atingissem o equilíbrio térmico. Desse modo, o primeiro valor de temperatura da superfície oposta, lido por termografia, foi considerado  $[T_i]$ .

Faz-se importante ressaltar que os procedimentos adotados foram realizados em bancadas de testes que possibilitaram atender à condição de contorno interna  $[T(x \rightarrow \infty, t) = T_i]$  para

condução transiente unidimensional em um sólido semi-infinito, uma vez que respeitavam os dois requisitos fundamentais para tanto. De acordo com o primeiro, o bloco deve possuir apenas uma superfície identificável e em contato com o fluxo de calor. Assim, todas as outras faces ficaram vedadas, exceto a oposta. Na superfície identificável foi aplicado um fluxo de calor constante por meio de uma lâmpada halógena, que produziu uma transferência de calor unidimensional transiente no interior do bloco. Já consoante o segundo, o sólido, quando sua espessura  $[x]$  tende ao infinito, deve apresentar, em qualquer instante de tempo  $[t]$ , a temperatura constante e igual à temperatura inicial  $[T_i]$ . Desse modo, a temperatura na superfície oposta à da aplicação do fluxo de calor, monitorada por termografia, descaracterizava a geometria do sólido semi-infinito na medida em que apresentava uma variação de temperatura perceptível, considerada aqui de  $2^\circ\text{C}$  em virtude da incerteza de medição da termocâmara ( $\pm 1^\circ\text{C}$ ).

Dada a complexidade de resolução do sistema de equações do modelamento matemático, utilizou-se aqui já mencionada ferramenta computacional *Engineering Equation Solver* para solucioná-lo. Tal programa foi alimentado, em cada ensaio, com as Equações (12) e (13), com a tabela função erro de Gauss, com os parâmetros de entrada, que são as constantes do modelamento matemático (temperatura inicial, fluxo de calor, espessura do bloco e condutividade térmica), e com os valores de temperatura (lidos por termografia) em função do tempo. Desse modo, foi possível determinar, para cada instante de tempo  $[t]$  ao longo do processo de aquecimento de cada bloco, os respectivos valores de difusividade térmica  $[\alpha]$ , tanto nos ensaios da segunda etapa quanto nos ensaios da terceira.

Nesse contexto, foi necessário quantificar o fluxo de calor constante que incidiu sobre a superfície identificável e determinar o valor da condutividade térmica equivalente dos blocos vazados.

#### **4.2.1.1 Cálculo do fluxo de calor**

O fluxo de calor  $[q_x'']$  que incidiu de forma constante sobre a superfície identificável de cada bloco ensaiado corresponde a uma parcela do total de calor emitido pela lâmpada. Considerada superfície difusa, a lâmpada emite calor na forma de radiação em todas as direções. A taxa total na qual a radiação deixa a lâmpada e é interceptada pela superfície do bloco é influenciada pelas suas características geométricas. Essa influência é quantificada

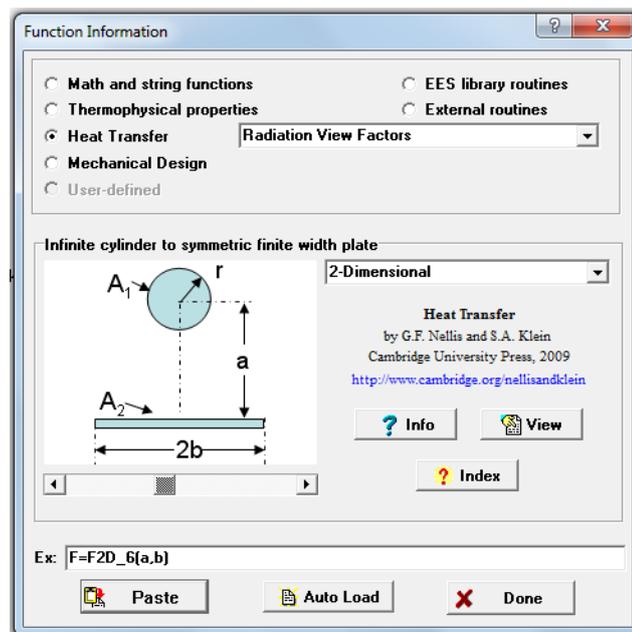
pelo fator de forma  $[F_{ij}]$ . A parcela de calor absorvida pela superfície interna do bloco pode ser calculada pela Equação (22):

$$q_x'' = F_{ij} \frac{Pot}{A} \quad (22)$$

onde  $[q_x'']$  corresponde ao fluxo de calor interceptado pela superfície identificável do bloco ( $W/m^2$ ),  $[Pot]$  à taxa de calor emitida pela lâmpada (W),  $[A]$  à área da superfície identificável do bloco, perpendicular ao fluxo de calor ( $m^2$ ), e  $[F_{ij}]$  ao fator de forma entre a lâmpada e a mencionada superfície.

Existem relações de fator de forma para troca radiante entre diferentes superfícies. Para a determinação do fator de forma entre a lâmpada e as superfícies identificáveis de cada amostra, foi adotada a relação matemática em que o cilindro é considerado infinitamente longo e paralelo a uma placa de largura finita, disponível e calculada pelo citado EES. A Figura 16 apresenta a interface desse *software* utilizada para a determinação do fator de forma em questão.

**Figura 16 – Caixa de diálogo do EES com relação matemática para determinação do fator de forma.**



Os parâmetros de entrada são  $[a]$  e  $[b]$  e o de saída, o fator de forma  $[F_{ij}]$ . No caso dos ensaios,  $[a]$  correspondeu à distância entre o eixo da lâmpada e a face interna do bloco e  $[b]$ , à

metade da altura do bloco. Assim, com os valores de  $[F_{ij}]$ ,  $[A]$  (área de retângulo) e  $[Pot]$  (potência da lâmpada fornecida pelo fabricante), foi possível determinar o fluxo de calor  $[q_x]$  de cada ensaio.

#### 4.2.1.2 Cálculo da condutividade térmica equivalente dos blocos vazados

Como visto nas Equações (12) e (13), é necessário conhecer o valor da condutividade térmica do material para determinação do comportamento da sua difusividade térmica em função do tempo. Entretanto, os valores de condutividade térmica dos blocos vazados em estudo não são apresentados nas bibliografias consultadas. Desse modo, fez necessário determinar a condutividade térmica total (ou equivalente) de cada bloco, uma vez que são compostos por camadas homogêneas de concreto ou de cerâmica e camadas de ar.

Para determinar a condutividade térmica equivalente dos blocos vazados recorreram-se às Equações (7) e (8), provenientes da NBR 15220-2 (2005) e descritas no item 3.2.1.1.1 do presente estudo. O processo consistiu em calcular, primeiramente, a resistência térmica total  $[R_t]$  de cada um dos seis blocos utilizando a Equação (7). As resistências das seções de cada bloco foram calculadas pela Equação (8). Para o uso dessa equação, os valores de condutividade térmica do ar, da cerâmica e do concreto foram obtidos a partir do exposto por Incropera e DeWitt (2003), apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1 - Valores de condutividade térmica para o ar, a cerâmica e o concreto.**

PROPRIEDADE	AR (a 300K)	CERÂMICA (a 300K)	CONCRETO (a 300K)
Condutividade Térmica (W/m.k)	0,0263	0,72	1,75

**FONTE: dados obtidos a partir do exposto por Incropera e DeWitt, 2003.**

Não foram utilizados os dados de condutividade térmica disponíveis na NBR 15220-2 (2005), pois ela não apresenta valores dessa propriedade para o ar. Para o cálculo da resistência térmica das camadas de ar dos blocos vazados, a norma disponibiliza, em uma tabela, valores previamente calculados. No entanto, o uso dos valores dessa tabela é válido para situações em que a temperatura média da camada esteja entre 0°C e 20°C e haja uma diferença de temperatura menor do que 15°C entre as superfícies limitantes. Com o primeiro ensaio da

segunda etapa foi possível observar que a diferença de temperatura é bem superior a 15°C e, com os ensaios da terceira etapa, foi possível concluir que a temperatura da camada de ar, durante o processo de aquecimento dos blocos, é superior a 20°C. Desse modo, tornou-se inviável utilizar os valores de resistência das camadas de ar apresentados na NBR 15220-2 (2005) e, assim, optou-se por empregar o valor de condutividade térmica do ar disponibilizado por Incropera e DeWitt (2003), para, com a Equação (8), calcular a resistência térmica de cada camada de ar.

Faz-se importante ressaltar que a mencionada norma sugere o uso da Equação (8) para o cálculo da resistência de camadas homogêneas de materiais sólidos, pois, no caso dos gases, observa-se, além do fenômeno de condução (movimento de energia), a convecção (movimento de energia + movimento de massa). Entretanto, na espécie, considerou-se desprezível a convecção das camadas de ar do interior dos blocos, uma vez que suas espessuras são relativamente pequenas e tais camadas se encontraram, em todos os ensaios, confinadas. Com essas considerações, o uso da referida Equação tornou-se pertinente.

Determinada a resistência térmica total de cada bloco, foi possível encontrar as respectivas condutividades térmicas equivalentes utilizando a Equação (8) e considerando [e] a espessura do bloco.

Ainda com relação à condutividade térmica, é relevante destacar que essa é uma propriedade dos materiais que varia com a temperatura. Entretanto, em problemas de transferência de calor por condução transiente, que é o caso deste trabalho, é plausível considerá-la constante (INCROPERA; DEWITT, 2003).

#### ***4.2.2 Validação do método teórico-experimental e análise de incertezas***

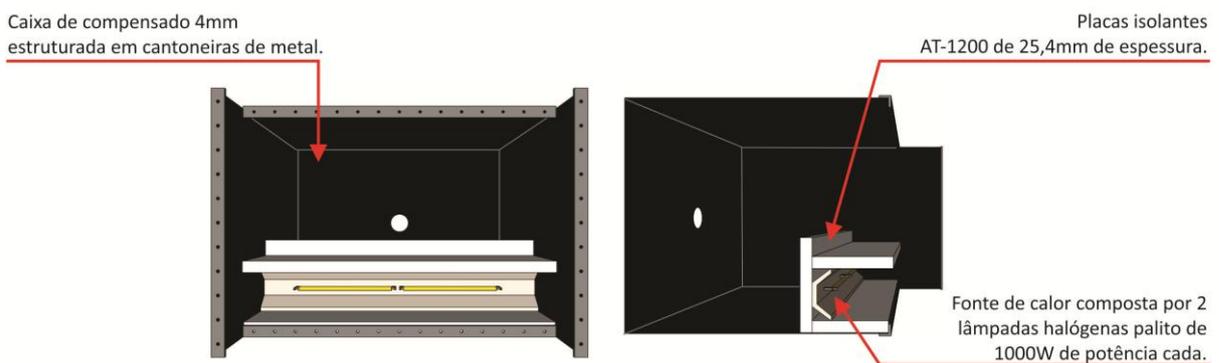
A etapa de validação do método e análise de incertezas compreende o primeiro ensaio para validação do método, o segundo ensaio para o mesmo fim e a análise de incerteza do que se mediu no segundo ensaio.

#### 4.2.2.1 Primeiro ensaio para validação do método teórico-experimental

O primeiro ensaio para validação do método consistiu na avaliação da difusividade térmica de um bloco maciço cerâmico utilizando o método teórico-experimental proposto no item 4.2.1. Além do uso da termocâmara para monitorar a variação da temperatura em função do tempo, utilizou-se um termopar, com o objetivo de comparar os valores obtidos em ambos os referidos processos de medição.

Para o desenvolvimento do ensaio, foi utilizada uma bancada experimental existente no LabTerm (Fig. 17), que consiste em uma caixa de compensado de 4mm estruturada em cantoneiras de metal e aberta em uma de suas faces, com uma fonte de calor interna composta por duas lâmpadas halógenas palito 189mm da marca Avant, 1.000W de potência cada, e um sistema de vedação composto por placas isolantes AT-1200 de 25,4mm de espessura, fabricadas em alumina, sílica e ligantes pela empresa Texfiber.

**Figura 17 – Bancada de testes existente no LabTerm.**



Os dispositivos de medição utilizados no ensaio foram: a) uma câmera termográfica de infravermelho da marca FLIR Systems, modelo SC660, para monitorar a temperatura da face externa dos blocos (até então chamada de superfície oposta); b) um relógio termo-higrômetro da marca Testo, modelo 622, para mensurar a temperatura ambiente e a umidade do ar, *inputs* requeridos pela termocâmara; c) uma trena manual de fita de aço da marca LEE PRO Tools, para mensurar a distância entre o bloco e o termovisor; d) um termopar tipo K Agilent 34970A e um sistema de aquisição de dados, para registrar as temperaturas de um ponto da face interna (até então chamada de superfície identificável) e de um ponto da face externa do bloco; e e) uma régua de aço inox, com 0,8m e graduada em milímetro, da marca Vonder,

para medir as dimensões do bloco e a distância entre bloco e lâmpada. Os dispositivos de medição podem ser visualizados na Figura 18.

**Figura 18 – Dispositivos de medição utilizados no primeiro ensaio.**



Câmera Termográfica FLIR SC660



Relógio termo-higrómetro Testo 622



Trena LEE PRO Tools



Termopar Agilent



Régua Vonder

**FONTE:** imagens disponíveis na internet.

Em relação aos *softwares*, o *ThermaCAM QuickReport*, fornecido pelo fabricante do equipamento de termografia, foi utilizado para analisar as imagens termográficas, ao passo que o EES foi empregado para resolver as equações do modelo matemático e o *Excel* para compilação dos dados e elaboração dos gráficos.

O ensaio teve a finalidade de verificar a pertinência do método proposto, de ambientar a pesquisadora ao laboratório e de familiarizá-la com o equipamento de termografia, com o sistema de aquecimento ativo, com os demais equipamentos e *softwares* envolvidos no processo e com a sistematização da coleta de dados, de forma a estabelecer uma relação segura entre pesquisadora e método. As fases desse primeiro ensaio são as descritas na Tabela 2 e encontram-se detalhadas a seguir.

Tabela 2 – Fases do primeiro ensaio para validação do método.

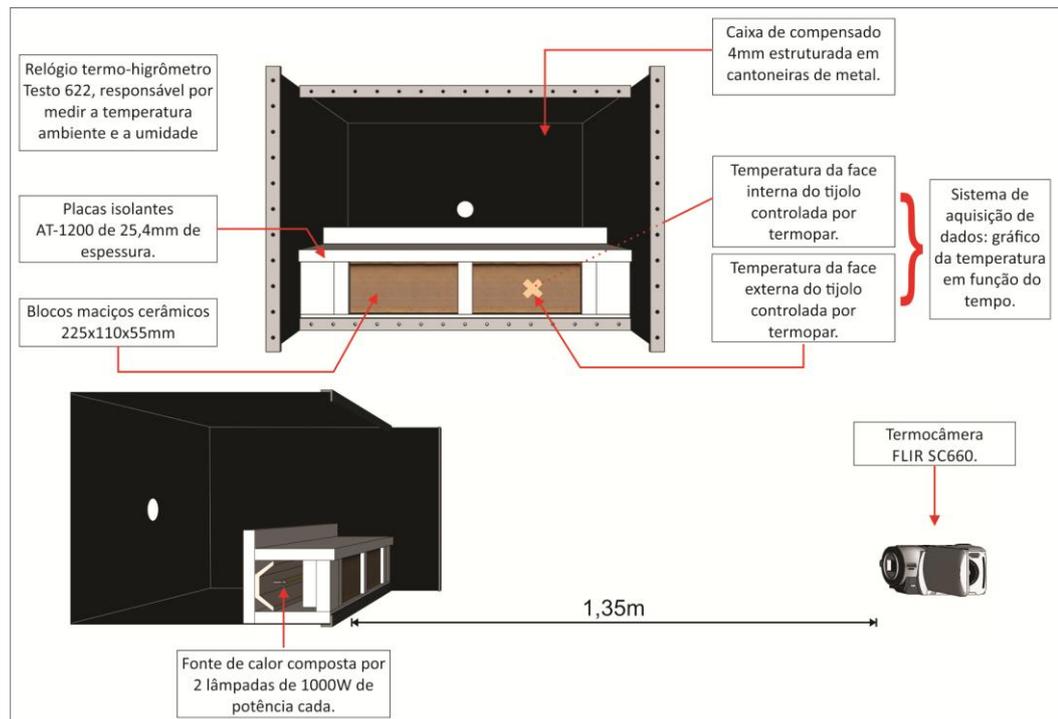
PRIMEIRO ENSAIO DA SEGUNDA ETAPA PARA VALIDAÇÃO DO MÉTODO		
FASE		DESCRIÇÃO
I	MONTAGEM DO EXPERIMENTO	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aquisição dos materiais e empréstimo dos equipamentos;</li> <li>• Preparação da bancada (conferência das lâmpadas, inserção da amostra e finalização do sistema de vedação);</li> <li>• Posicionamento do termopar, fixação das hastes e conexão com o sistema de aquisição de dados;</li> <li>• Posicionamento do relógio termo-higrômetro e registro dos valores;</li> <li>• Posicionamento e configuração da termocâmara.</li> </ul>
II	AQUISIÇÃO DE DADOS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Monitoramento da variação da temperatura em função do tempo, via termopar e sistema de aquisição de dados, de um ponto da face externa e outro da face interna da amostra;</li> <li>• Monitoramento da variação da temperatura em função do tempo, por termografia, da área da face externa da amostra;</li> <li>• Análise dos termogramas com o <i>ThermaCAM QuickReport</i>;</li> <li>• Preparação do EES com as equações e parâmetros necessários ao cálculo da difusividade térmica da amostra.</li> </ul>
III	AValiação DA DIFUSIVIDADE TéRMICA DA AMOSTRA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alimentação do ESS com as constantes do modelo matemático e os valores de tempo e temperatura registrados por termografia;</li> <li>• Cálculo, no EES, dos valores de difusividade térmica em função do tempo;</li> <li>• Compilação dos dados em planilhas do <i>Excel</i> para gerar tabelas e gráficos.</li> </ul>

## I. MONTAGEM DO EXPERIMENTO

A bancada existente no LabTerm foi utilizada por atender às premissas apresentadas no item 4.2.1. Pelo fato de essa bancada possuir duas lâmpadas halógenas palito como fonte de calor e comportar o encaixe de dois blocos cerâmicos maciços, utilizou-se uma segunda amostra apenas para compor o fechamento frontal da bancada. E, para completar a vedação, utilizaram-se pedaços, lascas e pó de refugo da placa isolante, inserindo-os entre os blocos e a bancada para evitar perda de calor através de pequenas frestas.

Após encaixe dos blocos, conectou-se o sistema de medição via termopar (apenas no bloco a ser avaliado) e foram posicionados o relógio termo-higrômetro e a termocâmara. O esquema da montagem desse experimento pode ser observado na Figura 19.

**Figura 19 – Esquema da montagem do primeiro ensaio da segunda etapa.**



A conexão do sistema de medição via termopar consistiu em acoplar, utilizando fita adesiva, duas de suas hastes ao bloco em estudo, uma à face interna e outra à face externa, como pode ser visto na Figura 20.

**Figura 20 – Fixação das hastes do termopar nas superfícies externa e interna do bloco.**



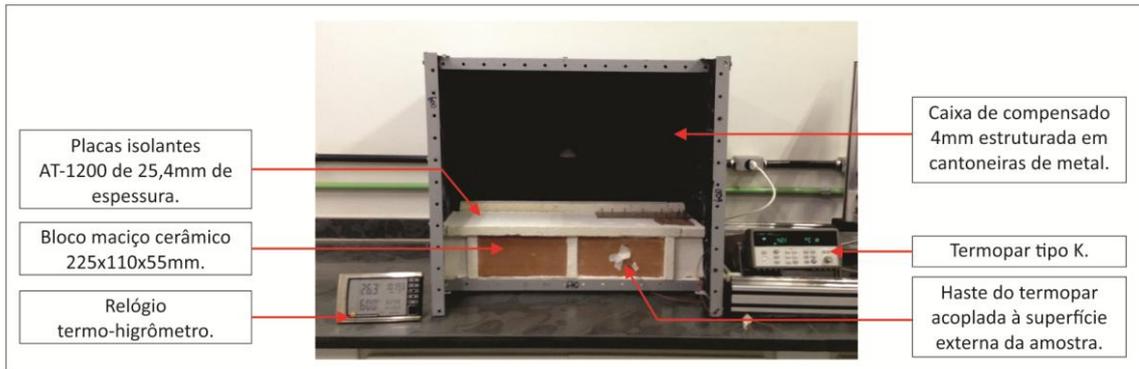
Fixação da haste do termopar na face externa do bloco



Fixação da haste do termopar na face interna do bloco

Para as leituras de temperatura via termopar, foram utilizados dois canais – um para a superfície interna e outro para a externa – e os terminais foram ligados ao sistema de aquisição de dados. O dispositivo teve a função de medir a variação de temperatura em um ponto central das superfícies e registrá-las no sistema de aquisição de dados a cada segundo a partir do momento em que os blocos foram submetidos ao fluxo de calor gerado pelas lâmpadas.

**Figura 21 – Montagem do primeiro ensaio da segunda etapa.**



Em paralelo, os valores médios de temperatura da área da superfície externa da amostra em estudo foram obtidos por termografia. O termovisor foi posicionado, com o auxílio de um tripé, a 1,35m de distância da face externa do bloco, como pode ser visualizado na Figura 22, e foi programado para registrar imagens em intervalos de 60 segundos.

**Figura 22 – Termocâmera posicionada de frente à bancada de testes.**



Para a leitura dos valores de temperatura, como apresentado no item 3.3.3, a termocâmera deve ser configurada com os valores de temperatura ambiente, umidade do ar, distância entre a lente e o objeto ensaiado, temperatura refletida e emissividade do material em análise.

Neste estudo, a temperatura refletida foi igualada à temperatura ambiente, uma vez que, próximo à bancada, não havia a presença de objetos com temperaturas contrastantes com o meio. Para a emissividade, o valor foi estimado por meio da técnica da temperatura conhecida. O procedimento foi feito a partir do conhecimento do valor da temperatura do material, via termopar, e da variação do valor da emissividade no termovisor, até que o mesmo alcançasse um valor correspondente à temperatura lida pelo termopar.

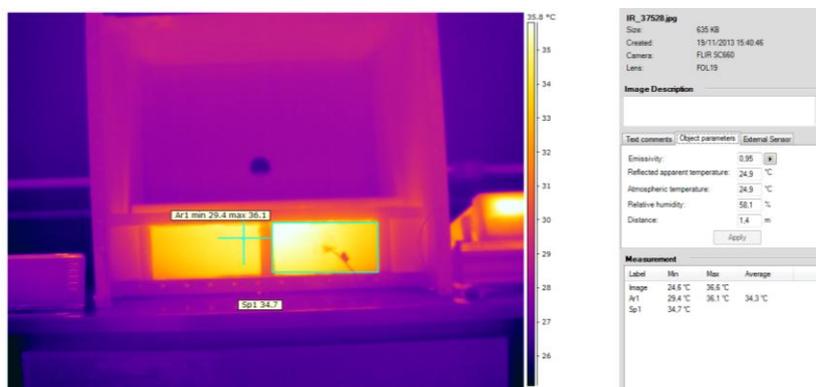
Com a montagem do experimento concluída, deu-se início à fase de aquisição de dados.

