

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

**"DESEMPENHO TÉRMICO DE COMPOSTOS CIMENTÍCIOS PRODUZIDOS
COM ADIÇÃO DE MICROPARTÍCULAS DE RESÍDUO DE VIDRO"**

Autora: Oneida Heiderick Maximo

Orientadora: Profa. Dr^a. Maria Teresa Paulino Aguilár

Coorientadora: Profa. Dr^a. Rosemary do Bom Conselho Sales

Belo Horizonte

Mai/2016

Oneida Heiderick Maximo

**" DESEMPENHO TÉRMICO DE COMPOSTOS CIMENTÍCIOS PRODUZIDOS
COM ADIÇÃO DE MICROPARTÍCULAS DE RESÍDUO DE VIDRO "**

Dissertação apresentada a Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Construção Civil. Área de concentração: Materiais de Construção Civil. Linha de pesquisa: Resíduo como Materiais de Construção Civil.

Orientadora: Prof^a. Maria Teresa Paulino Aguilar

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2016

Os pensamentos de uma pessoa são como água em poço fundo, mas quem é inteligente sabe como tirá-los para fora.

Provérbios 20:4

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo dom da vida.

À minha orientadora, Prof^a. Dra. Maria Teresa Paulino Aguilár, pela oportunidade que me foi oferecida, pela compreensão e exemplo de competência, determinação e ética e por todo o apoio dispensado na elaboração do presente trabalho.

À minha coorientadora, Prof^a. Dra. Rosemary do Bom Conselho Sales, pela dedicação, carinho e compreensão com que se conduziu durante toda a preparação desta dissertação.

Ao Programa de Pós-graduação em Construção Civil, pela oportunidade deste mestrado.

À Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais -FAPEMIG-, pela bolsa de estudos que tornou possível a dedicação exclusiva a este trabalho.

Ao Prof. Dr. Matheus Pereira Porto, pela colaboração no uso dos equipamentos e instalações do Laboratório de Termometria do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da UFMG, e à sua equipe que, com toda paciência e dedicação me ensinou a manusear os equipamentos. Em especial ao Bruno Alves, Rafael Ferreira, Flávio Calado, Selson Gomes e Wiliam Mendes.

Ao Prof. Dr. Juan Carlos González Pérez, pela colaboração na execução do ensaio de condutividade térmica no Laboratório de Epitaxia de Feixe Molecular do Departamento de Física do Instituto de Ciências Exatas da UFMG. Em especial ao Henrique Limborço cuja dedicação, apoio e companheirismo proporcionaram a realização dos ensaios.

Ao Prof. Dr. White José dos Santos, pelo apoio, ensino e colaboração no uso das instalações e equipamentos do Laboratório de Concreto do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção Civil da Escola de Engenharia da UFMG.

Aos Técnicos Ricardo Barbosa e Éderson Correa, pela ajuda, dedicação, instrução e amizade.

Ao Prof. Dr. Luiz Claudio Monteiro Montenegro, pela colaboração no uso dos equipamentos e instalações do Laboratório de Tratamentos de Minérios do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Engenharia da UFMG, e ao Técnico Alberto Lúcio Afonso, pelo ensino e auxílio na limpeza do resíduo e na peneiração da areia.

Ao. Prof. Mestre Antônio Ananias de Mendonça, por toda a colaboração e apoio na realização do ensaio de massa específica do resíduo e da amostra, no Laboratório de Geotecnia do Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia da Escola de Engenharia da UFMG, e ao técnico Marcus Vinícius dos Reis Torres pelo ensino e auxílio nos ensaios.

Ao CEFET-MG, na pessoa da Profa. Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa, por ter viabilizado os ensaios de granulometria e composição química do resíduo industrial.

À Marmoraria Artesanato, nas pessoas de Matheus Gouthier e Andréia Paiva, por terem providenciado o cortes das amostras.

À Empresa Vidrometro Ltda, por ter fornecido o resíduo.

A Fredson Santos, pela revisão deste trabalho.

Aos colegas de mestrado, pelo companheirismo e apoio.

Aos meus pais, irmãos, tios, primos e amigos, pelo apoio, orações, incentivo e compreensão pela ausência.

A meu marido, Antônio Carlos Maximo, *amore mio*, pelo seu amor, companheirismo, dedicação, paciência, e ajuda inestimáveis, sem os quais esse trabalho não se concretizaria.

RESUMO

Os resíduos de vidro sodo-cálcicos apresentam alta taxa de reciclabilidade. Podem ser utilizados na fabricação de novos vidros quando se apresentam na forma de cacos. Devido a sua atividade pozolânica, micropartículas geradas na lapidação e furação do vidro sodo-cálcico podem ser incorporadas às matrizes cimentícias em substituição parcial ao cimento *Portland*. Diversos trabalhos na literatura avaliam o desempenho mecânico e a durabilidade desses compostos. No entanto, praticamente não existem informações sobre as propriedades térmicas desses materiais. Neste estudo é avaliado o desempenho térmico de compostos cimentícios gerados com adição de 10% e 20% de micropartículas de resíduo de vidro em substituição parcial ao cimento *Portland*. Na confecção das amostras foram utilizados vidros produzidos em laboratórios e vidros provenientes de estação de tratamento de efluentes. Foi avaliada a condutividade térmica com base no método da placa quente protegida e a difusividade térmica por meio de termografia infravermelha. Os resultados indicam que as amostras confeccionadas com substituição parcial de resíduos de vidro apresentam melhor desempenho térmico em relação às amostras sem substituição, porque quando adicionados ao composto cimentício, esses resíduos aumentam o tempo da difusão de calor nos materiais.

Palavras chave: desempenho térmico, pó de vidro sodo-cálcicos, micropartícula de vidro, difusividade térmica, condutividade térmica.

ABSTRACT

The lime glass waste present high rate of recyclability. They can be used in the production of new glasses when they come in the form of bits. By presenting pozzolanic activity, those are micro particles generated in the lime glass cutting and drilling which can be incorporated to the cement arrays in partial replacement to the cement Portland. Several studies in the literature evaluate the mechanical performance and the durability of those compounds. However, practically there aren't any information on the thermal properties of those materials. In this study the thermal performance of cement compound produced with the addition of 10% and 20% of microparticles of glass residue in partial substitution to the cement Portland is evaluated in. In the confection of the samples were used were used glasses produced in laboratories and coming glasses from the effluent treatment station. The thermal conductivity was evaluated based on the hot plate protected method and the thermal diffusivity through the thermal infrared thermography. The results indicate that the samples made with partial replacement of glass waste present a better thermal performance in relation to the samples without replacement, because when it's added to the compound cement these residues increase the time of the diffusion of the heat in the materials.

keywords: performance, sodo-lime glass powder, glass microparticles, thermal diffusivity, thermal conductivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Composição do vidro.....	5
Figura 3.2 – Unidade básica da sílica.....	7
Figura 3.3 (a) – Arranjo cristalino – (b) arranjo não cristalino ou vítreo.....	7
Figura 3.4 – Transferência de calor.....	10
Figura 3.5 – Transferência de calor por condução.....	11
Figura 3.6 – Transferência de calor entre as moléculas.....	11
Figura 3.7 – Fluxo de calor por condução em um corpo.....	12
Figura 3.8 – Condução de calor na parede plana.....	13
Figura 3.9 – Nomenclatura para a condução transitória no sólido semi-infinito.....	16
Figura 3.10 – Distribuição transitória de temperaturas em um sólido semi-infinito para três condições de superfície: (1) temperatura constante na superfície, (2) fluxo constante de calor superficial e (3) convecção superficial.....	17
Figura 3.11 – Convecção de superfície para fluido.....	18
Figura 3.12 – Espectro eletromagnético.....	20
Figura 3.13 – Transmissividade, absorvidade e refletividade.....	20
Figura 3.14 – Características geométricas e radiação entre duas superfícies.....	23
Figura 3.15 – Termograma em escala de cinza e em cores.....	24
Figura 3.16 – Diagrama simplificado de um termovisor genérico.....	25
Figura 3.17 – Evolução dos termovisores.....	26
Figura 3.18 – Técnica de termografia passiva.....	27
Figura 3.19 – Técnica de termografia passiva.....	28
Figura 3.20 – Técnica de termografia passiva.....	29
Figura 3.21 – Influências do meio ambiente.....	31
Figura 3.22 – Parcelas que compõem o sinal de radiação em medição termográfica.....	31
Figura 4.1 – Fluxograma do método de pesquisa.....	36
Figura 4.2 – Resíduo de vidro a partir de cacos.....	37
Figura 4.3 – Estação de tratamento de efluentes.	38

Figura 4.4 – Resíduo de vidro em forma de pasta.....	38
Figura 4.5 – Processamento do resíduo.....	39
Figura 4.6 – Adição de água ao resíduo.....	40
Figura 4.7 – Lavagem do resíduo.....	40
Figura 4.8 – Resíduo seco.....	40
Figura 4.9 – Forma de madeira identificada.....	44
Figura 4.10 – Pesagem e mistura do material.....	45
Figura 4.11 – Material sendo vibrado.....	45
Figura 4.12 – Amostras moldadas.....	46
Figura 4.13 – Diagrama fluxo de calor.....	47
Figura 4.14 – Bancada de teste.....	47
Figura 4.15 – Esquema de construção da bancada.....	47
Figura 4.16 – Placa quente.....	48
Figura 4.17 – Fonte de corrente contínua.....	48
Figura 4.18 – Controlador de temperatura e processo.....	48
Figura 4.19 – Unidade de aquisição de dados.....	49
Figura 4.20 – Placa fria instalada na base da bancada.....	49
Figura 4.21 – Vista das amostras cerradas e do sulco para acomodar o termopar.....	50
Figura 4.22 – Termopares fixados na amostra.....	50
Figura 4.23 – Pasta térmica na amostra.....	51
Figura 4.24 – Montagem do ensaio.....	51
Figura 4.25 – Resultados das medições de temperatura obtidos por meio da interface do <i>software</i> BenchLink Data Logger 3.....	52
Figura 4.26 - Dados de entrada da incerteza das medições.....	54
Figura 4.27 – Termograma com a ferramenta “ponto”.....	55
Figura 4.28 – Termograma com pontos de medição de temperatura.....	55
Figura 4.29 – Túnel de teste.....	56
Figura 4.30 – Câmera termográfica registrando imagens.....	57
Figura 4.31 – Termograma com dados de entrada.....	57
Figura 4.32 – Amostra posicionada na câmara.....	58
Figura 4.33 – Interface do EES.....	59
Figura 4.34 – Interface do EES com função de condução transiente.....	60

Figura 4.35 – Interface do EES com parâmetros inseridos.....	60
Figura 4.36 – Interface do EES com valores de temperatura inseridos.....	61
Figura 5.1 – Valores de resistência à compressão axial.....	64
Figura 5.2 – Valores de temperatura de ensaio amostra [R].....	65
Figura 5.3 – Valores de temperatura de ensaio amostra [R].....	67
Figura 5.4 – Valores da condutividade térmica.....	70
Figura 5.5 – Termograma ensaio amostra referência [R].....	71
Figura 5.6 – Variação da temperatura da amostra referência [R].....	73
Figura 5.7 – Temperatura da amostra referência [RVI 10%].....	73
Figura 5.8 – Temperatura da amostra referência [RVI 20%].....	74
Figura 5.9 – Temperatura da amostra referência [RVA 10%].....	74
Figura 5.10 – Temperatura da amostra referência [RVA 20%].....	75
Figura 5.11 – Temperatura da amostra referência [RS 10%].....	76
Figura 5.12 – Temperatura da amostra referência [RS 20%].....	76
Figura 5.13 – Temperatura da amostra referência [RL 10%].....	77
Figura 5.14 – Temperatura da amostra referência [RL 20%].....	77
Figura 5.15 – Valores de difusividade térmica das amostras durante ensaio. (a) referência, (b) com resíduo de vidro incolor em substituição a 10% e (c) 20% de cimento, (d) com resíduo de vidro âmbar em substituição a 10% e (e) 20% de cimento, (f) com resíduo de vidro industrial sujo em substituição a 10% e (g) 20% de cimento, (g) com resíduo de vidro industrial limpo em substituição a 10% e (i) 20% de cimento.....	79
Figura 5.16 – Valores de difusividade térmica das amostras.....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Definições de vidro publicadas na década de 90.....	4
Tabela 3.2 – Composição química de vidros.....	6
Tabela 3.3 – Óxidos e suas cores.....	7
Tabela 3.4 – Principais óxidos usados na fabricação do vidro.....	8
Tabela 3.5 – Linha histórica da evolução da termografia.....	26
Tabela 3.6 – Razões para incerteza das medições.....	33
Tabela 4.1 – Caracterização dos resíduos produzidos em laboratório.....	37
Tabela 4.2 – Caracterização do resíduo industrial.....	39
Tabela 4.3 – Caracterização do cimento Portland CPV ARI Plus.....	41
Tabela 4.4 – Caracterização da areia.....	42
Tabela 4.5 – Propriedades físicas e químicas da água.....	43
Tabela 4.6 – Nomenclatura das amostras conforme adição de resíduo.....	44
Tabela 5.1 – Massa específica.....	62
Tabela 5.2 – Temperaturas registradas na amostra Referência.....	65
Tabela 5.3 – Valores de tensão, corrente e potência da amostra Referência	66
Tabela 5.4 – Valores de condutividade térmica da amostra Referência.....	66
Tabela 5.5 – Valores comparativos de condutividade térmica.....	66
Tabela 5.6 – Incerteza de medição da condutividade térmica da amostra Referência.....	68
Tabela 5.7 – Condutividade térmica e incerteza de medições.....	69
Tabela 5.8 – Dados de entrada da equação 3.11.....	78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABCERAM – Associação Brasileira de Cerâmica
- ABIVIDRO – Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automáticas de Vidro
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
- a.C. – Antes de Cristo
- COPASA – Companhia de Saneamento de Minas Gerais
- CEMPRE – Compromisso Empresarial Para a Reciclagem
- d.C. – Depois de Cristo
- EES – Engineering Equation Solver
- ETE – Estação de Tratamento de Efluente
- FPA – Tecnologia Focal Plane Array
- ICEX – Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal de Minas Gerais
- MDF – Medium Density Fiberboard
- NBR – Norma Brasileira
- PVC – Policloreto de Polivinila
- R – Referência
- RVI 10% – Resíduo de vidro incolor com adição de 10%
- RVI 20% – Resíduo de vidro incolor com adição de 10%
- RVA10% – Resíduo de vidro âmbar com adição de 10%
- RVA 20% – Resíduo de vidro âmbar com adição de 10%
- RS 10% – Resíduo de vidro industrial com adição de 10%
- RS 20% – Resíduo de vidro industrial com adição de 10%
- RL 10% – Resíduo de vidro industrial lavado com adição de 10%
- RL 20% – Resíduo de vidro industrial lavado com adição de 10%
- TRIR – Time-resolved Infrared Radiometry
- UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais

LISTA DE SÍMBOLOS

°C – medida da temperatura em graus Celsius

cm – centímetro, a centésima parte do metro

Al_2O_3 – óxido de alumínio ou alumina

BaO – óxido de bário

BeO – óxido de berílio

B_2O_3 – óxido de boro

CaO – óxido de cálcio

PbO – óxido de chumbo

GeO_2 – óxido de germânio

MgO – óxido de magnésio

K_2O – óxido de potássio

SiO_2 – óxido de silício ou sílica

Na_2O – óxido de sódio

TiO_2 – óxido de titânio

ZnO – óxido de zinco

As_2O_5 – pentóxido de arsênio

P_2O_5 – pentóxido de fósforo

μm – micron ou micrômetro, a milionésima parte do metro

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVO.....	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1 Vidro.....	4
3.2 Transmissão de calor.....	9
3.2.1 Condução.....	10
3.2.2 Convecção.....	18
3.2.3 Radiação.....	19
3.3 Termografia infravermelha.....	23
3.3.1 Métodos de medição por termografia.....	30
3.4 Incerteza das medições.....	32
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
4.1 Materiais.....	37
4.2 Métodos.....	43
4.2.1 Fabricação e caracterização física/mecânica de compostos cimentícios	43
4.2.2 Determinação da condutividade térmica pelo método da placa quente protegida.....	46
4.2.3 Determinação da difusividade térmica utilizando modelamento matemático de difusão de calor.....	54
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	63
5.1 Fabricação e Caracterização Física/Mecânica dos Compostos Cimentícios.....	63
5.2 Determinação da Condutividade pelo Método da Placa Quente.....	64
5.3 Determinação da Difusividade Térmica das Amostras Utilizando Modelamento Matemático de Difusão de calor.....	70
5.3.1 Emissividade térmica das amostras.....	70
5.3.2 Perfil de temperatura.....	71
5.3.3 Cálculo da difusividade térmica.....	78

6 CONCLUSÕES	84
6.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	84
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	86
ANEXO A - Valores de medição utilizados para cálculo da condutividade térmica.....	91

1 INTRODUÇÃO

A exploração dos recursos naturais tem provocado alterações ambientais em toda a Terra. Conscientes das mudanças desencadeadas pela depredação humana, diversos setores da sociedade civil organizada e dos governos, em todo o mundo, têm promovido várias discussões em prol de ações que diminuam os impactos do homem no planeta. Nesse contexto, um setor que causa um grande efeito negativo é o da construção civil, que consome elevada quantidade de recursos naturais e de energia, e que é também um grande gerador de resíduos. Uma das formas de se minimizar o impacto da construção civil é utilizar resíduos agroindustriais em substituição parcial ao cimento *Portland*. Um resíduo de grande potencialidade, devido ao seu alto teor de sílica não cristalina, é o de vidro sodo-cálcico. No entanto, para que esse material seja utilizado em concretos e argamassas, sua granulometria deve ser menor que 60 μ m, condição na qual não se verificará a ocorrência da reação álcali-agregado (MATOS, 2010; ANTONIO 2012, SAUER, 2013).

No Brasil são gerados 76,38 milhões de toneladas de resíduo sólido urbano por ano (ABRELPE, 2013). Desse total, 10% são destinados a lixões ou a aterros sem controle algum. Os resíduos de vidro correspondem a 2,4% de todo o resíduo gerado no país (CEMPRE, 2013), ou seja, 1,83 milhão de tonelada de vidro é jogada no lixo por ano. Conforme a NBR 10004 (ABNT, 2004), o vidro é um resíduo não inerte (classe II B) e devido às suas características de resistência à intempéries, supõe-se que pode demorar até 4.000 anos para se decompor.

Parte do resíduo de vidro gerado é reciclada e utilizada como matéria prima para a produção de novos vidros. No entanto, os resíduos de vidro na forma de pó são lançados em aterros. Esse resíduo é produto da lapidação e furação do vidro em meio aquoso. Para se reutilizar essa água no processo produtivo é feito um tratamento em que se adiciona material floculante que permite a separação entre a água e o vidro em pó. O pó de vidro resultante do processo de tratamento do efluente possui contaminantes que lhe impedem o retorno ao processo produtivo

do próprio vidro. Todavia, umas das possibilidades de aplicação desses resíduos de vidro em pó, com granulometria da ordem de $60\mu\text{m}$, é a sua utilização como material cimentício suplementar. Esse pó de vidro gerado pela lapidação é do tipo de vidro sodo-cálcico e sua composição é de aproximadamente 73% de SiO_2 (óxido de silício ou sílica), 13% Na_2O (óxido de sódio) e 10% CaO (óxido de cálcio) (ANTONIO, 2012).

Trabalho recente na UFMG (SALES, 2014) indicou que a composição química do resíduo de vidro pode influenciar seu desempenho térmico quando utilizado em substituição ao cimento. A partir dessa informação, este trabalho visa estudar o desempenho térmico de compostos cimentícios confeccionados com resíduo de vidro, gerado nas indústrias beneficiadoras de vidro, e de compostos cimentícios produzidos com pó de vidro gerado em laboratório. Para isso, a condutividade térmica do material foi determinada por meio de adaptação do método da placa quente protegida e a difusividade térmica foi determinada por termografia infravermelha. Tais propriedades permitem avaliar a capacidade que um material tem de conduzir e armazenar calor. Conhecendo-se essas propriedades, pode-se avaliar se os materiais contribuem para um melhor desempenho térmico de edificações.

2 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo principal comparar, por meio de termografia infravermelha, o desempenho térmico de compostos cimentícios contendo substituição parcial do cimento *Portland* por micropartículas de pó de vidro incolor e de cor âmbar, produzidos em laboratório, e o desempenho térmico de compostos cimentícios contendo substituição parcial do cimento *Portland* por resíduos oriundos da indústria vidreira.

Constitui objetivo específico do trabalho a determinação da emissividade, da condutividade e da difusividade térmica dos compostos avaliados.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Vidro

Os vidros têm sido produzidos por centenas de anos e sua história está intimamente ligada à da própria humanidade. Compostos basicamente por areia, cal e uma substância alcalina, sua origem é considerada desconhecida pelos historiadores.

Existem diferentes definições para o vidro, com o passar do tempo, tais definições foram se modificando. Alves (2001) faz um relato de definições de vidro usadas na década de 1990, conforme demonstrado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Definições de vidro publicadas na década de 90

Autor	[Ano]	Definição
Elliott	[1990]	"Vidros são materiais amorfos que não possuem ordem translacional a longo alcance (periodicidade), característica de um cristal. Os termos amorfo e sólido não cristalino são sinônimos nesta definição. Um vidro é um sólido amorfo que exhibe uma transição vítrea."
Zarzycki	[1991]	"Um vidro é um sólido não cristalino exibindo o fenômeno de transição vítrea."
Doremus	[1994]	"Vidro é um sólido amorfo. Um material é amorfo quando não tem ordem a longa distância, isto é, quando não há uma regularidade no arranjo dos constituintes moleculares, em uma escala maior do que algumas vezes o tamanho desses grupos. Não é feita distinção entre as palavras vítrea e amorfo."
Varshneya	[1994]	"Vidro é um sólido que tem estrutura do tipo de um líquido, um sólido 'não-cristalino' ou simplesmente um sólido amorfo, considerando a característica de amorfo como uma descrição da desordem atômica, evidenciada pela técnica de difração de raios-X."
Shelby	[1997]	"Vidro é um sólido amorfo com ausência completa de ordem a longo alcance e periodicidade, exibindo uma região de transição vítrea. Qualquer material, inorgânico, orgânico ou metal, formado por qualquer técnica, que exhibe um fenômeno de transição vítrea é um vidro."

Fonte: Adaptado de Alves, 2001.

O vidro é um material constituído basicamente por: óxido de silício (SiO_2), óxido de sódio (Na_2O), óxido de cálcio (CaO), óxido de magnésio (MgO) e o óxido de alumínio (Al_2O_3). O óxido de silício (SiO_2) é o material vitrificante, o óxido de sódio

(Na_2O), também conhecido como barrilha, é o material fundente, o óxido de cálcio (CaO) é o material estabilizante, o óxido de magnésio (MgO) é o que acrescenta resistência ao vidro para suportar mudanças bruscas de temperatura, e o óxido de alumínio (Al_2O_3) é acrescentado para aumentar a resistência mecânica (CARAM,1998; COELHO,2009). As porcentagens de cada material constituinte mudam conforme a característica que se pretende dar ao vidro. A Figura 3.1 mostra como são distribuídos o quantitativo de material para a produção de um determinado tipo de vidro.

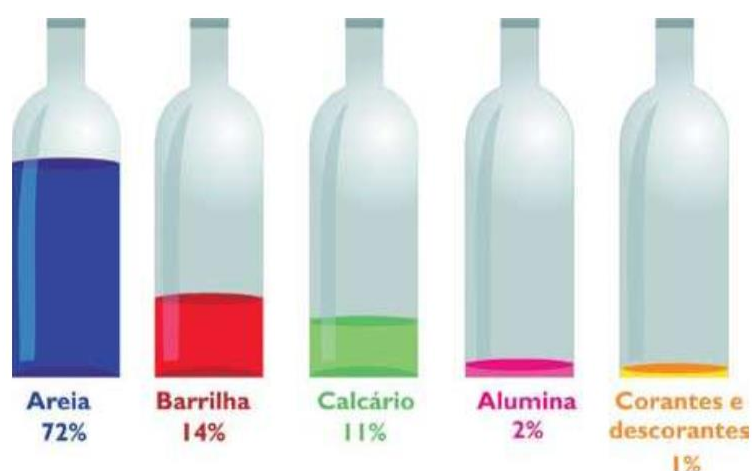


Figura 3.1 – Composição do Vidro, ABIVIDRO.

Devido à elevada quantidade de elementos químicos que entram na formação do vidro, Akerman (2000) afirma que quase todos os elementos da tabela periódica podem ser a ele adicionados, fazendo com que apresente uma ampla variedade de propriedades mecânicas, óticas, térmicas, elétricas e químicas. O vidro costuma ser classificado por sua composição química. A Tabela 3.2 apresenta a composição química de alguns tipos de vidros de acordo com a sua utilização.

Tabela 3.2 – Composição química de vidros

Tipo / Composição	SiO ₂	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	PbO	Uso
sodo-cálcicos	72	2	0	12,5	1	11	1,5		embalagem
	71	1		13,5	0,5	10	4		plano
	73	1		16,5	0,5	5	4		lâmpada
Borossilicato	79	2	13	5,5					utensílio refratário
	66	1,5	3,5	15,5	1	8	4		fibra isolante
Chumbo	56			4	12	2	2	24	vidro cristal
	63	1		8	6			22	néon
	32			1	2			65	lente
Aluminoborossilicato	72	6	11	7	1	1			farmacêutico
	55	15	7			19	4		fibra de reforço
	62	17	5	1		8	7		tubo de combustão

Fonte: Adaptado de Alkeman, 2000.

Dentre os vários tipos de vidros destacam-se os vidros sodo-cálcios, devido sua ampla utilização. São produzidos incorporando, em sua composição, óxidos alcalinos como o óxido de cálcio (CaO) e o óxido de magnésio (MgO), usados como modificadores de rede, que reduzem a viscosidade do vidro fundido de sílica. Com a adição dos carbonatos alcalinos, ocorre uma diminuição da resistência química do vidro, possibilitando o seu emprego na produção de garrafas, frascos, janelas, bulbos e tubos de lâmpadas (PINTO-COELHO, 2009).