## II. AQUISIÇÃO DE DADOS

A fase de aquisição de dados consistiu em submeter os blocos cerâmicos maciços ao aquecimento gerado pelas lâmpadas de 1.000W e monitorar, durante 01 hora e via termopar, a temperatura de um ponto da face externa e um ponto da face interna da amostra em estudo. Acompanhou-se, também, nesse mesmo intervalo de tempo e via termocâmara, a variação da temperatura da superfície externa dessa mesma amostra.

Para a análise dos termogramas, utilizou-se o *software ThermaCAM QuickReport*, pelo qual foi possível demarcar a área de interesse e obter o seu valor médio de temperatura. O procedimento foi realizado para cada um dos 60 termogramas obtidos, sendo possível construir uma tabela e um gráfico de temperatura média da superfície externa em função do tempo. A Figura 23 apresenta a interface do *FLIR QuickReport*.

**Figura 23 – Interface do *QuickReport* em análise da área superficial do bloco.**



A diferença entre as temperaturas registradas pela termocâmara e os valores lidos pelo termopar está na possibilidade de se obter, por meio dos termogramas, o valor médio da temperatura superficial do bloco para cada instante de tempo, enquanto o termopar registra um valor pontual.

O *software* EES, por sua vez, foi preparado para receber os dados coletados. As constantes do modelo matemático, como visto no item (3.2.1.1.2), são: a) temperatura inicial (medida por termografia); b) fluxo de calor (encontrado pelo método descrito no item 4.2.1.1); c) condutividade térmica (disponível na Tabela 1); e d) espessura do bloco (medida com a régua graduada em milímetros). A Figura 24 apresenta a interface do EES com esses dados.

**Figura 24 – Interface do ESS preparado para receber os dados experimentais.**

MODELO MATEMÁTICO PARA SÓLIDOS SEMI-INFINITOS

Constantes

Ti = 33,1 [C]

qo = 10,711 [W/m<sup>2</sup>]

k = 0,72 [W/m\*K]

x = 0,055 [m]

$$\text{Temp} - T_i = \frac{2 \cdot q_o \cdot \left[ \frac{\alpha \cdot t}{\pi} \right]^{(1/2)}}{k} \cdot \exp \left[ \frac{-x^2}{4 \cdot \alpha \cdot t} \right] - \frac{q_o \cdot x}{k} \cdot \text{erfc}$$

$$w = \frac{x}{2 \cdot (\alpha \cdot t)^{(1/2)}}$$

erfc = 1 - erfw

erfw = Interpolate ( 'D:\Usuario\MESTRADO PROJETO 1; 2; 1= w )

F=F2D<sub>0(0,050;0,110)</sub>

Além das equações e das constantes, foi necessário alimentar o ESS com a tabela função erro de Gauss. Na Figura 25, é possível visualizar a interface do *software* com uma parte dos valores dessa tabela.

**Figura 25 – Interface do ESS com a tabela função erro de Gauss.**

Função Erro de Gauss | Table 2

	w	erfw
Run 1	0	0,00000
Run 2	0,02	0,02256
Run 3	0,04	0,04511
Run 4	0,06	0,06762
Run 5	0,08	0,09008
Run 6	0,1	0,11246
Run 7	0,12	0,13476
Run 8	0,14	0,15695
Run 9	0,16	0,17901
Run 10	0,18	0,20094
Run 11	0,2	0,22270
Run 12	0,22	0,24430
Run 13	0,24	0,26570
Run 14	0,26	0,28690
Run 15	0,28	0,30788
Run 16	0,3	0,32863
Run 17	0,32	0,34913
Run 18	0,34	0,36936
Run 19	0,36	0,38933
Run 20	0,38	0,40901

Por fim, o EES foi alimentado com os valores de temperatura em função do tempo obtidos por termografia, estando preparado para solucionar o sistema de equações do modelo matemático para sólido semi-infinito, Equações (12) e (13).

### III. AVALIAÇÃO DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA DA AMOSTRA

Os valores de difusividade térmica para cada instante de tempo do processo de aquecimento do bloco foram determinados pelo EES. Os resultados obtidos foram compilados no *Excel*, pelo que foi possível gerar tabelas e gráficos para análise dos resultados.

Ressalta-se que o método utilizando a termografia infravermelha aliada ao modelo matemático para sólido semi-infinito mostrou-se adequado e aplicável à análise da difusividade térmica do bloco maciço cerâmico. Os resultados deste ensaio sugeriram o refinamento da técnica, o que foi feito com o planejamento e a construção de uma nova bancada para ser utilizada no segundo ensaio desta etapa e nos ensaios da terceira.

#### 4.2.2.2 Segundo ensaio para validação do método teórico-experimental

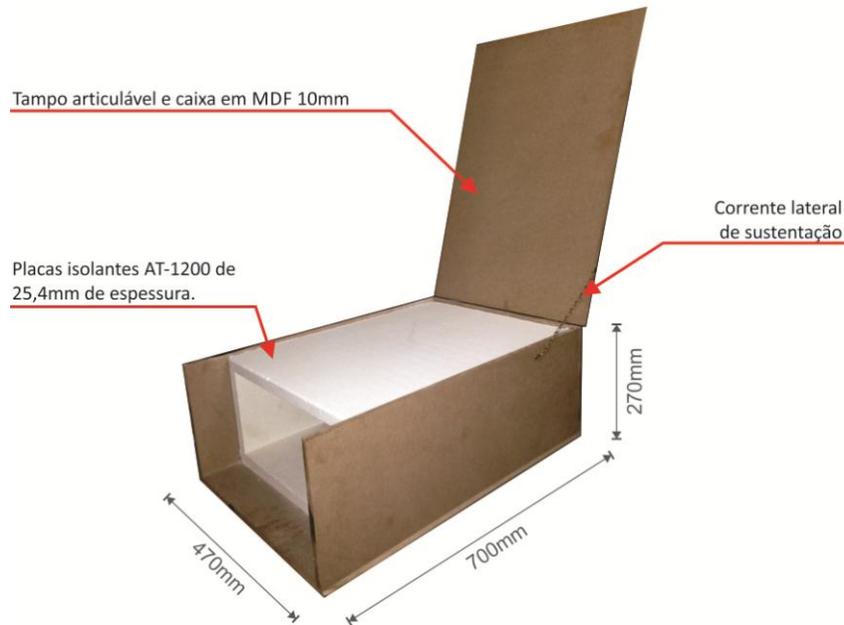
Este ensaio também compreende a validação do método teórico-experimental por meio da avaliação da difusividade térmica de um bloco maciço cerâmico. Para esse ensaio, fez-se necessário projetar e construir uma nova bancada de testes, denominada aqui “túnel térmico”, para proporcionar melhor vedação ao sistema, aperfeiçoar a sua usabilidade e possibilitar a análise de apenas uma amostra.

As dimensões do túnel térmico<sup>23</sup> (Fig. 26) foram definidas em 470x700x270mm, segundo a largura e altura das amostras da terceira etapa, para proporcionar encaixe perfeito, deixar apenas a superfície identificável em contato com o fluxo de calor e evitar frestas que pudessem contribuir com a perda de energia térmica. O material utilizado para a sua conformação foi o *Medium Density Fiberboard* (MDF) cru de 10mm, fixado com parafusos cabeça chata 5x50mm. Para melhor manuseio do túnel, projetou-se um tampo articulável preso a uma corrente lateral de sustentação e a duas dobradiças metálicas polidas. Buscando evitar perdas de calor por condução, a parte interna do túnel foi totalmente revestida com placas isolantes iguais às da bancada existente (Texfiber AT-1200 - 25,4mm).

---

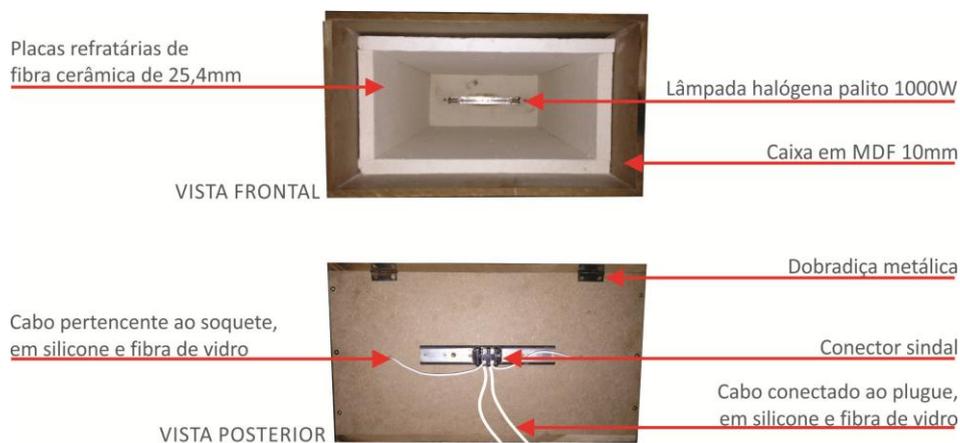
<sup>23</sup> O detalhamento técnico do túnel térmico encontra-se no apêndice deste trabalho.

**Figura 26 – Túnel térmico: nova bancada experimental.**



A face vazada do túnel e o tampo articulável permitiram o melhor manuseio e encaixe da amostra. Internamente, em sua face oposta à vazada (vista frontal da Fig. 28), instalou-se uma fonte de calor composta por uma lâmpada halógena palito 189mm (127V) de 1.000W de potência, sustentada em estrutura de alumínio e soquetes próprios para o tipo de lâmpada. Para o cabeamento, como pode ser visualizado na vista posterior da Figura 27, utilizou-se cabo de silicone com fibra de vidro, um conector sindal e plugue adequado, para evitar emenda do cabeamento e possível perda de corrente.

**Figura 27 – Vistas frontal e posterior do túnel térmico.**



Com o objetivo de aumentar a pressão entre o tampo do túnel e a parte superior dos blocos em ensaio – evitando, assim, o vazamento de calor –, instalaram-se quatro trincos de pressão por alavanca, dois de cada lado (Fig. 28).

**Figura 28 – Incorporação de trincos ao túnel térmico.**



Os dispositivos de medição e *softwares* utilizados neste ensaio foram os mesmos do primeiro, com exceção do termopar, que não foi utilizado<sup>24</sup>. A Tabela 3 apresenta a descrição das fases do segundo ensaio, que são detalhadas a seguir.

---

<sup>24</sup> No primeiro ensaio da segunda etapa, utilizou-se o termopar para introdução do conceito de emissividade, então calculada por meio da técnica da temperatura conhecida. Houve, também, a intenção de comparar os resultados obtidos via termopar com os obtidos via termocâmara. No segundo ensaio da segunda etapa, entretanto, tais funções não se fizeram mais necessárias, visto que a técnica de emissividade empregada não demandava o uso do equipamento e o valor pontual de temperatura lido pelo termopar não mais faria sentido nos ensaios subsequentes (terceira etapa), pois os blocos vazados possuem geometria interna não homogênea. Nesse caso, apenas a termografia seria suficiente, por possibilitar a leitura da média da temperatura da face externa do bloco em estudo.

**Tabela 3 – Fases do segundo ensaio para validação do método.**

SEGUNDO ENSAIO DA SEGUNDA ETAPA PARA VALIDAÇÃO DO MÉTODO		
FASE		DESCRIÇÃO
I	MONTAGEM DO EXPERIMENTO	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Empréstimo dos equipamentos;</li> <li>• Preparação do túnel térmico (instalação da lâmpada, inserção da amostra e finalização do sistema de vedação);</li> <li>• Posicionamento do relógio termo-higrômetro e registro dos valores;</li> <li>• Posicionamento e configuração da termocâmara.</li> </ul>
II	AQUISIÇÃO DE DADOS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Monitoramento da variação da temperatura em função do tempo, por termografia, da área da face externa da amostra;</li> <li>• Análise dos termogramas com o <i>ThermaCAM QuickReport</i>;</li> <li>• Cálculo do fluxo de calor;</li> <li>• Preparação do EES com as equações e parâmetros necessários ao cálculo da difusividade térmica da amostra.</li> </ul>
III	AVALIAÇÃO DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA DA AMOSTRA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alimentação do EES com as constantes do modelo matemático e os valores de tempo e temperatura registrados por termografia;</li> <li>• Cálculo, no EES, dos valores de difusividade térmica em função do tempo;</li> <li>• Compilação dos dados em planilhas do <i>Excel</i> para gerar tabelas e gráficos.</li> </ul>

### I. MONTAGEM DO EXPERIMENTO

Para que o bloco maciço fosse encaixado no túnel térmico, uma vez que suas dimensões são inferiores às dos blocos vazados e a bancada foi projetada para encaixe perfeito deles, construiu-se um suporte para sustentação e vedação do bloco maciço, utilizando-se placas e mantas isolantes, como pode ser visualizado na Figura 29.

**Figura 29 – Estrutura para suporte e vedação do bloco maciço cerâmico.**



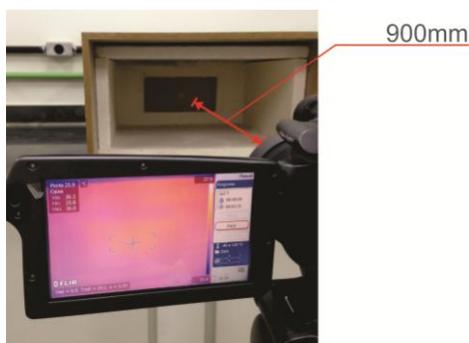
Na abertura frontal da caixa colocou-se o bloco a ser ensaiado, a uma distância de 100mm do eixo da lâmpada (Fig. 30). Essa distância foi estipulada com base no primeiro ensaio e se manteve constante em todos os ensaios da terceira etapa.

**Figura 30 – Inserção do bloco maciço cerâmico no túnel térmico.**



Posicionado no mesmo local durante todos os ensaios, o relógio termo-higrômetro registrou a temperatura atmosférica e a umidade do ar. A lente da termocâmera, por sua vez, foi centralizada com o túnel e disposta a 900mm da face externa do bloco (Fig. 31). Essa distância foi estipulada empiricamente<sup>25</sup> e se manteve constante em todos os ensaios da terceira etapa.

**Figura 31 – Posição da termocâmera em relação ao túnel térmico.**



Diferentemente do verificado no primeiro ensaio, o valor da emissividade do bloco maciço cerâmico foi, neste segundo, estimado por meio da técnica de emissividade conhecida. A superfície cuja emissividade é conhecida (no caso, uma fita crepe) deve estar em equilíbrio térmico com a superfície do material que se deseja conhecer a emissividade. Ao focalizar o

<sup>25</sup> No primeiro ensaio, a distância utilizada foi de 1350mm. A partir do segundo ensaio da segunda etapa, adotou-se, para o posicionamento da lente da termocâmera, a distância de 900mm até a face externa do bloco. Essa alteração justifica-se pelo fato da distância de 900mm ser o suficiente para enquadrar todo e somente o objeto em estudo. Com valores inferiores a 900mm, percebeu-se que a termocâmera enquadrava apenas parte do objeto e, com valores superiores, enquadrava outros objetos não interessantes ao estudo.

material, varia-se o valor da emissividade para que o valor da temperatura medida pela termocâmara seja igual ao medido para a fita crepe.

Com os valores de emissividade, temperatura ambiente, temperatura refletida, umidade do ar e distância da lente ao objeto, a termocâmara foi configurada para dar início à fase de aquisição de dados.

## II. AQUISIÇÃO DE DADOS

O experimento consistiu em submeter o bloco maciço cerâmico ao aquecimento gerado pela lâmpada de 1.000W e monitorar, em intervalos de 20 segundos, o valor médio de temperatura da face externa para cada instante de tempo, até que atingisse uma variação de 2°C, limite da incerteza da medição termográfica.

O programa *ThermaCAM QuickReport* foi utilizado para analisar as imagens termográficas. Seguindo os mesmos procedimentos do primeiro ensaio, o ESS foi preparado para calcular os valores de difusividade do bloco para cada instante de tempo.

## III. AVALIAÇÃO DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA DA AMOSTRA

O EES foi utilizado para calcular os valores da difusividade térmica do bloco ao longo do seu processo de aquecimento, e o *Excel* foi empregado para elaboração das tabelas e dos gráficos.

Por fim, os resultados foram comparados com os valores de difusividade térmica do material disponíveis na literatura consultada, evidenciando a possibilidade de reprodução da técnica para conhecimento e análise da difusividade térmica de blocos vazados.

### 4.2.2.3 Análise de incertezas

A todo processo de medição de uma grandeza, existe uma incerteza associada. Neste trabalho, optou-se por determinar a faixa de incerteza do segundo ensaio de validação do método, uma vez que o mesmo túnel térmico foi adotado para os demais ensaios, possibilitando assumir os mesmos valores de incerteza aqui encontrados. Para tal, levaram-se em consideração as interferências geradas pelos parâmetros associados ao método teórico-experimental, que inclui a medição indireta de temperatura por termografia e o modelamento matemático para sólidos semi-infinitos.

Nessa etapa, foram utilizados os *softwares ThermaCAM QuickReport e Excel*, para estimar a incerteza da emissividade, o *ThermaCAM ResearcherPro* junto ao IMT, para o cálculo da incerteza da temperatura, e o EES, para determinar a incerteza de cada um dos valores obtidos para difusividade térmica. As fases dessa etapa da pesquisa encontram-se descritas na Tabela 4 e detalhas a seguir.

**Tabela 4 – Fases da análise de incertezas do segundo ensaio.**

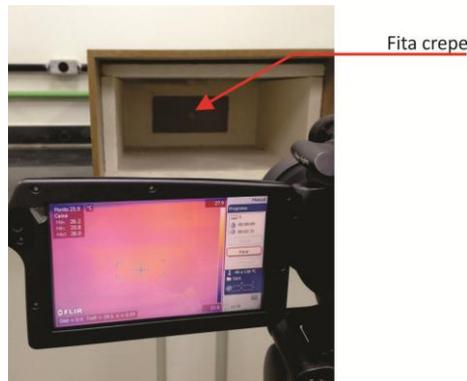
ANÁLISE DE INCERTEZAS DO SEGUNDO ENSAIO DA SEGUNDA ETAPA		
FASE		DESCRIÇÃO
I	INCERTEZA DA TEMPERATURA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cálculo da incerteza da emissividade utilizando os <i>softwares FLIR QuickReport e Excel</i>;</li> <li>• Definição da incerteza da temperatura ambiente, da temperatura refletida, da distância entre objeto e lente e do sinal da termocâmara;</li> <li>• Análise da incerteza dos valores de temperatura medidos por termografia por meio dos programas <i>ThermaCAM Researcher Professional</i> e IMT.</li> </ul>
II	INCERTEZA DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Definição do valor de incerteza da temperatura lida por termografia.</li> <li>• Estimativa dos valores de incerteza para o fluxo de calor e para a condutividade térmica;</li> <li>• Definição da incerteza do tempo e da distância entre a lâmpada e a face interna do bloco;</li> <li>• Análise da incerteza dos valores obtidos para difusividade térmica do bloco maciço cerâmico por intermédio do <i>software EES</i>.</li> </ul>

## I. INCERTEZA DA TEMPERATURA

No que se refere ao processo de medição indireta de temperatura por termografia, as grandezas associadas à incerteza da medição são, como exposto no item 3.3.3: a) a emissividade; b) distância entre o objeto ensaiado e a termocâmara; c) a temperatura ambiente; d) a temperatura refletida; e e) o sinal do termovisor.

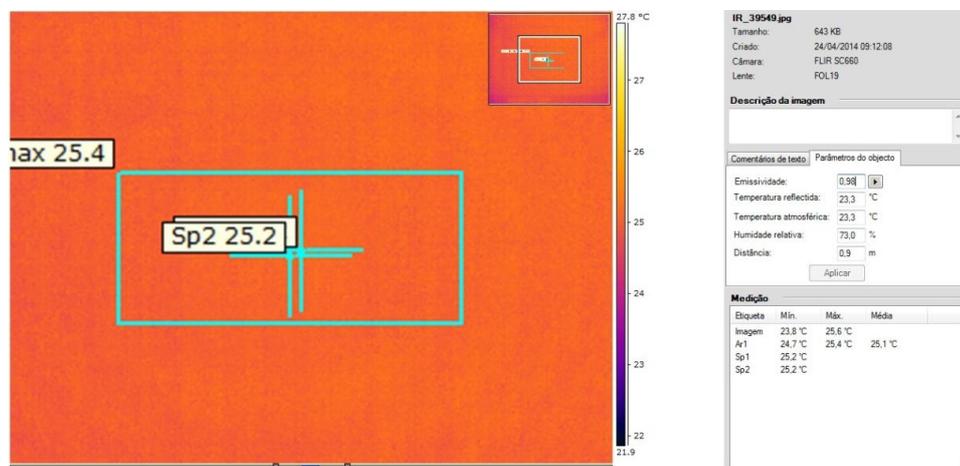
A incerteza da emissividade foi assumida como sendo o desvio padrão dos valores de emissividade de cinco pontos distintos da amostra. Para tanto, uma fita crepe (superfície de emissividade conhecida) foi fixada no centro do bloco (Fig. 32) e registrou-se um termograma no qual a ferramenta “ponto” foi marcada sobre a fita para indicar a sua posição. No *software FLIR QuickReport*, o valor da temperatura da fita crepe foi determinado.

**Figura 32 – Fixação de fita crepe no centro do bloco para determinação da incerteza da emissividade.**



Próximo ao ponto que indicava a localização da fita crepe (Fig. 33), foram selecionados cinco pontos nos quais o valor de emissividade foi alterado para que a temperatura, nesses pontos, se igualasse à temperatura do ponto de referência. De posse dos cinco valores de emissividade encontrados, calculou-se o desvio padrão dessa amostra pelo *software Excel*.

**Figura 33 – Interface do software *QuickReport*, utilizado na determinação da incerteza da emissividade.**



Em relação à temperatura ambiente e à temperatura refletida, utilizou-se o valor de incerteza informado pelo fabricante do relógio termo-higrômetro. A incerteza atribuída à distância entre a termocâmera e a face externa do bloco também está relacionada com o instrumento de medição, que, nesse caso, foi uma trena graduada em milímetros. Segundo diversos autores, considera-se como incerteza de um instrumento graduado metade de sua resolução. Porém, para este experimento, foi adotada uma postura conservadora em virtude da dificuldade de se

obter o ponto exato da lente da termocâmara, admitindo-se um valor maior do que 0,5mm. Já o valor para incerteza do sinal da termocâmara foi o obtido por Teixeira (2012).