Os vidros sodo-cálcicos coloridos são produzidos quando se introduz, em sua composição, elementos que alteram a capacidade de transição espectral. Eles são utilizados para dar uma coloração especial aos vidros. A variação de cores é conseguida por meio da adição de diversos óxidos que podem ser vistos na Tabela 3.3. Aditivos como selênio, óxido de cobalto e o óxido de neodímio entram na composição do vidro a fim de corrigir manchas verdes causadas por impurezas do ferro presentes na areia. (OMAR, 2011).

Tabela 3.3 – Óxidos e suas cores

Cor do Vidro	Fe ₂ O ₃	FeO	Cr ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃ CoO	Cr ₂ O ₃ CoO NiO	Cr ₂ O ₃ Fe Cr	Cr ₂ O ₃ Fe Cr Se	Cr ₂ O ₃ FeCr Co	Fe ³⁺ S ⁻ Na ⁺
Amarelo/esverdeado									
Azul/cerâmico									
Verde esmeralda									
Verde geórgia									
Verde champanhe									
Branco									
Rosado									
Azulada									
Âmbar									

Fonte: Adaptado de Sales, 2014.

Os vidros são formados principalmente por óxido de silício (SiO₂), e como um vidro silicato, são compostos por redes conectadas tridimensionalmente (Figura 3.2). A unidade básica é o tetraedro silício-oxigênio, onde um átomo de silício está ligado a quatro átomos de oxigênios (AKERMAN, 2000).

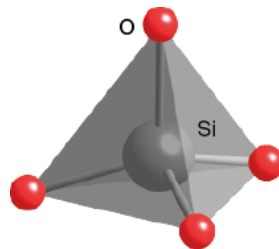


Figura 3.2 – Unidade básica da sílica. | Fonte: Gallery of Rotatable Structures.

A sílica, em estado natural, possui um arranjo atômico que se repete de forma regular a longas distâncias (Figura 3.3a). Quando fundida e resfriada rapidamente, apresenta arranjos locais, e se denomina de sílica vítrea ou não cristalina (Figura 3.3b) (SALES, 2014 *apud* WULFF et al., 1964).

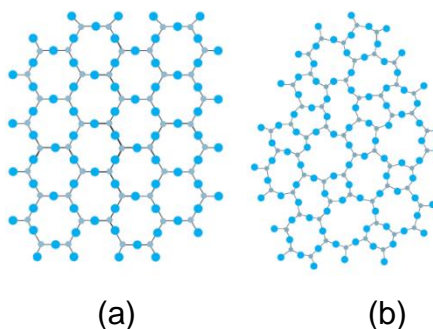


Figura 3.3 (a) – Arranjo cristalino | (b) – Arranjo não cristalino ou vítreo.

Fonte: Alves et al., 2001.

Óxidos formadores de rede são capazes de substituir o silício e formar uma rede de ligação iônica aleatória. A maioria dos cátions monovalentes e bivalentes não entra na rede, mas tem capacidade de destruir a rede vítrea, formando ligações iônicas com o oxigênio, são os óxidos modificadores. Esses óxidos são adicionados na fabricação do vidro para aumentar a viscosidade, diminuindo o ponto de fusão do material. (AKERMAN, 2000; MARAN, 2010). Os óxidos intermediários são aqueles que, por si só, não podem originar uma rede, mas se ligam à rede vítrea no lugar do SiO_4^{4-} . Porém, como são tetravalentes, os cátions suprem outros elétrons a fim de neutralizá-los eletricamente. Esses óxidos são adicionados ao vidro para dar característica de resistência térmica (MARAN, 2010). Na Tabela 3.4 encontram-se alguns óxidos formadores, intermediários e modificadores de rede.

Tabela 3.4 – Principais óxidos usados na fabricação do vidro

Formadores de rede	Intermediários	Modificadores
SiO_2	Al_2O_3	MgO
B_2O_3	TiO_2	K_2O
GeO_2	PbO	BaO
P_2O_5	BeO	CaO
As_2O_5	ZnO	Na_2O

Fonte: Adaptado de Maran, 2010.

Uma das principais propriedades dos vidros é a transparência. Isso se deve à sua elevada transmitância na gama do espectro visível da radiação eletromagnética. Devido às propriedades espectrofotométricas (transmissão, reflexão e absorção), os vidros atuam de forma seletiva na radiação solar: são opacos ao comprimento de onda longa e transparente ao comprimento de onda curta na faixa do infravermelho.

Em termos ambientais e construtivos, os vidros, que são utilizados para revestimentos de fachadas, possuem elevada transmitância e deixam passar a radiação da luz visível e radiação infravermelha (onda curta) para o interior das edificações. Por outro lado, este mesmo vidro não permite que a radiação infravermelha refletida pelos objetos (onda longa) seja transferida para o exterior

da edificação, dando origem, assim, ao principal problema ambiental associado ao vidro, que é o efeito de estufa (ASSIS, 1998).

Por ser um material isotrópico e com ruptura frágil, ele não permite a redistribuição de esforços por deformações plásticas. O vidro apresenta um valor de resistência à compressão significativamente superior ao valor da resistência à tração (VILARINHO, 2010).

Os vidros utilizados na construção civil apresentam, em média, um coeficiente de dilatação linear em torno de $9 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, calor específico entre 20°C e 300°C , difusividade térmica entre $0,0025 \text{ cm}^2/\text{s}$ e $0,010 \text{ cm}^2/\text{s}$ e condutividade térmica de $0,8 \text{ W/mK}$. Nos processos de fabricação do vidro, alguns fluidos e modificadores podem ser introduzidos com o intuito de aprimorar não somente sua fabricação, mas também suas propriedades, como melhora na transmissão da luz visível, no índice de refração, na dureza e resistência à abrasão, na durabilidade, densidade, resistência ao fogo, isolamento acústico e térmico, dentre outras propriedades relacionadas à sua utilização (ASKELAND; PHULÉ, 2008; SMITH, 1998).

3.2 Transmissão de Calor

Segundo Kreith (1973), a energia térmica é transmitida sempre que existir um gradiente de temperatura no interior de um sistema ou, quando dois sistemas com diferentes temperaturas são colocados em contato. O processo pelo qual a energia é transportada é chamado de transmissão de calor. Ocorre entre dois corpos quando existe um trânsito de energia entre eles, causado pela diferença de temperatura. (INCROPERA; DEWITT, 2008). O que transita, chamado calor, não pode ser medido ou observado diretamente, mas os efeitos por ele produzidos são suscetíveis à observação e medida. O fluxo de calor, como o desempenho de trabalho, é um processo pelo qual a energia interna de um sistema é mudada, não é governado por uma única relação, mas, por uma combinação de várias leis independentes da física. O fluxo de calor, que transita do corpo de maior energia (T_1) para o de menor energia (T_2), pode ser observado na Figura 3.4. O corpo com maior temperatura tende a entrar em equilíbrio com o

de menor temperatura pelas trocas térmicas, até que as temperaturas dos corpos sejam a mesma ($T_1 = T_2$). Quando isso ocorre os corpos estão em equilíbrio térmico. (LAMBERTS, 2011).

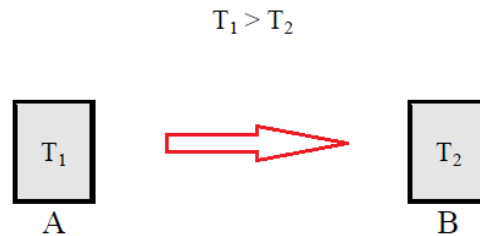


Figura 3.4 – Transferência de calor.

Fonte: Adaptado de Lamberts, 2011.

É importante que se compreenda os mecanismos físicos que fundamentam as formas de transferência de calor. Eles não estão ligados à quantidade de energia térmica que um corpo possui e sim à sua temperatura (RIVERO 1985). Os três modos de transmissão de calor são: condução, convecção e radiação térmica. Na prática, a transmissão de calor será sempre uma superposição de dois ou mais casos, ou mesmo dos três. Fluxo térmico é o nome dado à quantidade de calor trocada na unidade de tempo, por área, em qualquer um dos três processos. É chamado de permanente ou estacionário quando constante, ou seja, a temperatura em cada ponto não muda e as condições de regime permanente prevalecem. Ele é transitório quando a temperatura muda com o tempo em vários pontos do sistema, como exemplo, a variação de temperatura de um edifício, durante o período de 24 horas (RIVERO, 1985).

3.2.1 Condução

A troca de calor por condução acontece em um corpo em nível molecular por partículas de maior energia para partículas de menor energia devido à interação molecular (Figura 3.5). Ocorre na maioria das vezes em sólido, mas pode acontecer em um fluido com aplicação dos mesmos princípios, desde que não haja movimentos convectivos no mesmo. (KREITH,1973; INCROPERA; DEWITT, 2008).

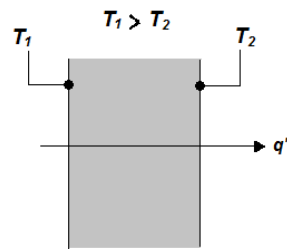


Figura 3.5 – Transferência de calor por condução.

Fonte: Adaptado de Incropera; Dewitt, 2008.

Quanto maior a temperatura de um corpo maior será sua energia molecular e, conseqüentemente, maior a energia presente nas moléculas. As moléculas com maior energia se movimentam mais e com maior velocidade. Ao se chocarem com as outras de menor energia ocorre a transferência de calor entre elas (Figura 3.6). O processo de troca de energia prossegue até que o corpo entre em equilíbrio térmico (INCROPERA; DEWITT, 2008).

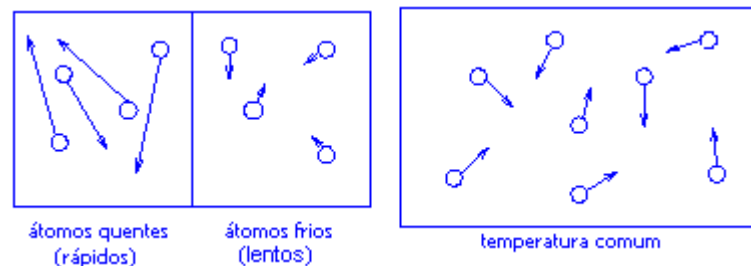


Figura 3.6 – Transferência de calor entre as moléculas.

Fonte: Bertulane, 1999.

Quando elevamos a temperatura em um ponto de um corpo, o fluxo de energia se propaga em todas as direções, da região mais aquecida para a região menos aquecida (Figura 3.7). A quantidade de energia distribuída para os diversos pontos do corpo será proporcional à quantidade necessária para haver o equilíbrio térmico (RIVERO 1985).

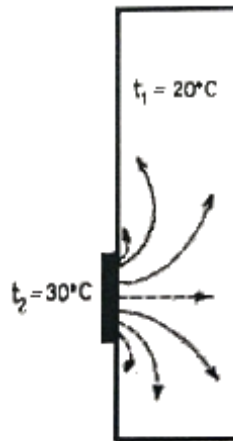


Figura 3.7– Fluxo de calor por condução em um corpo.

Fonte: Rivero, 1985.

Conforme Incropera (2008) pode-se quantificar o processo de transferência de calor por equações de taxas apropriadas. Na condutividade térmica, essa equação da taxa é denominada Lei de Fourier, que permite determinar a quantidade de energia transferida na unidade de tempo (Equação 3.1).

$$q_x = KA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (3.1)$$

em que $[q_x]$ é o calor transmitido por unidade de tempo (W/m^2), $[A]$ é a área de seção pela qual o calor flui (m^2), $\Delta T/\Delta x$ é o gradiente de temperatura e $[K]$ é a condutividade térmica do material (W/mK).

Atendendo à segunda lei da termodinâmica, que diz que o fluxo de calor fluirá do local de temperatura mais alta para o local de temperatura mais baixa. O sinal negativo é adicionado à equação de condução de calor (Equação 3.2).

$$q_x = -KA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (3.2)$$

A condutividade térmica $[K]$ é uma propriedade de transporte e fornece o valor da taxa em que a energia é transferida pelo processo de difusão e está relacionada à estrutura física da matéria, atômica e molecular (INCROPERA; DEWITT, 2008). A condutividade térmica varia com a temperatura, mas em engenharia a variação

que é considerada pequena pode ser desprezada (INCROPERA; DEWITT, 2008; KREITH, 1977).

a) Condução unidimensional em regime permanente

As transferências de calor são classificadas conforme as variáveis que atuam na temperatura. Se a temperatura for independente do tempo, a transferência de calor será classificada como estacionária ou permanente. E se a transferência ocorrer em uma única coordenada espacial é chamada de unidimensional. A parede plana é o caso mais simples de condução unidimensional, onde o gradiente de temperatura e o fluxo calor transmitido por unidade de tempo na seção transversal, no caminho que o fluxo percorre, são uniformes. As variáveis da Equação 3.2 podem ser separadas, e resulta na Equação 3.3. (INCROPERA; DEWITT, 2008; KREITH, 1977).

$$\frac{q_k}{A} \int_0^L dx = - \int_{T_{quente}}^{T_{fria}} k dT = - \int_{T_1}^{T_2} K dT \quad (3.3)$$

Os limites da integração podem ser visualizados na Figura 3.8, em que a temperatura na face esquerda, onde $x=0$, é uniforme em T_1 , e a temperatura na face direita, onde $x=L$, é uniforme em T_2 . Se K for independente de T , obtém-se, por integração, a Equação 3.4 para a taxa de condução através da parede plana (INCROPERA; DEWITT, 2008; KREITH, 1977).

$$q_k = \frac{AK}{L} (T_{quente} - T_{fria}) = \frac{\Delta T}{L/AK} \quad (3.4)$$

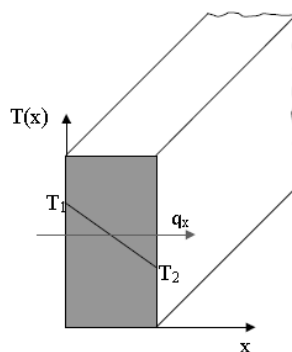


Figura 3.8 – Condução de calor na parede plana.
Fonte: adaptado de INCROPERA; DEWITT, 2008.

Na Equação 3.4, ΔT , a diferença entre a temperatura mais elevada T_{quente} , e a menos elevada T_{fria} , consiste no potencial de impulso que provoca a transição de calor. $L/\Delta T$ equivale à uma resistência térmica R_k que a parede plana oferece ao fluxo de calor por condução, conforme a Equação 3.5. (INCROPERA; DEWITT, 2008; KREITH, 1977). As condições do regime transiente permitem fazer uma analogia entre a difusão de calor e a carga elétrica. A resistência elétrica está associada à uma condução de eletricidade, então uma resistência térmica pode ser associada à uma condução de calor (ORDENES, 2008).

$$R_k = \frac{L}{AK} \quad (3.5)$$

O fluxo de corrente elétrica (i) equivale ao potencial de tensão E_1-E_2 dividido pela resistência elétrica R_e e o fluxo de calor q_k é igual ao potencial da temperatura T_1-T_2 dividido pela resistência térmica R_k . A recíproca da resistência térmica é chamada de condutância térmica e é definida pela Equação 3.6 (INCROPERA; DEWITT, 2008; KREITH, 1977).

$$K_k = \frac{AK}{L} \quad (3.6)$$

b) Condução unidimensional em regime transiente

É o tipo de condução de calor em que a variável que influencia a temperatura em função do tempo é unidimensional, porque a condução ocorre somente em uma coordenada. Quando ocorre alteração contínua de temperatura no meio que envolve um sólido, há um intervalo de tempo até que aconteça o equilíbrio térmico de temperatura entre o interior e o exterior (HOLMAN, 1983; INCROPERA; DEWITT, 2008; RIVERO 1985). Nesse processo transitório de troca de calor que ocorre até que o equilíbrio seja estabelecido, as análises devem ser modificadas para que seja levado em consideração a variação de energia interna do corpo com o tempo. Também devem ser levados em conta as condições de contorno para serem compatíveis com a situação física de transferência de calor em regime transiente por meio da equação geral da condução (HOLMAN, 1983):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.7)$$

em que [T] corresponde à temperatura do sólido (°C ou K), [t] é o tempo (s), [x] corresponde à direção na qual ocorre a transferência de calor e [α] corresponde à difusividade térmica do material (m²/s).

A difusividade térmica [α], que aparece nos problemas de condução de calor em regime transiente, é uma propriedade do material que mede a capacidade do material em conduzir energia térmica em relação à sua capacidade de armazená-la. Quanto maior o valor da difusividade térmica de um material mais rapidamente vai responder à mudanças de temperatura a ele impostas. Um material com baixa difusividade térmica responderá mais lentamente, levando um tempo maior para atingir a condição de equilíbrio. A difusividade térmica pode ser expressa como a razão entre a condutividade térmica [K] e a capacidade calorífica volumétrica representada pela expressão:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (3.8)$$

em que [K] corresponde à condutividade térmica (W/m.K), [ρ] à densidade (Kg/m³) e [C_p] corresponde ao calor específico (J/kg.K).

O produto [ρC_p] é chamado de capacidade calorífica volumétrica e mede a capacidade do material de armazenar energia térmica (INCROPERA; DEWITT, 2008).

Holman (1983) afirma que um valor elevado de [α] pode representar um valor elevado da condutividade térmica ou um valor baixo da capacidade térmica [ρC_p]. Quando um material tem um valor baixo da capacidade térmica significa que pouca quantidade de energia que está em trânsito no material será absorvida e usada para aumentar a temperatura do material, deixando assim, uma maior quantidade de energia disponível para ser transferida.

Uma das formas de calcular a difusividade térmica de um material é por meio da geometria do sólido semi-infinito. O sólido semi-infinito possui uma geometria simples e é caracterizado por ter apenas uma superfície identificável e as demais infinitas. Figura 3.9. (INCROPERA; DEWITT, 2008).

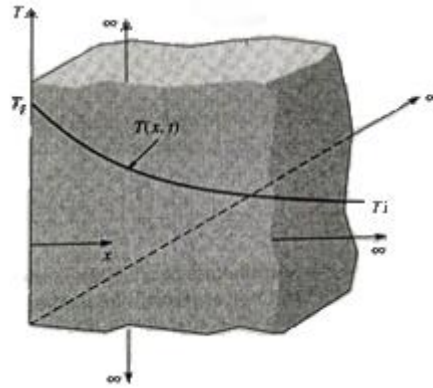


Figura 3.9 – Nomenclatura para a condução transitória no sólido semi-infinito.

Fonte: KREITH; BOHN (2003)

Se uma súbita mudança térmica for imposta na superfície identificável, a condução unidimensional em regime transiente ocorrerá no interior do sólido. A equação de calor para a condução transiente em um sólido semi-infinito é dada pela Equação 3.7. Para solucionar a equação, é preciso especificar duas condições de contorno e a distribuição inicial de temperaturas. Para a condição inicial de temperatura, especifica-se que a temperatura no interior do sólido é uniforme em T_i (Equação 3.9). E para uma das condições de contorno necessárias é requerido que, longe da superfície identificável, a temperatura interna não será atingida pela onda de temperatura (Equação 3.10) (HOLMAN, 1983; INCROPERA; DEWITT, 2008).

$$T(x, 0) = T_i \quad (3.9)$$

$$T(x \rightarrow \infty, t) = T_i \quad (3.10)$$

Existem três modos para que ocorra uma súbita mudança térmica na superfície do sólido: uma rápida variação de temperatura $T_s \neq T_i$, uma rápida incidência de um fluxo de calor especificado $[q''_o]$, que pode ser exposição à radiação, uma

rápida exposição à um fluxo de calor constante \hat{h} . Os três modos podem ser vistos na Figura 3.10 (INCROPERA; DEWITT, 2008).

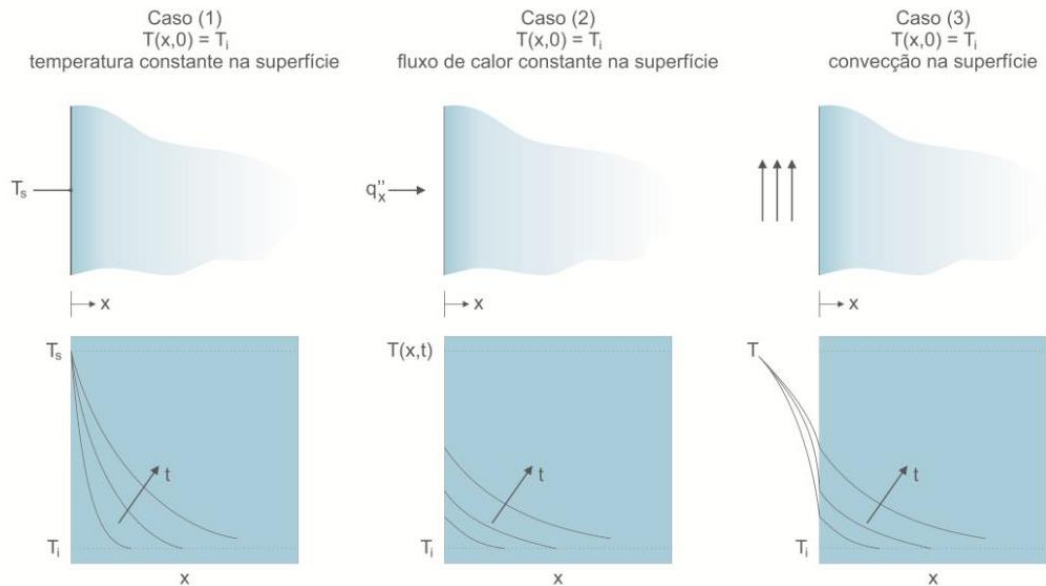


Figura 3.10 – Distribuição transitória de temperaturas em um sólido semi-infinito para três condições de superfície: (1) temperatura constante na superfície, (2) fluxo constante de calor superficial e (3) convecção superficial.

Fonte: Incropera e DeWitt, 2003, p.112.

Neste trabalho foi calculada a difusividade térmica por meio da condução de calor unidimensional em regime transiente do sólido semi-infinito, na condição de contorno de segunda espécie, que considera um fluxo constante na superfície $q''_{sup} = q''_0$ e é apresentado a seguir:

$$T(x, t) - T_i = \frac{2q''_0\sqrt{\frac{\alpha t}{\pi}}}{K} e^{-\frac{x^2}{4\alpha t}} - \frac{q''_0}{K} \operatorname{erfc}\left[\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right] \quad (3.11)$$

em que $[T(x,t)]$ representa a temperatura ($^{\circ}\text{C}$), $[T_i]$ é a temperatura da superfície identificável no instante inicial ($^{\circ}\text{C}$), $[q''_0]$ é o fluxo de calor constante aplicado na superfície identificável (W/m^2), $[\alpha]$ é a difusividade térmica do sólido (m^2/s), $[t]$ é o tempo (s), $[k]$ é a condutividade térmica do sólido ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$), $[x]$ é a posição (m) e $[\operatorname{erfc}(w)]$ é a função erro complementar, que é a função de Erro de Gauss, demonstrada na Equação 3.12.

$$\operatorname{erfc}(\omega) = 1 - \operatorname{erf}(\omega), \quad \text{sendo } \omega = \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \quad (3.12)$$

3.2.2 Convecção

A convecção é o processo de transporte de energia pela combinação de armazenamento de energia, condução de calor e do movimento de mistura (KREITH, 1977). A transferência de energia ocorre quando há contato entre uma superfície sólida com um líquido ou gás, estando os materiais em diferentes temperaturas (Figura 3.11). A transferência pode ocorrer do sólido ao fluido ou do fluido ao sólido, conforme for a relação de temperatura entre eles. (INCROPERA; DEWITT, 2008; KREITH, 1977; RIVERO 1985).

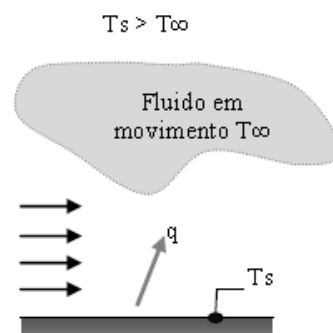


Figura 3.11 – Convecção de superfície para fluido.
Fonte: Pedra, 2011.

A transferência pelo movimento de calor gerado por convecção é mantida pelo movimento molecular aleatório (difusão) e também pelo movimento global, ou macroscópico do fluido. O fluido em movimento está relacionado ao fato de que, em um momento qualquer, elevada quantidade de moléculas está se movimentando coletivamente ou como agregado. Esse movimento, na presença de um gradiente de temperatura gera a transferência de calor (INCROPERA; DEWITT, 2008).

A transferência de calor por convecção ocorre em etapas: inicialmente o calor se transmite por contato ou condução da superfície para as partículas próximas ao fluido. A energia que foi transferida ou retirada do fluido provocará um aumento ou diminuição da temperatura e da energia interna das partículas do fluido, que

modificará sua densidade, causando movimento convectivo ascendente ou descendente (KREITH, 1977; RIVERO 1985).

Segundo Kreith (1977), o calor transmitido em unidade de tempo por convecção entre a superfície de um sólido e um fluido é calculado por:

$$q_c = \hat{h}_c A \Delta T \quad (3.13)$$

Em que $[q_c]$ é o calor transmitido na unidade de tempo por convecção (Kcal/h), $[\hat{h}_c]$ é o coeficiente médio de transmissão de calor por meio de convecção (Kcal/h m²), $[A]$ é área de transmissão de calor (m²), $[T]$ é a diferença de temperatura entre o fluido T_∞ e a superfície T_s (C°) (KREITH, 1977).

A transmissão de calor por convecção pode ser classificada conforme a natureza do escoamento do fluido, sendo chamada de convecção natural ou livre e convecção forçada. Na convecção natural, o escoamento do fluido ou o movimento da mistura acontece como resultado das diferenças das densidades causadas pelo gradiente de temperatura. A convecção forçada acontece quando o escoamento do fluido é induzido por agente externo como uma bomba ou ventilador (INCROPERA; DEWITT, 2008; KREITH, 1977).

3.2.3 Radiação

A transmissão de calor por radiação ocorre quando o calor é transmitido de um corpo com temperatura maior para um corpo de temperatura menor estando esses corpos separados no espaço (KREITH, 1977). A intensidade da radiação emitida depende da temperatura do corpo bem como do material da superfície (HOLMAN, 1983; RIVERO 1985).