De posse dos valores de incerteza dos parâmetros que influenciam a leitura da termocâmara, foi possível calcular a incerteza da temperatura por meio da ferramenta computacional IMT. Essa ferramenta avalia a incerteza de um ponto de cada um dos termogramas do ensaio e, para isso, fez-se necessário determinar as coordenadas desse ponto. O procedimento inicia-se com a definição do ponto relevante a ser avaliado. Nesse experimento, foi determinado que o ponto representativo deveria apresentar o mesmo valor da temperatura média da área correspondente à superfície externa do bloco maciço cerâmico. O *software ThermaCAM Researcher Pro*, por sua vez, permite selecionar essa área de interesse, determinar sua temperatura média e, com a ferramenta ponto, procurar um *pixel* que apresenta o mesmo valor da temperatura média. Assim, as coordenadas do ponto encontrado em cada um dos termogramas foram registradas.

Por fim, com todos os dados de entrada necessários ao uso do IMT, foi possível determinar a incerteza do processo de medição da temperatura por termografia. A faixa de incerteza gerada nesse ensaio foi considerada para os demais experimentos, uma vez que as incertezas dos parâmetros de entrada são iguais e a variação da temperatura, relativamente baixa para que haja uma variação dos seus valores de incerteza.

## II. INCERTEZA DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA

No modelo matemático utilizado, as grandezas associadas à incerteza da difusividade térmica são: a) o fluxo de calor; b) a condutividade térmica; c) a espessura do bloco; d) a temperatura; e e) o tempo.

O valor da incerteza da temperatura foi obtido do procedimento anterior. O fluxo de calor gerado pela lâmpada, entretanto, não possui incerteza conhecida, e a literatura consultada não disponibiliza um método para a determinação da mesma. O valor da condutividade foi considerado constante para cada bloco e, também, não possui valor de incerteza conhecido. Para esses parâmetros, foram estimados, com conservadorismo, 10% de incerteza.

A incerteza do valor da espessura do bloco foi assumida como sendo metade da resolução da régua graduada, enquanto a incerteza do tempo foi associada à incerteza da temperatura, uma vez que o seu critério de determinação foi a variação da temperatura captada pela termocâmara.

Com esses dados, a faixa de incerteza dos valores de difusividade térmica foi calculada pelo *software* EES.

#### 4.2.3 Aplicação do método teórico-experimental no estudo da difusividade térmica de blocos vazados

A aplicação do método é dedicada ao estudo da difusividade térmica das seis amostras de blocos vazados apresentadas no item 4.1, por meio do método teórico-experimental validado na etapa anterior. Para o desenvolvimento da terceira etapa, utilizou-se o túnel térmico e os mesmos *softwares* e dispositivos de medição utilizados no segundo ensaio da segunda etapa. A Tabela 5 apresenta as fases que compreendem a aplicação do método. A seguir, essas fases são detalhadas.

**Tabela 5 – Fases da aplicação do método-teórico experimental.**

APLICAÇÃO DO MÉTODO NO ESTUDO DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA DE BLOCOS VAZADOS (TERCEIRA ETAPA)		
FASE		DESCRIÇÃO
I	MONTAGEM DO EXPERIMENTO PARA CADA ENSAIO	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Empréstimo dos equipamentos;</li> <li>● Preparação do túnel térmico (instalação da lâmpada, inserção da amostra e finalização do sistema de vedação);</li> <li>● Posicionamento do relógio termo-higrômetro e registro dos valores;</li> <li>● Posicionamento e configuração da termocâmera.</li> </ul>
II	AQUISIÇÃO DE DADOS PARA CADA ENSAIO	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Monitoramento da variação da temperatura em função do tempo, por termografia, da área da face externa da amostra;</li> <li>● Análise dos termogramas com o <i>ThermaCAM QuickReport</i>;</li> <li>● Cálculo do fluxo de calor;</li> <li>● Análise dimensional do bloco e cálculo da condutividade térmica equivalente;</li> <li>● Preparação do EES com as equações e parâmetros necessários ao cálculo da difusividade térmica da amostra.</li> </ul>
III	AVALIAÇÃO DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA PARA CADA AMOSTRA	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Alimentação do EES com as constantes do modelo matemático e os valores de temperatura e tempo registrados por termografia;</li> <li>● Cálculo, no EES, dos valores de difusividade térmica em função do tempo;</li> <li>● Compilação dos dados em planilhas do <i>Excel</i> para gerar tabelas e gráficos.</li> </ul>

## I. MONTAGEM DO EXPERIMENTO

As amostras foram avaliadas uma a uma, em dias alternados, mantendo-se a mesma situação de contorno para todas: a) janelas e portas do laboratório fechadas; ar condicionado desligado; b) utilização do mesmo equipamento de termografia; c) lente da termocâmara posicionada a 900mm da face externa do bloco; d) lâmpada fria no início do experimento; e) face interna do bloco posicionada a 100mm do eixo da lâmpada; f) relógio termo-higrômetro na mesma posição; e g) registro dos valores de temperatura ambiente e umidade do ar instantes antes de se iniciar o ensaio.

Na abertura frontal da caixa, como previsto, foram colocados os blocos a serem ensaiados. Tomou-se o cuidado de deixá-los em repouso no local do experimento, para que estivessem em equilíbrio térmico. As possíveis frestas existentes entre as placas isolantes e o bloco foram calafetadas, nas faces interna e externa, utilizando-se raspas e pó de refugo da placa isolante. Para vedação completa, utilizou-se uma manta isolante sobre o tampo de cada bloco. Desse modo, garantiu-se que apenas a face posterior da amostra estivesse em contato com o fluxo de calor gerado pela lâmpada. A Figura 34 apresenta o preparo de cada ensaio.

**Figura 34 – Preparação dos ensaios da terceira etapa.**



Bloco cerâmico de 9cm



Bloco cerâmico de 14cm



Bloco cerâmico de 19cm



Bloco de concreto de 9cm



Bloco de concreto de 14cm



Bloco de concreto de 19cm

O equipamento de termografia foi fixado em um tripé, centralizado e alinhado com o túnel (Fig. 35), e foi programado para registrar imagens em intervalos de 10 segundos.

**Figura 35 – Posicionamento do termovisor.**



Para a análise dos termogramas, foi necessário conhecer a emissividade da cerâmica e do concreto. Dessa forma, tais valores foram estimados pela técnica da emissividade conhecida, conforme descrito no item 4.2.2.2.

## II. AQUISIÇÃO DE DADOS

O experimento consistiu em submeter o bloco em estudo ao aquecimento gerado pela lâmpada de 1.000W e monitorar o valor médio da temperatura da face externa para cada instante de tempo, até que atingisse uma variação de 2°C. O *software ThermaCAM QuickReport* foi utilizado para analisar as imagens termográficas.

Posteriormente, para avaliar o comportamento da difusividade térmica de cada bloco, fez-se necessário determinar, para cada ensaio, o fluxo de calor e a condutividade térmica equivalente, cujos procedimentos foram descritos, respectivamente, nos itens 4.2.1.1 e 4.2.1.2. Para o cálculo da condutividade térmica equivalente, fez-se necessário proceder à análise dimensional de cada amostra.

Os valores de temperatura em função do tempo, bem como a espessura do bloco, a condutividade térmica do material e o fluxo de calor foram inseridos no arquivo base do EES para o cálculo da difusividade em função do tempo.

## III. AVALIAÇÃO DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA

O EES foi, então, utilizado para o cálculo da difusividade térmica para cada instante de tempo de cada amostra. Por fim, o *Excel* foi empregado para elaboração das tabelas e dos gráficos.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos com a metodologia descrita no Capítulo 4 e suas respectivas análises são apresentados a seguir.

### 5.1 Ensaios para validação do método teórico-experimental

A validação do método teórico-experimental, como descrito anteriormente, consistiu em comparar os resultados obtidos experimentalmente para difusividade térmica do bloco maciço cerâmico com os valores dessa propriedade disponíveis na literatura. Entretanto, as fontes consultadas, Incropera e DeWitt (2003) e NBR 15220-2 (2005), não os apresentam de forma direta, fazendo-se necessário o uso da Equação (11) (item 3.2.1.1.2) para determinação dos valores teóricos de difusividade térmica do bloco. Os dados de condutividade térmica, massa específica e calor específico, necessários à aplicação da mencionada equação, bem como os resultados obtidos para difusividade térmica, são apresentados na Tabela 6.

**Tabela 6 – Valores teóricos para a difusividade térmica do bloco maciço cerâmico.**

<b>PROPRIEDADES</b>	<b>INCROPERA (a 300K)</b>	<b>NBR 15220-2</b>	<b>NBR 15220-2</b>
Condutividade Térmica (W/m.k)	0,72	0,7	0,7
Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	1920	1300	1000
Calor Específico (J/kg.K)	835	920	920
<b>Difusividade Térmica (m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>4,49E-07</b>	<b>5,85E-07</b>	<b>7,61E-07</b>

**FONTE: Incropera e DeWitt (2003) e NBR 15220-2 (2005).**

Observa-se que há equivalência, em relação à ordem de grandeza, nos valores de difusividade térmica obtidos. Acredita-se que as diferenças nos dados de massa específica e calor específico sejam em virtude da diferença do processo de fabricação dos blocos utilizados para respectivas medições. Ademais, a especificação do material nas tabelas de referência é abrangente, não sendo suficiente para a certeza de que se tratam exatamente de blocos qualitativamente idênticos.

A partir desses dados, foi possível analisar os resultados obtidos nos dois ensaios para validação do método teórico-experimental, descritos a seguir.

### 5.1.1 Primeiro ensaio para validação do método

Durante a fase de montagem do experimento do primeiro ensaio para validação do método, fez-se necessário configurar a termocâmara para o monitoramento da temperatura. Essa configuração consistiu em ajustar o foco do equipamento, definir a escala de temperatura e editar os *inputs*, que são a emissividade, a distância do objeto, a temperatura refletida, a temperatura atmosférica e a umidade relativa.

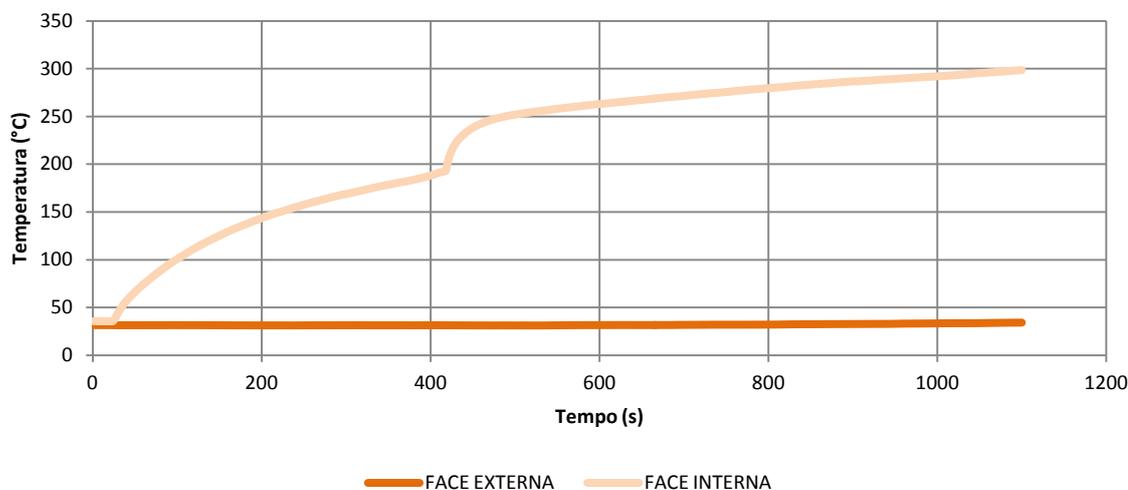
A emissividade do bloco maciço cerâmico, obtida pelo método da temperatura conhecida, foi de 0,95. Esse valor é similar aos descritos por Incropera e DeWitt (2003) e pela NBR 15220-2 (2005). Os resultados obtidos para os demais *inputs*, bem como o respectivo sistema de medição utilizado, são apresentados na Tabela 7.

**Tabela 7 – Parâmetros de entrada da termocâmara para o primeiro ensaio.**

PARÂMETROS	VALORES	SISTEMA DE MEDIÇÃO
Emissividade	0,95	Técnica da temperatura conhecida
Temperatura refletida	24,9°C	Relógio termo-higrômetro
Distância do objeto	1,35m	Trena graduada em mm
Temperatura atmosférica	24,9°C	Relógio termo-higrômetro
Umidade relativa %	58%	Relógio termo-higrômetro

Na fase de aquisição de dados, houve o monitoramento da variação de temperatura em função do tempo das superfícies interna e externa da amostra em estudo, via termopar e via termocâmara, durante 3.600 segundos. A Figura 36 apresenta essa variação de temperatura, registrada por termopar, das faces interna e externa do bloco maciço cerâmico ao longo dos primeiros 1.100 segundos.

**Figura 36 – Variação de temperatura das superfícies interna e externa do bloco maciço cerâmico, registrada pelo termopar.**



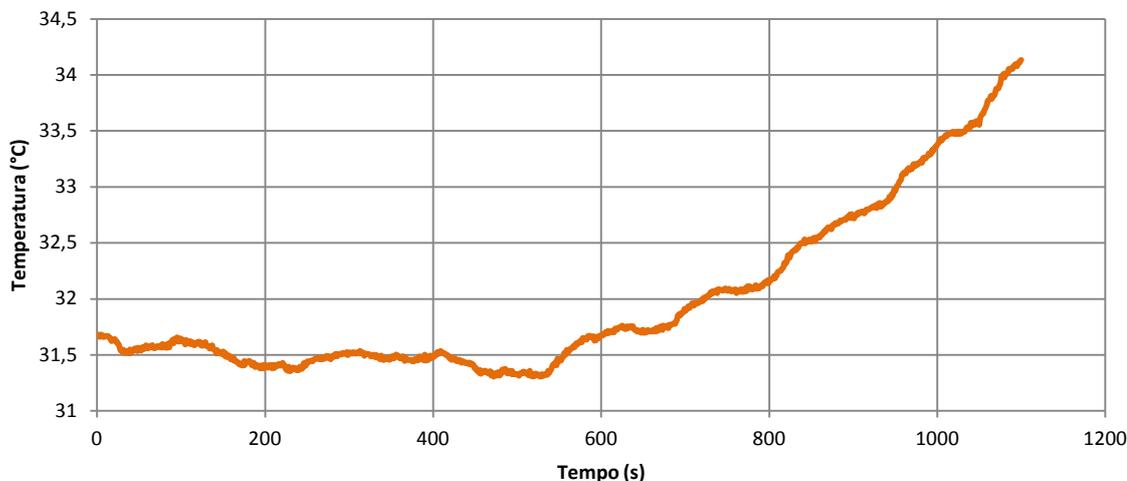
Percebe-se que, na face interna, a temperatura aumenta segundo uma determinada tendência crescente no decorrer de aproximadamente 400 segundos. O ponto de inflexão apresentado na curva possivelmente se deve ao parcial desprendimento, devido à alta temperatura, daquilo que fixava a haste do termopar na superfície interna do bloco (Fig. 37). No entanto, percebe-se que a curva de temperatura continua ascendente, sugerindo que a superfície do bloco também tenha acompanhado a mesma tendência. A variação da temperatura da superfície externa, quando comparada à interna, não é perceptível na escala do gráfico.

**Figura 37 – Situação da fixação da haste na superfície interna após o primeiro ensaio da segunda etapa.**



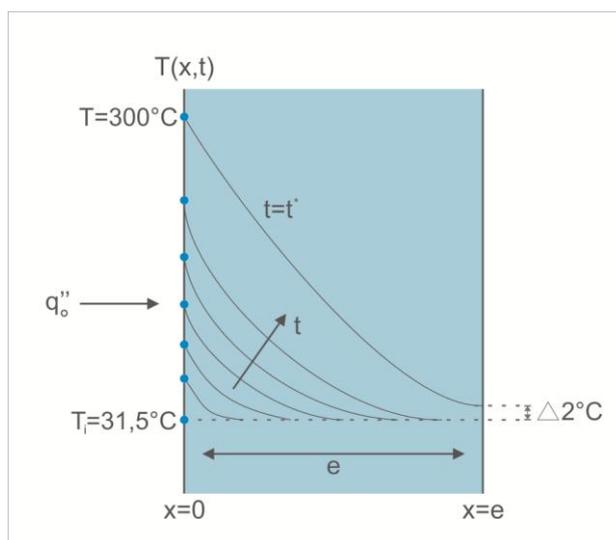
A Figura 38 apresenta, em uma escala ampliada, o comportamento térmico da face externa do bloco. No intervalo de tempo entre 0 e 1.030 segundos, a temperatura aumentou de, aproximadamente, 31,5°C para 33,5°C, um aumento de 2°C, variação suficiente para análise da difusividade térmica com base no modelo matemático para sólido semi-infinito.

**Figura 38 – Variação da temperatura da superfície externa do bloco maciço cerâmico, observada pelo termopar.**



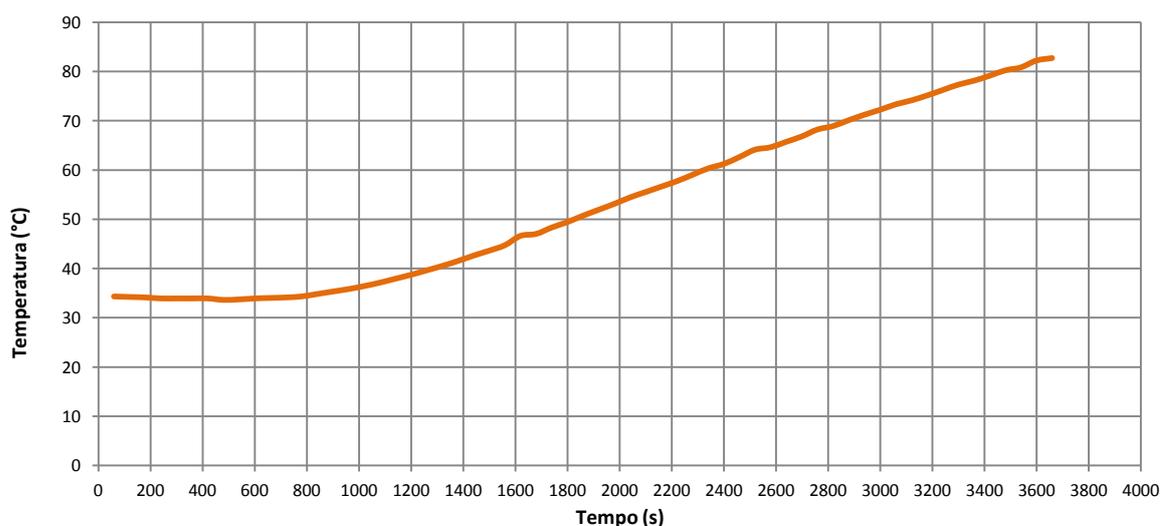
Com esses dados, é possível fazer uma analogia à Figura 5, apresentada no item 3.2.1.1.2. Como um sólido semi-infinito é uma geometria na qual as alterações impostas à sua superfície identificável não são observadas na superfície oposta, é nítida, nesse ensaio, a pertinência em se considerar o bloco como tento tal geometria, uma vez que foi necessário variar a temperatura da parte confinada da bancada em torno de  $300^{\circ}\text{C}$  para que se obtivesse uma variação de  $2^{\circ}\text{C}$  da temperatura da superfície externa, esta última praticamente desprezível em relação à primeira. A Figura 39 ilustra o instante  $[t^*]$  no qual se percebe a variação de  $2^{\circ}\text{C}$  da face externa.

**Figura 39 – Análise do comportamento do bloco maciço cerâmico como um sólido semi-infinito.**



A Figura 40 apresenta os valores de temperatura, obtidos por meio da análise dos termogramas, da face externa do bloco. A temperatura se manteve estável até 600 segundos, quando começou a aumentar de forma perceptível, atingindo, aos 3.600 segundos, cerca de 83°C, elevação de aproximadamente 50°C na temperatura superficial do bloco. Valores da mesma ordem foram registrados pelo termopar.

**Figura 40 – Comportamento da temperatura média da superfície externa do bloco maciço cerâmico, via análise dos termogramas.**



Para o cálculo da difusividade térmica da amostra por meio do EES, fez-se necessário alimentá-lo com as constantes do modelamento matemático e os valores de tempo e temperatura registrados por termografia. Utilizaram-se os dados obtidos por termografia pois acredita-se que o valor médio da temperatura superficial do bloco – obtido por meio da área que demarca a superfície externa da amostra – represente melhor a realidade do que um valor pontual de temperatura obtido pelo termopar.

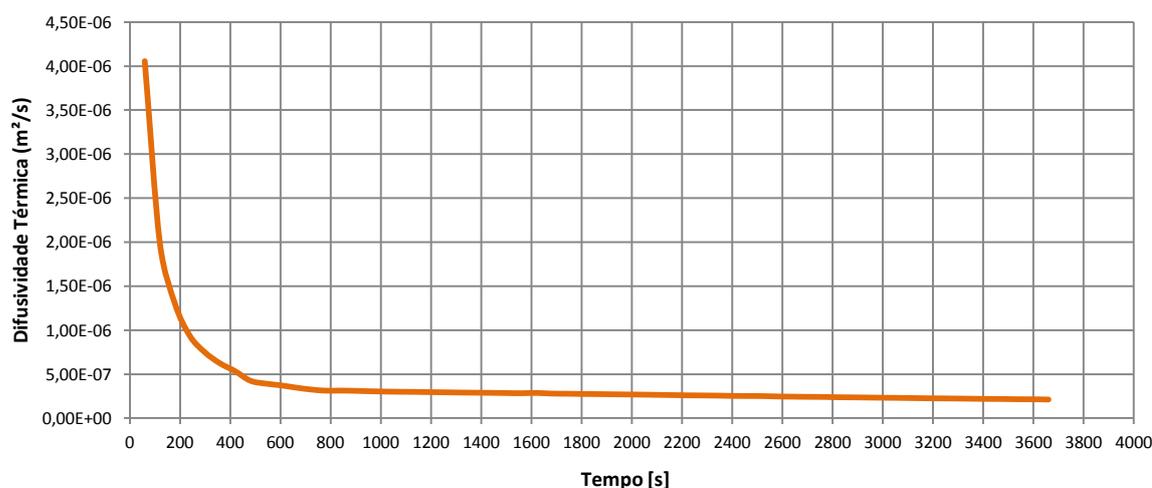
A espessura do bloco, medida pela régua graduada em mm, é de 0,055m. A temperatura inicial, dada por termografia, é de 33,1°C. Considerou-se a condutividade térmica [k] de 0,72W/m.K, conforme apresentado na Tabela 1. Para a determinação do fluxo de calor [ $q_x$ ], utilizou-se o procedimento descrito no item 4.2.1.1, em que [A] assumiu o valor de 0,02475m<sup>2</sup> (área da superfície de contato com o fluxo de calor) e [Pot] de 1.000W<sup>26</sup> (potência da lâmpada fornecida pelo fabricante). O fator de forma [ $F_{ij} = 0,2651$ ] foi calculado pelo EES, com parâmetros de entrada [a] de 0,05m (distância entre o centro da lâmpada e a face interna

<sup>26</sup> Como havia dois blocos e duas lâmpadas inseridos na bancada de testes e o objetivo era avaliar a difusividade térmica de apenas um deles, utilizou-se somente a potência de uma lâmpada para determinação do fluxo de calor.

do bloco) e [b] de 0,055m (metade da altura do bloco). Assim, encontrou-se, para o fluxo de calor,  $[q_x] = 10.711\text{W/m}^2$ .

A partir desses dados e dos apresentados na Figura 40, foi avaliado o comportamento da difusividade térmica ao longo do processo de aquecimento do bloco. A Figura 42 apresenta os resultados obtidos.

**Figura 41 – Comportamento da difusividade térmica do bloco maciço cerâmico ao longo do tempo (primeiro ensaio).**



Observa-se que os valores de difusividade térmica diminuíram de forma acentuada nos primeiros 600 segundos de ensaio – período no qual se observou um patamar nos valores de temperatura –, mantendo-se, a partir de então, praticamente constante no decorrer do tempo. Ao analisarmos a Equação (12), que descreve o comportamento do perfil de temperatura em um sólido semi-infinito em função do tempo e da posição, percebe-se que, no primeiro membro, há uma subtração entre o valor de temperatura na posição [x] e no tempo [t] e o valor da temperatura inicial  $[T_i]$ . Como a temperatura da face externa da amostra, onde [x] corresponde à espessura do bloco, manteve-se constante nos primeiros 600 segundos e igual a  $[T_i]$ , o resultado da subtração é nulo e, como as demais variáveis se mantiveram constantes, exceto o tempo, era de se esperar uma queda nos valores de difusividade. Esperava-se, pois, que, se a difusividade pode ser entendida como a velocidade de difusão do calor e se a variação na temperatura na superfície externa não é perceptível com o passar do tempo, quanto maior esse intervalo de tempo, menor o valor da difusividade térmica.

Como observado na Figura 41, a curva de difusividade térmica em função do tempo tende a um valor constante, na ordem de  $2,11 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ . Ao confrontar essa tendência com os valores

teóricos de difusividade obtidos para o mesmo material (Tabela 6), percebe-se que o método utilizando a termografia infravermelha aliada ao modelo matemático para sólido semi-infinito mostrou-se adequado e aplicável à análise da difusividade térmica de blocos maciços cerâmicos, visto que os resultados experimentais corroboram, em termos de ordem de grandeza, os valores teóricos.

Esse resultado sugeriu o refinamento da técnica para análise de outros materiais construtivos, o que foi feito com a construção do túnel térmico, utilizado no segundo ensaio desta etapa e nos ensaios da terceira etapa.

### 5.1.2 Segundo ensaio para validação do método

Na fase de montagem do segundo ensaio fez-se necessário, assim como no primeiro, configurar a termocâmara. Para obtenção do valor da emissividade do bloco maciço cerâmico utilizou-se, como descrito no item 4.2.2.2, a técnica da emissividade conhecida. O valor encontrado foi de 0,95, estando em concordância com a bibliografia consultada e com o resultado obtido no primeiro ensaio pela técnica da temperatura conhecida.

Os resultados obtidos para os demais *inputs* da termocâmara, bem como o respectivo sistema de medição utilizado, são apresentados na Tabela 8.

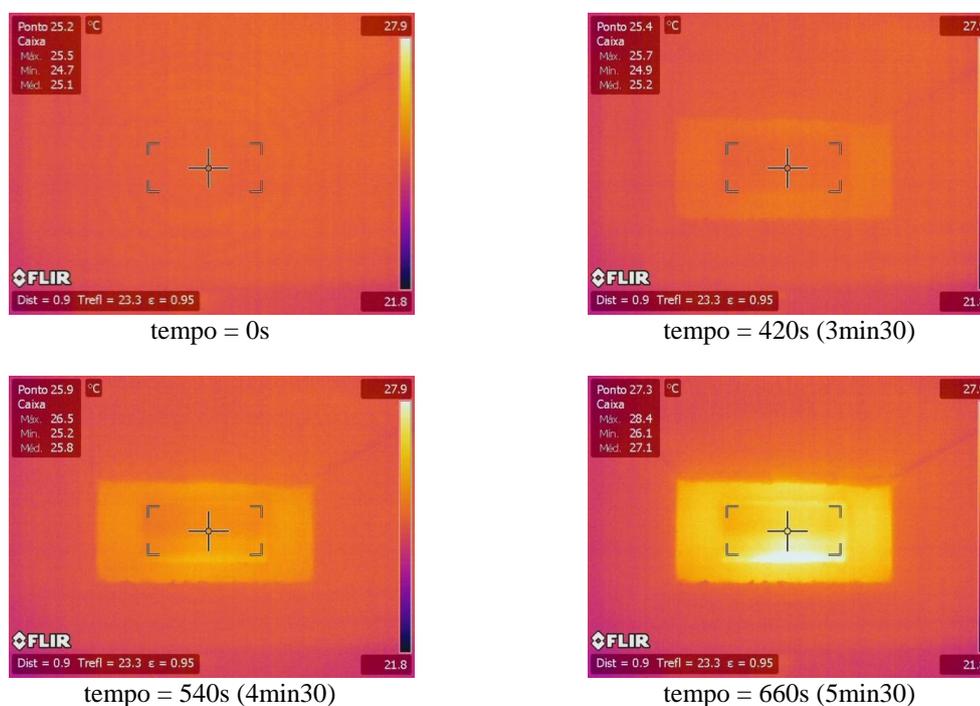
**Tabela 8 – Parâmetros de entrada da termocâmara para o segundo ensaio.**

PARÂMETROS	VALORES	FONTE
Emissividade	0,95	Técnica da emissividade conhecida
Temperatura refletida	23,3°C	Relógio termo-higrômetro
Distância do objeto	0,9m	Trena graduada em mm
Temperatura atmosférica	23,3°C	Relógio termo-higrômetro
Umidade relativa %	73%	Relógio termo-higrômetro

A fase de aquisição de dados consistiu em monitorar a temperatura da face externa do bloco, enquanto a sua face interna era submetida ao fluxo de calor constante emitido pela lâmpada. Para isso, utilizou-se o túnel térmico e a mesma câmara termográfica do primeiro ensaio, conforme especificado anteriormente.

O ensaio teve a duração de 660 segundos, período no qual foi possível observar a variação de temperatura de  $2^{\circ}\text{C}$  na superfície externa do bloco maciço cerâmico. A Figura 42 apresenta os termogramas de quatro estágios do ensaio.

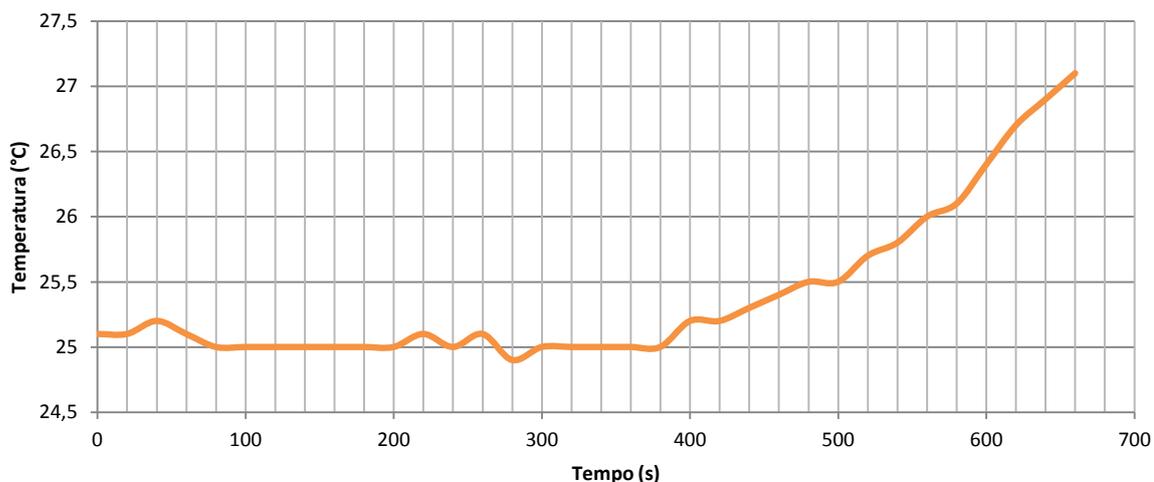
**Figura 42 – Termogramas do segundo ensaio com bloco maciço cerâmico da segunda etapa.**



É importante mencionar que a ferramenta “área”, utilizada para demarcar a superfície externa, não é congruente com a área da face do bloco. Ao considerar essa borda de segurança, é possível evitar influência dos pontos vizinhos nas leituras dos valores de temperatura. A quarta imagem da Figura 42 apresenta, de forma nítida, na parte inferior do bloco, a parcela de vazamento de calor que foi desprezada na quantificação da média da temperatura da área. Cabe observar que o experimento foi repetido sete vezes e com diferentes estratégias de vedação, na tentativa de se eliminar o vazamento percebido, o que não foi possível. O ensaio apresentado é o que obteve o melhor resultado.

Os valores das médias de temperatura registrados ao longo do tempo podem ser visualizados na Figura 43. Observa-se que a temperatura apresenta uma tendência constante até aproximadamente 380 segundos, quando começou a aumentar de forma perceptível, atingindo, aos 660 segundos, cerca de  $27,1^{\circ}\text{C}$ . Acredita-se que esse período no qual a temperatura da face externa da amostra se manteve estável (380s) seja inferior ao do primeiro ensaio (600s), pois, com a construção do túnel, foi possível um melhor controle do vazamento de calor, acelerando o processo de aquecimento do bloco.

**Figura 43 – Variação da temperatura do bloco maciço cerâmico verificada por termografia.**



Percebe-se que, durante esses 380s, há uma inconstância na leitura do valor da temperatura, sendo possível verificar, inclusive, a diminuição dos seus valores em um fenômeno físico em que a temperatura deveria estar estável ou tendendo ao crescimento. A tal perturbação, atribui-se a instabilidade de leitura da termocâmara com a ferramenta “área”, uma vez que tal recurso calcula a média dos valores de temperatura de cada *pixel* do termograma.

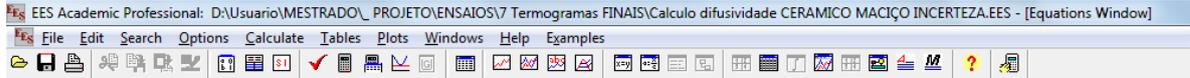
Para o cálculo do fluxo de calor incidente sobre a superfície interna da amostra, utilizou-se o procedimento descrito no item 4.2.1.1, em que  $[A]$  assumiu o valor de  $0,02475\text{m}^2$  e  $[\text{Pot}]$ , de  $1.000\text{W}$ . O fator de forma  $[F_{ij} = 0,1601]$  foi calculado pelo EES, com parâmetros de entrada  $[a = 0,01\text{m}]$  e  $[b = 0,055\text{m}]$ . Assim, encontrou-se, para o fluxo de calor,  $[q_x'' = 6.468,69\text{W}/\text{m}^2]$ .

A espessura do bloco tem valor igual a  $0,055\text{m}$ , medido pela régua de aço graduada em milímetros. A temperatura inicial, dada pela média das temperaturas medidas por termografia durante os primeiros 380s do ensaio, foi de  $25^\circ\text{C}$ . Considerou-se a condutividade térmica  $[k]$  de  $0,72\text{W}/\text{m.K}$ , conforme apresentado na Tabela 1.

Assim, a partir dos dados coletados (temperatura inicial da superfície interna, variação da temperatura superficial externa em função do tempo, fluxo de calor incidente, espessura do bloco e condutividade térmica do material), foi estimada, por meio do EES, a variação da difusividade térmica ao longo do processo de aquecimento do bloco.

A Figura 44 apresenta a interface do EES com alguns dos dados de entrada necessários ao cálculo da difusividade térmica, bem como a equação do modelamento matemático para sólidos semi-infinitos.

**Figura 44 – Interface do EES com dados de entrada para o cálculo da difusividade térmica do bloco maciço cerâmico.**



```

EES Academic Professional: D:\Usuario\MESTRADO\ PROJETO\ENSAIOS\7 Termogramas FINAIS\Calculo difusividade CERAMICO MACIÇO INCERTEZA.EES - [Equations Window]
File Edit Search Options Calculate Tables Plots Windows Help Examples
[MÉTODO DOS SÓLIDOS SEMHNFINITOS]

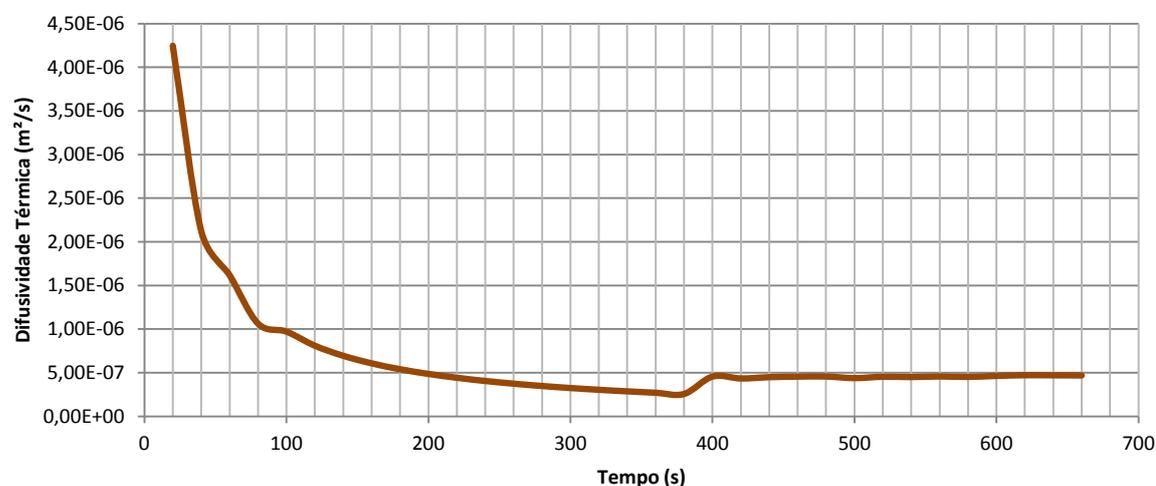
"Constantes"
Ti= 25 [C]
qo= 6468,69 [W/m^2]
k = 0,72 [W/m*K]
x= 0,055 [m]

Temp- Ti= ((2*qo*(alpha^(pi)^(1/2))/k)*exp((-x^2)/(4*alpha))- ((qo*x)/k)*erfc
w= x/(2*(alpha)^(1/2))
erfc=1-erfw
erfw= interpolate('Função Erro de Gauss','w','erfw';w=w)

"F=F2D_6(0.1,0.055)"
  
```

A partir dos valores de difusividade térmica calculados pelo EES para cada instante de tempo, foi possível construir o gráfico apresentado na Figura 45. Observa-se que, assim como no primeiro ensaio, os valores de difusividade térmica diminuíram de forma acentuada durante o período em que a temperatura da superfície externa da amostra se manteve constante (primeiros 380s). Comparando-se os valores de temperatura obtidos por termografia (Fig. 44) e os valores calculados para a difusividade, percebe-se que, a partir de 380 segundos, a temperatura média da superfície externa aumenta numa tendência linear, enquanto a difusividade tende a uma constante.

**Figura 45 – Comportamento da difusividade térmica do bloco maciço cerâmico ao longo do tempo (segundo ensaio).**



Ao considerar essa tendência da difusividade térmica um valor constante e aproximadamente igual a  $4,68 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ , pode-se concluir que o valor da difusividade do bloco maciço cerâmico, obtido experimentalmente, é, em termos de ordem de grandeza, igual aos valores teóricos apresentados na Tabela 6. Além disso, esse valor encontra-se muito próximo ao valor absoluto encontrado por Incropera e DeWitt (2003).

## 5.2 Análises de incertezas

Nesta pesquisa, foram estimadas as incertezas atribuídas ao procedimento de medição da temperatura e à determinação da difusividade térmica do bloco maciço cerâmico, amostra do segundo ensaio.

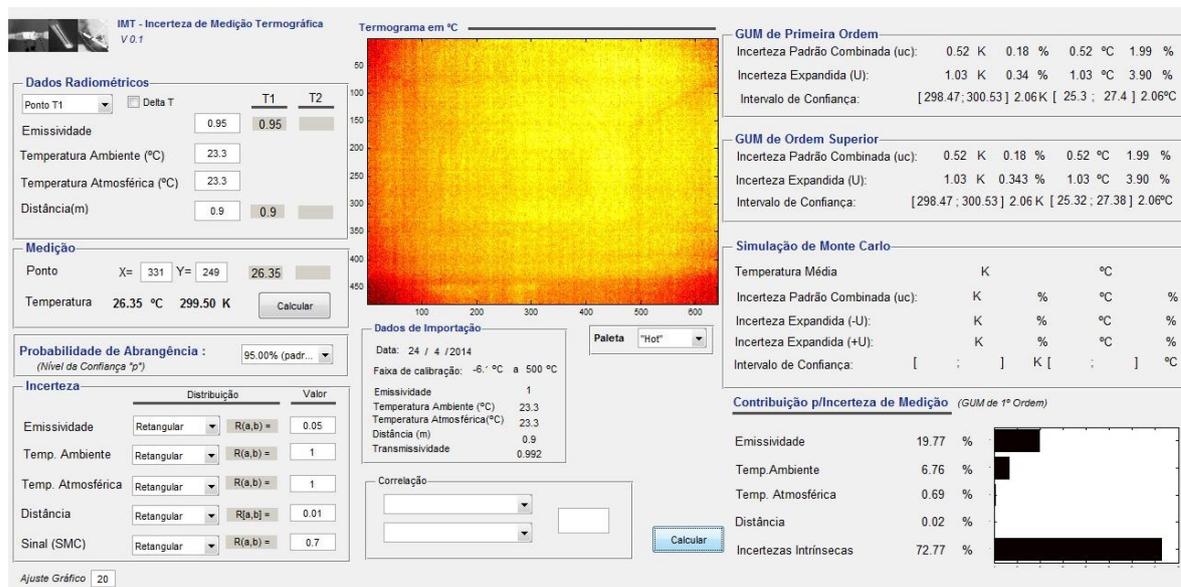
### 5.2.1 Análise da incerteza da temperatura

O primeiro procedimento necessário à análise da incerteza da medição indireta de temperatura por termografia refere-se à determinação da incerteza da emissividade. Conforme descrito no item 4.2.2.3, foi calculado o desvio padrão no *software Excel* dos valores de emissividade dos cinco pontos determinados. O valor obtido, 0,05, corresponde ao valor da incerteza da emissividade.

Em relação à temperatura ambiente e à temperatura refletida, a incerteza foi associada à do relógio termo-higrômetro, igual a  $1^\circ\text{C}$ . Admitiu-se o valor de 0,01m para a incerteza da trena, sistema de medição da distância entre a termocâmara e superfície externa do bloco. Já o sinal do termovisor, possui incerteza de 0,7V, segundo Teixeira (2012).

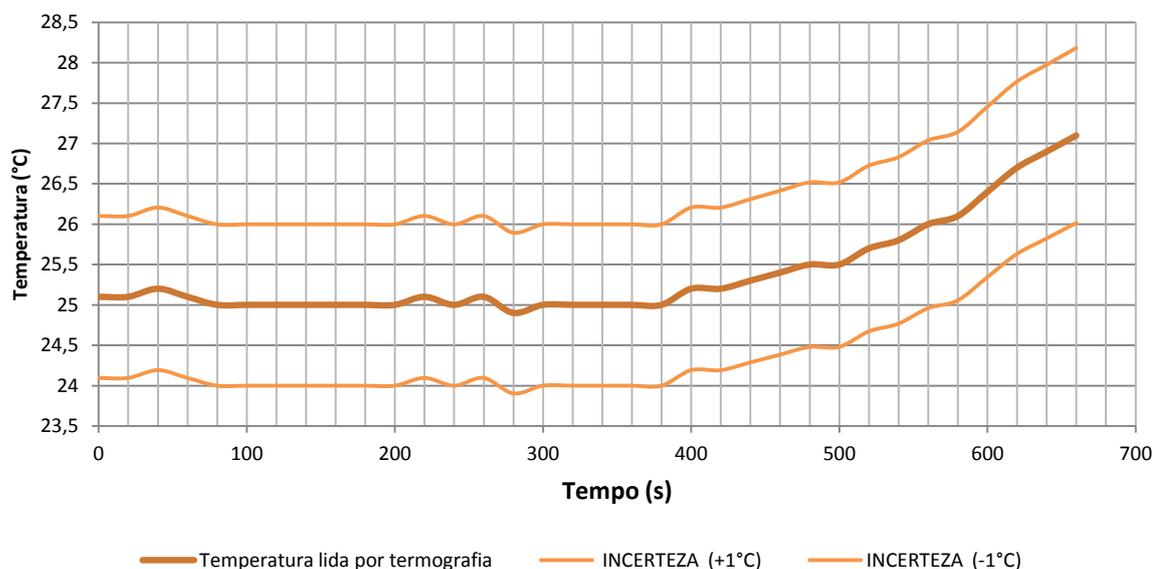
Assim, com todos os dados de entrada necessários ao cálculo no IMT, foi possível determinar a incerteza do processo de medição da temperatura para cada ponto escolhido em cada um dos 34 termogramas do segundo ensaio para validação do método. A Figura 46 apresenta, a título de ilustração, o cálculo da incerteza para o ponto (331,249) do 15º termograma. Optou-se pela incerteza expandida do método GUM, correspondente, nesse caso, a 3,9%. Assim, a leitura da temperatura no referido ponto é de  $26,4^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ .

**Figura 46 – Interface do IMT para o cálculo de incerteza para o ponto (331,249) do 15º termograma do segundo ensaio com o bloco maciço cerâmico.**



Dada a proximidade dos valores de incerteza obtidos em cada um dos pontos dos termogramas analisados, definiu-se que a incerteza da medição da temperatura seria de 4%, o maior dos valores encontrados, e considerou-se esse mesmo valor para os demais ensaios. O gráfico da Figura 47 apresenta os valores de temperatura registrados por termografia com respectivas faixas de incerteza.

**Figura 47 – Variação da temperatura ao longo do tempo e respectiva faixa de incerteza.**



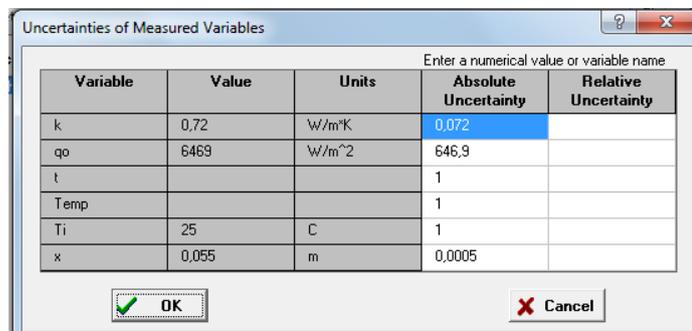
### 5.2.2 Análise da incerteza da difusividade

A incerteza dos valores de difusividade térmica foi calculada pelo *software* EES. No modelamento matemático para sólido semi-infinito, as grandezas associadas à incerteza da difusividade térmica são: a temperatura lida pela termocâmara, o fluxo de calor, a condutividade térmica, a espessura do bloco e o tempo.