A radiação térmica é a energia que é emitida por todo corpo que está com a temperatura diferente de zero absoluto e é transmitida por meio de ondas eletromagnéticas (INCROPERA; DEWITT, 2008). A propagação da radiação térmica acontece na velocidade da luz (3×10^8 m/s) e se assemelha muito aos fenômenos da radiação da luz (HOLMAN, 1983; KREITH, 1977). Conforme a

teoria eletromagnética, a radiação térmica e a radiação da luz, se diferenciam apenas nos comprimentos de onda (KREITH, 1977) (Figura 3.12).

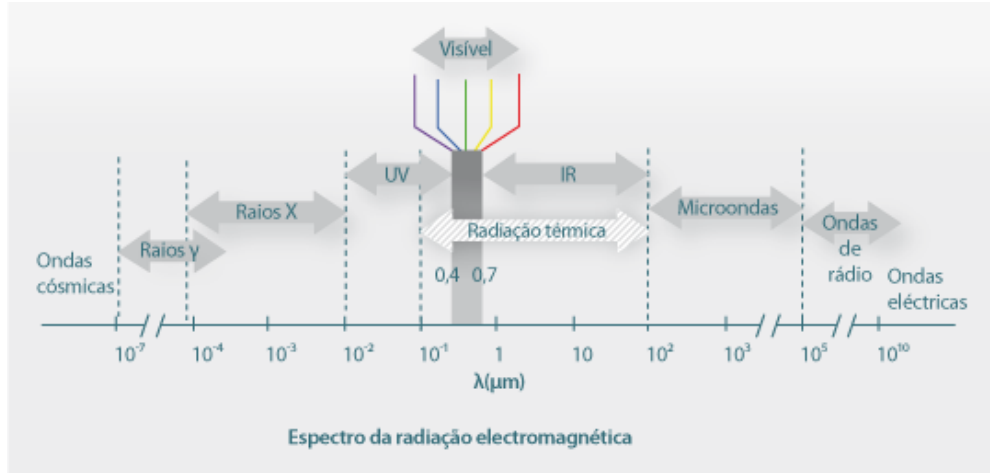


Figura 3.12 – Espectro eletromagnético.

Fonte: Portal laboratórios visuais de processos químicos.

A propagação das ondas eletromagnéticas acontece em todas as direções e em linha reta partindo da superfície emissora. Como a radiação térmica segue as leis da ótica, parte dessa radiação, quando chegar a um corpo, será absorvida, parte será refletida e parte transmitida, como mostra a Figura 3.13. A refletividade (ρ) é a parte refletiva, a transmissividade (τ) é a parte transmitida e a absorvidade (α) é a parte absorvida, tendo-se assim:

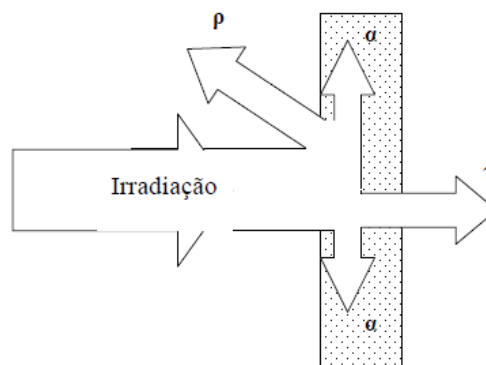


Figura 3.13 – Transmissividade, absorvidade e refletividade.

Fonte: Güths *et al.*, 2008

Nesse caso, a energia transmitida (τ) é a energia que atravessa o corpo, pelo fato de o corpo ser transparente a esse tipo de radiação. A energia radiante que é absorvida é transformada em energia térmica ou calor, porém a energia que é

refletida e transmitida não sofre alteração alguma, mantendo-se com o mesmo comprimento de onda (RIVERO 1985). A energia térmica irradiada certamente se decompõe numa das três formas descritas acima e o princípio da conservação de energia determina que, para qualquer material, aplica-se a Equação 3.14:

$$\rho + \tau + \alpha = 1 \quad (3.14)$$

Onde (ρ) é coeficiente de emissividade, (τ) é o coeficiente de transmissividade e (α) é o coeficiente de absorvidade.

a) Emissividade

Emissividade ou poder emissivo é a quantidade de energia que é liberada pela superfície de um material por unidade de área (W/m^2). A emissividade de uma substância varia conforme o comprimento de onda, a temperatura absoluta e a condição da superfície (HOLMAN, 1983; INCROPERA; DEWITT, 2008; KREITH, 1977; RIVERO 1985). O valor da emissividade de um material é determinado pela lei de Stefan-Boltzman e é dado por:

$$E_n = \sigma T_s^4 \quad (3.15)$$

em que (T_s^4) é a temperatura absoluta (K) da superfície e (σ) é a constante de Stefan-Boltzman, cujo valor é $5,67 \times 10^{-8} W/(m^2K^4)$. Essa equação se refere ao radiador ideal denominado de corpo negro (INCROPERA; DEWITT, 2008).

O corpo negro é um material que não existe na natureza, mas é produzido em laboratório e tem a capacidade de absorver todas as radiações que chegam até ele e é, também, o maior emissor de energia radiante. Todos os materiais têm uma emissividade menor que a do corpo negro, sendo comprovado porque, para uma mesma temperatura, a irradiação do corpo negro é maior que a de qualquer outro material. A emissividade de um material é determinada pela relação entre sua irradiação (H_r) e pela irradiação do corpo negro (H_{rn}), estando os dois à mesma temperatura:

$$\varepsilon = H_r/H_{rn} \quad (3.16)$$

Como resultado, a emissividade dos materiais sempre terá valores compreendidos entre 0 e 1 (RIVERO 1985).

Os materiais que não preenchem as especificações de um irradiador ideal (corpo negro), mas emitem radiação menor que os corpos negros à mesma temperatura são denominados corpos reais. De modo geral, quando uma radiação incide sobre um corpo real, como dito anteriormente, parte vai ser absorvida (α), e o restante é refletido (ρ) ou transmitido (τ). A emissividade emitida por um corpo real, conforme a lei de Stefan-Boltzman é dado por:

$$E = \varepsilon\sigma T_s^4 \quad (3.17)$$

Em que (ε) é a propriedade radiante da superfície, isto é, sua emissividade (INCROPERA; DEWITT, 2008).

b) Fator de forma da radiação

Quando a transmissão de calor por radiação ocorre entre duas ou mais superfícies, o cálculo da taxa de transmissão consiste em quantificar a fração da radiação que deixa uma determinada superfície e é interceptada por outra superfície e vice-versa (HOLMAN, 1983; INCROPERA; DEWITT, 2008; KREITH, 1977). A transmissão de calor vai depender da forma, localização e orientação das superfícies como também de sua emissividade e da temperatura.

Na Figura 3.14, a fração da radiação que deixa a superfície ($T_i A_i$) e alcança a superfície ($T_j A_j$) é chamada de fator de forma para a radiação (F_{ij}). O fator de forma da radiação é um parâmetro adimensional que leva em conta as características geométricas, relacionado à localização com a orientação das superfícies (Güths *et al.*, 2008).

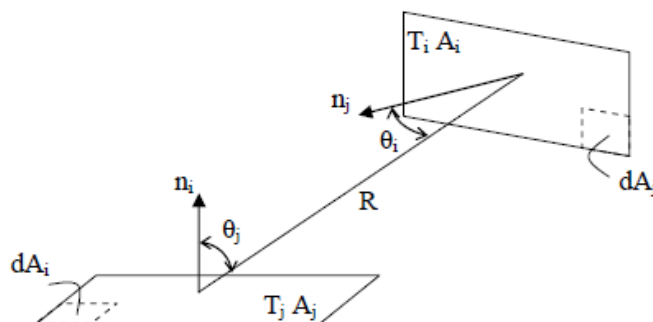


Figura 3.14 – Características geométricas e radiação entre duas superfícies.

Fonte: Güths *et al.*, 2008.

A equação que determina a quantidade de radiação que sai da superfície ($T_i A_i$) e é interceptada pela superfície ($T_j A_j$), é dada por:

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \cdot \int A_i \int A_j \frac{\cos \theta_i \cdot \cos \theta_j}{\pi \cdot R^2} \cdot dA_i \cdot dA_j \quad (3.18)$$

A determinação de um fator de forma de radiação por meio da resolução da integração dupla mostrada na Equação 3.18 é muito complexa. Os fatores de forma para uma boa quantidade de configurações geométricas foram calculados e estão disponíveis na literatura (Güths *et al.*, 2008). Neste trabalho foi usado o fator de forma para cálculo de transferência de calor por radiação, e pela complexidade dos cálculos foi utilizado o *software* EES - Engineering Equation Solver.

3.3 Termografia Infravermelha

A termografia infravermelha é um ensaio não destrutivo capaz de captar e avaliar a temperatura superficial de diferentes estruturas, correlacionando-as com algum tipo de anomalia (CASTANEDO, 2004; SALES, et al. 2010). A técnica se baseia na teoria de que todo corpo, acima do zero absoluto (-273°C), absorve e emite radiação térmica (INCROPERA E DEWITT, 2008).

A termografia permite mensurar e avaliar as características dos materiais em uma variedade de investigações que envolvam os fenômenos de transferência de calor. Conforme a Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR 15424), a termografia infravermelha é uma técnica de sensoriamento remoto que possibilita a medição de temperaturas e a formação de imagens térmicas de um componente, equipamento ou processo, a partir da radiação infravermelha emitida pela superfície do material. O resultado destas medições são imagens térmicas denominados termogramas (Figura 3.15). Nos termogramas, a distribuição de temperatura é representada por diferentes tons de cinza ou em cores, em uma palheta de diferentes tons (MARIO, 2011; PEREIRA, 2013).

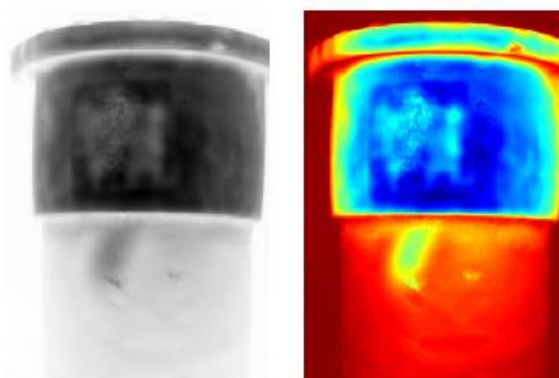


Figura 3.15 – Termograma em escala de cinza e em cores.
Fonte: Adaptado de Avdelidis *et al.*, 2011.

O equipamento de termografia infravermelha, conhecido como termovisor, é um instrumento óptico-eletrônico, constituído por sensores de radiação, amplificadores de sinal e processador de sinais (Figura 3.16). O processo de medição consiste em captar a radiação térmica pelos sensores de radiação que o transformam em um sinal elétrico. O sinal, após ser amplificado, lido e processado, é convertido em uma imagem térmica ou termograma (SANTOS, 2006; CORTIZO, 2007; FERREIRA, 2015; SALES, 2008; TEIXEIRA, 2012).

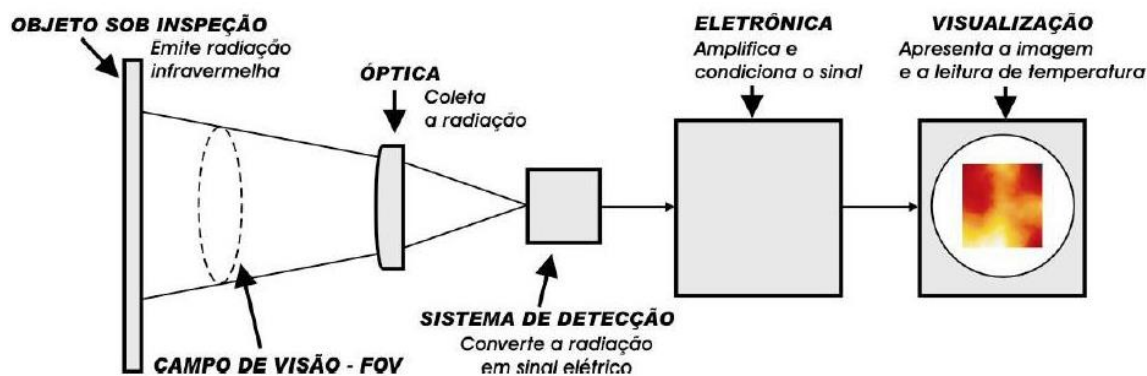


Figura 3.16 – Diagrama simplificado de um termovisor genérico.

Fonte: Santos, 2006.

A tecnologia aplicada à termografia infravermelha se iniciou por volta de 1800, com os estudos de William Herschel, que descobriu a radiação infravermelha. Em 1840, seu filho, John Herschel, produziu a primeira imagem térmica que foi denominada de termograma (CORTIZO, 2007; SALES, 2008).

Araújo, Barbosa e Siniscalchi (2008) afirmam que:

o grande desenvolvimento da termografia foi resultado do interesse militar, que já na I Guerra Mundial desenvolvia sistemas infravermelhos e durante a II Guerra Mundial obteve avanços no desenvolvimento da visão noturna, mísseis guiados pelo calor e do primeiro “*scanner*” de linha. Até 1954, uma câmera térmica levava 45 minutos para criar uma imagem e só em meados da década de 60 é que foi lançada a primeira câmera em tempo real.

A microeletrônica promoveu uma grande evolução tecnológica nos termovisores. A substituição dos sistemas de varredura, que eram óticos/mecânicos, pela tecnologia de FPA (*Focal Plane Array*), possibilitou que as leituras de temperatura fossem apresentadas diretamente no monitor da câmera, promovendo também melhoria na resolução das imagens e maior sensibilidade térmica.

A Tabela 3.5 mostra um resumo da evolução histórica da termografia infravermelha do pós-guerra até a década de 1990:

Tabela 3.5 – Linha histórica da evolução da termografia

Época	Evento
1950	Os primeiros radiômetros.
1960	Os primeiros sistemas de infravermelho imageadores (termovisores)
1970	Os visores térmicos, sem a determinação de temperatura, somente a detecção qualitativa.
1980	Aprimoramento na óptica e a utilização de circuito integrado, permitindo redução de peso e volume dos equipamentos. Em especial no ano de 1985, os detectores resfriados termoeletricamente, substituindo os equipamentos que utilizavam nitrogênio líquido.
1990	Introdução dos CCD e logo após os FPAs, permitindo a realização de centenas de imagens por segundo com alta resolução e grande sensibilidade.

Fonte: Adaptado de Cortizo, 2007.

A partir do desenvolvimento dos microbolômetros, que passaram a atuar nos termovisores como sensores de radiação térmica, houve uma diminuição considerada no tamanho e peso dos equipamentos, possibilitando a retirada dos sistemas de refrigeração criogênicos dos modelos anteriores. (ARAÚJO, BARBOSA e SINISCALCHI, 2008; CORTIZO, 2007). A evolução dos termovisores pode ser vista na Figura 3.17.



Figura 3.17– Evolução dos termovisores.

- a) Detector resfriado a nitrogênio líquido, sistema de varredura óptico/mecânico, 37 kg.
 - b) Detector resfriado eletricamente, sistema de varredura óptico /mecânico, 6,1 kg.
 - c) Detector não resfriado, FPA, 2,7 kg;
 - d) Termovisor modelo FLIR SC660, detector não resfriado peso total 1,7Kg.
- Fonte: adaptado de Araújo, Barbosa e Siniscalchi, 2008.

c) Captação da imagem térmica por termografia

Quando se utilizam os sensores térmicos, a captação da radiação é obtida a partir da estimulação que promove o aquecimento ou resfriamento do material em estudo. De acordo com a forma como é feita essa estimulação, os sistemas que utilizam sensores térmicos são classificados em passivos ou ativos.

No método passivo, a produção das imagens termográficas é realizada sem nenhum estímulo artificial, porém deve existir uma diferença natural de temperatura entre o objeto de estudo e o entorno no qual o objeto está inserido, que frequentemente está em temperatura mais elevada (Figura 3.18). A radiação solar é considerada como fonte natural. A principal vantagem desta categoria é que o único equipamento necessário é a câmara de infravermelhos

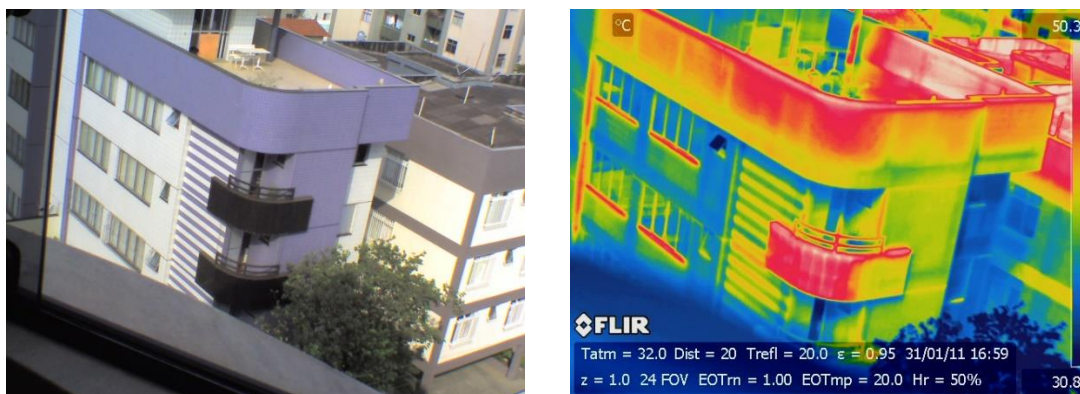


Figura 3.18 – Técnica de termografia passiva.

A termografia passiva possui, com maior frequência, um carácter qualitativo, uma vez que o objetivo é analisar as diferenças nos padrões de distribuição térmica. É realizada por comparação com uma situação padrão, sendo possível detectar irregularidades do objeto analisado, ficando os resultados sujeitos à experiência do avaliador.

A técnica é bastante utilizada para avaliar anomalias em edificações, na medicina, no desempenho de equipamentos e componentes (Figura 3.19), na veterinária, na fisioterapia, biologia, agricultura, na descoberta de fogo em floresta, pesquisa de eficiência energética, monitoramento de tráfego aéreo, investigação e detecção de gás, dentre outros (SALES, 2008; PEDRA, 2011; AVIDELIDIS 2011; PEREIRA, 2013;).

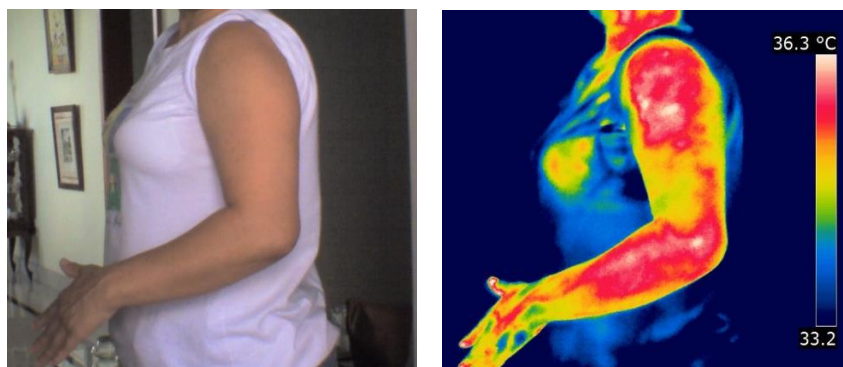


Figura 3.19 – Técnica de termografia passiva.

No método de termografia ativa, ao contrário da passiva, é necessário que o objeto em estudo seja estimulado para gerar diferenças de temperatura. Diferentes técnicas de estimulação podem ser empregadas para provocar um fluxo de calor ou resfriamento no material, cada qual com características e limitações próprias (MALDAGUE, 2001 e 2002).

Os tipos mais conhecidos de estimulação são: termografia pulsada, *step heating*, termografia *loch-in* e vibrotermografia. Visto que as características de aquecimento podem ser identificáveis na forma, na intensidade, na frequência e no tempo de exposição, é possível com esse método realizar medições quantitativas (AVIDELIDIS 2011; PEREIRA, 2013; MENDONÇA, AMARAL e CATARINO, 2013; PEREIRA, 2013; FERREIRA, 2015).

Os pulsos térmicos podem ser obtidos por meio de laser, lâmpadas, fio aquecido ou jatos de ar frio ou quente. Essa técnica é utilizada para detectar defeitos na superfície e até abaixo dela e é muito utilizada na indústria aeroespacial. O método também é utilizado para detectar e avaliar rachaduras, danos de impactos, deslocamento, umidade e avaliação de propriedades termofísicas em todos os tipos de indústria (MALDAGUE, 2001 e 2002).

A escolha do tipo de estímulo térmico ou do posicionamento da fonte vai depender das características de estudo e do tipo de informação requerida (Figura 3.19). A fonte pode estar posicionada do mesmo lado da câmara de infravermelho, correspondendo a uma inspeção por reflexão, ou localizada do

lado oposto ao equipamento, estabelecendo-se um fluxo térmico por transmissão, como se pode observar na Figura 3.20.

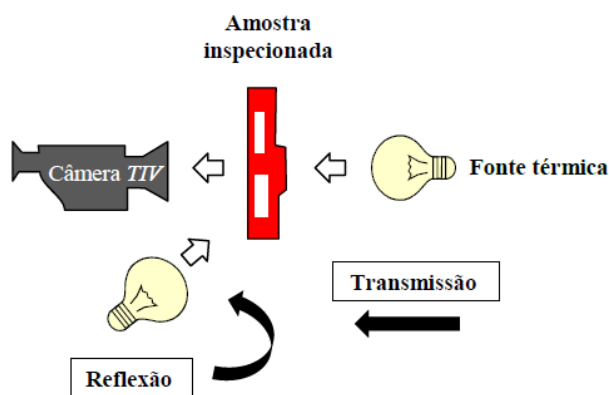


Figura 3.20 – Técnica de termografia passiva.

Fonte: Pereira, 2013.

Na técnica denominada *step heating*, ao contrário da anterior, em que o decaimento da temperatura é observado, monitora-se o aumento da temperatura da superfície enquanto o material é continuamente estimulado. Variações da temperatura da superfície ao longo do tempo estão relacionadas às características do material. Esta técnica de aquecimento também pode ser denominada de TRIR (*time-resolved infrared radiometry*) e é utilizada para avaliação da espessura de revestimento em materiais com múltiplas camadas e cerâmicos, determinação da integridade da ligação entre revestimento e substrato, avaliação de estrutura compósita e caracterização de corrosão oculta em estrutura, dentre outras (MALDAGUE, 2001 e 2002).

A termografia *loch-in* ou termografia modulada consiste em provocar estímulos térmicos periódicos no interior do material. A amostra é submetida a um aquecimento senoidal, em uma frequência que introduz ondas térmicas atenuadas e dispersivas no interior do material. A terminologia *loch-in* se refere à necessidade de monitorar o tempo exato entre o sinal da temperatura registrado e o sinal de referência. A técnica é utilizada para a detecção de corrosão, fissuras verticais e delaminações (MALDAGUE, 2001 e 2002).

A vibrotermografia é uma técnica em que, sob o efeito de vibrações mecânicas aplicadas externamente a uma estrutura com frequência fixa, o calor é liberado

pelo atrito das moléculas nos locais defeituosos. A técnica é utilizada para a detecção de falhas que outras técnicas de termografia são incapazes de detectar como, por exemplo, fissuras (MALDAGUE, 2001 e 2002).

3.3.1 Métodos de medição por termografia

As medições realizadas por meio de termografia por infravermelho alcançam somente as temperaturas superficiais. A temperatura superficial de um material depende de sua configuração interna, das condições de superfície e do meio-ambiente.

A configuração interna de um material é baseada no princípio de que as trocas térmicas não podem ser impedidas de acontecer, movimentando-se da região mais quente para a região mais fria. Contudo, devido aos efeitos isolantes do material que atravessa, o calor pode se movimentar em diferentes velocidades.

As condições de superfície da área sujeita às medições deve ser considerada, pois a capacidade de um material radiar energia é medida pela emissividade, que é uma propriedade da superfície. A emissividade é menor em superfícies lisas e maior em superfícies rugosas (MENDONÇA, AMARAL e CATARINO, 2013). Grandes variações no formato, acabamento e textura apresentam uma boa variação nas medições por termografia.

No processo de medição por termografia, a emissividade é uma variável muito importante, que deve ser avaliada corretamente mediante técnica experimental anterior às medições, ou após estas, por meio de processamento de dados em softwares de tratamento. O essencial é que a emissividade seja avaliada corretamente, a fim de evitar medição incorreta de termografia (FERREIRA, 2015).

O meio ambiente, onde são realizadas as medições termográficas, influencia os resultados dessas medições, por meio da interferência da atmosfera, emitindo, absorvendo e dispersando a radiação emitida pelo sol, pelos objetos próximos ao objeto analisado e pela umidade relativa do ar (ARAÚJO, BARBOSA,

SINISCALCHI, 2008). Nesse ambiente podem haver várias fontes de calor a temperaturas diferentes e energia de vários comprimentos de ondas, em várias direções, sendo propagadas ao mesmo tempo (Figura 3.21).

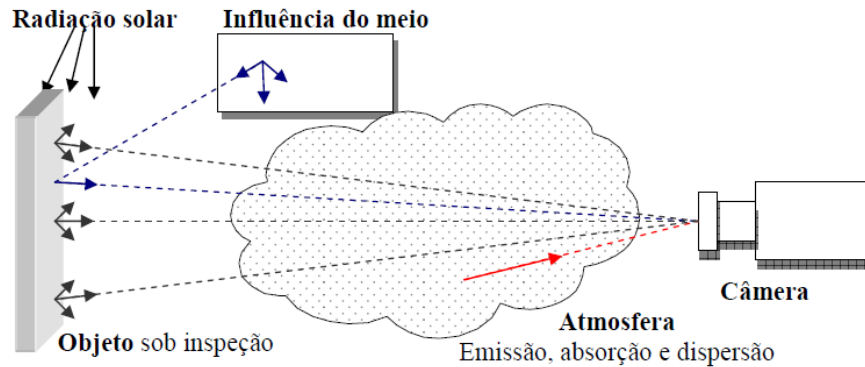


Figura 3.21 – Influências do meio ambiente.
Fonte: Araújo, Barbosa e Siniscalchi, 2008.

A radiação emitida por uma superfície é a soma da radiação emitida com a radiação refletida. A primeira radiação é produzida em consequência da temperatura do próprio corpo, e a segunda, em consequência da temperatura do entorno, mas o termovisor não é capaz de fazer distinção entre elas (FERREIRA, 2015).