O valor de incerteza da leitura da temperatura foi definido como 1°C, correspondente a 4% do valor da temperatura da faixa analisada. Para os parâmetros fluxo de calor e condutividade térmica, foram estimados 10% de incerteza, sendo 646,87W/m<sup>2</sup> e 0,072W/m.K, respectivamente. A incerteza do valor da espessura foi de 0,0005mm, enquanto a incerteza do tempo foi de 1s.

A Figura 48 apresenta a caixa de diálogo do EES alimentada com os dados de entrada necessários ao cálculo da incerteza da difusividade térmica do bloco maciço cerâmico.

**Figura 48 – Caixa de diálogo do EES com os dados de entrada necessários ao cálculo da incerteza da difusividade térmica do bloco maciço cerâmico.**



Variable	Value	Units	Absolute Uncertainty	Relative Uncertainty
k	0,72	W/m*K	0,072	
qo	6469	W/m^2	646,9	
t			1	
Temp			1	
Ti	25	C	1	
x	0,055	m	0,0005	

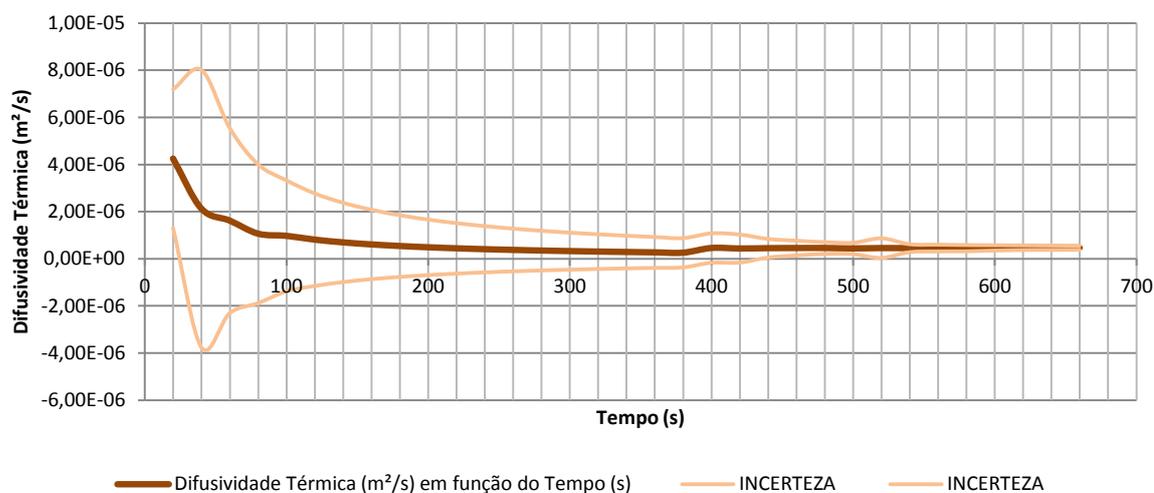
Para cada valor de difusividade térmica foi atribuído um valor de incerteza. Desse modo, não foi possível fixar um valor único para todos os valores de difusividade, como foi feito com a temperatura. A Tabela 9 apresenta essa relação.

**Tabela 9 – Variação da difusividade térmica do bloco maciço cerâmico ao longo do tempo e respectivos valores de incerteza.**

<b>t (s)</b>	<b><math>\alpha</math> (m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>INCERTEZA</b>	<b>t (s)</b>	<b><math>\alpha</math> (m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>INCERTEZA</b>
0	---	---	340	2,85E-07	±6,923E-07
20	4,25E-06	±2,935E-06	360	2,70E-07	±6,538E-07
40	2,12E-06	±5,885E-06	380	2,55E-07	±6,194E-07
60	1,62E-06	±3,923E-06	400	4,55E-07	±6,231E-07
80	1,06E-06	±2,942E-06	420	4,33E-07	±5,935E-07
100	9,70E-07	±2,354E-06	440	4,48E-07	±3,935E-07
120	8,09E-07	±1,961E-06	460	4,54E-07	±3,115E-07
140	6,93E-07	±1,681E-06	480	4,55E-07	±2,513E-07
160	6,07E-07	±1,471E-06	500	4,37E-07	±2,412E-07
180	5,39E-07	±1,308E-06	520	4,53E-07	±4,134E-07
200	4,85E-07	±1,177E-06	540	4,49E-07	±1,679E-07
220	4,41E-07	±1,070E-06	560	4,56E-07	±1,435E-07
240	4,04E-07	±9,807E-07	580	4,51E-07	±1,321E-07
260	3,73E-07	±9,053E-07	600	4,62E-07	±1,128E-07
280	3,47E-07	±8,406E-07	620	4,71E-07	±9,957E-08
300	3,24E-07	±7,846E-07	640	4,69E-07	±9,163E-08
320	3,03E-07	±7,355E-07	660	4,68E-07	±8,495E-08

A partir dos dados apresentados na Tabela 9, é possível verificar que os valores de incerteza diminuem com o passar do tempo, tendendo a valores muito próximos. Verifica-se, também, que no intervalo de tempo entre 40 e 420 segundos, a incerteza sugere valores negativos para difusividade, o que, evidentemente, deve ser desprezado, vez que, a tal propriedade, podem apenas ser atribuídos valores positivos.

Com esses resultados, a Figura 49 apresenta a variação da difusividade térmica do bloco maciço cerâmico ao longo do tempo, bem como a faixa de incerteza atribuída ao processo de medição.

**Figura 49 – Variação da difusividade térmica ao longo do tempo e respectiva faixa de incerteza.**

É importante reforçar que o valor teórico para difusividade do bloco maciço cerâmico informado por Incropera e DeWitt (2003),  $4,49E-07m^2/s$ , pertence à faixa de incerteza do valor obtido experimentalmente,  $4,68E0-7\pm0,8E-07m^2/s$ . Nesses termos, é plausível concluir que o modelo experimental mostrou-se adequado e aplicável à análise da difusividade térmica de outros componentes planos.

### 5.3 Avaliação da difusividade térmica de blocos vazados

Na terceira etapa da pesquisa, foram avaliados seis blocos vazados, sendo três de cerâmica e três de concreto, conforme apresentado no item 4.1. Em cada ensaio, durante a fase de montagem do experimento, utilizou-se o mesmo relógio termo-higrômetro, na mesma posição, com a função de medir a temperatura ambiente e a umidade relativa do ar. Os valores registrados pelo relógio, para cada ensaio, são apresentados na Tabela 10.

**Tabela 10 – Temperatura ambiente e umidade relativa do ar para os ensaios da terceira etapa**

<b>BLOCO (natureza/espessura)</b>	<b>TEMPERATURA AMBIENTE (°C)</b>	<b>HUMIDADE RELATIVA DO AR (%)</b>
Cerâmico 9cm	22,8	72
Cerâmico 14cm	24,0	60
Cerâmico 19cm	24,5	52
Concreto 9cm	24,3	62
Concreto 14cm	23,6	57
Concreto 19cm	22,0	63

Além desses dados, configurou-se a termocâmara, em cada ensaio, com o valor de 0,9m para a distância entre o equipamento e o bloco. Para a determinação dos valores de emissividade, foi utilizada a técnica de emissividade conhecida, e foi encontrado o valor de 0,95 para a emissividade dos blocos cerâmicos e dos blocos de concreto. Esse valor corrobora os disponíveis em Incropera e DeWitt (2003) e na NBR 15220-2 (2005).

Durante a fase de aquisição de dados, foi monitorada, por termografia, a variação de temperatura das faces externas de cada uma das seis amostras enquanto as respectivas faces internas eram submetidas ao fluxo de calor constante proveniente da lâmpada halógena palito de 1000W. Os ensaios foram realizados individualmente, cada um com duração e variação de temperatura determinadas. A Tabela 12 apresenta, a título de comparação, o tempo necessário para que fosse perceptível uma variação de temperatura de 2°C em cada uma das faces externas dos seis blocos ensaiados.

**Tabela 11 – Duração e variação de temperatura de cada ensaio da terceira etapa.**

<b>BLOCO (natureza/espessura)</b>	<b>DURAÇÃO DO ENSAIO (s)</b>	<b>VARIAÇÃO DA TEMPERATURA (°C)</b>
Cerâmico 9cm	1350	2,0
Cerâmico 14cm	1710	2,0
Cerâmico 19cm	2020	2,0
Concreto 9cm	560	2,0
Concreto 14cm	1050	2,0
Concreto 19cm	1350	2,0

Observa-se que o tempo necessário á percepção da variação de temperatura de 2°C das faces externas dos blocos de cerâmica é proporcionalmente maior ao observado no processo de aquecimento dos blocos de concreto.

A Figura 50 apresenta termogramas de cada um dos ensaios dos blocos cerâmicos em quatro ou cinco estágios de desenvolvimento, ao passo que a Figura 51 apresenta o mesmo para os ensaios dos blocos de concreto. A partir da análise dos termogramas é possível inferir que o sistema de vedação do túnel foi eficiente, impedindo minimamente o escape de calor de seu interior.

Figura 50 – Termogramas dos ensaios dos blocos cerâmicos durante a terceira etapa.

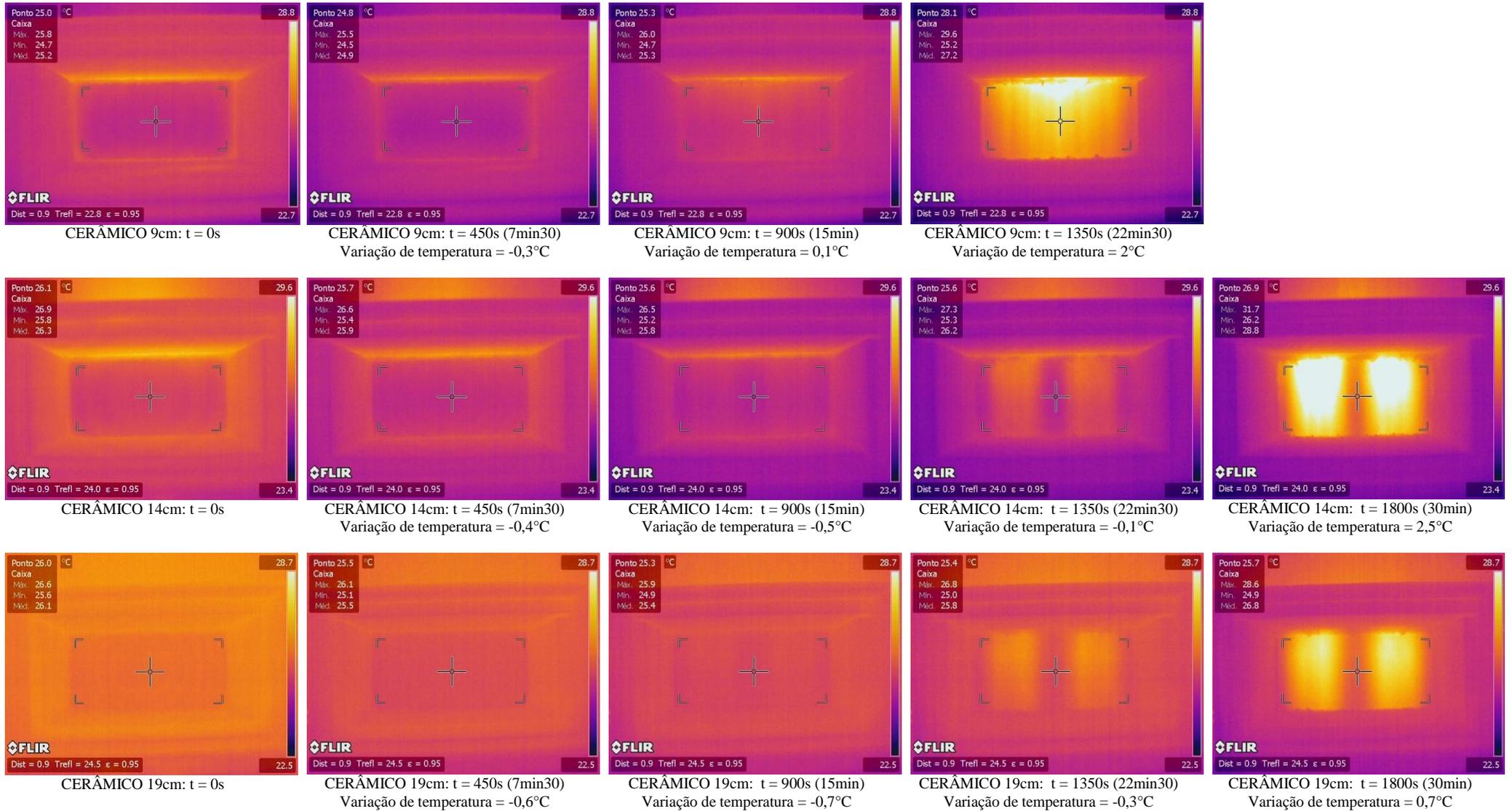
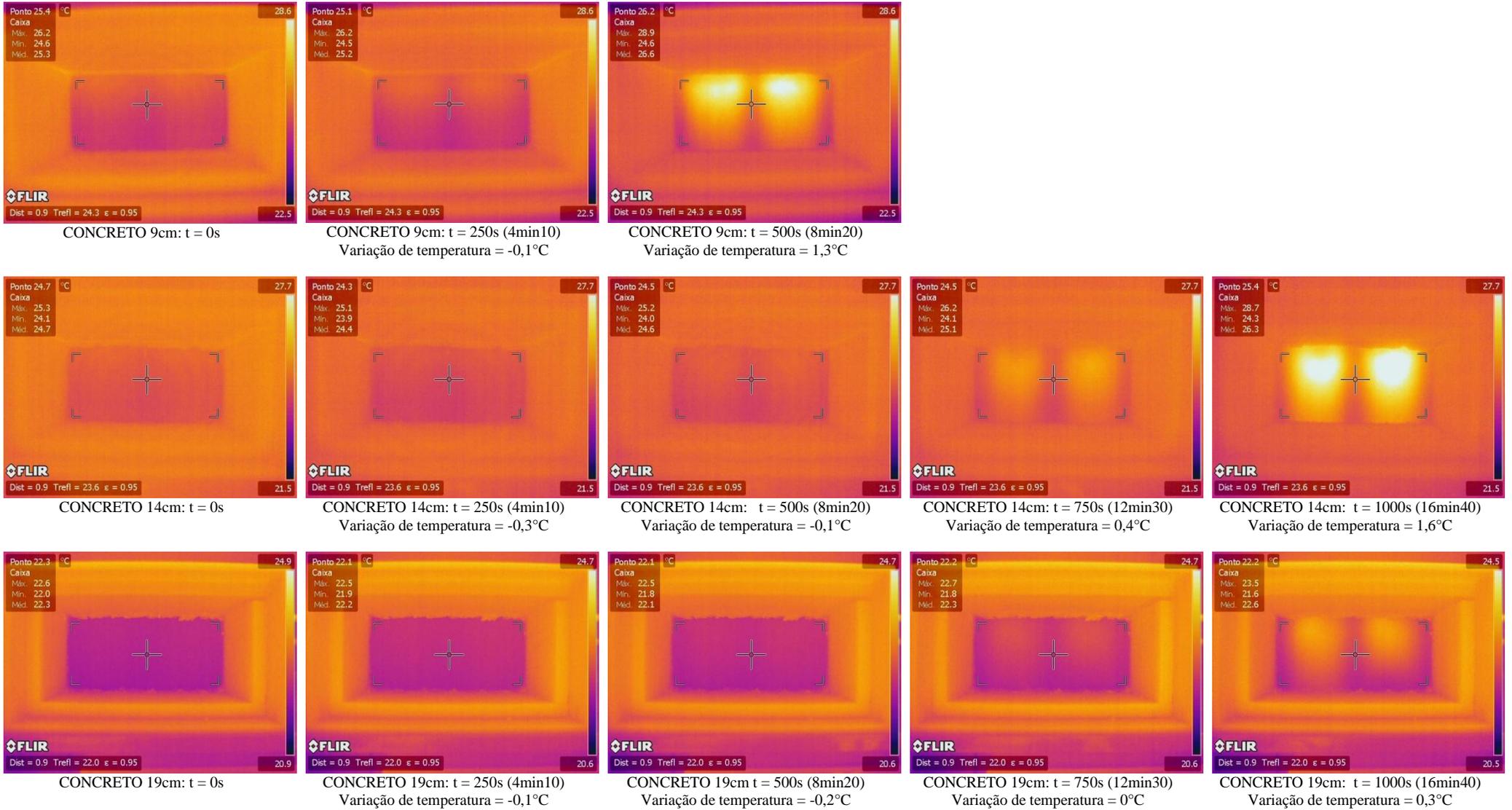


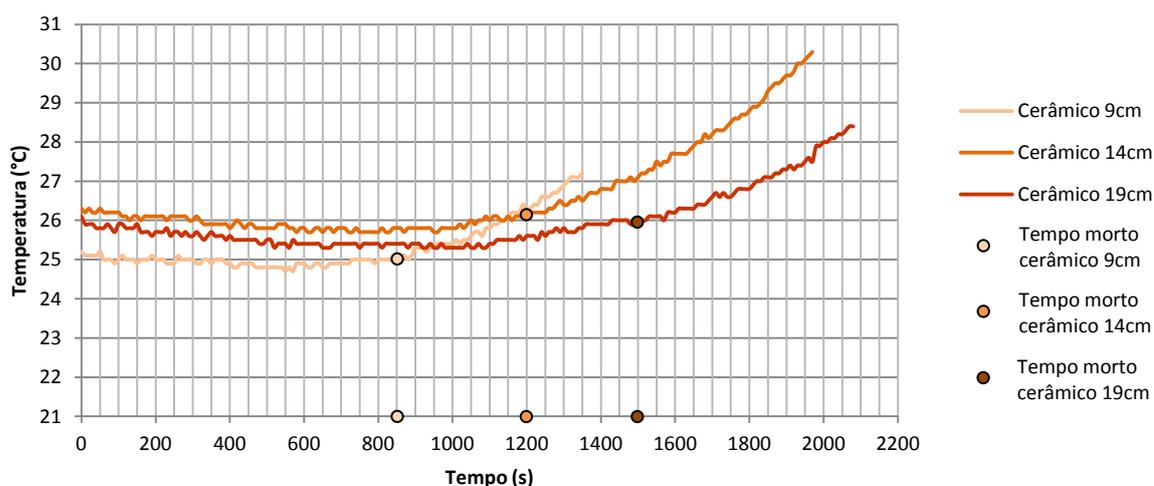
Figura 51 – Termogramas dos ensaios dos blocos de concreto durante a terceira etapa.



Ao analisar os termogramas, é possível perceber a geometria interna de cada bloco em seus respectivos processo de aquecimento. As áreas de coloração amarelada/esbranquiçada, mais evidentes nas últimas imagens de cada ensaio, correspondem às secções dos blocos que possuem predominância de camadas de ar. Por meio da escala de temperatura localizada à esquerda de cada termograma é possível verificar que as mencionadas áreas possuem temperatura mais elevada do que as correspondentes às secções homogêneas de cerâmica ou de concreto. Esse comportamento é consequência do acúmulo de energia térmica nas camadas de ar, aumentando a temperatura da superfície das secções correspondentes e, assim, culminando no gradiente de temperatura observado.

O perfil da média de temperatura das faces externas dos blocos cerâmicos, durante o processo de aquecimento, é apresentado na Figura 52.

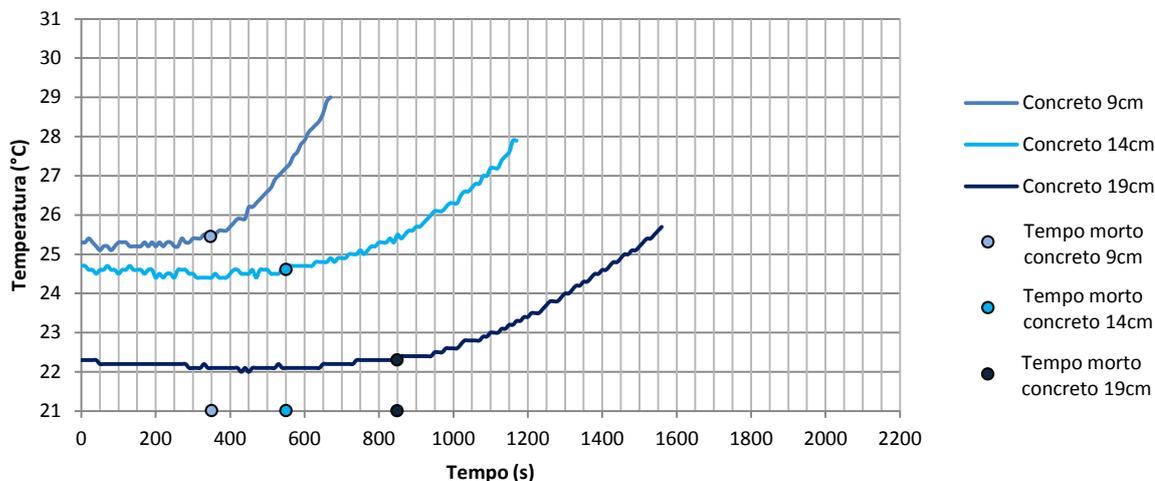
**Figura 52 – Variação da temperatura dos blocos vazados cerâmicos medida por termografia ao longo do tempo.**



Ao observar as curvas sobre o gráfico, é possível concluir que, quanto menor a espessura da amostra, menor o tempo morto do respectivo processo de aquecimento e, assim, mais rapidamente se percebe a variação de temperatura na sua superfície externa. Percebe-se, também, que as curvas apresentam uma mesma tendência, variando apenas a rapidez em que ocorre o processo de aquecimento de cada bloco.

A Figura 53 apresenta o gráfico de temperatura em função do tempo para cada um dos três ensaios realizados com blocos de concreto.

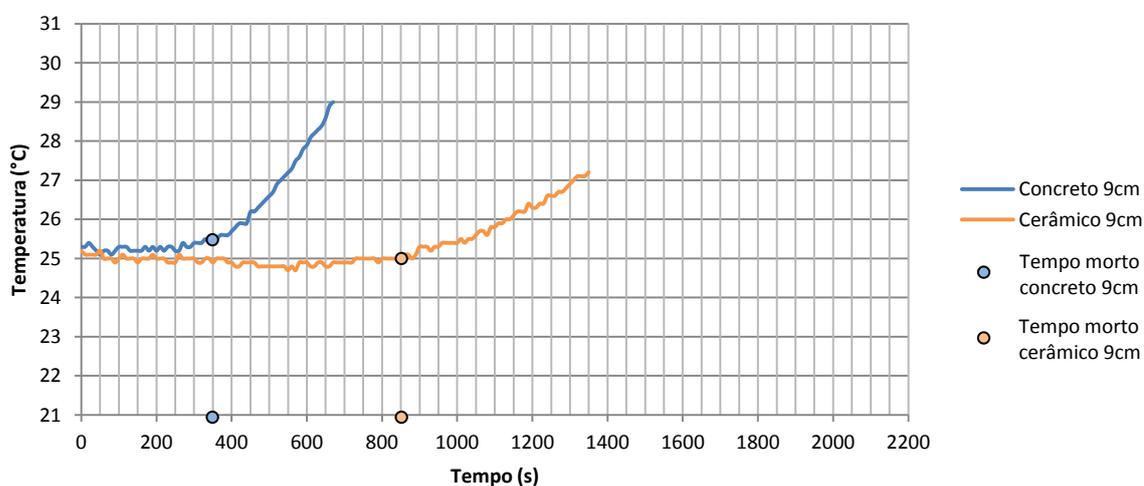
**Figura 53 – Variação da temperatura dos blocos vazados de concreto medida por termografia ao longo do tempo.**



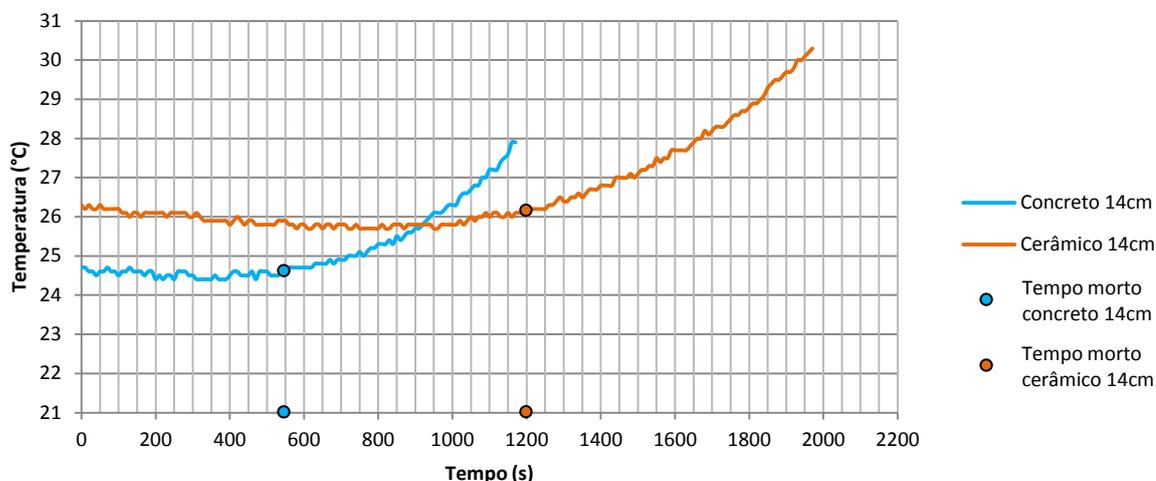
Assim como foi observado para os blocos cerâmicos, quanto menor a espessura do bloco de concreto, menor o tempo morto do respectivo processo de aquecimento e mais rapidamente se percebe a variação de temperatura em sua superfície externa. Percebe-se, novamente, que as curvas possuem mesma tendência, variando apenas a rapidez com que ocorre o processo de aquecimento. Essa tendência, ressalta-se, é diferente da observada para os blocos cerâmicos.

Observando os perfis das médias de temperatura da face externa do bloco cerâmico e do seu congênere em concreto, durante o processo de aquecimento, Figuras 54, 55 e 56, é possível concluir que as superfícies externas dos blocos vazados de concreto percebem de forma mais rápida a variação de temperatura imposta, pelo fluxo de calor, nas respectivas superfícies internas.

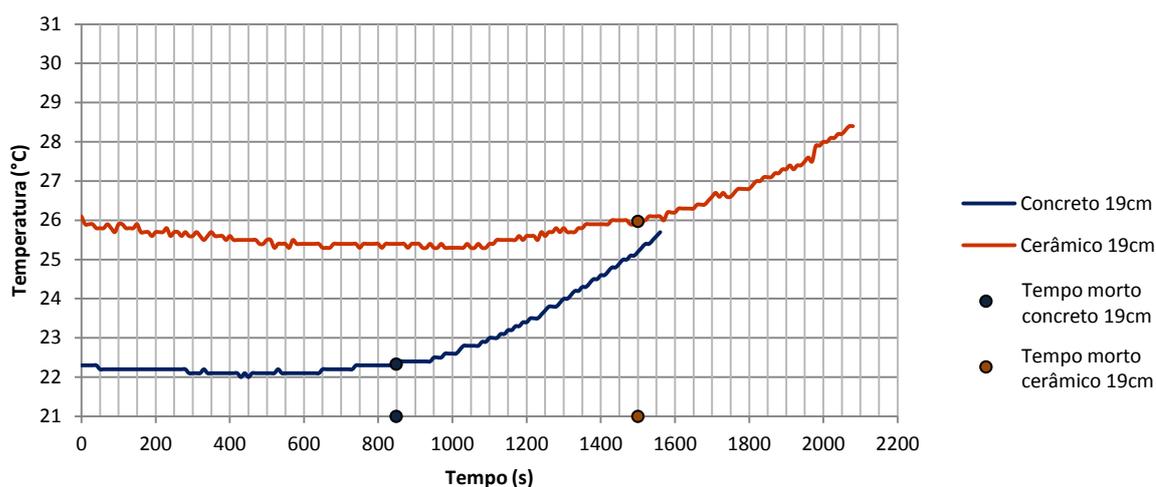
**Figura 54 – Variação da temperatura medida por termografia em função do tempo: blocos com 9cm de espessura.**



**Figura 55 – Variação da temperatura medida por termografia em função do tempo: blocos com 14cm de espessura.**



**Figura 56 – Variação da temperatura medida por termografia em função do tempo: blocos com 19cm de espessura.**

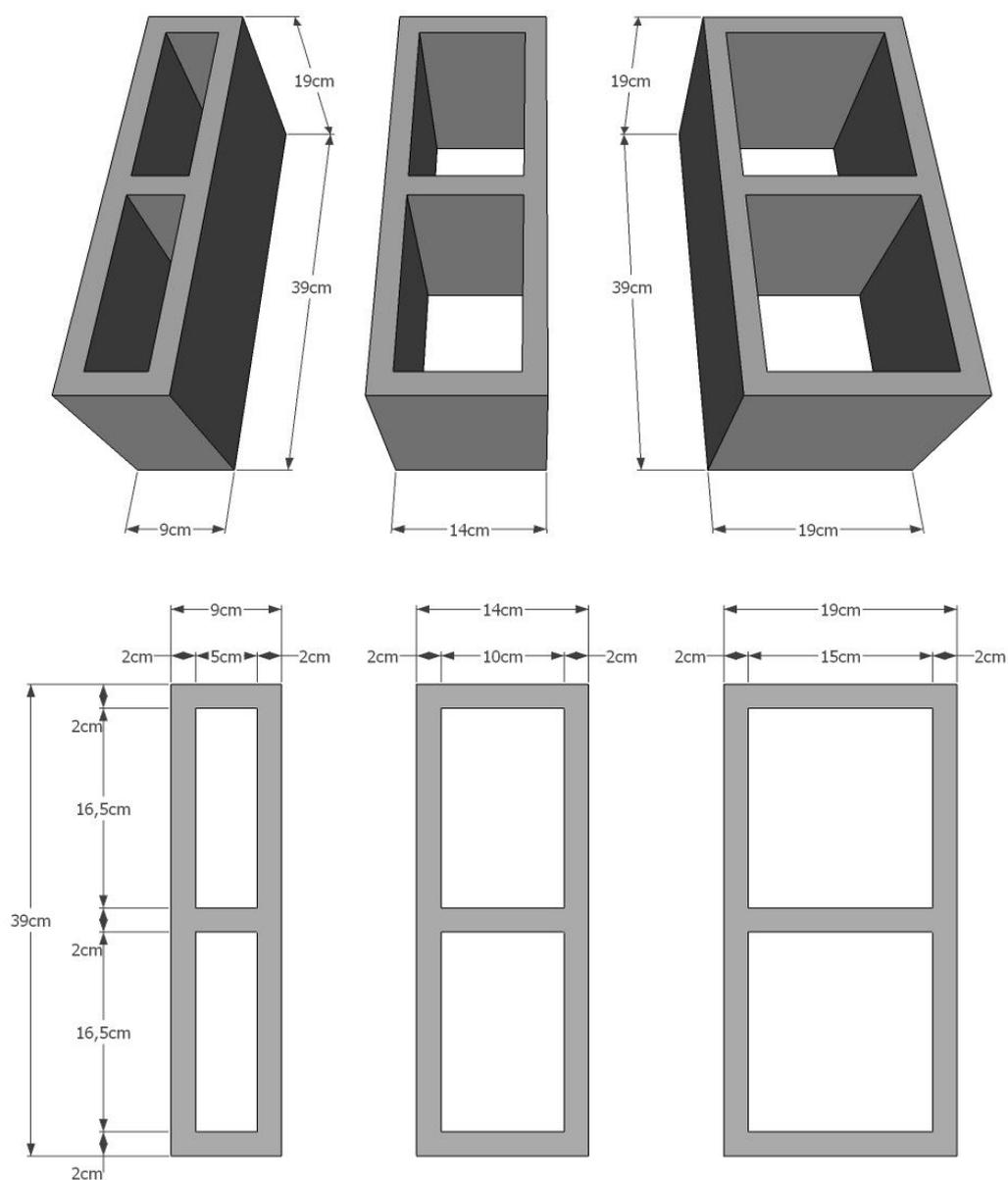


Para a determinação do fluxo de calor, utilizou-se o procedimento descrito no item 4.2.1.1. Como os valores de  $[A]$ ,  $[Pot]$  e  $[F_{ij}]$  são os mesmos em todos os ensaios e, respectivamente, iguais a  $0,0741\text{m}^2$  (produto da largura pela altura,  $0,39\text{m} \times 0,19\text{m}$ ),  $1.000\text{W}$  (especificada pelo fabricante) e  $0,2418$  (para  $a = 0,055\text{m}$  e  $b = 0,095$ ), o valor para o fluxo de calor  $[q_x''']$  de cada um dos seis ensaios é igual a  $3263,16\text{W/m}^2$ .

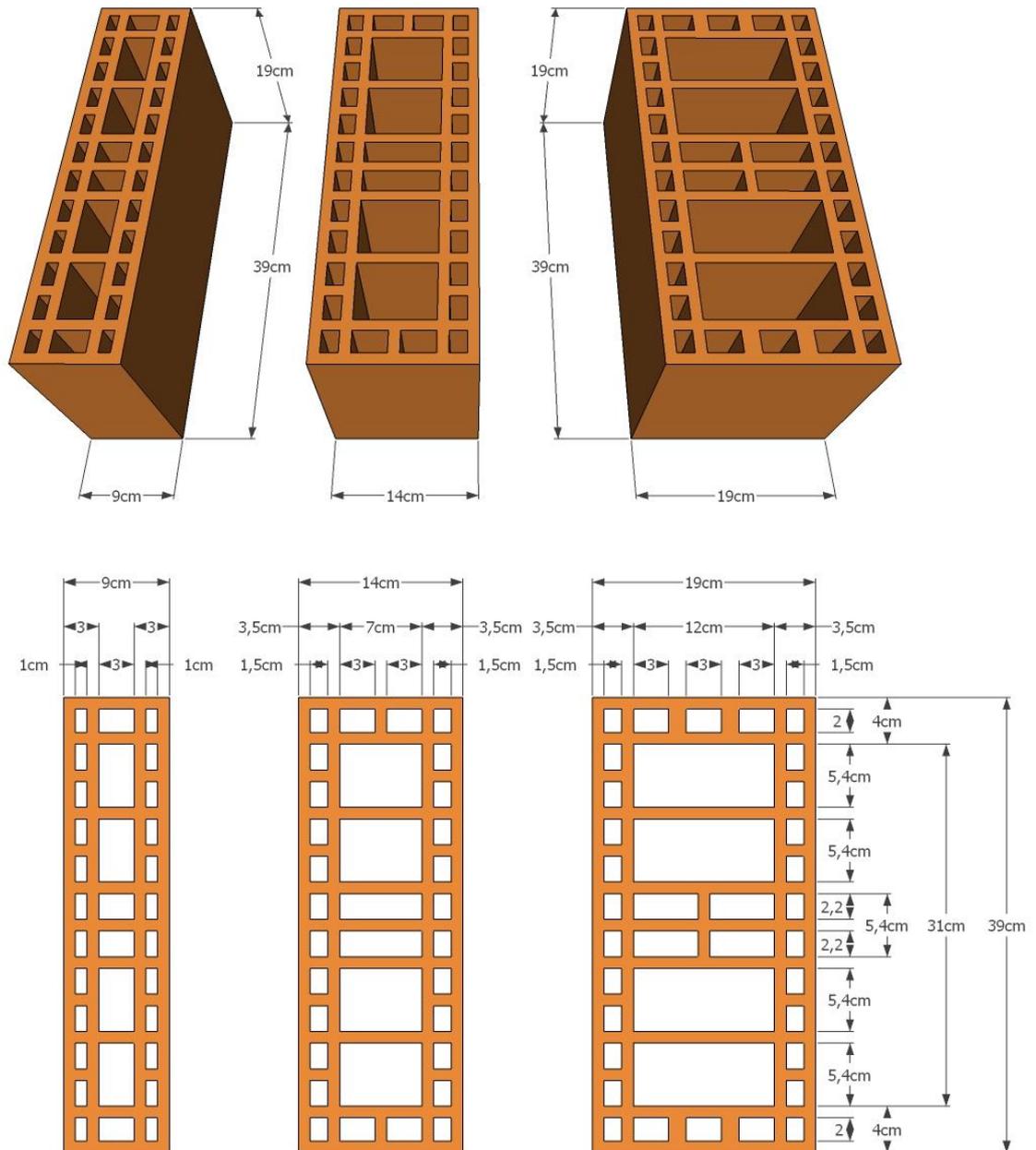
No caso dos blocos vazados, fez-se necessário determinar o valor da condutividade térmica equivalente de cada amostra, uma vez que são compostas por camadas homogêneas de concreto ou de cerâmica e camadas de ar. Ademais, os valores dessa propriedade para esses blocos não são determinados na bibliografia consultada. Desse modo, seguiram-se os procedimentos apresentados no item 4.2.1.2.

O processo de determinação da condutividade térmica equivalente começou com a análise dimensional dos blocos. As Figuras 55 e 56 apresentam esse resultado. As espessuras das camadas de ar nos blocos de concreto de 9cm, 14cm e 19cm são, respectivamente, 5cm, 10cm e 15cm. Os blocos cerâmicos, ao contrário, apresentam variação da geometria interna.

**Figura 57 – Dimensões consideradas dos blocos de concreto.**

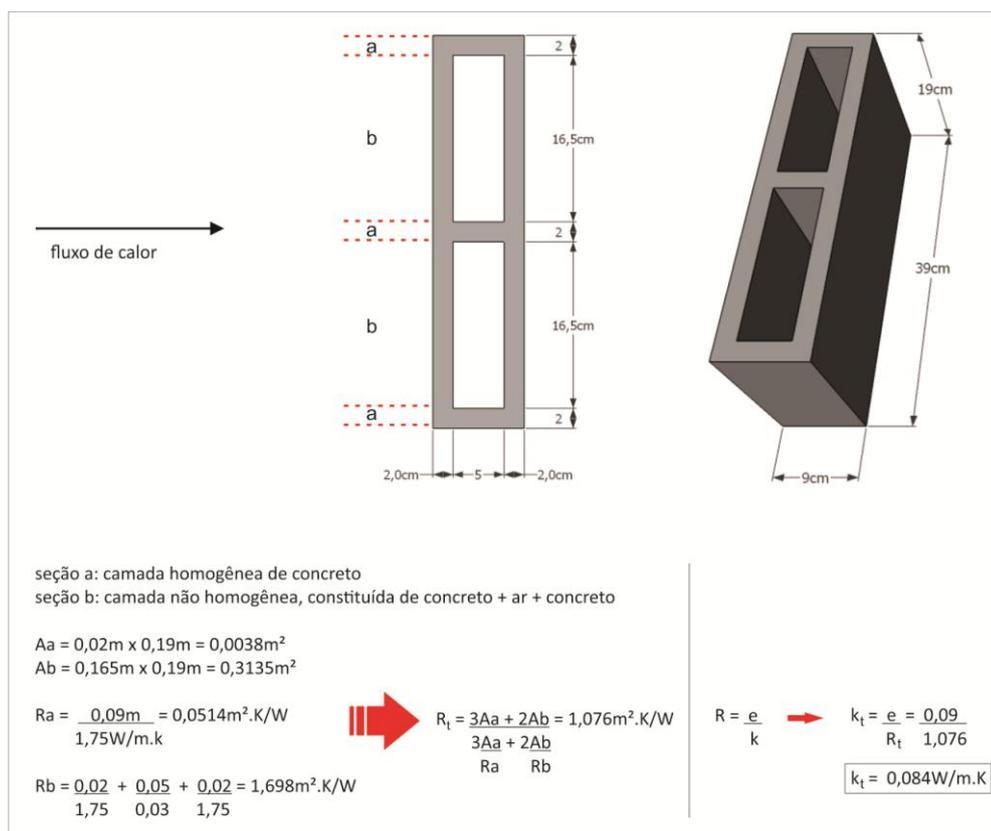


**Figura 58 – Dimensões consideradas dos blocos cerâmicos.**



Após análise dimensional dos blocos, foi determinada a condutividade térmica equivalente de cada amostra, como exemplificado na Figura 57 – cálculo da condutividade térmica equivalente do bloco de concreto de 9cm de espessura.

**Figura 59 – Cálculo da condutividade térmica equivalente do bloco de concreto de 9cm.**



Utilizando esse mesmo raciocínio, foram calculados os valores de resistência térmica total e condutividade térmica equivalente dos demais blocos, cujos resultados são apresentados na Tabela 12.

**Tabela 12 – Valores para resistência térmica total e condutividade térmica equivalente das amostras.**

BLOCO (natureza/espessura)	RESISTÊNCIA TÉRMICA TOTAL (m <sup>2</sup> K/W)	CONDUTIVIDADE TÉRMICA EQUIVALENTE (W/mK)
Cerâmico 9cm	0,430	0,210
Cerâmico 14cm	0,700	0,200
Cerâmico 19cm	0,964	0,197
Concreto 9cm	0,286	0,314
Concreto 14cm	0,460	0,305
Concreto 19cm	0,631	0,301

Os resultados indicam que as resistências térmicas totais dos blocos cerâmicos apresentam valores superiores quando comparadas às obtidas para os blocos de concreto. Sendo a resistência inversamente proporcional à condutividade, esses resultados eram previstos, já que o valor de condutividade térmica para o concreto é maior do que o cerâmico (vide Tabela 1).

Os resultados apresentados na Tabela 12 também corroboram o comportamento observado nas curvas das Figuras 53, 54 e 55. Ora, se os blocos vazados de concreto aquecem proporcionalmente mais rápido em relação aos blocos vazados cerâmicos, os valores de suas condutividades térmicas equivalentes deveriam ser maiores.

Dando sequência ao processo de avaliação da difusividade térmica das amostras, a Tabela 13 apresenta os valores das constantes necessárias ao cálculo, pelo EES, da difusividade em cada instante de tempo.

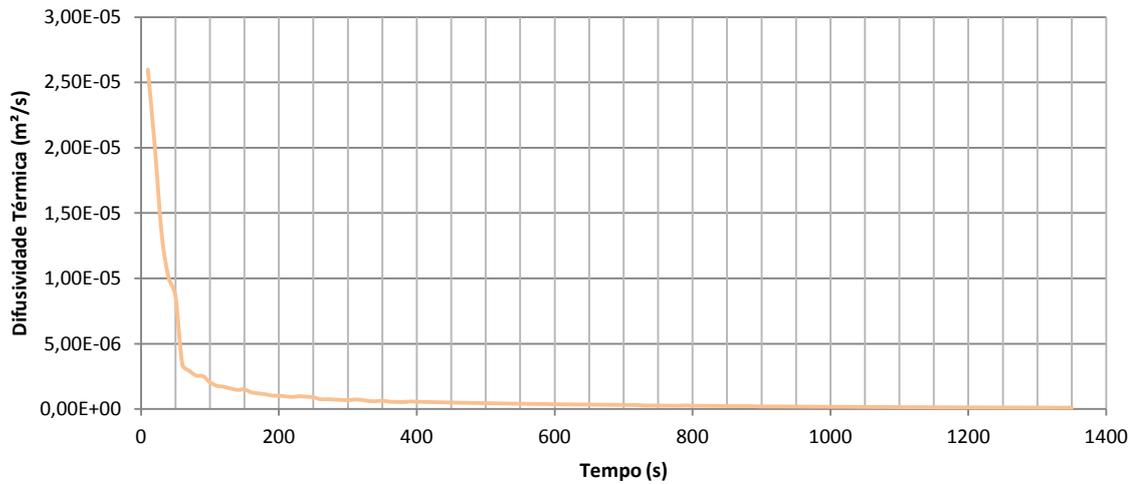
**Tabela 13 – Valores para as constantes do modelo matemático para sólido semi-infinito.**

<b>BLOCO (natureza/espessura)</b>	<b>TEMPERATURA INICIAL (°C)</b>	<b>FLUXO DE CALOR (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>CONDUTIVIDADE TÉRMICA (W/m.K)</b>	<b>ESPESSURA DO BLOCO (m)</b>
Cerâmico 9cm	24,9	3263,16	0,210	0,09
Cerâmico 14cm	25,9	3263,16	0,200	0,14
Cerâmico 19cm	25,6	3263,16	0,197	0,19
Concreto 9cm	25,3	3263,16	0,314	0,09
Concreto 14cm	24,5	3263,16	0,305	0,14
Concreto 19cm	22,2	3263,16	0,301	0,19

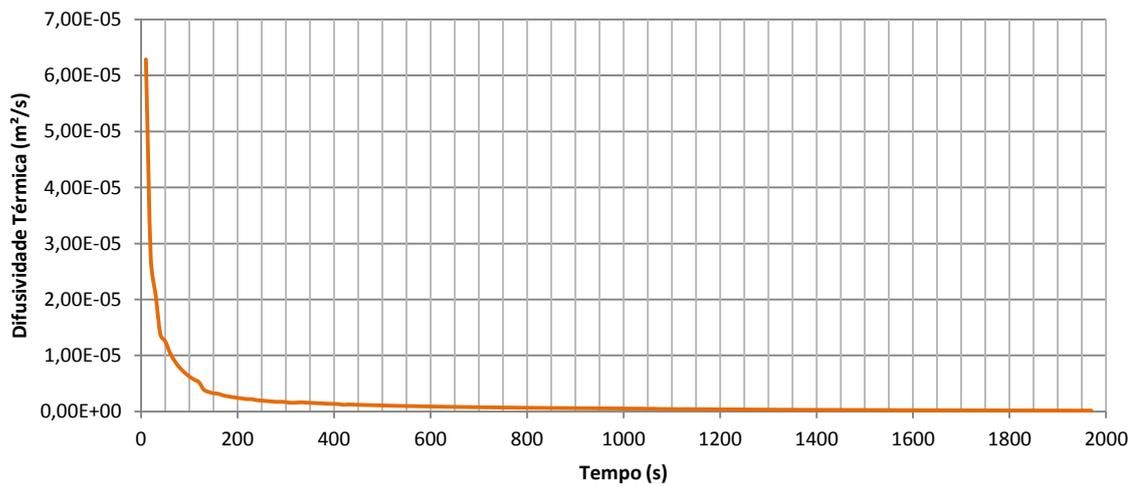
Com os dados da Tabela 13 e os valores da temperatura em função do tempo lidos por termografia, foi possível calcular, para cada ensaio, o comportamento da difusividade térmica de cada amostra durante o processo de aquecimento dos blocos.