De acordo com Teixeira (2012), a radiação infravermelha que é emitida por um objeto até alcançar o termovisor percorre certa distância. Quanto maior a distância que a radiação percorre, maior é a atenuação sofrida. Na Figura 3.22, pode ser visto uma representação de três parcelas do sinal da radiação que alcançam o termovisor, compensadas pela atenuação atmosférica.

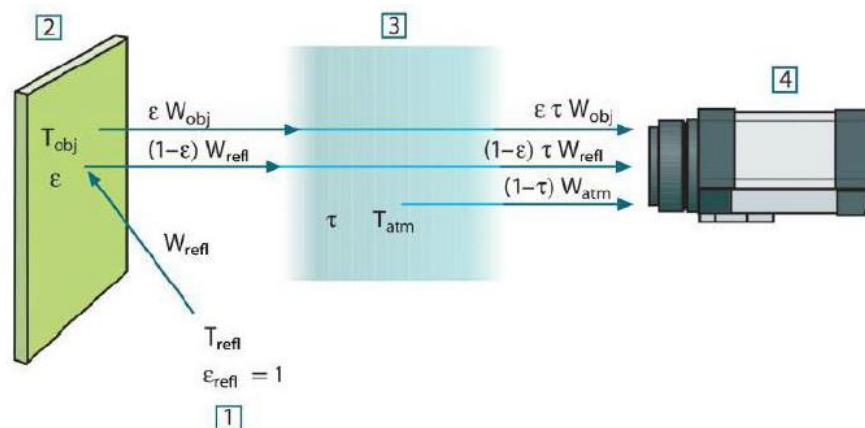


Figura 3.22 – Parcelas que compõem o sinal de radiação em medição termográfica.
Fonte: Ferreira, 2015.

O sinal da radiação que chega ao termovisor será a soma das parcelas, como pode ser visto na Equação 3.19.

$$W_{tot} = \varepsilon \tau W_{obj} + (1 - \varepsilon) \tau W_{refl} + (1 - \tau) W_{atm} \quad (3.19)$$

Em que $[\varepsilon \tau W_{obj}]$ é o sinal emitido pelo próprio objeto; $[(1 - \varepsilon) \tau W_{refl}]$ é o sinal refletido pela sua superfície com origem na vizinhança; e $[(1 - \tau) W_{atm}]$ o sinal emitido pela atmosfera.

Devido às interferências do meio e das características da superfície do material, Correa (2013) afirma que o operador do termovisor precisa “fornecer os seguintes parâmetros para o equipamento: emissividade do objeto, umidade relativa, temperatura da atmosfera, distância do objeto e temperatura refletida do ambiente”.

3.4 Incerteza das medições

Toda medição é realizada por sistemas físicos (instrumentos) por meio dos quais se determinam características de outro sistema físico (objeto). Os sistemas físicos reais diferem do comportamento “ideal” conforme previsto pelos modelos matemáticos que os descrevem (CABRAL, 2004).

O objetivo de uma medição é definir o valor de uma grandeza específica (mensurando) a ser medida. Normalmente, o resultado de uma medição é apenas uma aproximação ou suposição do valor do mensurando, necessitando ser acompanhado da afirmativa da incerteza dessa aproximação (JCGM, 2008).

De forma geral, numa medição há imperfeições que originam erro no seu resultado (JCGM, 2008). Os erros podem ser classificados como grosseiros, aleatórios e sistemáticos. Os erros grosseiros ocorrem devido à imperícia do operador, ajustes imperfeitos ou danos nos instrumentos de medição (TEIXEIRA, 2012; CABRAL, 2004). Os erros aleatórios são associados a variações temporais ou espaciais e ocorrem de forma imprevisível, não sendo possível compensá-los,

mas podem ser minimizados pelo aumento do número de observações. (CABRAL, 2004; JCGM, 2008; TEIXEIRA, 2012). O erro sistemático é o componente do erro de medição que afeta o resultado devido a um fator constante nas medições sob mesmas condições (INMETRO 2012; TEIXEIRA, 2012).

Conforme Teixeira (2012), a incerteza de medição não consiste em um erro, mas na incapacidade de se determinar o valor correto do mensurando. E de acordo com JCGM (2008), o resultado de uma medição, após correção dos efeitos sistemáticos reconhecidos, é tão somente uma estimativa do valor do mensurando, oriunda da incerteza proveniente dos efeitos aleatórios e da correção imperfeita do resultado para efeitos sistemáticos.

De acordo com Cabral (2004), é usual considerar a existência de cinco grupos que constituem as razões para existirem as incertezas de medições. A Tabela 3.6 apresenta esses grupos.

Tabela 3.6 – Razões de incerteza de uma medição

Fonte de incerteza	Contribuição para a incerteza do resultado
Objeto da medição, ou Equipamento a calibrar	Resolução finita, facilidade de leitura Estado de Conservação Instabilidade das leituras etc.
Instrumento(s) de medição ou Padrão usado	Incerteza devida à rastreabilidade (calibração) Afastamento do "padrão ideal" Deriva ao longo tempo etc.
Método de medição utilizado	Adequabilidade do método ao fim em vista Efeito de Carga, largura de bandas, fugas Aproximações inseridas no modelo da medição etc.
Operador	Treino, formação, experiência Paralaxe, capacidade visual Leitura e registro de valores, tempo de reação Respeito dos tempos de Warm-up etc.
Condições ambientais	Temperatura Humidade Pressão Atmosférica Poeiras Vibrações Ruído eletromagnético etc.

Fonte: Adaptado de Cabral, 2004

Incerteza de uma medição é definida por JCGM (2008), como um “parâmetro associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando”. A incerteza de uma medição normalmente compreende muitos componentes que podem ser estimados baseados na distribuição estatística de resultados de várias medições e também podem ser avaliados por meio da distribuição de probabilidade suposta.

Os componentes da incerteza das medições são divididos em duas categorias: Tipo A e Tipo B. Os componentes do Tipo A são avaliados mediante métodos estatísticos e os componentes do Tipo B pelos demais métodos. Ambas as categorias de análise são baseadas na distribuição de probabilidade e os resultados dos componentes de incerteza de cada categoria são calculados por variâncias ou desvios-padrão. O desvio padrão estimado $[u]$, é denominado Incerteza Padrão do Tipo A ou Incerteza Padrão do Tipo B.

Quando o resultado da incerteza padrão do mensurando $[Y]$ é obtido por meio da combinação de diversas grandezas de entrada $[x_1, x_2, \dots, x_n]$ (Equação 3.20), as incertezas combinadas são denominadas de Incerteza Padrão Combinada $[u_c(y)]$. A incerteza padrão combinada é a raiz quadrada positiva da variância combinada $[u_c^2(y)]$, representada pela Equação 3.21.

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (3.20)$$

$$u_c^2(Y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (3.21)$$

em que $u_c(Y)$ representa o intervalo dos valores que podem ser atribuídos ao mensurando $[Y]$, $[f]$ é a função citada na Equação 3.20 e cada $u(x_i)$ representa a incerteza-padrão avaliada.

A Incerteza Padrão Expandida $[U]$ é obtida pela multiplicação da Incerteza Padrão Combinada $[u_c(y)]$ por um fator de abrangência $[K]$ (Equação 3.21). A Incerteza

expandida tem como objetivo definir o intervalo em que o resultado do mensurando $[Y]$ está inserido.

$$U = Ku_c(y) \quad (3.21)$$

O resultado de uma medição com Incerteza Padrão Expandida é expresso por $Y = y \mp U$. Em que Y é $y - U$ e $y + U$ representa o intervalo em que se espera que os valores do mensurando $[Y]$ estejam contidos.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A avaliação do desempenho térmico de material cimentício com adição de micropartículas de resíduos de vidro foi realizada com base no método da placa quente protegida (NBR 15220), utilizando a termografia infravermelha. Foram avaliados compostos cimentícios confeccionados com e sem substituição do cimento *Portland* por resíduos de vidro de diferentes naturezas. A metodologia de cálculo da difusividade utilizada neste trabalho se baseou em dados de estudos com blocos cerâmicos desenvolvidos por Barbosa (2014). Os ensaios foram realizados no Laboratório de Solos, Laboratório de Concreto e Laboratório de Termometria da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Também foram realizados ensaios no Laboratório de Epitaxia de Feixe Molecular do Departamento de Física do Instituto de Ciências Exatas – ICEX. O procedimento experimental foi realizado de acordo com os critérios de cada laboratório e das normas pertinentes. A Figura 4.1 mostra, de forma esquemática, o desenvolvimento do trabalho.

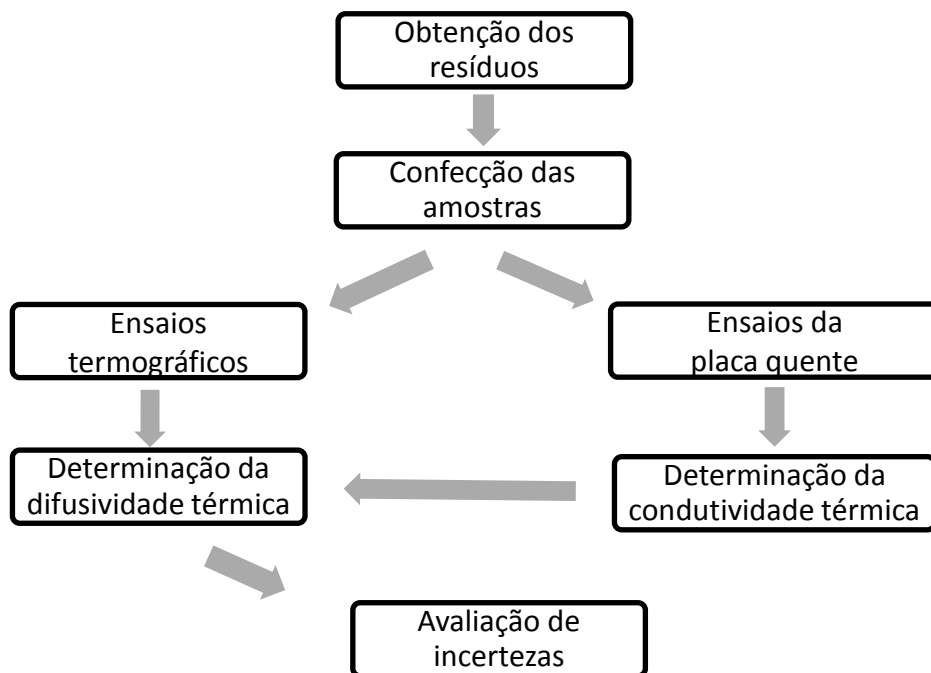


Figura 4. 1 – Fluxograma do método de pesquisa.

4.1 Materiais

Foram avaliados compostos cimentícios confeccionados com água, cimento *Portland* e areia com e sem resíduos de vidro. Utilizou-se dois tipos de resíduos de vidro plano tipo sílico-sodo-cálcicos: cacos que deram origem a micropartículas produzidas em laboratório e provenientes de Estação de Tratamento de Efluentes (ETE).

O primeiro tipo foi obtido a partir de cacos de vidros soda-cal plano incolor (R1) e cor âmbar (R2). Os vidros foram doados pela Indústria Brasileira de Vidros Pestana, situada na cidade de Belo Horizonte–MG. Após serem lavados e secos, os cacos foram submetidos a uma primeira redução de tamanho com o uso de esferas cerâmicas. A etapa seguinte, de trituração, foi realizada em moinho de bolas de aço (25 bolas de \varnothing 32 mm e 15 de \varnothing 50 mm). O material resultante foi acondicionado em sacos plásticos e armazenado até sua utilização (Figura 4.2). A caracterização dos resíduos é apresentada na Tabela 4.1 (SALES, 2014).



Figura 4.2 - Resíduo de vidro a partir de cacos.

Tabela 4.1 – Caracterização dos resíduos produzidos em laboratório

Tipo		Vidro Incolor	Vidro Âmbar
Composição Química: Florescência de Raios X por Energia Dispersiva – EDS (%)	Resíduo Insolúvel	92,72	94,39
	Perda ao fogo	0,22	0,37
	Dióxido de Silício	73,93	72,95
	Óxido de Cálcio	9,18	9,28
	Óxido de Alumino	0,25	0,82
	Óxido de Férrio	0,92	0,66
	Óxido de Magnésio	3,75	3,58
	Trióxido de Enxofre	0,23	0,25
	Óxido de Sódio	9,18	5,99
	Óxido de Potássio	0,02	0,02
	Equivalente Alcalino	9,19	6,00
Massa Específica: Frasco de Chapman (g/cm^3)		2,6	2,54
Granulometria: Espalhamento do Feixe de Laser (mm)		8.93	10.61
Pozolanicidade: Chappelle Modificado (mg de $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{g}$)		562,13	655,20
Estrutura do Arranjo Atômico	Difração de Raios X	não cristalina	não cristalina
	Espectroscopia Absorção Infravermelho	não cristalina	não cristalina

Fonte: Adaptado de Sales, 2014.

O segundo resíduo estudado é proveniente da furação, corte e polimento de bordas de vidro, e foi coletado na Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) da empresa Vidrometro Indústria e Comércio de Vidros Ltda, situada na cidade de Belo Horizonte–MG (Figura 4.3). Estes resíduos apresentam-se na forma de pasta (Figura 4.4) e contêm vidros de diferentes cores. Os resíduos provenientes da ETE estão contaminados com floculantes, que são adicionados à água de coleta do resíduo para facilitar a decantação das micropartículas de vidro em solução.



(a) tanque de agitação (b) tanque de decantação
Figura 4.3 – Estação de tratamento de efluentes.



Figura 4.4 – Resíduo de vidro em forma de pasta.

O resíduo industrial, após a coleta, foi seco em estufa por 48 horas à temperatura de 105 °C. Depois de seco foi destorroado. A seguir, foi separada a fração passante na peneira de abertura de 0,15 mm (Figura 4.5). A composição desses resíduos é apresentada na Tabela 4.2.



Figura 4.5 – Processamento do resíduo.

Tabela 4.2 - Caracterização do resíduo industrial

Tipo		Vidro lavado	Vidro não lavado
Composição Química:	Dióxido de Silício	58,16%	59,33%
	Óxido de Cálcio	36,31%	34,99%
	Óxido Férrico	3,73%	3,88%
	Óxido de Potássio	0,55%	0,48%
	Óxido de Tálcio	0,45%	0,42%
	Trióxido de Enxofre	0,30%	0,37%
	Óxido de Cobre	0,18%	0,22%
	Óxido de Estrôncio	0,12%	0,15%
	Óxido de Zinco	0,05%	0,79%
	Óxido de Manganês	0,05%	-
	Óxido de Rubídio	0,03%	0,03%
Massa Específica – (g/cm ³)		2,47	2,5
Granulometria	10% das partículas	3,75	3,23
Método espalhamento do feixe de laser (µm)	50% das partículas	15,15	16,39
	90% da partículas	44,13	46,25
	Diâmetro médio	19,92	21,03

Fonte: Adaptado de Sales, 2014.

Parte do material foi acondicionada em saco plástico e armazenada em câmara seca até o momento de uso. A outra parte do resíduo industrial seco foi submetida à lavagem com água. De acordo com Salomão *et al.* (2010), o resíduo de vidro proveniente de ETE, devido a sua contaminação com floculante, pode causar eflorescência nos corpos de prova de compostos de cimento *Portland*, por isso deve ser lavado para retirada do contaminante.

O processo de lavagem para retirada do floculante consistiu na transferência do resíduo para um balde de 18 litros, seguida de adição de água e agitação da mistura com o auxílio de um tubo de PVC (Figura 4.6).



(a) adição de água (b) agitação da mistura

Figura 4.6 – Adição de água ao resíduo

A mistura ficou descansando e, após a decantação do resíduo de pó de vidro, usou-se uma mangueira para a drenagem da água (Figura 4.7). Esse processo foi repetido diversas vezes até que não se percebesse a presença do floculante na água, o que pôde ser aferido pela inexistência de seu odor característico.



(a) resíduo decantado

(b) retirada da água

Figura 4.7 – Lavagem do resíduo.

Depois deste procedimento, o resíduo foi novamente seco em estufa por 24 horas, a uma temperatura de 105 °C. Depois de seco (Figura 4.8), o resíduo foi acondicionado em saco plástico vedado.



Figura 4.8 – Resíduo seco.

O cimento utilizado foi o *Portland* de alta resistência inicial CPV ARI Plus, fornecido pela Holcim e fabricado conforme a Norma NBR 5733 (ABNT, 1991). Utilizou-se este tipo de cimento por conter menor teor de adições, o que permite verificar o comportamento do resíduo sem maiores interferências. A caracterização do cimento é apresentada na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Caracterização do cimento Portland CPV ARI Plus

ENSAIOS	PERÍODO	17.01.2015 03.02.2015	05.02.2015 21.02.2015	24.02.2015	LIMITES NBR5733
ENSAIOS FÍSICOS					
	Média	2,2	2,4	2,3	
#400(%)	Desv. Pad.	0,53	0,31	0,34	
IT Holcim	Nº de Amostras	8	8	4	
	Média				
#325 (%)	Desv. Pad.				
NBR 9202	Nº de Amostras				
	Média	4782	4801	4730	
Blaine (cm²/g)	Desv. Pad.	115	62	35	≥ 3000
NBR NM 76	Nº de Amostras	8	8	4	
	Média	131	128	135	
Início Pega (min)	Desv. Pad.	6	5	7	≥ 60
NBR NM 65	Nº de Amostras	8	8	4	
	Média	185	181	190	
Fim Pega (min)	Desv. Pad.	6	7	11	≤ 600
NBR NM 65	Nº de Amostras	8	8	4	
	Média				
Exp. Quente (mm)	Desv. Pad.				≤ 5
NBR 11582	Nº de Amostras				
	Média	29,5	31,2		
R 1 dia (Mpa)	Desv. Pad.	0,59	0,89		≥ 14,0
NBR 7215	Nº de Amostras	8	8		
	Média	41,5	42,5		
R 3 dias (Mpa)	Desv. Pad.	0,75	0,69		≥ 24,0
NBR 7215	Nº de Amostras	8	8		
	Média	46,2	46,9		
R 7 dias (Mpa)	Desv. Pad.	0,65	0,36		≥ 34,0
NBR 7215	Nº de Amostras	8	8		
	Média	55			
R 28 dias (Mpa)	Desv. Pad.	0,74			
NBR7215	Nº de Amostras	8			

Tabela 4.3 – Caracterização do cimento Portland CPV ARI Plus – Continuação

ENSAIOS	PERÍODO	17.01.2015	05.02.2015	24.02.2015	LIMITES NBR5733
		03.02.2015	21.02.2015		
ANÁLISE QUÍMICA (%)					
PF 1000°C	NBR NM 18	3,61	3,45		≤ 4,5
SiO ₂	NBR 14656	19,48	19,39		
R.I.	NBR NM 15	0,85	0,81		≤ 1,0
Al ₂ O ₃	NBR 14656	4,99	5,04		
Fe ₂ O ₃	NBR 14656	2,86	2,92		
CaO	NBR 14656	63,16	63,49		
MgO	NBR 14656	0,77	0,75		
SO ₃	NBR 14656	2,94	3,07		≤ 4,5
CO ₂	NBR NM 20	2,7	2,56		≤ 3,0
K ₂ O	NBR 14656	0,79	0,8		
PF 500°C	IT Holcim Equação	0,68	0,71		
C ₃ A (Teórico)	Bogue	7,94	8,1		

Fonte: Adaptado de Holcim, 2015.

A areia utilizada foi a industrial, fornecida pela Construtora Martins Lanna, oriunda da trituração do gnaiss (Tabela 4.4).

Tabela 4.4 – Caracterização da areia

Dados		Peneiras		Peso Retido 1	Peso Retido 2	Porcentagem (%)		
Empresa:	Construtora Martins Lanna	Nº	Abertura (mm)	(g)	(g)	Retida	Pas. Acu.	Retido Acum.
Data de coleta:	11/05/2015							
Horário da coleta:	14:20	3"	75	0,00	0,00	0,0	100,0	0,0
Material amostrado:	Areia Grossa Lavada	2 ½"	63,5	0,00	0,00	0,0	100,0	0,0
Local de coleta:		2"	50	0,00	0,00	0,0	100,0	0,0
Anomalias Visuais:	Nenhuma	1 ½"	38	0,00	0,00	0,0	100,0	0,0
Observações		1 ¼"	32	0,00	0,00	0,0	100,0	0,0
		1"	25	0,00	0,00	0,0	100,0	0,0
Resultados		¾"	19	0,00	0,00	0,0	100,0	0,0
Módulo de Finura (NBR-7211/2009)	2,75	½"	12,5	0,00	0,00	0,0	100,0	0,0
Dimensão Máxima (mm)	6,30	¾"	9,5	0,00	0,00	0,0	100,0	0,0
Massa Específica (NBR-9776)	2,62	¼"	6,3	0,00	0,00	0,0	100,0	0,0
Massa Unitária Seca (NBR-7251)	1,64	4	4,8	8,18	8,12	0,4	99,6	0,4
Massa Unitária Úmida (NBR-7251)	1,33	8	2,4	378,57	384,92	20,0	79,6	20,4
Peso do Material Úmido (g)	4111,00	16	1,2	386,17	386,98	20,2	59,4	40,6
Peso do Material Seco (g)	3820,50	30	0,6	306,34	305,28	16,0	43,3	56,7
Umidade do Material (%)	7,07	50	0,3	292,46	310,10	15,8	27,6	72,4
Material Pulverulento (%) (NBR-7211)	6,24	100	0,15	230,94	230,80	12,1	15,5	84,5
Impurezas Orgânicas (NBR-7220)	-	200	0,075	178,70	174,59	9,2	6,2	93,8
Torrões de argila (NBR-7216)	-	Fundo		129,34	109,01	6,2	0,0	100,0
Absorção de água (NBR-9777)	-	Soma		1910,70	1909,80	-	-	-

Fonte: Adaptado de Martins Lana, 2015.

A areia foi lavada para se remover o excesso de finos e, após a secagem em estufa, foi separada em faixas granulométricas de acordo com as peneiras de 1,2

mm; 0,6 mm; 0,3 mm e 0,15 mm. Tal procedimento se justificou, pois se utilizou o traço recomendado para determinação da resistência do cimento conforme NBR 7215 (1996).

A água utilizada foi a fornecida pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA), cujas composições física e química, no período dos experimentos, são apresentadas na Tabela 4.5. Esses resultados foram obtidos no site www.copasa.com.br e se referem ao mês março de 2015.

Tabela 4.5 – Propriedades físicas e químicas da água

Parâmetro	Unidade	Número de amostras				Valor	
		Mínimo	Analisadas	Fora padrão	Que atende	Médio	Limites
Cloro	mg/L Cl	619	734	0	734	1.12	0.2 a 2
Coliformes Totais	NMP/100mL	619	734	18	716	97.55%	Obs.
Cor	UH	143	215	2	213	0.31	15
Escherichia coli	NMP/100mL	619	734	0	734	-	Obs.
Fluoreto	mg/L F	0	95	5	90	0.73	0.6 a 0.85
Turbidez	uT	619	735	11	724	0.51	5
pH		0	215	0	215	8.05	6 a 9.5

Fonte: Adaptado de Copasa.

4.2 Métodos

O estudo foi realizado em três diferentes etapas: 1) fabricação e caracterização física/mecânica das amostras; 2) determinação da condutividade térmica pelo método da placa quente; 3) avaliação da difusividade térmica das amostras utilizando modelamento matemático de difusão de calor.

4.2.1 Fabricação e caracterização física/mecânica dos compostos cimentícios

Para os ensaios de termografia e de condutividade pelo método da placa quente, foram confeccionados corpos de prova de 22,5 x 11 x 5,5 cm, que após cura de

28 dias foram ensaiados. Tal medida equivale ao tamanho padrão do tijolo cerâmico maciço utilizado na construção civil.

Para moldagem das amostras, foram fabricadas formas de madeira medindo internamente 22,5 x 11 x 5,5 cm. A forma de madeira foi revestida com material melamínico buscando facilitar a desmoldagem dos corpos de prova (Figura 4.9).

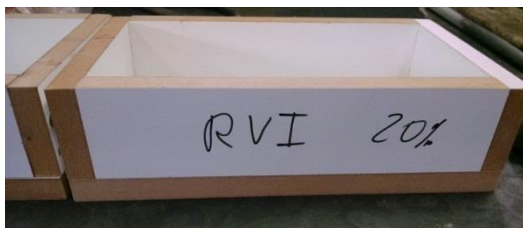


Figura 4.9 – Forma de madeira identificada.

Foram confeccionadas 27 amostras, sendo 3 de referência e 24 contendo resíduo de vidro. As amostras de referência foram confeccionadas com cimento, água e areia, na proporção em massa de 1 de cimento para 3 de areia, e 0,5 de água para 1 de aglomerante. Para as demais amostras, foram utilizados os resíduos de vidro produzidos em laboratório (incolor e âmbar) e os resíduos industriais (lavado e não lavado) em substituição a 10% e 20% de cimento (Tabela 4.6). Considerando que os resíduos de vidro apresentam atividade pozolânica, no cálculo da relação água aglomerante (igual a 0,5), considerou-se como aglomerantes hidráulicos o cimento e os resíduos de vidro.

Tabela 4.6 – Nomenclatura das amostras conforme adição de resíduo

Descrição	Nomenclatura
Traço referência	R
Traço com adição de 10% de substituição de vidro incolor	RVI 10%
Traço com adição de 20% de substituição de vidro incolor	RVI 20%
Traço com adição de 10% de substituição de vidro âmbar	RVA 10%
Traço com adição de 20% de substituição de vidro âmbar	RVA 20%
Traço com adição de 10% de substituição de vidro da indústria	RV 10%
Traço com adição de 20% de substituição de vidro da indústria	RV 20%
Traço com adição de 10% de substituição de vidro da indústria lavado	RVL 10%
Traço com adição de 20% de substituição de vidro da indústria lavado	RVL 20%

Para o cálculo da quantidade de material utilizado na substituição do cimento por resíduo de vidro, levou-se em consideração que a massa específica do cimento é

diferente da massa específica do vidro. Para não existir diferença no volume do aglomerante, no caso de amostras feitas com adição de vidro, foi necessário calcular a massa equivalente do resíduo conforme a Equação 4.1.

$$M_{resíduo} = M_{cimento} \times \frac{\gamma_{resíduo}}{\gamma_{cimento}} \quad (4.1)$$

em que:

$M_{resíduo}$ = massa do resíduo, em kg, $M_{cimento}$ = massa do cimento, em kg,

$\gamma_{resíduo}$ = massa específica do resíduo, em kg/dm³ e $\gamma_{cimento}$ = massa específica do cimento em kg/dm³.