As Figuras 60, 61 e 62 apresentam os resultados alcançados para os blocos cerâmicos vazados. Observa-se que as curvas apresentam o mesmo comportamento e tendência a uma constante, como foi observado nos gráficos de difusividade em função do tempo dos ensaios com blocos maciços cerâmicos.

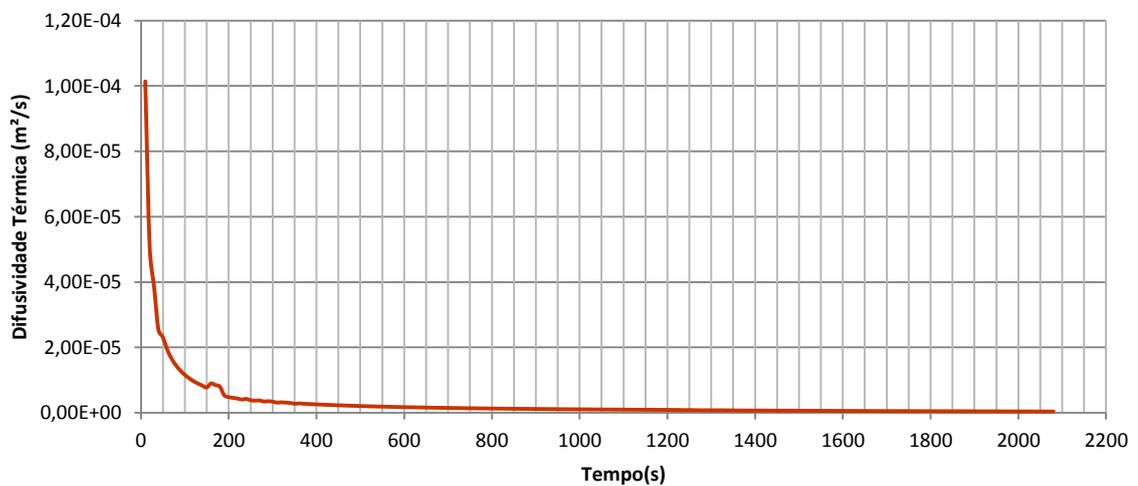
**Figura 60 – Comportamento da difusividade térmica do bloco cerâmico vazado de 9cm.**



**Figura 61 – Comportamento da difusividade térmica do bloco cerâmico vazado de 14cm.**

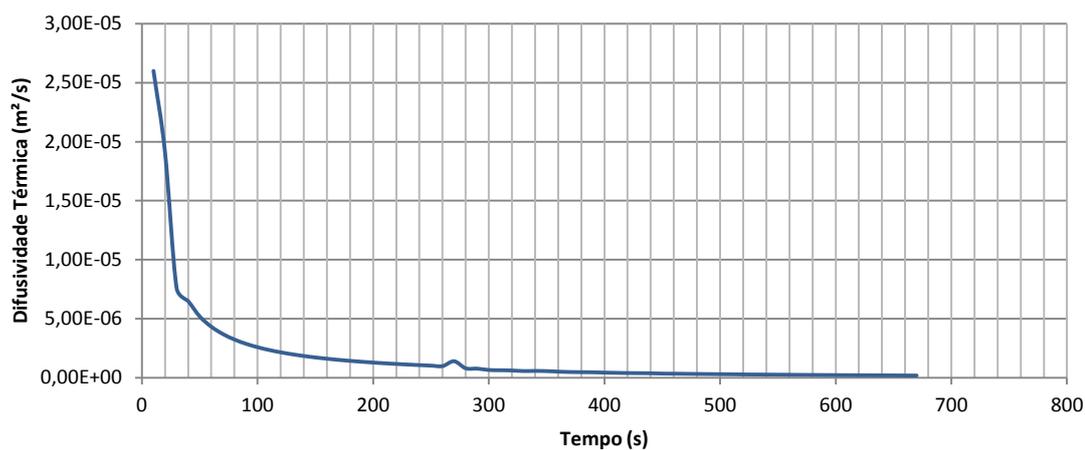


**Figura 62 – Comportamento da difusividade térmica do bloco cerâmico vazado de 19cm.**

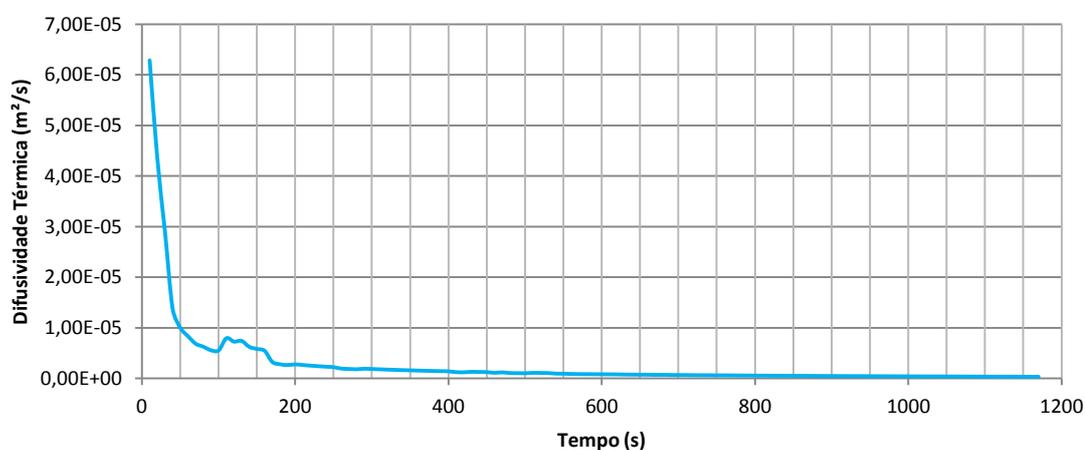


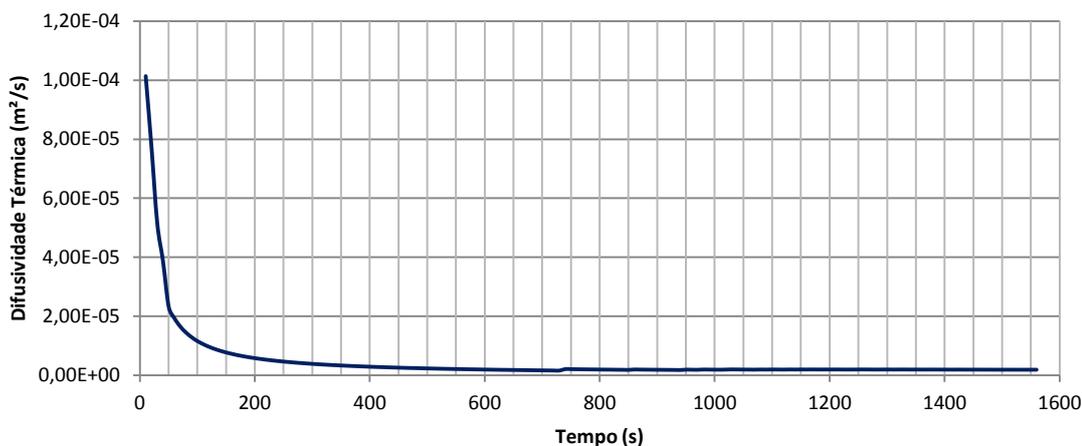
As Figuras 63, 64 e 65 apresentam os resultados alcançados para os blocos vazados de concreto. Assim como os cerâmicos maciços e cerâmicos vazados, observa-se que as curvas apresentam o mesmo comportamento e que os valores de difusividade térmica tendem a uma constante com o passar do tempo.

**Figura 63 – Comportamento da difusividade térmica do bloco de concreto vazado de 9cm.**



**Figura 64 – Comportamento da difusividade térmica do bloco de concreto vazado de 14cm.**



**Figura 65– Comportamento da difusividade térmica do bloco de concreto vazado de 19cm.**

A Tabela 14 apresenta os últimos valores de difusividade térmica encontrados no segundo ensaio da segunda etapa e em cada um dos ensaios da terceira etapa.

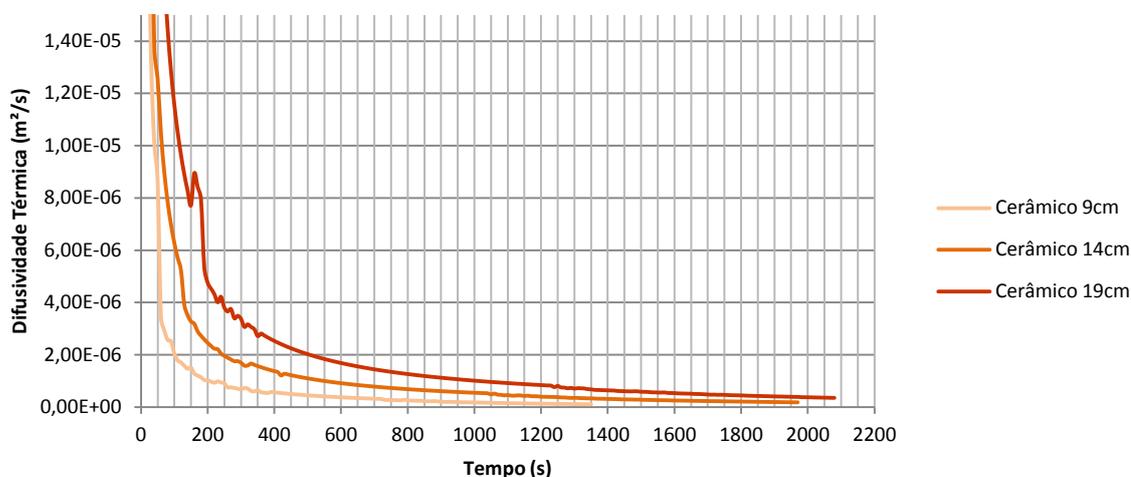
**Tabela 14 – Últimos valores de difusividade térmica encontrados para cada uma das amostras.**

BLOCO (natureza/espessura)	DIFUSIVIDADE TÉRMICA (m²/s)
Maciço cerâmico – 2º ensaio	$4,68 \times 10^{-7}$
Cerâmico vazado 9cm	$1,14 \times 10^{-7}$
Cerâmico vazado 14cm	$1,85 \times 10^{-7}$
Cerâmico vazado 19cm	$3,57 \times 10^{-7}$
Concreto vazado 9cm	$2,00 \times 10^{-7}$
Concreto vazado 14cm	$3,03 \times 10^{-7}$
Concreto vazado 19cm	$1,88 \times 10^{-6}$

O valor de difusividade térmica obtido para o bloco maciço cerâmico é o maior. Os valores obtidos para os blocos compostos são menores em consequência das camadas de ar, uma vez que o valor de condutividade térmica do ar é aproximadamente 27,4 vezes menor que a da cerâmica e 66,5 vezes menor que a do concreto.

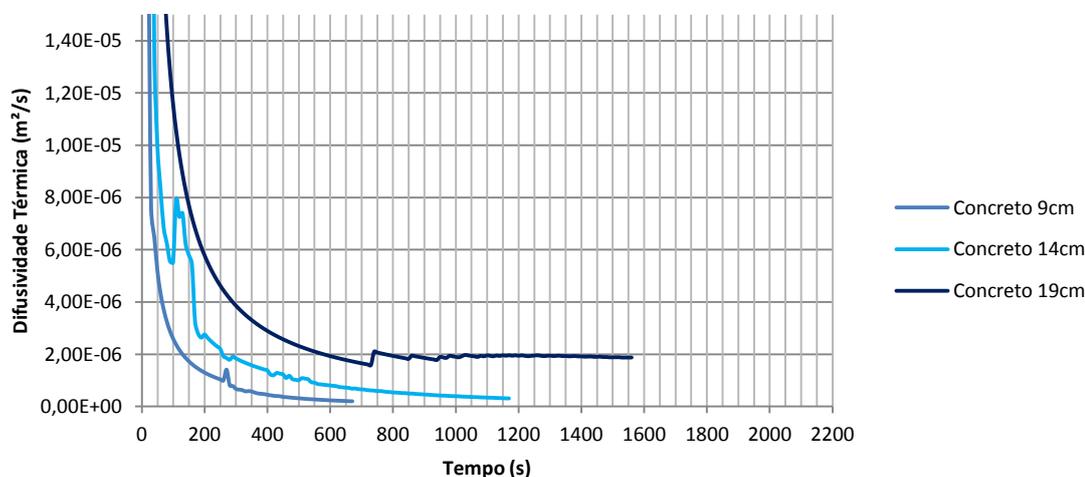
Ao comparar os valores obtidos para os blocos vazados cerâmicos, percebe-se que, quanto maior a espessura do bloco, maior o valor da difusividade. Esse resultado pode ser melhor visualizado na Figura 66.

**Figura 66 – Difusividade térmica em função do tempo dos blocos cerâmicos de 9cm, 14cm e 19cm.**



O mesmo pode ser observado para os blocos vazados de concreto, conforme exposto na Tabela 14 e na Figura 67.

**Figura 67 – Difusividade térmica em função do tempo dos blocos cerâmicos de 9cm, 14cm e 19cm.**



De modo geral, os valores de difusividade para os blocos vazados cerâmicos são menores do que os valores obtidos para os congêneres de concreto. Esse resultado indica que os blocos vazados cerâmicos têm tempo de resposta às alterações de temperatura impostas ao seu entorno inferior aos blocos vazados de concreto. Entretanto, acredita-se que a tendência apresentada em uma mesma natureza de blocos em relação às suas espessuras – quanto menor a espessura, menor a difusividade térmica – sejam questões pertinentes a futuros trabalhos.

## 6 CONCLUSÕES

O método teórico-experimental proposto mostrou-se adequado, inicialmente, à avaliação da difusividade térmica de blocos maciços cerâmicos. O primeiro ensaio com bloco maciço cerâmico apresentou resultados que corroboraram, em termos de ordem de grandeza, os valores reportados na literatura consultada, sugerindo o refinamento da técnica, o que foi feito com a construção do túnel térmico que permitiu controlar, com maior eficiência, os vazamentos de calor. Assim, no segundo ensaio com bloco maciço cerâmico, o valor obtido para difusividade foi muito próximo ao valor absoluto encontrado em Incropera e DeWitt (2003) e esse valor teórico, por sua vez, era pertencente à faixa de incerteza do valor obtido experimentalmente. Nesses termos, é plausível concluir que o método proposto mostrou-se aplicável à análise da difusividade térmica dos outros componentes planos estudados neste trabalho.

A partir dos resultados obtidos com esta pesquisa foi possível concluir, no que se refere à contribuição para o conforto térmico no interior das edificações, que o bloco maciço cerâmico, em comparação com os blocos vazados de cerâmica e de concreto, seja o menos indicado para a conformação de alvenarias, uma vez que a sua difusividade é maior que a dos demais. Acredita-se que a contribuição das camadas de ar dos blocos vazados seja determinante para o resultado obtido.

Com relação aos blocos vazados cerâmicos e de concreto, comparando-se os de mesma espessura e de natureza distinta, verificou-se que os compostos por cerâmica e ar possuem valores de difusividade térmica menores. Em conclusão, acredita-se que, por apresentarem tempo de resposta às alterações de temperatura impostas ao seu entorno inferior aos blocos vazados de concreto, os blocos vazados cerâmicos sejam mais indicados em situações climáticas nas quais seja estratégico diminuir a amplitude térmica diária para se obter condições térmicas adequadas ao conforto no interior do ambiente construído.

Entretanto, acredita-se que a tendência apresentada em uma mesma natureza de blocos em relação às suas espessuras – quanto menor a espessura, menor a difusividade térmica – sejam questões pertinentes a futuros trabalhos.

Para o design do conforto, este estudo contribui com o repertório teórico da disciplina, fundamentando escolhas e possibilitando vislumbrar novos estudos referentes ao design de materiais, de tecnologias e de processos construtivos com foco no conforto térmico do ambiente construído. Ademais, percebe-se uma contribuição no sentido de incitar o diálogo

entre o design e a engenharia e entre o design e a arquitetura, munindo o designer de conhecimentos que lhe possibilitem trabalhar em uma equipe multidisciplinar e, principalmente, que lhe deem subsídio para o planejamento e o projeto do conforto térmico do ambiente construído para além das questões simbólicas e estéticas, evidenciando a importância dos aspectos técnico-práticos que permeiam o conforto ambiental.

Como proposta de continuidade deste estudo, sugere-se o desenvolvimento de modelos físicos com maior número de blocos, para estudo do comportamento de painéis conformados com blocos e argamassa. Sugere-se, ainda, o estudo da influência da aplicação de revestimentos e acabamentos, como as tintas e as cerâmicas, no comportamento térmico do composto formado por esse revestimento e pelo painel.

Pode-se, também, utilizar o método teórico-experimental ora proposto para a análise de outras famílias de blocos ou materiais construtivos, bem como para o estudo da difusividade térmica de novos materiais.

Outra possibilidade seria o desenvolvimento de um estudo comparativo entre a condutividade térmica e a difusividade térmica em análises do comportamento térmico dinâmico de uma construção. E, também, pesquisas que analisassem o potencial da aplicação dos conceitos de difusividade térmica e efusividade térmica na arquitetura bioclimática.

## 7 REFERÊNCIAS

- ABREU, A. M. de; SOARES, I. M.; SOUZA, S. T. de O. **Termografia em manutenção preditiva: conceitos e aplicabilidades em máquinas e equipamentos industriais**. Bolsista de Valor – Revista de divulgação do Projeto Universidade Petrobras e IF Fluminense, Campos dos Goytacazes, v. 2, n. 1, p. 89-94, 2012.
- ALVARENGA, C.; PEDRA, S. A.; SALES, R. B. C. **Influência da cor no revestimento cerâmico de fachadas em edificação de alvenaria estrutural, utilizando termografia infravermelha**. In: 10º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Design – P&D Design. São Luiz, out., 2012.
- ANDRADE, J. J. de O.; DIEHL, C. **Avaliação do processo de fabricação de blocos de concreto através do emprego do controle estatístico de processo**. In: XXXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção – Inovação Tecnológica e Propriedade Intelectual: Desafios da Engenharia de Produção na Consolidação do Brasil no Cenário Econômico Mundial. Belo Horizonte, out., 2011.
- ANDRADE, R. M. de. **Conceitos gerais de metrologia**. Termografia Avançada. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Slides de aula, em 08 out. 2013a.
- ANDRADE, R. M. de. **Sistemas de medição por temperatura sem contato**. Termografia Avançada. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Slides de aula, em 01 out. 2013b.
- ASENSIO, M. M.; MÁRQUEZ, I. L.; RODRÍGUEZ, J. M. S. **Aplicacion de la termografia en el diagnostico y valoracion de la pododermatitis plantar en rapaces**. Revista Complutense de Ciencias Veterinarias, Universidad Complutense de Madrid, v. 4, n. 2, p. 61, 2010.
- BOUÉ, C.; HOLÉ, S. **Infrared thermography protocol for simple measurements of thermal diffusivity and conductivity**. Infrared Physics & Technology, Elsevier, n. 55, p. 376-379, 2012.
- BRASIL. **Balanco Energético Nacional 2012: Ano base 2011 / Empresa de Pesquisa Energética**. Rio de Janeiro: EPE, 2012.

- CALADO, F. A. R. **Sistema de visão multiespectral para uma plataforma robótica de inspeção termográfica em subestação de energia**. 2013. 129f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte.
- CALKINS, M. **Materials for sustainable sites: a complete guide to the evaluation, selection, and use of sustainable e constructions materials**. USA: Wiley, 2009.
- CALLISTER, W. D. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais: uma abordagem integrada**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.
- CAMACHO, J. S. **Projeto de edifícios de alvenaria estrutural**. Núcleo de Ensino e Pesquisa da Alvenaria Estrutural – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2006. Disponível em: <[HTTP://www.nepae.feis.unesp.br](http://www.nepae.feis.unesp.br)>. Acessado em: jun. 2013.
- CARA, M. **Do Desenho Industrial ao Design no Brasil** – Uma bibliografia crítica para a disciplina. São Paulo: Blücher, 2010.
- CARDOSO, R. **Uma Introdução à História do Design**. 3. ed. São Paulo: Blücher, 2008.
- CARDOSO, R. **Design para um Mundo Complexo**. São Paulo: Cosac Naify, 2012.
- CBCS. **Sustentabilidade na Construção**. In: Notícias do Setor da Construção, Conselho Brasileiro de Construção Sustentável, 2007. Disponível em: <<http://www.cbcs.org.br>>, acessado em: dez. 2012.
- CBCS. **PBE Edifica incentiva adoção de soluções eficientes para reduzir o consumo de energia elétrica na operação dos edifícios**. CBCS Notícias. Boletim Informativo do Conselho Brasileiro de Construção Sustentável, Especial Eficiência Energética, n.7, abr., 2013.
- CDTN. **Flash de Laser**. Universidade Federal de Minas Gerais, Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Belo Horizonte. Disponível em: <[http://www.cdtm.br/linhas\\_de\\_atuacao/Projetos/flash-de-laser](http://www.cdtm.br/linhas_de_atuacao/Projetos/flash-de-laser)>. Acessado em: jun. 2014.
- CHUDZIK, S. **Measurement of thermal parameters of a heat insulating material using infrared thermography**. Infrared Physics & Technology, Elsevier, n.55, p.73-83, 2012.
- CORTIZO, E. C. **Avaliação da técnica de termografia infravermelha para identificação de estruturas ocultas e diagnóstico de anomalias em edificações: ênfase em edificações do patrimônio histórico**. 2007. 178p. Tese (Doutorado em Engenharia

Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte.

CORTIZO, E. C.; BARBOSA, M. P.; SOUZA, L. A. C. **Estado da Arte da Termografia**. In: Fórum Patrimônio – Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável. Belo Horizonte, v.2, n.2, maio/ago., 2008.

COSTA, V. **Estudo comparativo entre cerâmica e concreto: tijolos e telhas**. Revista da Anicer, Rio de Janeiro, 82. ed, p. 26-33, 2013.

ELETROBRAS. **Programa de Combate ao Desperdício de Energia Elétrica**. Rio de Janeiro: PROCEL, 2010. Disponível em: <<http://www.eletrobras.gov.br>>. Acessado em: dez. 2012.

F-CHART SOFTWARE. **About EES – Engineering Equation Solver**. Disponível em: <<http://www.fchart.com/ees/>>. Acessado em: jun. 2014.

FLIR Systems. **The Ultimate Infrared Handbook for R&D Professionals: A Resource Guide for Using Infrared in the Research and Development Industry**, United Kingdom, 2012.

FLORES LARSEN, S.; LESINO, G. **Medición de la difusividad térmica de materiales de construcción**. Revista de la Construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile, n. 1, v. 3, ago., 2004.

FOKAIDES, P. A.; KALOGIROU, S. A. **Application of infrared thermography for the determination of the overall heat transfer coefficient (U-Value) in building envelopes**. Applied energy, v. 88, iss:12, p. 4358 -4365, 2011.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual do Conforto Térmico**. 5 ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001.

GALLAS, M. R. **Incerteza de Medição**. Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – IF-UFRGS. [sd]. Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/~marcia/medidas.pdf>>. Acessado em: out. 2013.

GONÇALVES JR., A. A. **Metrologia** (Apostila). Universidade Federal de Santa Catarina. Laboratório de Metrologia e Automatização, Departamento de Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2002.

- GONZÁLEZ CRUZ, E. M. **Selección de materiales em la concepción arquitectónica bioclimática**. Instituto de Investigaciones de la Facultad de Arquitectura y Diseño (IFAD). Universidad Del Zulia, Maracaibo/Venezuela, 2003.
- GROSSI, P. A.; CAMARANO, D. das M.; FERREIRA, R. A. N.; ANDRADE, R. M. de. **Metodologia para a estimativa da incerteza de medição da difusividade térmica pelo método do Flash Laser**. In: 8º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica. Cusco, out., 2007.
- HOUAISS, Instituto Antônio. Conforto. In: **Grande Dicionário Houaiss da Língua Portuguesa**, 2012a. Disponível em: <<http://houaiss.uol.com.br/busca?palavra=conforto>>. Acessado em: maio 2013a.
- HOUAISS, Instituto Antônio. Design. In: **Grande Dicionário Houaiss da Língua Portuguesa**, 2012b. Disponível em: <<http://houaiss.uol.com.br/busca?palavra=design>>. Acessado em: maio 2013.
- ICSID. **About ICSID** – International Council of Societies of Industrial Design. Disponível em: <<http://www.icsid.org/about/about.htm>>. Acessado em: maio 2013.
- INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.
- INMETRO. **Vocabulário Internacional de Metrologia**: conceitos fundamentais e gerais de termos associados. Duque de Caxias: Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), 2012.
- ISO 7730. **Ergonomics of the thermal environment** — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. Geneva, 2005.
- KREITH, F. **Princípios de transmissão de calor**. São Paulo: Blücher, 1977.
- KRUCKEN, L. **Competências para o design na sociedade contemporânea**. Caderno de Estudos Avançados: Design e Transversalidade. Belo Horizonte: EdUEMG, 2008. P. 23-32.
- LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. **Eficiência Energética na Arquitetura**. São Paulo: PW, 1997.

- LAMBERTS, R. et al. **Desempenho Térmico de Edificações**. Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Florianópolis, 2011.
- LAMBERTS, R. Entrevista. CBCS Notícias. Boletim Informativo do Conselho Brasileiro de Construção Sustentável, **Especial Eficiência Energética**, n.7, abr., 2013.
- LEHUGEUR, C. M. **Bem-estar em ovinos no Rio Grande do Sul**: termografia na avaliação de podridão dos cascos e estresse por calor. 2012. 70f. Dissertação (Mestrado em Ciências Veterinárias) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- LEITE, P. G. **Curso de ensaios não destrutivos de metais**. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1966.
- LIMA, R. C. F.; MAGNANI, F. S.; NUNES, R. **Deteção de falhas em monumentos históricos de Olinda através de imagens por infravermelho** – uma análise preliminar. Revista Brasileira de Arquiometria, Restauração e Conservação, v. 1, p. 343-346, 2007.
- LONGMAN. Design. In: **Dictionary of Contemporary English**, s.d. Disponível em: <[http://www.ldoceonline.com/dictionary/design\\_1](http://www.ldoceonline.com/dictionary/design_1)>. Acessado em: maio 2013.
- MAGNANI, F. S.; SILVA, R. N. T. da. **Influence of the errors in an infrared camera on the estimation of thermal conductivity and thermal capacity of a gypsum plaster sample**. Infrared physics & technology, Elsevier, n. 57, p. 14-20, 2012.
- MALDAGUE, X. **Introduction to NDT by active infrared thermography**. Materials Evaluation, v. 6, p. 1060-1073, 2002.
- MENDONÇA, L. V. **Termografia por infravermelhos**: aplicações em edifícios. SPY Building – Inspeção de Edifícios. 2005.
- MENDONÇA, L. V. **Termografia por infravermelho**: inspeção de betão. Revista Engenharia e Vida, n. 16, p. 53-57, 2005.
- MEOLA, C. et al. **The use of infrared thermography for materials characterization**. Journal of Materials Processing Technology, v. 155, p. 1132-1137, 2004.
- MEOLA, C.; CARLOMAGNO, G. M. **Recent advances in the use of infrared Thermography**. Publishing Measurement Science and Technology, v. 15, p. 27-58, 2004.

- MEOLA, C. et al. **Application of infrared thermography and geophysical methods for defect detection in architectural structures**. *Engineering Failure Analysis*, v. 12, p. 875–892, 2004.
- MORAES, D. **Design e Complexidade**. *Caderno de Estudos Avançados: Design e Transversalidade*. Belo Horizonte: EdUEMG, 2008. P. 07-22.
- MORENO, A. C. R. **Minha Casa Minha Vida: análise de desempenho térmico pela NBR 15.220-3, NBR 15.575, Selo Casa Azul e RTQ-R**. 2013. 205f. Dissertação (Mestrado em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável) –Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Arquitetura, Belo Horizonte.
- MOURA, C. **O desígnio do design**. In: 4º SOPCOM | Associação Portuguesa de Ciências da Comunicação. Aveiro, 2005, p. 73-81.
- NBR15220-1. **Desempenho térmico de edificações**. Parte 1: Definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005.
- NBR15220-2. **Desempenho térmico de edificações**. Parte 2: Método de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005.
- NBR15220-3. **Desempenho Térmico de Edificações**. Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005.
- NBR15270-1. **Componente cerâmicos**. Parte 1: Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação – Terminologia e requisitos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005.
- NBR15270-2. **Componente cerâmicos**. Parte 2: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural – Terminologia e requisitos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005.
- NBR 15575. **Edificações Habitacionais – Desempenho**. Partes 1 a 6. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013.
- OXFORD. Design. In: **Advanced Learner’s Dictionary**. 8<sup>th</sup> edition. Oxford University Press, 2010. CD-Room.

- PEDRA, S. A. **Potencialidades da Termografia Infravermelha Aplicada ao Design do conforto Térmico de Alvenaria Estrutural**. 2011. 100f. Dissertação (Mestrado em Design) – Universidade do Estado de Minas Gerais, Escola de Design, Belo Horizonte.
- PEDRA, S. A.; SALES, R. B. C.; LANA, S. L. B.; AGUILAR, M. T. P. **Termografia infravermelha aplicada à análise térmica de alvenaria em blocos de concreto e de cerâmica**. In: 54º Congresso Brasileiro do Concreto – CBC. Maceió, 2012.
- PEREIRA, A. C. **A difusividade térmica, a efusividade térmica e a inércia térmica da envolvente dos edifícios**. 2004. Disponível em: <[http://www.get.pt/site\\_files/publicaes/a\\_difusividade\\_trmica1301121906.pdf](http://www.get.pt/site_files/publicaes/a_difusividade_trmica1301121906.pdf)>. Acessado em: maio 2014.
- PERKOWSKI, Z. **A thermal diffusivity determination method using thermography: theoretical background and verification**. International Journal of Heat and Mass Transfer, Elsevier, n. 54, p. 2126-2135, 2011.
- PROCLIRA. **Circulação Geral da Atmosfera. Circulação Média à Superfícies. Circulações locais**. Proclira Clima e Ambiente. Módulo 6. Portugal: Universidade de Évora, 2007.
- RHEINGANTZ, P. A. **Uma pequena digressão sobre conforto ambiental e qualidade de vida nos centros urbanos**. Cidade & Ambiente, Universidade Federal de Santa Maria, v. 1, n. 22, p. 35-58, 2001.
- RHEINGANTZ, P. A. **Projeto Bioclimático** – quadro síntese de recomendações para a cidade do Rio de Janeiro. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura. Disponível em: <[http://www.fau.ufrj.br/prolugar/arq\\_pdf/Textos%20did%E1tico/recom\\_bioclimatica.pdf](http://www.fau.ufrj.br/prolugar/arq_pdf/Textos%20did%E1tico/recom_bioclimatica.pdf)>. Acessado em: jun. 2013.
- SARAMAGO, J. **Ensaio sobre a cegueira**. São Paulo: Companhia das Letras, 1995.
- SALES, R. B. C.; MOTTA, S. R. F.; AGUILAR, M. T. P. **O papel da seleção de materiais na criação da identidade do produto pelo design**. Caderno de Estudos Avançados em Design – Identidade. Barbacena: Editora da Universidade do Estado de Minas Gerais, 2010. P. 101-115.
- SALES, R. B. C. **Estudo de compostos de cimento portland utilizando o ensaio de frequência ressonante forçada e termografia**. 2008. 204f. Tese (Doutorado em

Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte.

SALES, R.B.C. et al. **Concrete study using infrared thermography and forced resonant frequency.** Advanced Materials Research, v.168 – 170, p. 778 – 786, 2011.

SANSÃO, J. H. **Análise Ambiental de Alvenarias em Blocos:** Uma Discussão Baseada na Avaliação do Ciclo de Vida e no Desempenho Térmico de Envolvórias. 2011. 113f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) –Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte.

SCHNEIDER, B. **Design – Uma Introdução:** o design no contexto social, cultural e econômico. São Paulo: Blücher, 2010.

SHACKELFORD, J. F. **Introdução à ciência dos materiais para engenheiros.** 6. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

SILVA, A. M. da; BARBOSA JR, E. P.; BRAGA JR, W. **Utilização do software EES no auxílio ao desenvolvimento de trabalhos acadêmicos e de projetos de P&D.** In: XXXVII Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia – COBENGE. Recife, 2009.

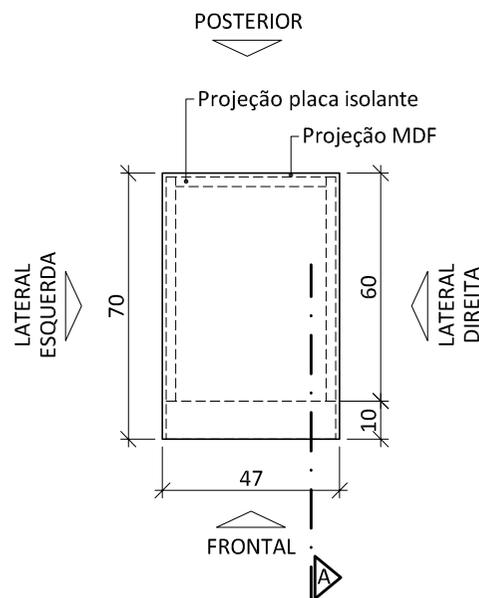
SILVA JR, O. G. **Produção e caracterização de compósitos à base de fibra de curauá, amido termoplástico e polietileno, utilizando a termografia.** 2013. 130f. Dissertação (Mestrado em Design) –Universidade do Estado de Minas Gerais, Escola de Design, Belo Horizonte.

SILVA JR, O. G.; AGUILAR, M. T. P.; SALES, R. B. C. **Avaliação da viabilidade do uso da fibra do Curauá para aplicação em isolamento térmico de alvenaria estrutural através da termografia infravermelha.** In: 20º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Joinville, 2012.

SILVEIRA, F. C.; CARDOSO, J. C.; FRANCO, P. M.; BARROS JR, M. C. de; TAVARES, S. G. **Analysis the thermal properties of blocks made from ashes of natural fibers and construction waste.** In: 11<sup>th</sup> International Conference on Quantitative InfraRed Thermography (QIRT). Naples, Italy, 11-14 June, 2012.

SONNTAG, R.; BORGNAKKE, C.; VAN WYLEN, G. **Fundamentos da Termodinâmica.** 6. ed. São Paulo: Blücher, 2003.

- SOUZA, H. A. de. **Conforto Humano** – CIV 715. Material didático – Mestrado em Construção Metálica (Pós Graduação em Engenharia Civil). Escola de Minas: Universidade Federal de Ouro Preto, 2006.
- TAVARES, S. G. **Desenvolvimento de uma metodologia para aplicação de ensaios térmicos não destrutivos na avaliação da integridade de obras de arte**. 2006. 189f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte.
- TAVARES, S. G.; CUNHA, A. M.; ANDRADE, R. M. **Ensaio térmico não destrutivo para avaliação de defeitos e inclusões não aparentes em materiais**. In: 7º Congresso Ibero-americano de Engenharia Mecânica. México, 2005.
- TEIXEIRA, G. G. D. **Confiabilidade metrológica em termografia aplicada em sistemas elétricos**. 2012. 164f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte.



**TÚNEL TÉRMICO**  
vista superior Esc: 1/20

### ESPECIFICAÇÕES:

Caixa no formato de túnel em *medium density fiberboard* (MDF) cru 10mm - Duratex. A fixação das peças de MDF para conformação do túnel é feita com parafusos cabeça chata 5x50mm. A caixa possui tampo articulável preso a uma corrente metálica lateral que funciona como limitador de abertura. Este tampo é fixado no corpo da caixa com duas dobradiças metálicas polidas e é travado com quatro trincos de pressão por alavanca. A corrente metálica e as dobradiças são peças de reaproveitamento.

Vedação interna com placa isolante AT-1200, composta por alumina, sílica e ligantes, com 25.4mm de espessura - Texfiber.

Suporte de alumínio para soquetes e lâmpada, confeccionado manualmente para este projeto.

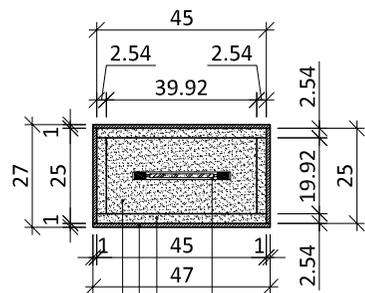
Lâmpada halógena palito com potência de 1000W, tensão 127V, base R7s, 189mm - Golden ou Avant.

Soquetes para lâmpada halógena de 1000W em latão, macho, F-75M, 9101A, 15 x 30 x 15mm - Lumenorte.

Cabo de silicone com fibra de vidro ou cabo Silastic. Conector sindal. Plugue/tomada adequado à potência da lâmpada.

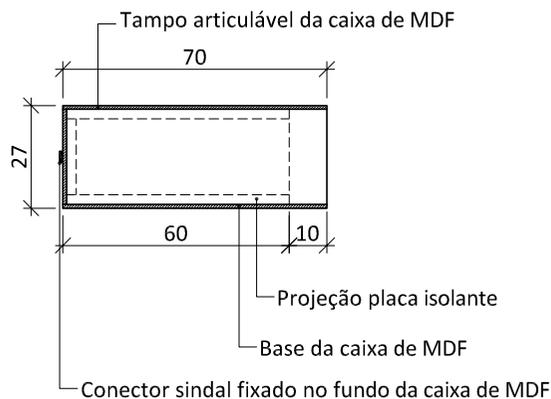
**OBSERVAÇÃO:** blocos cerâmicos e de concreto com 39cm de comprimento e 19cm de altura, variando a espessura em 9cm, 14cm e 19cm.

**ATENÇÃO:** em virtude dos materiais utilizados na composição da placa isolante, sugere-se o uso de máscara descartável e luvas cirúrgicas para construção e manuseio do túnel térmico.

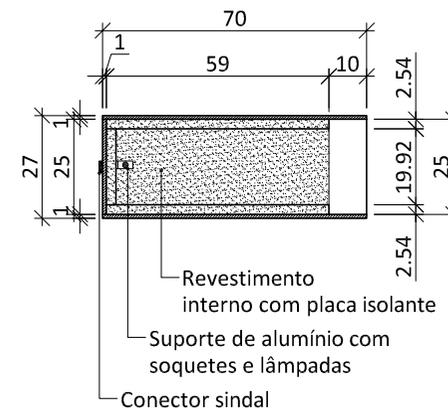


Fundo da caixa revestido com placa isolante  
 Caixa de MDF  
 Placa isolante  
 Suporte de alumínio com soquetes e lâmpada.

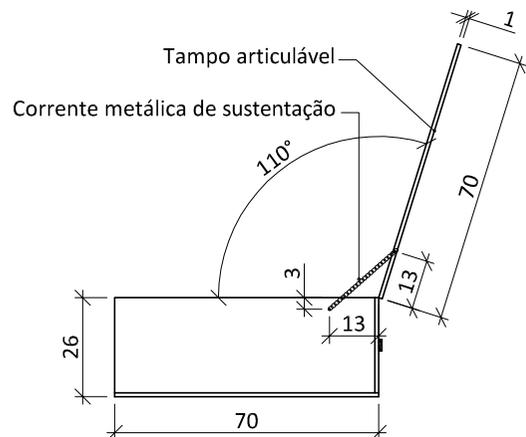
**TÚNEL TÉRMICO**  
 vista frontal Esc: 1/20



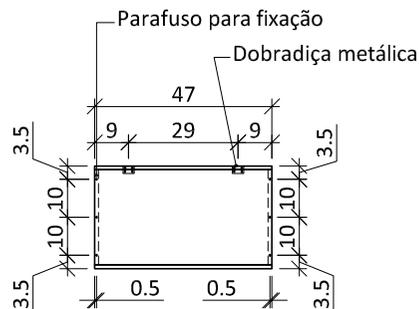
**TÚNEL TÉRMICO**  
 vista lateral esquerda Esc: 1/20



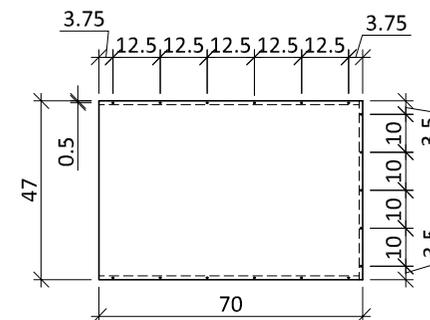
**TÚNEL TÉRMICO**  
 corte A Esc: 1/20



**TÚNEL TÉRMICO**  
 vista lateral direita  
 marcação da corrente e abertura do tampo Esc: 1/20



**TÚNEL TÉRMICO**  
 vista posterior  
 marcação parafusos e dobradiças Esc: 1/20



**TÚNEL TÉRMICO**  
 vista base  
 marcação parafusos Esc: 1/20



Chapa de MDF 10mm cru previamente cortada em 2 placas de 70x47cm (tampo e base), 2 de 69x25cm (laterais) e 1 de 47x25cm (fundo).



Furação da base conforme marcação apresentada na PR 02/06. Utilizar furadeira com broca AR 1/8".



Furação da base com furadeira, broca AR - aço rápido - 1/8".



Fixação entre as placas utilizando parafusadeira e parafuso Philips nº2.



Fixação da placa posterior (ver PR02/06) utilizando furadeira com broca AR 1/8" e parafusadeira com Philips nº2.



Marcação para fixação da dobradiça metálica 2"x3/4".



Fixação da dobradiça 2"x3/4" com parafusadeira ponta Philips nº2.



Instalação do limitador de abertura - corrente metálica, como no caso, ou algo similar.



Caixa em formato de túnel montada e pronta para instalação das placas isolantes.



Placa isolante AT-1200, 25.4mm, sendo cortada com estilete (faca Olfa), esquadro graduado e régua de aço.



Revestimento interno com placa isolante cortada em 2 peças de 59x45cm (tampo e base), 2 de 59x19.9cm (laterais) e 1 de 39.9x19.9cm (fundo). Peças encaixadas.



Lâmpadas halógena palito de 1000W, cabo de silicone com fibra de vidro, soquetes para lâmpada e plugue/tomada.



Preparação do suporte para soquetes e lâmpada: ferro chato 3/4"x3/16", martelo 500g e madeira para modelar.



Utilizar bloco de metal para modelagem e martelo para funileiro para dobrar o ferro chato para conformar o suporte.



Utilizar bloco de metal para modelagem e martelo para funileiro para dobrar o ferro chato para conformar o suporte.



Utilizar martelo para funileiro para conformar o ferro chato (suporte).



Utilizar lima bastarda 1"x6" para dar acabamento no suporte.



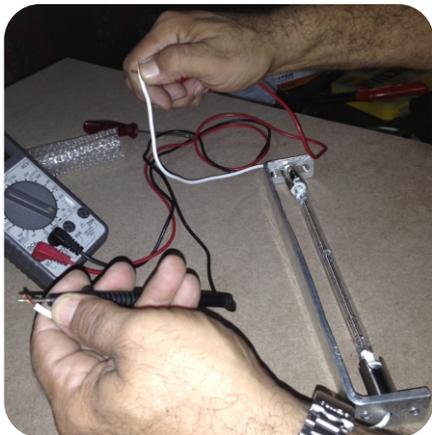
Suporte para fixação dos soquetes e lâmpada halógena palito.



Furações em cada lado do suporte para instalação dos soquetes: um furo central de 5mm e dois de 1/8" de acordo com as furações do soquete.



Utilizar alicate e arrebite pop de 1/8"x6mm para fixação do soquete no suporte de ferro chato.



Utilizar multímetro com pontas de teste para verificar corrente e detectar mal contatos.



Verificando posicionamento para fiação do suporte de ferro chato no fundo da caixa. O suporte deve estar centralizado.



Furação do fundo do túnel (placa isolante e MDF) para passagem dos cabos condutores e para fixação do suporte.



Fixação do suporte com soquetes no fundo do túnel com chave Philips nº2 e três parafusos rosca soberba 4x16mm.



Visualização do suporte instalado na caixa com uma lâmpada encaixada.



Visão interna da caixa em formato de túnel.



Furação com chave de fenda 1/4" ou Philips nº2 para instalação do conector Sindal, para alimentação da lâmpada.



Instalação dos cabos de alimentação da lâmpada, com chave de fenda 1/4" ou Philips nº2.



Visualização da parte posterior da caixa com os itens para alimentação da lâmpada instalados.



Instalação do cabo para energização da lâmpada. Utilizar tomada 110V.



Instalação de quatro trincos de pressão por alavanca para fixação do tampo no corpo da caixa.



Fixação do trinco de pressão por alavanca com chave Philips nº2.