Para a confecção das amostras, o material (areia, cimento e resíduo) foi pesado (seco) em balança de precisão de 0,1 g e colocado na masseira para mistura manual. Em seguida, foi adicionada a água aos poucos até que a massa se mostrasse homogênea (Figura 4.10).



Figura 4.10 – Pesagem e mistura do material.

A seguir, a mistura foi colocada até a metade da forma de madeira devidamente identificada e levada para a mesa vibratória para adensar o material. Após o adensamento, a forma foi totalmente preenchida com a mistura e novamente levada a mesa vibratória para adensamento final conforme mostrado na Figura 4.11.



Figura 4.11 – Material sendo vibrado.

Após a confecção das amostras (Figura 4.12), as formas foram cobertas com filme plástico, para se impedir a evaporação da água. Transcorridas as primeiras 24 horas, as amostras foram desmoldadas, identificadas e armazenadas em câmara úmida por 28 dias, para a cura.

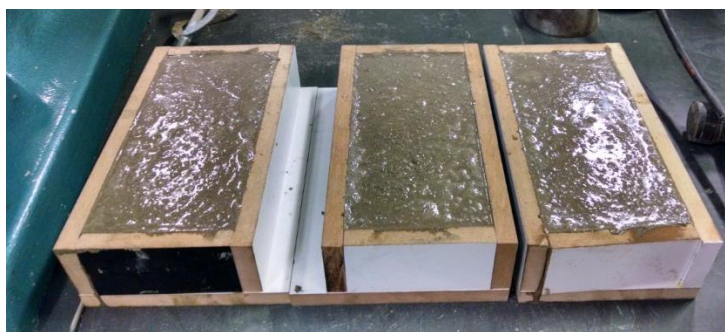


Figura 4.12 – Amostras moldadas.

As amostras (3 de cada tipo de material) produzidas foram caracterizadas quanto à massa específica aparente, utilizando-se uma balança da marca Ohaus, modelo Explore, com capacidade máxima de 32.000 g e resolução de 0,1 g. Também foram produzidos 6 corpos de prova cilíndricos (5 mm de diâmetro por 10 mm de comprimento) de forma a caracterizar os compósitos produzidos quanto à resistência à compressão, de acordo com a NBR 7215 (1996). Essas amostras foram ensaiadas em uma prensa hidráulica da marca EMIC.

4.2.2 Determinação da condutividade térmica pelo método da placa quente protegida

a) Montagem do experimento

O experimento se baseou no método da Placa Quente Protegida descrito na NBR 15220 (ABNT, 2003) - Parte 4: medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida. A Norma estabelece o método para determinação, em regime permanente, da resistência térmica e da condutividade térmica de materiais sólidos. O método consiste em colocar duas amostras idênticas de forma simétrica entre uma placa quente e duas placas frias,

de modo a provocar um fluxo de calor unidirecional conforme mostrado, esquematicamente, na Figura 4.13.



Figura 4.13 – Diagrama fluxo de calor.

Para realizar as medições de condutividade térmica, foi construída uma bancada de trabalho estruturada em MDF (*Medium Density Fiberboard*) e revestida internamente com placas isolantes da Texfiber AT 1200 com 25,4 mm de espessura (Figura 4.14).



Figura 4.14 – Bancada de teste.

Para facilitar a execução dos experimentos, a bancada foi montada em três seções. Na seção do meio foi instalada uma placa quente e nas seções das extremidades foi instalada uma placa fria (Figura 4.15).

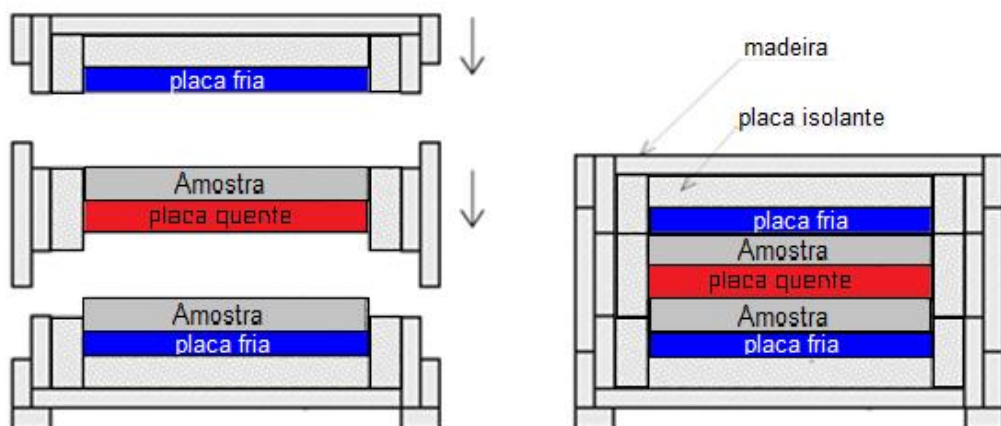
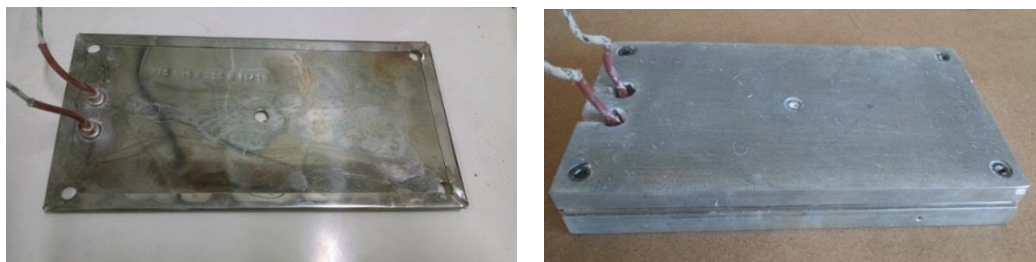


Figura 4.15 – Esquema de construção da bancada.

A placa quente, responsável por aquecer as amostras, foi construída com o mesmo tamanho das amostras (22,5 x 11 cm), utilizando-se uma resistência plana de mica com 500 W de potência e resistência de 1,7 Ω entre duas placas de alumínio (Figura 4.16).



(a) Resistência plana em mica.

(b) Conjunto da placa quente

Figura 4.16 – Placa quente.

O aquecimento da resistência da placa foi feito por uma fonte de corrente contínua da marca TDK Lambda, modelo AC/DC (Figura 4.17). A fonte possui controle preciso, em tempo real, da corrente e tensão aplicadas na resistência, o que permitiu o controle da potência dissipada em cada momento.



Figura 4.17 – Fonte de corrente contínua da marca TDK Lambda, modelo AC/DC.

Para controle da temperatura e do processo, foi utilizado um equipamento tipo PID da marca Contemp, modelo CPM45 (Figura 4.18), para monitorar ativamente a potência dissipada na resistência, mantendo estável a temperatura da placa quente com precisão de 0,5 $^{\circ}\text{C}$.



Figura 4.18 – Controlador de temperatura e processo Contemp, modelo CPM45.

Utilizou-se um termopar colocado na placa quente, que serviu de retorno para o controlador de temperatura. Além disso, para a medição de temperatura nas amostras e nas placas frias foram utilizados termopares do tipo K e do tipo T. Todos esses medidores de temperatura foram ligados à unidade de aquisição, comutação e registro de dados, Agilent 34970A (Figura 4.19), equipada com o módulo 34902A e *software* BenchLink Data Logger 3, para a coleta dos dados. O Agilent foi programado para registrar as medições a cada 1 minuto, durante os ensaios.



Figura 4.19 – Unidade de aquisição de dados.

As placas frias têm a função de dissipar o calor, resfriar o sistema e produzir um fluxo de calor unidirecional nas amostras. Foram instaladas duas, uma em cada extremidade da bancada de ensaio. As placas em alumínio foram usinadas com uma rede de dutos internos em forma de espiras, por onde a água circula e mantém constante a temperatura da placa. Utilizando-se mangueiras plásticas, as placas foram conectadas ao sistema de circulação e resfriamento (à base de água) do laboratório de Epitaxia de Feixe Molecular do Departamento de Física/ICEX – UFMG. A temperatura da água foi monitorada por termopar posicionado sobre uma das placas frias, que mostrou uma variação inferior a 1 °C durante os ensaios (Figura 4.20).



Figura 4.20 – Placa fria instalada na base da bancada.

Para a montagem da bancada de trabalho, as amostras a serem submetidas ao ensaio foram cortadas ao meio, utilizando-se uma serra circular para mármore, produzindo duas amostras com dimensões aproximadas de 22,5 x 11 x 2,5 cm. Na face das amostras foram abertos sulcos para acomodar os termopares e monitorar sua temperatura superficial (Figura 4.21).



Figura 4.21 – Vista da amostra cerradas e do sulco para acomodar o termopar.

Os termopares foram fixados nos pequenos sulcos abertos nas amostras, de forma que os contatos ficassem completamente aderidos aos corpos de prova, sem interferir no contato entre a amostra e as placas (Figura 4.22).

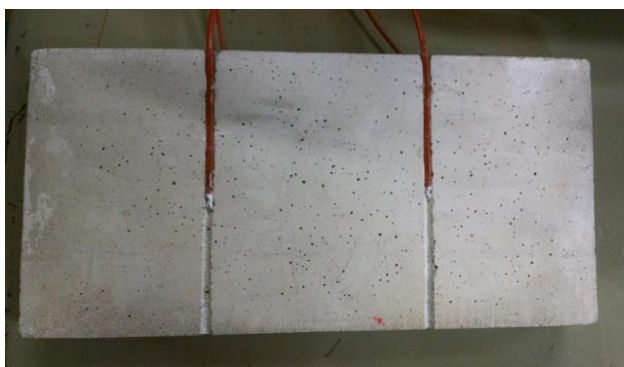


Figura 4.22 – Termopares fixados na amostra.

A face em contato com as placas de aquecimento e resfriamento foi coberta com pasta térmica para melhorar o contato térmico entre a amostra e as placas (Figura 4.23).



Figura 4.23 – Pasta térmica na amostra.

A montagem geral do ensaio pode ser vista na Figura 4.24.



Figura 4.24 – Montagem do ensaio.

b) Cálculo da condutividade térmica

O cálculo da condutividade térmica [K] fundamenta-se na hipótese de que a troca de calor ocorre por condução no corpo de prova. Ao aquecer a amostra em uma das faces e resfriar a outra, cria-se um fluxo de calor unidirecional. Desconsideram-se as perdas laterais da amostra e afirma-se que toda a potência dissipada pela placa quente é direcionada ao aquecimento da amostra. A condutividade térmica foi calculada neste trabalho através da Equação 4.2.

$$K = \frac{q/A}{\Delta T/e} \quad (4.2)$$

em que [q] é o fluxo de calor, [A] é a área da superfície em contato com a placa quente ou fria, [ΔT] é a diferença de temperatura nas faces das amostras, e [e] é

a espessura da amostra. O fluxo de calor incidente em cada amostra, obtido a partir do valor da potência dissipada pela resistência, é dado por:

$$e = \frac{V.I}{2} \quad (4.3)$$

em que [V] é a tensão e [I] é a corrente, lidos diretamente no display da fonte de potência.

A placa quente, por meio do controlador de temperatura, foi mantida à temperatura constante de 50 °C. Os termopares fixados nas faces das amostras registraram as temperaturas durante todo ensaio por meio do *software* BenchiLink Data Logger, o que permitiu a obtenção de um valor médio de temperatura para cada face da amostra, possibilitando determinar o valor de $[\Delta T]$.

Para o cálculo da condutividade térmica [K], foram utilizadas 4 medições com intervalos de 30 minutos, após se atingir o regime permanente. A Figura 4.25 mostra o registro das temperaturas em um dos ensaios. Percebe-se o momento em que o regime permanente foi alcançado.

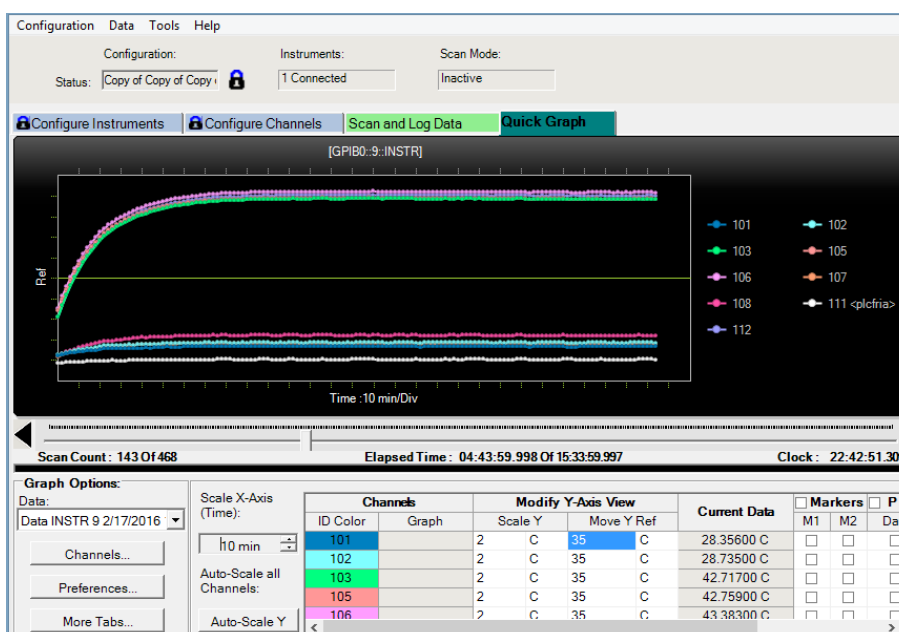


Figura 4.25 – Resultados das medições de temperatura obtidos por meio da interface do *software* BenchiLink Data Logger 3.

Conforme Teixeira (2012), o resultado de medição de uma grandeza física está associado a algum tipo de incerteza que pode ser monitorada, quantificada e reduzida, entretanto não eliminada. Para o cálculo da condutividade térmica [K], as grandezas associadas à incerteza das medições são: fluxo de calor, área das amostras, diferença de temperatura das faces das amostras [ΔT] e espessura das amostras.

Neste trabalho, a avaliação das incertezas das medições da condutividade térmica [K] se deu por meio do *software* EES (*Engineering Equation Solver*) que possui uma rotina para o cálculo de incertezas propagadas. O EES utiliza o método descrito por Taylor e Kuyatt (1994) para determinar a incerteza propagada e é dado por:

$$U_y = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial Y}{\partial X_i}\right)^2 U^2(X_i)} \quad (4.4)$$

em que Y é a relação funcional das grandezas correlacionadas ao cálculo do mensurando, e U (X_i) é uma incerteza padrão, avaliada em Tipo A ou Tipo B, das estimativas de entrada X_i .

A incerteza do cálculo do fluxo de calor está relacionada à incerteza de medições da corrente [I] e da tensão [V], cujos valores foram fornecidos pelo fabricante da fonte e são respectivamente 0,05 A e 0,005 V. A incerteza atribuída à medição da área e da espessura está relacionada ao instrumento de medição graduado, que foi um paquímetro provido com um nônio de 20 divisões, com resolução de 0,05 mm. A incerteza desse instrumento foi considerada a metade do valor final de escala, isto é 0,025 mm. Nas medições de temperatura, foram utilizados termopares tipo T e K, cuja incerteza de medição foi informada pelo fabricante como sendo 1 °C. Na Figura 4.26, pode ser vista a interface do *software* EES com os dados de entrada das incertezas de medição.

Enter a numerical value or variable name

Variable	Value	Units	Absolute Uncertainty	Relative Uncertainty
b	0,225		0,00225	
dt	9,23		1	
h	0,11		0,000025	
i	3,73		0,05	
l	0,019		0,000025	
V	8,83		0,005	

OK Cancel

Figura 4.26 - Dados de entrada da incerteza das medições.

4.2.3 Determinação da difusividade térmica utilizando modelamento matemático de difusão de calor

A difusividade dos compostos cimentícios foi avaliada com base no modelo matemático de transferência de calor unidimensional em regime transiente para um sólido semi-infinito (Equação 3.11). Para isto, fez-se necessária a determinação experimental da variação de temperatura superficial do bloco ao longo do tempo, sob condições experimentais pertinentes ao modelo teórico. Esse perfil foi determinado utilizando-se termografia, o que exigiu a determinação da emissividade das amostras.

a) Determinação da emissividade térmica das amostras

A emissividade térmica (ϵ) das amostras foi estimada por meio da técnica de emissividade conhecida (no caso, uma fita crepe). Neste método, é necessário que os materiais estejam em equilíbrio térmico. O procedimento iniciou-se pela fixação de um pedaço de fita crepe na amostra e inserção na câmara termográfica do valor da emissividade da fita ($\epsilon = 0,95$). O ponto de referência da câmara para leitura da temperatura foi posicionado sobre a fita crepe. Automaticamente, o valor da temperatura pôde ser lido no display da câmara, conforme mostrado na Figura 4.27.



Figura 4.27 – Termograma com a ferramenta “ponto”.

Determinada a temperatura da fita, posicionou-se o ponto de leitura da câmara sobre outros locais da amostra que não continham a fita. O valor da emissividade registrada na câmara termográfica foi ajustado até que a temperatura desses pontos da amostra se igualou à temperatura da fita crepe, obtendo-se, assim, o valor da emissividade térmica do material.

A incerteza de medição da emissividade foi obtida mediante cálculo do desvio padrão das medidas. Utilizando-se o *software Flir Quick Report* foram criados 7 pontos no termograma (Figura 4.28), na área correspondente à área da amostra que não havia fita crepe. Nesses pontos, o valor da emissividade deveria ser alterado até que a temperatura fosse igual à registrada sobre a fita crepe. Como a emissividade do material e da fita crepe é a mesma, não houve alteração de valores de temperatura, pois em todos os pontos para os quais o cursor foi direcionado continham o mesmo valor de temperatura que foi registrado sobre a fita crepe.

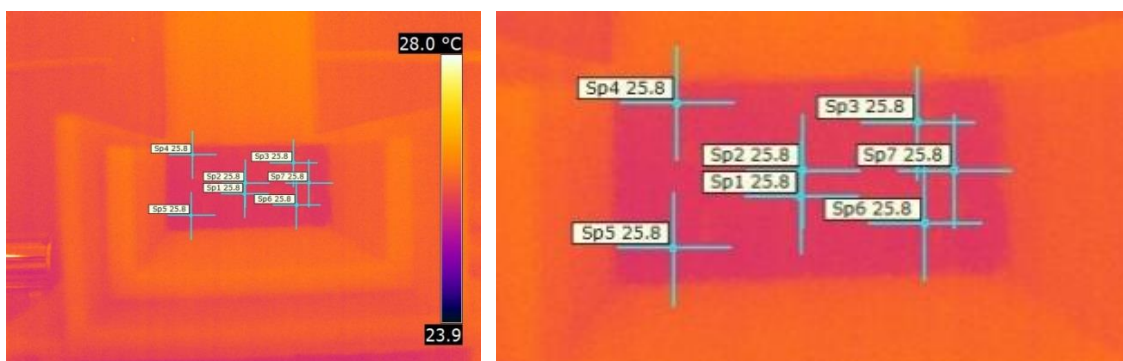


Figura 4.28 – Termograma com pontos de medição de temperatura.

b) Determinação do perfil de temperatura

A metodologia utilizada neste trabalho para determinar o perfil de temperatura de amostras foi desenvolvida por Barbosa (2014) com base em ensaios termográficos. Para que o perfil de temperatura fosse determinado sob condições experimentais que validassem a utilização do modelo matemático de transferência de calor unidimensional, em regime transiente para um sólido semi-infinito [$T(x \rightarrow \infty, t) = T_i$], foi necessária a construção de um túnel de teste (Figura 4.29) cuja posição de análise correspondesse à espessura do bloco em estudo.

O túnel de teste foi revestido internamente de material isolante (placa isolante AT 1200 com 25,4 mm da Texfiber) de forma que todas as faces da amostra ficassem em contato com o material isolante, exceto a face identificada, que recebeu o fluxo de calor, e a face oposta a esta. O fluxo de calor constante foi gerado por uma lâmpada halógena de 127 V de tensão e 500 W de potência e pôde ser quantificado devido à uma condição de vedação que impediu a perda de energia térmica para o ambiente. A lâmpada produziu na amostra um fluxo de calor unidirecional.

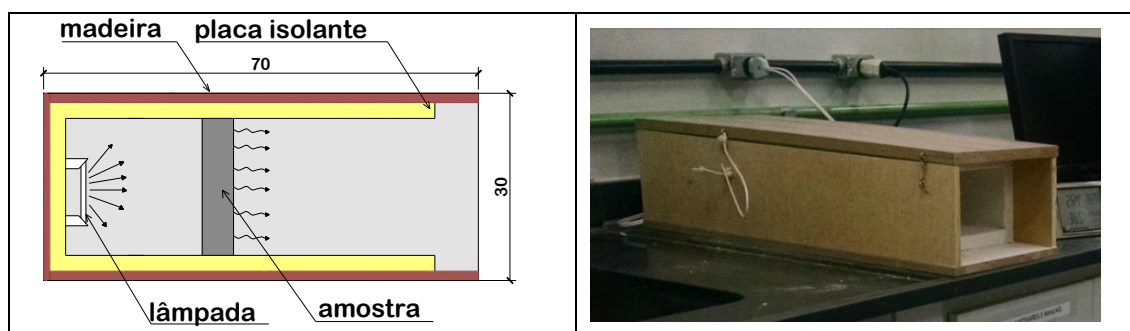


Figura 4.29 – Túnel de teste.

A parte superior da caixa foi fixada na lateral do fundo por dobradiças, sendo possível abrir a caixa e posicionar as amostras. A leitura da temperatura superficial dos blocos foi feita por uma termocâmera Flir Systems, modelo SC660, posicionada a 0,80 m de distância da parte frontal do túnel de madeira (Figura 4.30).



Figura 4.30 – Câmera termográfica registrando imagens.

Para iniciar a aquisição das imagens, foi necessário calibrar a câmera termográfica com dados de entrada (Figura 4.31): emissividade térmica do material, determinada conforme descrito no item 4.2.2; temperatura atmosférica e umidade do ar que foram registrados pelo Relógio Termo Higrômetro Testo 622; a temperatura refletida foi considerada tendo o mesmo valor da temperatura atmosférica e a distância da câmera até a amostra que foi aferida com uma trena metálica (80 cm).



Figura 4.31 – Termograma com dados de entrada.

As amostras foram levadas com antecedência para o laboratório, com a finalidade de entrarem em equilíbrio térmico com o ambiente e foram colocadas no túnel de teste pelo menos 24 horas antes da realização do ensaio, com o mesmo objetivo de que o material estivesse em equilíbrio térmico com o ambiente, que nesse caso é o túnel de teste. Todas as amostras ensaiadas foram colocadas no túnel de

teste com a mesma distância (Figura 4.32) em relação à lâmpada e se teve o cuidado de fazer uma boa vedação para que o fluxo de calor gerado pela lâmpada não escapasse para a parte frontal da câmara.



Figura 4.32 – Amostra posicionada na câmara.

c) Cálculo da difusividade térmica

Os valores de temperatura superficial obtidos pela termografia foram tratados como valores de entrada para a Equação 3.11, assim como o tempo em segundos, enquanto a difusividade $[\alpha]$ foi uma variável de saída. A condutividade térmica $[K]$ também é um dado necessário para a resolução da Equação 3.11. Utilizou-se os dados obtidos no ensaio da placa quente.

Outro parâmetro necessário para se determinar a difusividade térmica de um material é o fluxo de calor $[q_x]$ que incide sobre ele. No experimento realizado, a lâmpada emite energia térmica em todas as direções e nem toda essa energia será interceptada pela superfície da amostra. O fluxo de calor $[q_x]$ foi determinado em conformidade com Barbosa (2014), utilizando-se o fator de forma da radiação, que quantifica a fração da radiação emitida pela lâmpada e é interceptada pela amostra, e pode ser calculada pela Equação 4.5:

$$q''_x = F \frac{Pot}{A} \quad (4.5)$$

em que $[q_x]$ é o fluxo de calor (W/m^2), $[F]$ é o fator de correção, $[P_{ot}]$ é a potência da lâmpada (W), $[A]$ é a área da amostra (m^2). A correção apresentada por $[F]$ se mostrou efetiva na determinação do fluxo de calor equivalente, mesmo ocorrendo transferência de calor por convecção no interior da câmara. A Figura 4.33 mostra a interface do EES para o cálculo do fluxo de calor com os valores de entrada $[a]$ e $[b]$ que são respectivamente a distância do eixo da lâmpada até a amostra e a metade da altura da amostra.

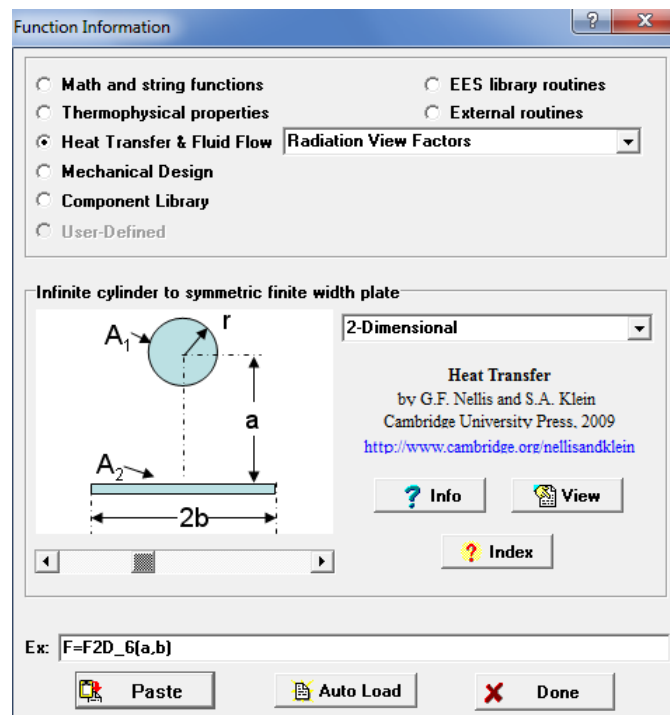


Figura 4.33 – Interface do EES.

Com esses dados, foi possível aplicar a Equação 3.11 e devido à complexidade da equação foi necessário o uso do *Software* EES que possui uma biblioteca embutida com várias funções de propriedades termofísicas, entre elas a condução transiente (Figura 4.34) que foi utilizada neste trabalho.

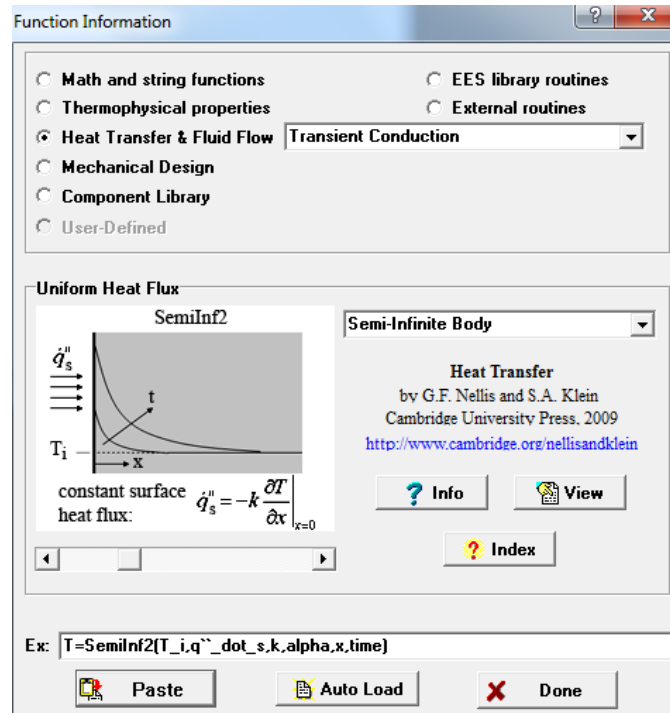


Figura 4.34 – Interface do EES com função de condução transiente.

Após ser selecionada e inserida a função, o *Software* (Figura 4.35) foi alimentado com as constantes do modelamento matemático: temperatura inicial da amostra (lida) no tempo 0 s, fluxo de calor (descrito em tópico anterior), condutividade térmica [K] (descrita no Item 4.2.4), espessura do bloco (medido com paquímetro) e os valores da temperatura em função do tempo (obtidos na sequência de termogramas realizados durante o ensaio) (Figura 4.36).

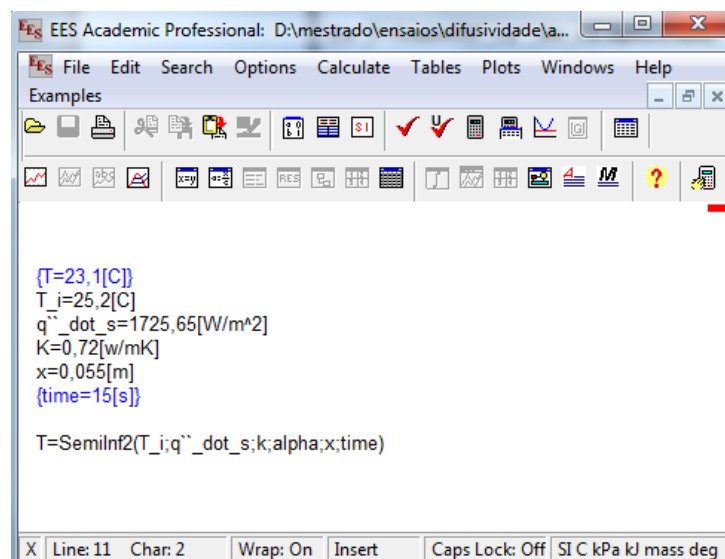


Figura 4.35 – Interface do EES com parâmetros inseridos.

	α	time [s]	T [C]
2.70			
Run 1		0	25,6
Run 2	0,00001883	15	25,6
Run 3	0,000009413	30	25,6
Run 4	0,000006276	45	25,6
Run 5	0,000004381	60	25,5
Run 6	0,000003765	75	25,6
Run 7	0,00000292	90	25,5
Run 8	0,000002276	105	25,4
Run 9	0,00000219	120	25,5
Run 10	0,00000177	135	25,4
Run 11	0,000001593	150	25,4

Figura 4.36 – Interface do EES com valores de temperatura inseridos.

O valor da difusividade térmica, obtida por este método, foi determinado por meio do cálculo da média dos valores de difusividade encontrados para cada medição de tempo.

Neste trabalho, o método adotado considerou os valores compreendidos entre o início da alteração de temperatura na face externa da amostra até a elevação de 2 °C na mesma face. No sólido semi-infinito, toda sua espessura [x] deve apresentar a temperatura constante igual a temperatura inicial [Ti], em todo instante de tempo [t]. Na metodologia desenvolvida por Barbosa (2014), para se atender à condição de contorno do sólido semi-infinito que tem apenas uma superfície identificada, no momento em que foi registrada alteração de 2 °C na face externa da amostra, o ensaio era encerrado. A temperatura da face externa foi monitorada por termografia e, devido à incerteza de medição da câmara termográfica Barbosa (2014), considerou-se que a elevação de até 2 °C não descumpriu a condição de contorno de sólido semi-infinito.

d) Avaliação de incertezas

Na avaliação da incerteza da difusividade térmica, de acordo com Barbosa (2014), não há como atribuir um único valor de incerteza para a medição do material, pois o valor da difusividade térmica, obtido por esse método, é composto por várias medições, tendo cada uma um valor de incerteza associado. No caso específico deste trabalho, para cada amostra foram feitas em torno de 50 medições, o que representa 50 incertezas de medições para uma única amostra. Como foram ensaiadas 3 amostras de cada material, optou-se por avaliar a incerteza das medições pelo método estatístico, utilizando os componentes do Tipo A.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados são apresentados em 3 blocos: 1) Caracterização física/mecânica das amostras, 2) Determinação da condutividade pelo método da placa quente, 3) Avaliação da difusividade térmica das amostras utilizando modelamento matemático de difusão de calor.

5.1 Fabricação e Caracterização Física/Mecânica dos Compostos Cimentícios

As amostras foram caracterizadas pelo ensaio de massa específica e resistência à compressão. O resultado do ensaio de determinação da massa específica aparente está apresentado na Tabela 5.1. Como pode ser observado nos resultados, há pouca variação nos valores da massa específica entre as amostras dos diferentes materiais. A diferença máxima entre os valores obtidos é de 3,73%.

Tabela 5.1 – Massa específica

Massa específica (g/cm ³)								
R	RVL 10%	RVI 20%	RVA 10%	RVA 20%	RS10%	RS 20%	RL 10%	RL 20%
2,14	2,11	2,15	2,06	2,14	2,10	2,07	2,06	2,11

A Figura 5.1 apresenta os resultados da resistência à compressão axial das amostras cilíndricas com idade de 28 dias. Foram ensaiados 6 corpos de prova para cada situação e os resultados apresentados são da média aritmética com a barra de erros referente à incerteza de medições com intervalo de confiança de 95%. Os valores mostram que o uso do vidro incolor e âmbar na proporção de 10% não provocou uma elevação da resistência mecânica nestes corpos de prova em relação à amostra referência, como apresentado por Sales (2014), que utilizou o mesmo resíduo. A adição de 20% de resíduo produziu uma diminuição da resistência mecânica em relação à amostra referência, que também divergiu dos valores de Sales (2014), que se mostraram similares ao valor da amostra de referência. Em relação ao resíduo da indústria, nota-se que a adição de 10% de resíduo lavado (RL10%) não provocou alteração na resistência mecânica

comparado ao valor da amostra referência. Nos demais resíduos da indústria, como também demonstrado por Antônio (2012), houve redução na resistência mecânica quando comparado com a amostra referência.

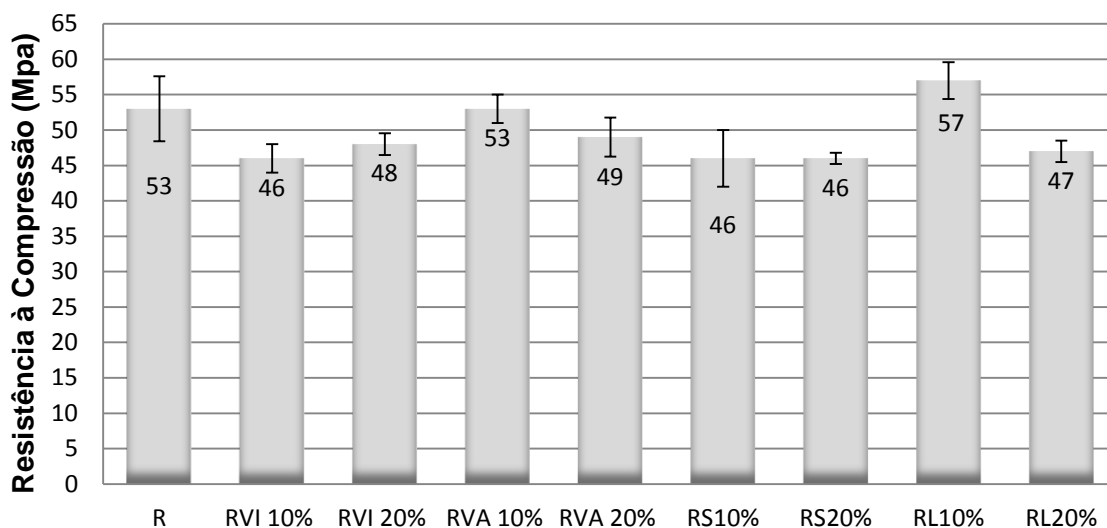


Figura 5.1 – Valores de resistência à compressão axial.

5.2 Determinação da Condutividade pelo Método da Placa Quente

Na Figura 5.2, são apresentados os perfis de temperatura medidos no ensaio da amostra referência [R] durante a aquisição de dados que foram registradas pelo Datalogger a cada 1 minuto. O tempo de duração deste ensaio foi de 3h 42 min e o regime estacionário foi alcançado por volta de 100 minutos de ensaio, mas, para o cálculo de condutividade, foi considerada a primeira medição, no tempo 120 minutos.

A linha superior representa as medidas registradas pelo termopar alojado na placa quente, que teve sua temperatura estabilizada em 50 °C pelo controlador de temperatura. As 4 linhas logo abaixo, TA1, TA2, TA3 e TA4 se referem às temperaturas medidas pelos termopares localizados na face dos blocos que ficaram em contato com a placa quente. As linhas denominadas TA5, TA6, TA7 e TA8 se referem às temperaturas medidas pelos termopares localizados na face dos blocos que ficaram em contato com a placa fria. E as duas linhas na parte inferior do gráfico mostram a medição de temperaturas nas placas frias.

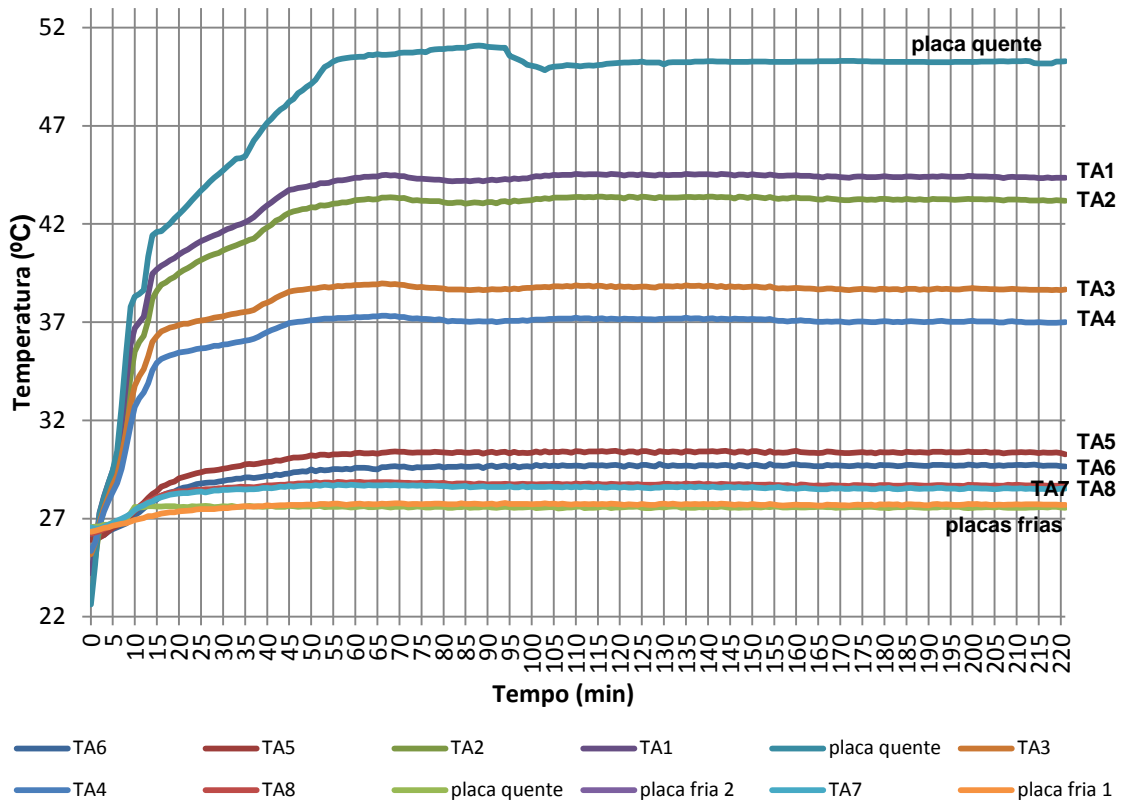


Figura 5.2 – Valores de temperatura de ensaio amostra [R].

Considerou-se que o regime permanente foi estabelecido quando as temperaturas das amostras não variaram mais do que $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, valor considerado como ruído de sinal. A Tabela 5.2 mostra as medições das temperaturas realizadas no regime permanente, bem como os respectivos $[\Delta t]$ da amostra referência [R].

Tabela 5.2 – Temperaturas registradas na amostra Referência.

Amostra R	Temperatura bloco inferior		Temperatura bloco superior		ΔT bloco inferior	ΔT bloco superior
	Face inferior	Face superior	Face inferior	Face superior		
0 min	29,37	43,89	41,08	28,48	14,52	12,60
30 min	29,52	43,98	41,15	28,47	14,46	12,68
60 min	29,54	43,97	41,12	28,50	14,43	12,62
90 min	29,54	43,93	41,06	28,43	14,40	12,63

O fluxo de calor $[q]$ que incidiu sobre as amostras foi determinado pela Equação 4.3 por meio dos valores da tensão $[V]$, da corrente $[I]$, que também foram registrados a cada minuto e são apresentados na Tabela 5.3. O fluxo de calor $[q]$ em cada amostra foi considerado como sendo metade da potência aplicada.

Tabela 5.3 – Valores de tensão, corrente e potência da amostra Referência.

Amostra R	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Fluxo de Calor W/m ²
120 min	9,17	4,3	39,43	19,72
150 min	9,17	4,3	39,43	19,72
180 min	9,17	4,3	39,43	19,72
220 min	9,18	4,31	39,57	19,78

Por meio da Equação 4.2, foi calculada a condutividade térmica [K] da amostra. A Tabela 5.4 apresenta os valores da condutividade térmica para cada tempo registrado, bem como a média da condutividade, que foi o valor adotado para a amostra referência [R].

Tabela 5.4 – Valores de condutividade térmica da amostra Referência.

Amostra R	K bloco inferior	K bloco superior	Condutividade Térmica (W/m.K)
0 min	1,26	1,20	1,23
30 min	1,27	1,19	
60 min	1,27	1,20	
90 min	1,28	1,20	

A Tabela 5.5 mostra valores de condutividade térmica [K] para materiais cimentícios (concreto e argamassa) encontrados na literatura. A consulta à literatura foi necessária para verificar se o valor da condutividade da amostra referência [R] estava dentro da faixa de valores publicados.

Tabela 5.5 – Valores comparativos de condutividade térmica.

Condutividade (W/m.K)	Este trabalho	Rivero	Holman	Kreith	Icropera	NBR 15220
Concreto	1,23	1,74	–	1,8	1,4	1,75
Argamassa		1,10-1,40	1,16	–	1,4	1,15

Como pode ser visto na Tabela 5.5, o valor encontrado na amostra referência [R] como sendo 1,23 W/m.K se encontra dentro da faixa de valores encontrados na literatura para materiais cimentícios. Esses valores variam de 1,10 W/m.K até 1,8 W/m.K.

Para as medições do cálculo da condutividade térmica [K] da amostra referência [R] foi estimado o valor de incerteza expandida das medições conforme suas variáveis. Não se pode afirmar o nível de confiança dos resultados das incertezas, pois não se obteve o nível de confiança dos dados das variáveis de entrada. A Figura 5.3 apresenta a interface do EES com os valores da incerteza de medição de cada parâmetro medido e sua contribuição para a incerteza total de uma medição da amostra referência [R].

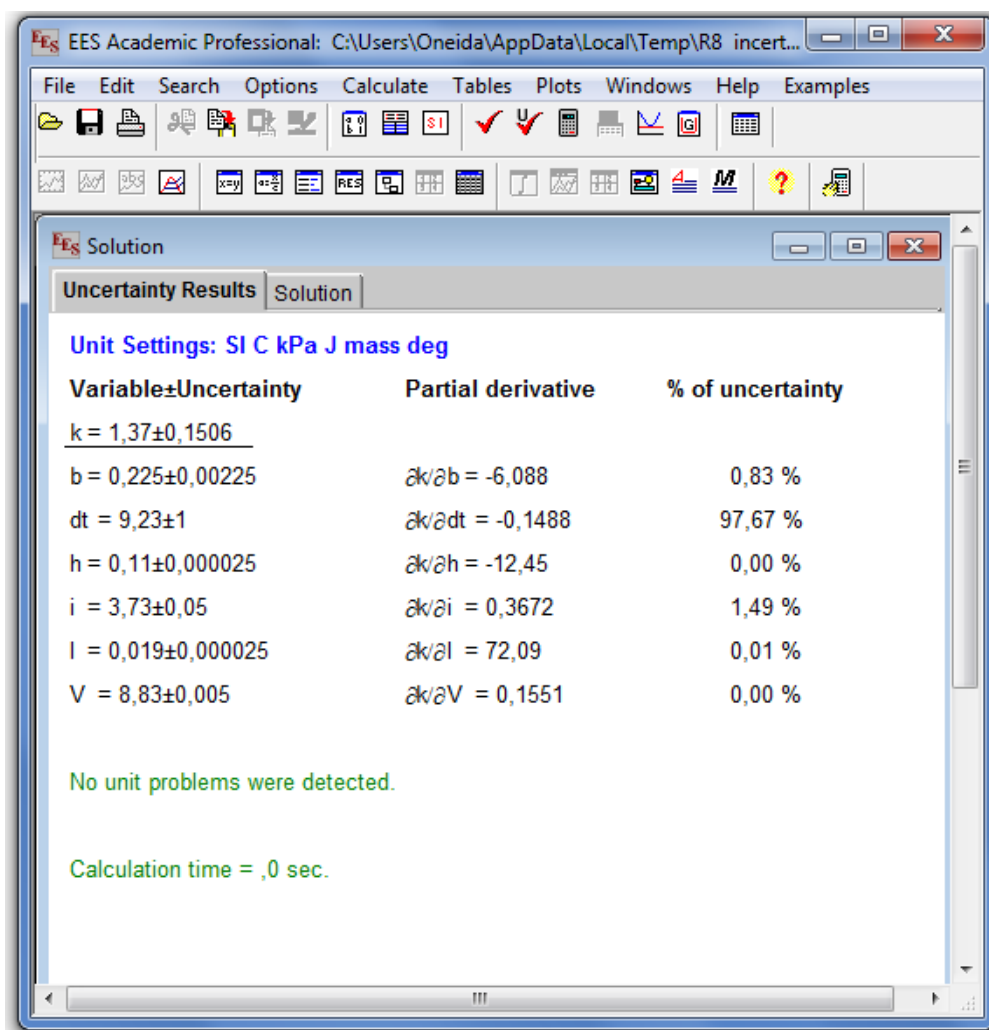


Figura 5.3 – Valores de temperatura de ensaio amostra [R].

É notório na Figura 5.3 que as incertezas da medição realizada pelos termopares [dt] trazem a maior contribuição para a incerteza como um todo. A Tabela 5.6 mostra os resultados levantados para as incertezas das medidas da amostra referência [R] por meio do EES.

Tabela 5.6 – Incerteza de medição da condutividade térmica da amostra Referência.

K bloco inferior e incerteza medição	K bloco superior e incerteza medição	Média de K e incerteza de medição
k=1,26 ±0,08	k=1,20 ±0,09	k=1,23 ±0,09
k=1,27 ±0,08	k=1,19 ±0,09	
k=1,27 ±0,09	k=1,20 ±0,09	
k=1,28 ±0,09	k=1,20 ±0,09	

O valor da condutividade térmica [K] para a amostra referência [R], levando-se em conta a pior condição da incerteza das medidas apresentadas na Tabela 5.5, é equivalente a $1,23 \pm 0,09$. A pior condição de incerteza representa a medida que obteve o maior percentual de incerteza, que neste caso, foi de 7,6%. Mesmo com a incerteza de medição, o valor da condutividade térmica da amostra referência [R], ainda fica dentro da faixa de valores para materiais cimentícios encontrados na literatura (Tabela 5.4).

Os valores de medição utilizados para a determinação da condutividade térmica [K] das demais amostras estão apresentados no Anexo A. A Tabela 5.7 apresenta os valores de condutividade térmica [K] para as amostras com adição de resíduo de vidro. O valor base da condutividade foi determinado pelas médias dos valores de cada amostra, como realizado no cálculo da amostra referência [R]. Também estão apresentados os valores da incerteza expandida de medição para cada medida quem compõe o valor da condutividade térmica [K]. De modo geral, os valores da condutividade térmica para as diferentes amostras com adição de vidro, são muito próximos entre si.

Tabela 5.7 – Condutividade térmica e incerteza de medições

Tempo	K bloco inferior	K bloco superior	Média [K] W/m.K	Incertezas das medições de [K]		Média de K e incerteza de medição
RVI 10%						
0 min	0,98	1,05	1,02	0,98 ±0,10	1,06 ±0,11	k=1,02 ±0,10
30 min	0,98	1,05		0,98 ±0,10	1,06 ±0,11	
60 min	1,03	1,06		0,98 ±0,10	1,06 ±0,11	
90 min	0,97	1,06		0,97 ±0,10	1,06 ±0,11	
RVI20%						
0 min	1,05	0,93	0,95	1,00 ±0,09	0,90 ±0,07	k=0,95 ±0,07
30 min	1,05	0,94		1,01 ±0,09	0,90 ±0,07	
60 min	1,06	0,94		0,99 ±0,09	0,88 ±0,07	
90 min	1,03	0,92		0,97 ±0,08	0,87 ±0,06	
RVA 10%						
0 min	1,13	1,00	1,07	1,13 ±0,07	1,00 ±0,06	k=1,07 ±0,06
30 min	1,14	1,00		1,14 ±0,07	1,00 ±0,06	
60 min	1,14	1,00		1,14 ±0,07	1,00 ±0,06	
90 min	1,14	1,00		1,14 ±0,07	1,00 ±0,06	
RVA 20%						
0 min	1,08	0,89	0,99	1,08 ±0,07	0,89 ±0,06	k=0,99 ±0,06
30 min	0,93	0,89		1,08 ±0,07	0,89 ±0,06	
60 min	0,94	0,89		1,08 ±0,07	0,89 ±0,06	
90 min	1,07	0,89		1,07 ±0,07	0,89 ±0,06	
RS 10%						
0 min	1,07	1,01	1,05	1,07 ±0,07	1,01 ±0,07	k=1,05 ±0,07
30 min	1,08	1,02		1,08 ±0,08	1,02 ±0,07	
60 min	1,07	1,01		1,07 ±0,07	1,01 ±0,07	
90 min	1,08	1,02		1,08 ±0,08	1,02 ±0,07	
RS 20%						
0 min	0,97	1,02	1,00	0,97 ±0,07	1,0 ±0,07	k=1,00 ±0,07
30 min	0,97	1,02		0,97 ±0,07	1,02 ±0,07	
60 min	0,97	1,02		0,97 ±0,07	1,02 ±0,07	
90 min	0,97	1,02		0,97 ±0,07	1,02 ±0,07	
RL 10%						
0 min	0,97	0,97	1,01	0,96 ±0,06	0,97 ±0,06	k=1,01 ±0,07
30 min	0,97	0,97		0,96 ±0,06	0,96 ±0,06	
60 min	1,05	1,05		1,05 ±0,07	1,05 ±0,07	
90 min	1,05	1,06		1,05 ±0,07	1,06 ±0,07	
RL 20%						
0 min	0,97	1,05	1,02	0,97 ±0,07	1,05 ±0,07	K= 1,02 ±0,07
30 min	0,97	1,05		0,97 ±0,07	1,05 ±0,07	
60 min	0,96	1,06		0,96 ±0,07	1,05 ±0,07	
90 min	0,96	1,09		0,96 ±0,07	1,09 ±0,08	

Na Figura 5.4 são apresentados os valores de condutividade térmica [K] dos materiais com as barras de erro relativas à incerteza expandida para os materiais estudados neste trabalho. O valor de incerteza, da mesma forma que foi adotado na amostra referência, foi determinado adotando-se a pior condição de incerteza das medidas que compõe o valor médio. Analisando-se a figura, percebe-se que, a amostra [RVI20%] promoveu a maior redução (22,7%) no valor base da

condutividade térmica em relação à amostra referência [R] e que, a amostra [RVA%] promoveu a menor redução (13%) do valor base em relação à amostra referência [R].

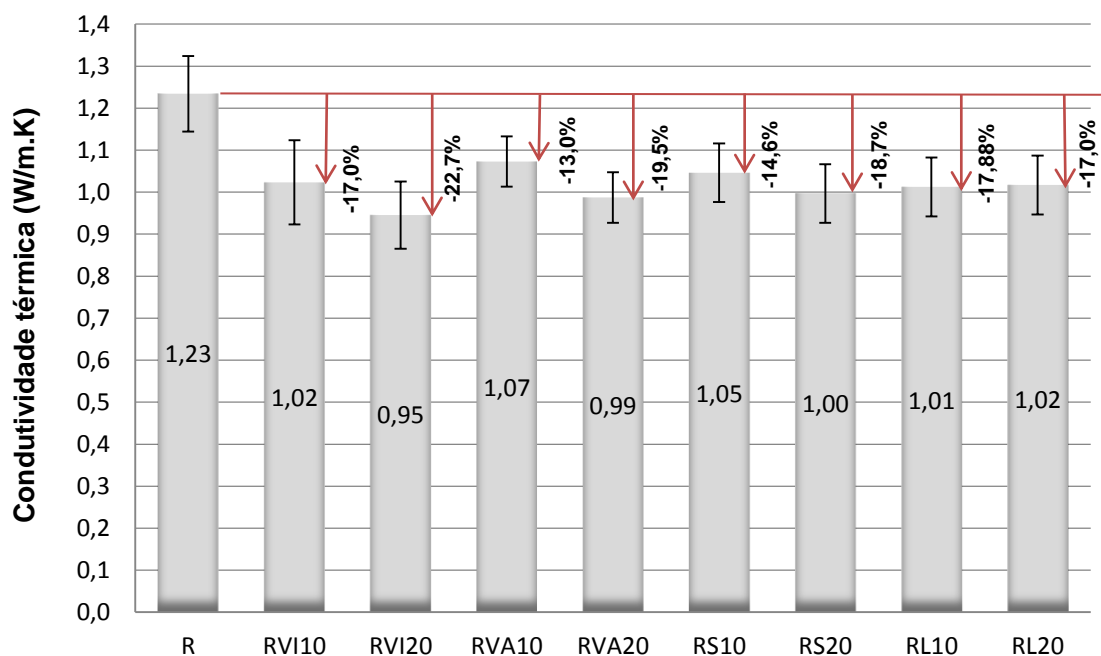


Figura 5.4 – Valores da condutividade térmica.

Analisando-se a Figura 5.4 e levando-se em consideração às incertezas de medições, o que se pode concluir é que a condutividade térmica [K] da amostra referência [R] possui valor mais elevado em relação às amostras com adição de vidro. Dentre as amostras com resíduo de vidro não se pode afirmar qual material tem maior ou menor condutividade térmica.

5.3 Determinação da Difusividade Térmica das Amostras Utilizando Modelamento Matemático de Difusão de Calor

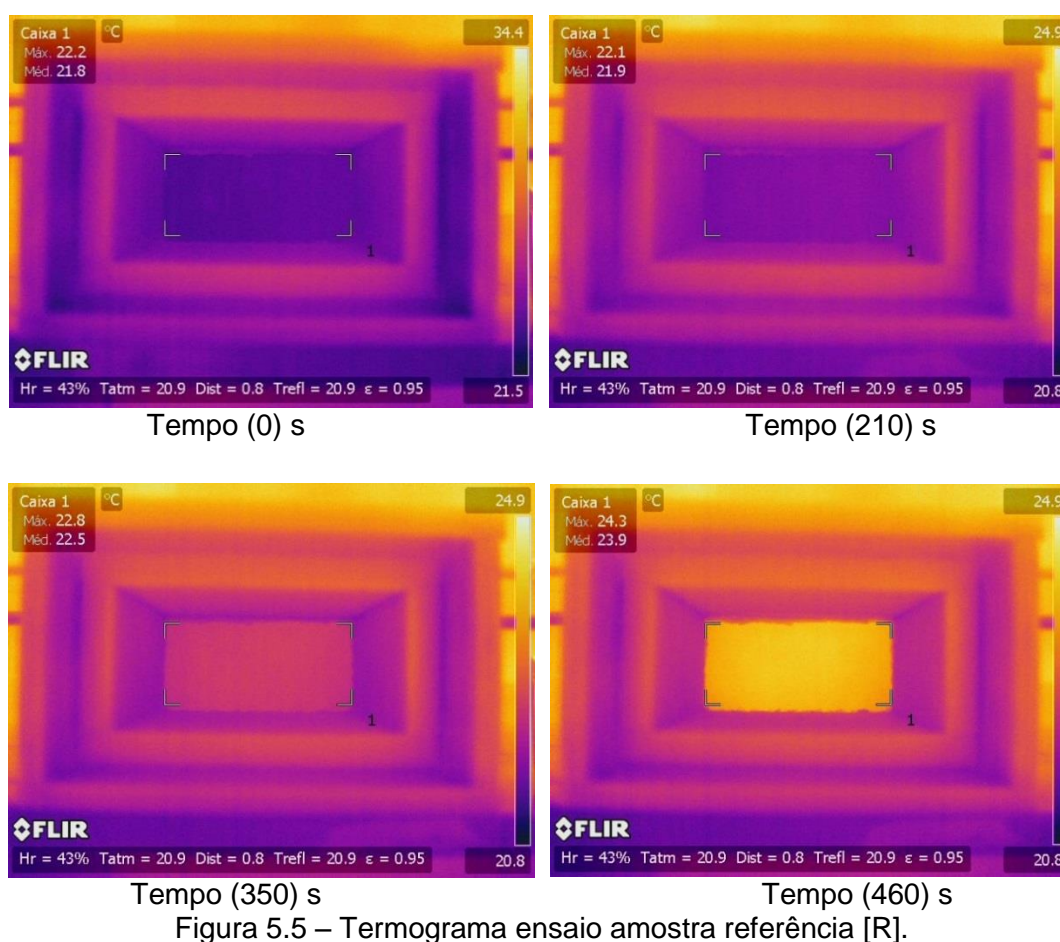
5.3.1 Emissividade térmica das amostras

A emissividade térmica das amostras foi determinada por meio do método de material com emissividade térmica conhecida e o valor encontrado, para todos os materiais, foi 0,95, não havendo nenhuma diferença de emissividade térmica

entre eles. Este valor se aproxima dos relatados por Icropera e DeWitt (2003), sendo para o concreto (0,88 – 0,93) e para o vidro (0,90 – 0,95).

5.3.2 Perfil de temperatura

Na Figura 5.5, são apresentados termogramas, conforme escala de cores, obtidos de uma das amostras de referência [R], durante o processo de aquecimento. Para a aquisição dessas imagens, foram inseridos na termocâmara os dados de entrada: umidade relativa do ar: 43%; temperatura atmosférica: 20.9 °C; distância até o objeto: 0,8 m, temperatura refletida: 20.9 °C e emissividade: 0,95.



Os dados mostram que no tempo 0 segundo, a temperatura média da superfície externa do bloco é de 21,8 °C. A temperatura média da amostra só começa a se alterar após 210 segundos de ensaio, subindo para 21,9 °C. No tempo 350 segundos, a temperatura registrada foi de 22,5 °C e no último

termograma do ensaio, aos 460 segundos, a temperatura registrada foi de 23,9 °C, ou seja, observou-se uma elevação de 2 °C na temperatura da face externa da amostra em 460 segundos. A temperatura média da amostra é dada por meio da ferramenta “área” da termocâmara que foi demarcada sobre a área da amostra.

Por meio dos registros dos termogramas, durante os ensaios, foi determinada a variação da temperatura superficial das amostras ao longo do tempo. Na Figura 5.6 pode ser vista a variação de temperatura no tempo da amostra referência [R], onde são apresentados os resultados referentes às três amostras do mesmo material analisado.

Verifica-se que na amostra referência [R], a temperatura na face externa começa a variar no tempo 190-210 segundos. Este tempo foi o necessário para que o fluxo de calor gerado pela lâmpada, na face interna da amostra, atingisse a face externa, começando a produzir alterações na temperatura. Observa-se que, na amostra 1, a temperatura inicial do ensaio foi 24,5 °C, percebeu-se uma alteração na temperatura externa em 260 segundos, e a elevação de 2 °C foi atingida quando o tempo de ensaio atingiu 450 segundos. Na amostra 2, a temperatura inicial era 21,8 °C. No tempo 210 segundos, subiu para 21,9 °C, atingindo o aumento de 2 °C em 510 segundos. Na amostra 3, a temperatura inicial era 25,5 °C. No tempo 210 segundos, subiu para 25,6 °C, atingindo o aumento de 2 °C em 470 segundos. A taxa de crescimento da temperatura é praticamente a mesma para todas as situações.

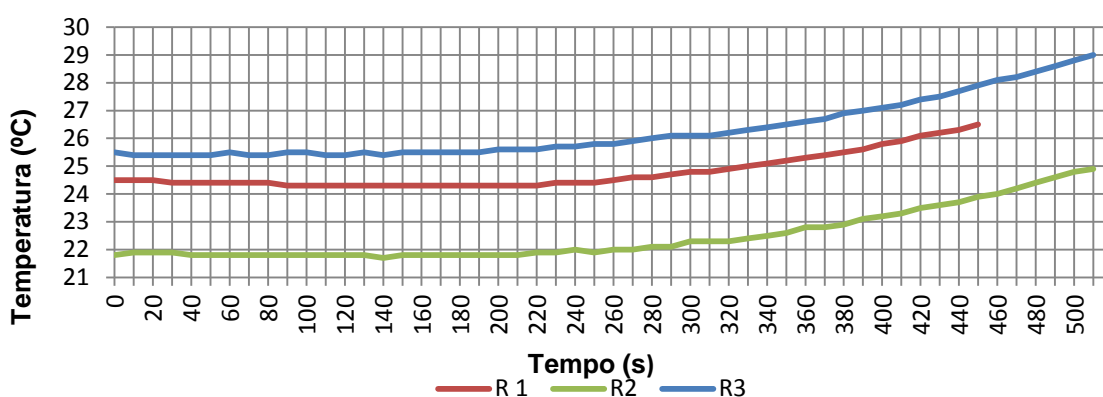


Figura 5.6 – Variação da temperatura da amostra referência [R].

A Figura 5.7 apresenta os valores de variação de temperatura no tempo da amostra [RVI 10%]. Na amostra 1, a temperatura inicial era 26,7 °C. No tempo 280 segundos, subiu para 26,8 °C, atingindo o aumento de 2 °C em 470 segundos. Na amostra 2, a temperatura inicial era 26,2 °C. No tempo 280 segundos subiu para 26,3 °C, atingindo o aumento de 2 °C em 450 segundos. Na amostra 3, a temperatura inicial era 22,4 °C. No tempo 280 segundos, subiu para 25,6 °C, atingindo o aumento de 2 °C em 470 segundos. Nesse caso pode ser visto uma diferença na taxa de crescimento da temperatura da amostra [RVI10%2] a partir de 280 segundos.

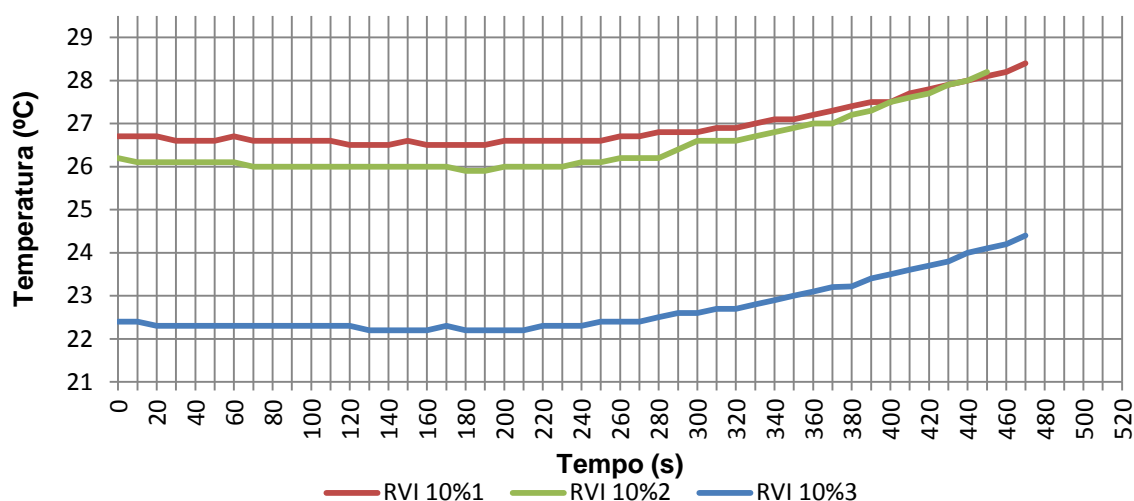


Figura 5.7 – Temperatura da amostra [RVI 10%].

A Figura 5.8 apresenta os valores de variação de temperatura no tempo da amostra [RVI 20%]. Na amostra 1, a temperatura inicial era 25,6 °C. No tempo 280 segundos, subiu para 25,7 °C, atingindo o aumento de 2 °C em 470 segundos. Na amostra 2, a temperatura inicial era 25,7 °C. No tempo 260 segundos, subiu para 25,8 °C, atingindo o aumento de 2 °C em 490 segundos. Na amostra 3, a temperatura inicial era 25,5 °C. No tempo 280 segundos, subiu para 22,5 °C, atingindo o aumento de 2 °C em 500 segundos. Nesse caso pode ser visto uma pequena diferença na taxa de crescimento da temperatura da amostra [RVI20%] a partir de 270 segundos.

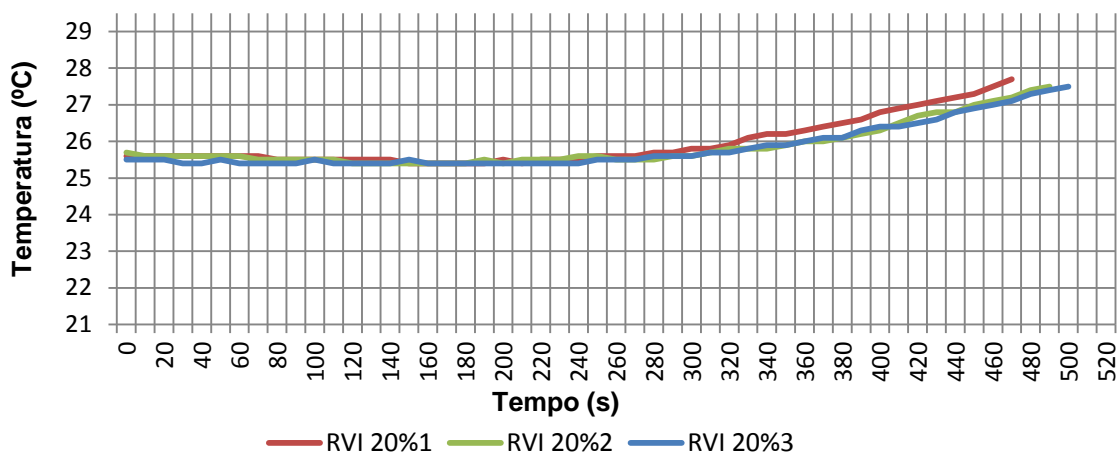


Figura 5.8 – Temperatura da amostra [RVI 20%].

A Figura 5.9 apresenta os valores de variação de temperatura no tempo da amostra [RVA 10%]. Na amostra 1, a temperatura inicial era 27,4°C. No tempo 280 segundos, subiu para 27,5 °C, atingindo o aumento de 2 °C em 490 segundos. Na amostra 2, a temperatura inicial era 24,3 °C. No tempo 270 segundos, subiu para 24,4 °C, atingindo o aumento de 2 °C em 440 segundos. Na amostra 3, a temperatura inicial era 27,1 °C. No tempo 240 segundos, subiu para 27,5 °C, atingindo o aumento de 2 °C em 500 segundos. A taxa de crescimento da temperatura nas amostras é praticamente a mesma para todas as situações.

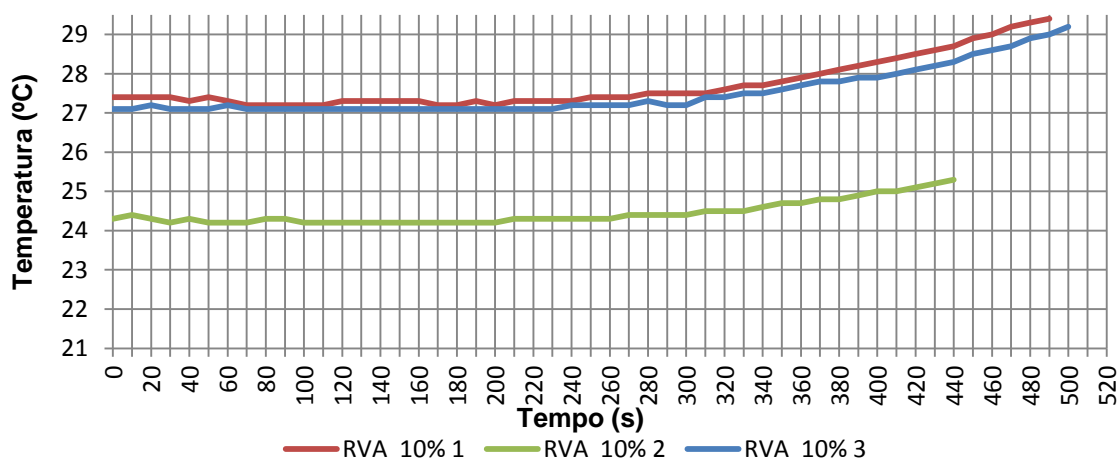


Figura 5.9 – Temperatura da amostra [RVA 10%].

A Figura 5.10 apresenta os valores de variação de temperatura no tempo da amostra [RVA 20%]. Na amostra 1, a temperatura inicial era 23,7 °C. No tempo 300 segundos, subiu para 23,8 °C, atingindo o aumento de 2 °C em 490 segundos. Na amostra 2, a temperatura inicial era 25,0 °C. No tempo 330 segundos, subiu para 25,1 °C, atingindo o aumento de 2 °C em 500 segundos. Na

amostra 3, a temperatura inicial era 25,3 °C. No tempo 280 segundos, subiu para 25,4 °C, atingindo o aumento de 2 °C em 420 segundos. A taxa de crescimento da temperatura nas amostras é praticamente a mesma para todas as situações.

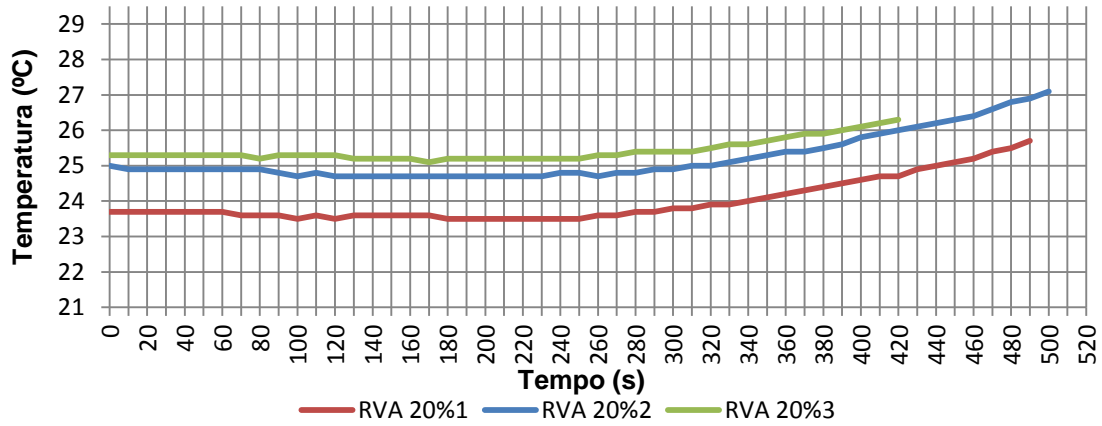


Figura 5.10 – Temperatura da amostra [RVA 20%].

A Figura 5.11 apresenta os valores de variação de temperatura no tempo da amostra [RS 10%]. Na amostra 1, a temperatura inicial era 25,5 °C. No tempo 260 segundos, subiu para 25,6 °C, atingindo o aumento de 2 °C em 520 segundos. Na amostra 2, a temperatura inicial era 25,6 °C. No tempo 280 segundos, subiu para 25,7 °C, atingindo o aumento de 2 °C em 460 segundos. Na amostra 3, a temperatura inicial era 26,3 °C. No tempo 280 segundos, subiu para 26,4 °C, atingindo o aumento de 2 °C em 470 segundos. Observa-se uma pequena diferença na taxa de crescimento da temperatura da amostra [RS10%2] a partir de 290 segundos.

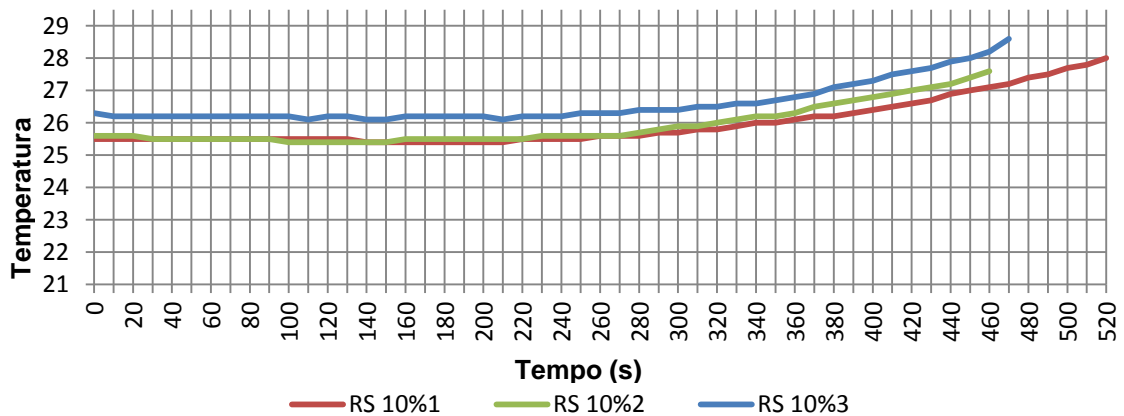


Figura 5.11 – Temperatura da amostra [RS 10%].

A Figura 5.12 apresenta os valores de variação de temperatura no tempo da amostra [RS 20%]. Na amostra 1, a temperatura inicial era 25,3 °C. No tempo 290 segundos, subiu para 25,6 °C, atingindo o aumento de 2 °C em 500 segundos. Na amostra 2, a temperatura inicial era 27,2 °C. No tempo 360 segundos, subiu para 27,3 °C, atingindo o aumento de 2 °C em 550 segundos. Na amostra 3, a temperatura inicial era 26,8 °C. No tempo 270 segundos, subiu para 26,8 °C, atingindo o aumento de 2 °C em 510 segundos. Nesse caso, pode ser visto uma diferença na taxa de crescimento da temperatura da amostra [RS20%3] a partir de 280 segundos. A taxa de crescimento da temperatura nas amostras é praticamente a mesma para todas as situações.

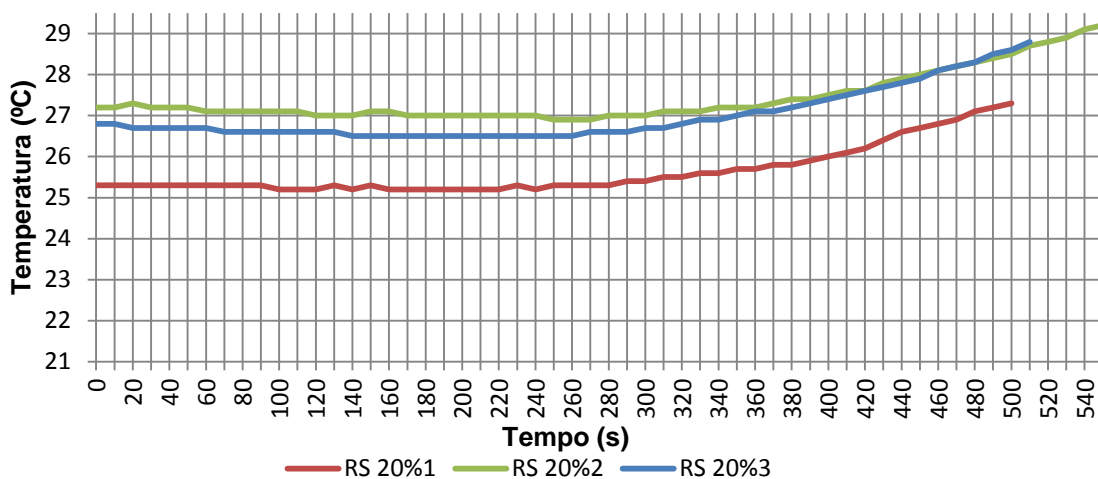


Figura 5.12 – Temperatura da amostra [RS 20%].

A Figura 5.13 apresenta os valores de variação de temperatura no tempo da amostra [RL 10%]. Na amostra 1, a temperatura inicial era 24,8 °C. No tempo 230 segundos, subiu para 24,9, atingindo o aumento de 2 °C em 520 segundos. Na amostra 2, a temperatura inicial era 26,4 °C. No tempo 260 segundos, subiu para 26,5 °C, atingindo o aumento de 2 °C em 500 segundos. Na amostra 3, a temperatura inicial era 26,4 °C. No tempo 300 segundos, subiu para 26,5 °C, atingindo o aumento de 2 °C em 500 segundos. A taxa de crescimento da temperatura nas amostras é praticamente a mesma para todas as situações.

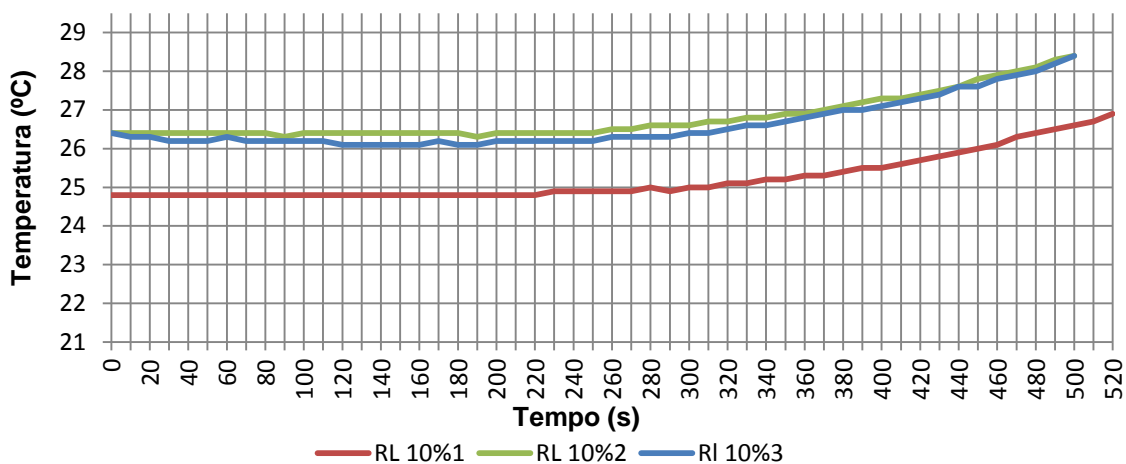


Figura 5.13 – Temperatura da amostra [RL 10%].

A Figura 5.14 apresenta os valores de variação de temperatura no tempo da amostra [RL 20%]. Na amostra 1, a temperatura inicial era 26 °C. No tempo 260 segundos, subiu para 26,1°C, atingindo o aumento de 2 °C em 510 segundos. Na amostra 2, a temperatura inicial era 26,1 °C. No tempo 270 segundos, subiu para 26,2 °C, atingindo o aumento de 2 °C em 490 segundos. Na amostra 3, a temperatura inicial era 25,6 °C. No tempo 280 segundos, subiu para 25,7 °C, atingindo o aumento de 2 °C em 520 segundos.

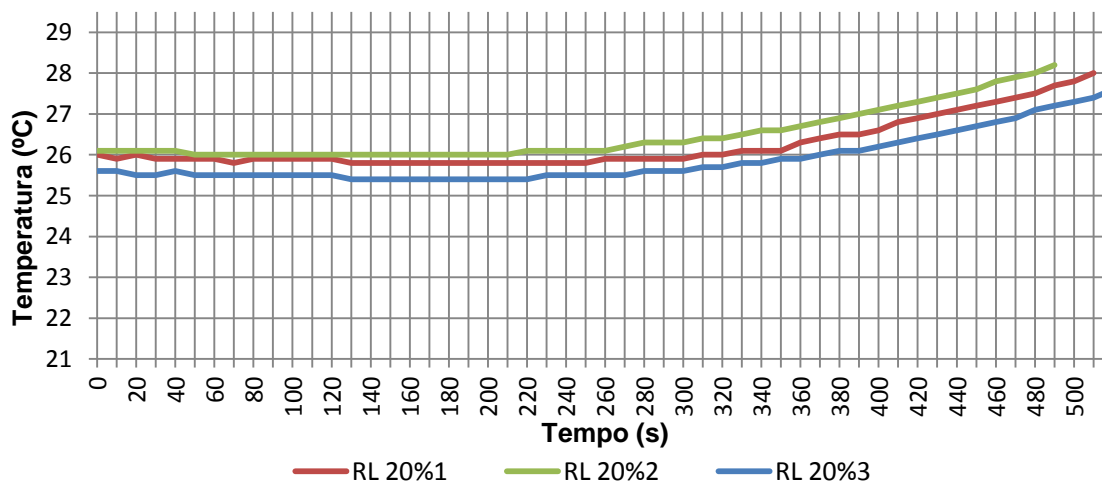


Figura 5.14 – Temperatura da amostra [RL 20%].

As amostras com adição de vidro, no geral, começaram a apresentar elevação de temperatura na face externa, num tempo maior que as amostras sem adição de vidro. Isso significa que quanto maior o tempo para provocar alteração de temperatura menor é o valor de difusividade térmica.

5.3.3 Cálculo da difusividade térmica

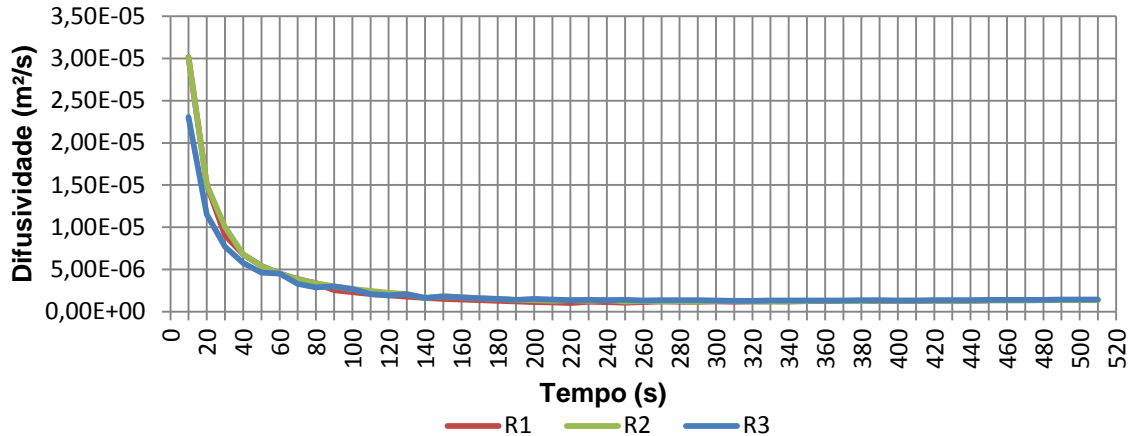
O cálculo da difusividade térmica pelo modelo do sólido semi-infinito foi realizado partindo-se da Equação 3.11, por meio do software ESS, com a inserção dos dados de entrada: fluxo de calor [q_x''], temperatura inicial, condutividade térmica [K], espessura da amostra e tempo. O fluxo de calor [q_x''] foi obtido mediante a Equação 4.5, utilizando-se o EES.

Os valores da condutividade térmica [K] foram obtidos conforme 4.2.2 e demonstrados na Tabela 5.4. A espessura da amostra é 0,55 m. O valor da temperatura inicial, para cada ensaio, foi lido no display da câmara ou no primeiro termograma da série de cada amostra e pode ser visto na Tabela 5.8, que mostra também os dados de entrada da Equação 3.11.

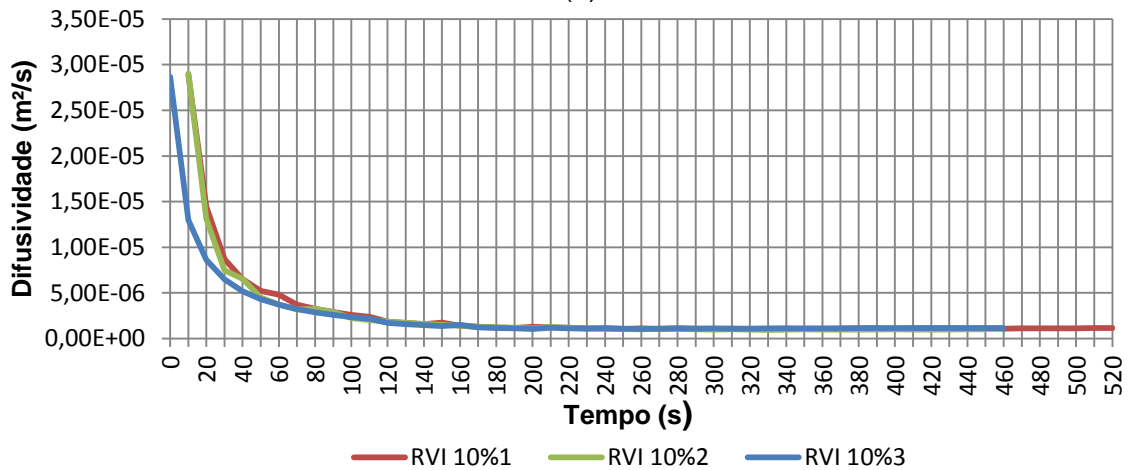
Tabela 5.8 – Dados de entrada da equação 3.11.

Amostra	cp	Temperatura Inicial (°C)	Fluxo de calor q'' (W/m ² .)	Condutividade térmica (w/m.K)	Espessura (m)
R	1	26,70	1725,65	1,23	0,055
	2	26,20			
	3	22,40			
RVI 10%	1	25,60		1,02	
	2	26,20			
	3	22,40			
RVI 20%	1	25,60		0,95	
	2	25,70			
	3	25,50			
RVA 10%	1	27,40		1,07	
	2	24,30			
	3	27,10			
RVA 20%	1	23,70		0,99	
	2	25,00			
	3	25,30			
RS10%	1	25,50	1,05		
	2	25,60			
	3	26,30			
RS20%	1	25,30	1,00		
	2	27,20			
	3	26,80			
RL10%	1	24,80	1,01		
	2	26,40			
	3	26,40			
RL20%	1	26,00	1,02		
	2	26,10			
	3	26,60			

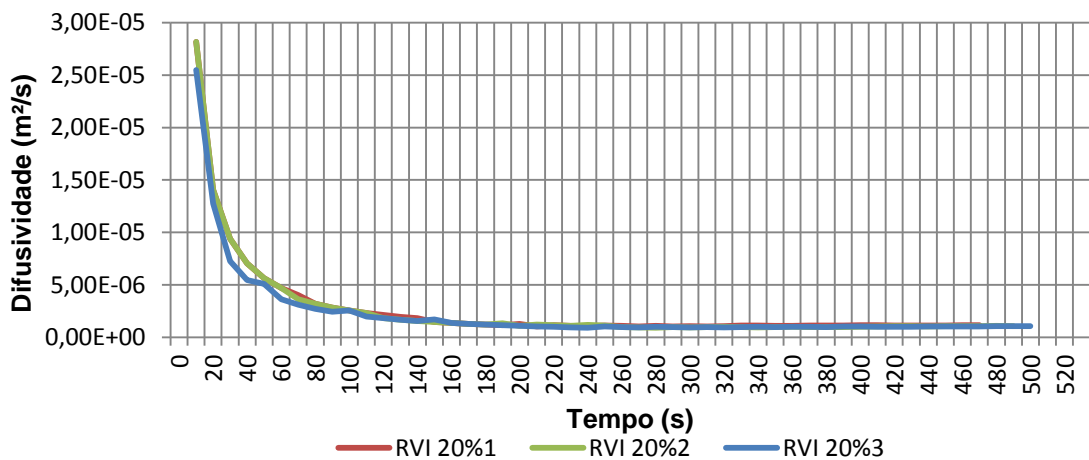
Os dados da Tabela 5.8 e o histórico de temperatura (gráficos das Figuras 5.6 a 5.14) permitem avaliar a difusividade térmica durante o processo de aquecimento das amostras. Os resultados da difusividade térmica de cada uma das três amostras dos materiais ensaiados podem ser vistos nas Figuras 5.15.



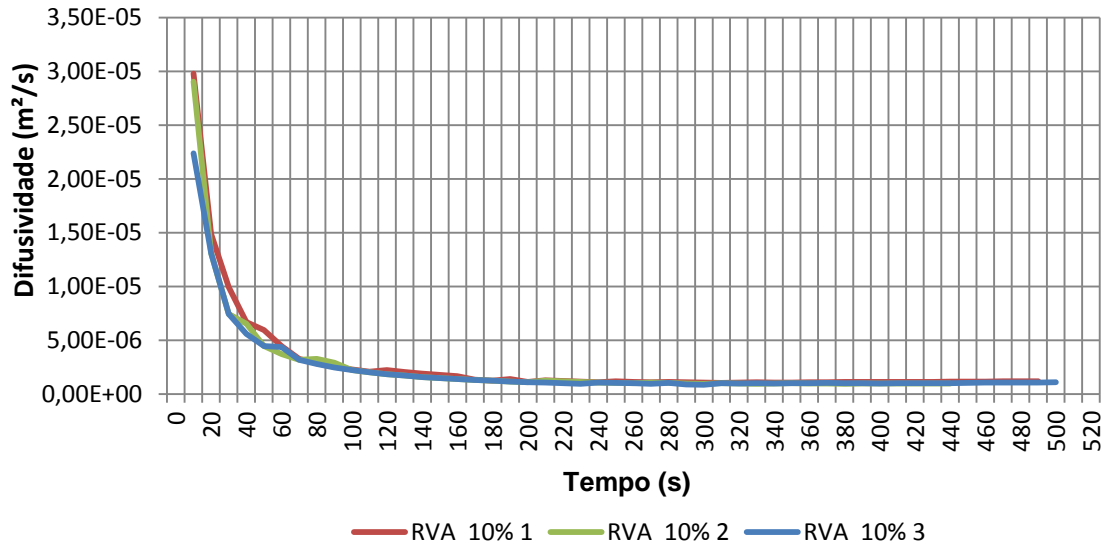
(a)



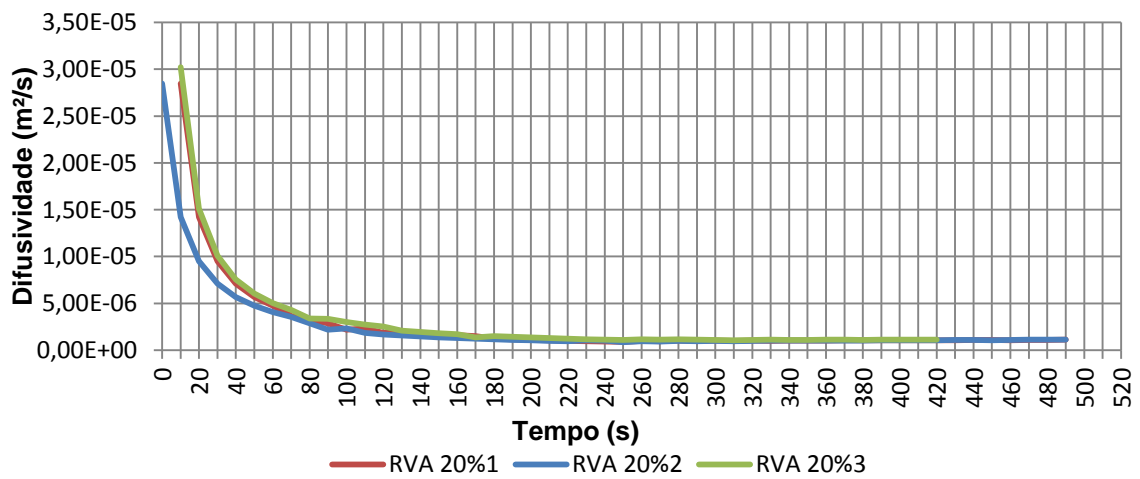
(b)



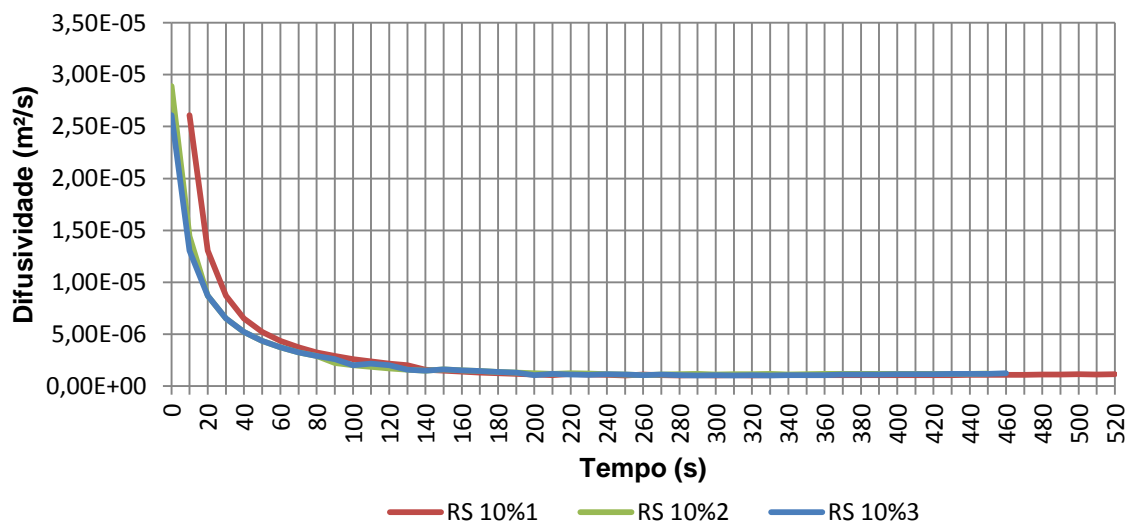
(c)



(d)



(e)



(f)

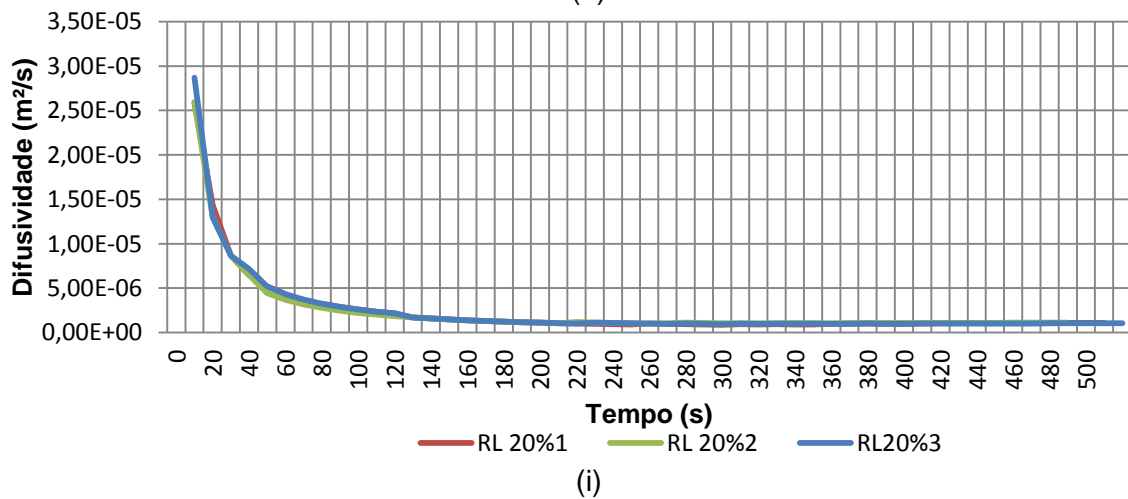
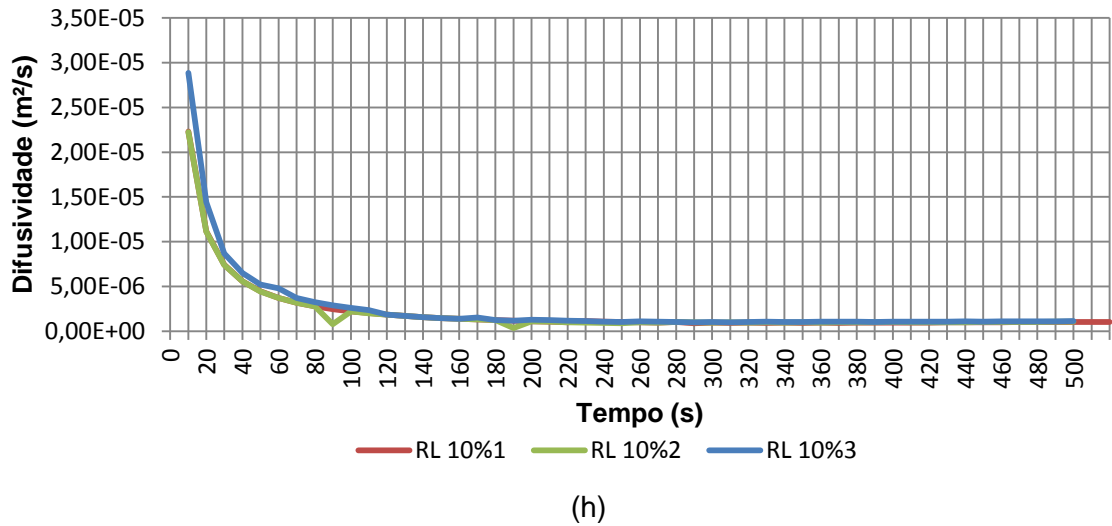
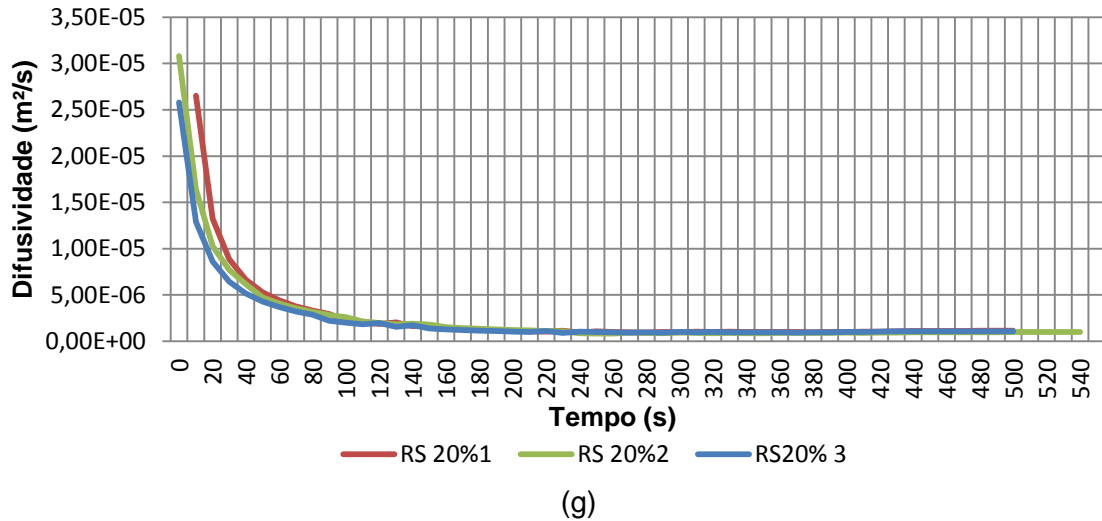


Figura 5.15 – Valores de difusividade térmica das amostras durante ensaio. (a) referência, (b) com resíduo de vidro incolor em substituição a 10% e (c) 20% de cimento, (d) com resíduo de vidro âmbar em substituição a 10% e (e) 20% de cimento, (f) com resíduo de vidro industrial sujo em substituição a 10% e (g) 20% de cimento, (g) com resíduo de vidro industrial limpo em substituição a 10% e (i) 20% de cimento

Analisando-se a Figura 5.15, pode-se observar que em todos os gráficos os valores da difusividade térmica apresentam um declive acentuado até que se aproximam da estabilidade, como pode ser observado no trabalho de Barbosa (2014) com blocos cerâmicos. Esse período de declive coincide com a fase inicial do ensaio em que não há alteração de temperatura na amostra. Quando a temperatura da face externa da amostra começa a subir, os valores da difusividade tendem a estabilizar, isso ocorre porque a variação de temperatura acontece de forma dinâmica.

Para se chegar a um único valor de difusividade térmica dos materiais, foi calculada a média de todos os valores da difusividade, a partir do tempo em que ocorreu elevação da temperatura na face externa da amostra, até quando se atingiu uma variação de 2 °C também na face externa. Na Figura 5.16, são apresentados os valores médios de difusividade térmica das amostras com a barra de erros referente à incerteza de medições com intervalo de confiança de 95%. Analisando-se a figura, percebe-se que a amostra [RVI10%] promoveu a maior redução (22,9%) do valor base da difusividade térmica em relação à amostra referência [R] e a amostra [RVI 10%] promoveu a menor redução (14,5%) do valor base da difusividade térmica em relação à mesma amostra referência [R].

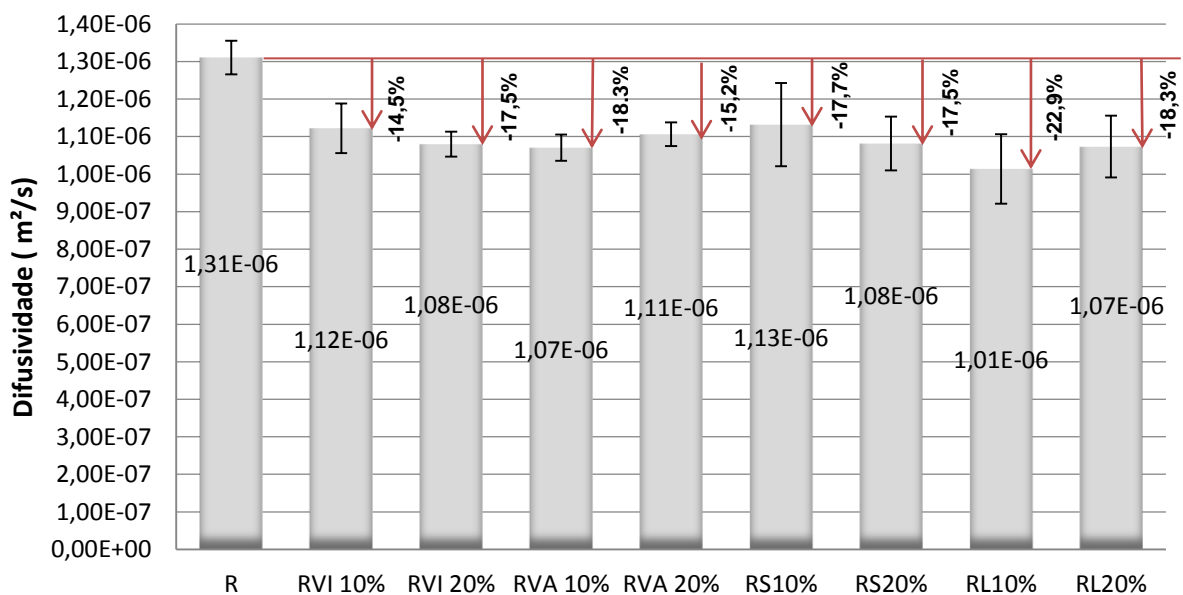


Figura 5.16 – Valores de difusividade térmica das amostras.

Na literatura consultada, não foram encontrados valores de difusividade térmica para argamassas com ou sem adição de resíduo de vidro. Conforme Kreith e Bohn (2003), o valor da difusividade térmica do concreto é $9,40 \text{ E}^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ e a do vidro é $3,40 \text{ E}^{-7} \text{m}^2/\text{s}$. Considerando que o concreto possui brita e que foi usado baixo teor de vidro, os resultados obtidos são coerentes.

Da mesma forma como aconteceu com os valores de condutividade térmica [K], devido às incertezas de medições, o que se pode afirmar é que a difusividade térmica da amostra referência [R] possui valor mais elevado em relação às amostras que possuem adição de vidro. Isso significa que a adição de vidro retardou a difusão de calor nas amostras, o que poderia contribuir para a manutenção da temperatura interna de ambientes revestidos com tal material, uma vez que materiais de menor difusividade retardam a transferência de variações externas de temperatura para o interior das construções.

6 CONCLUSÕES

A substituição de 10% de cimento *Portland* por resíduos de vidro âmbar e resíduo de vidro da indústria lavado, não promoveu redução na resistência mecânica dos materiais comparado ao valor da amostra referência. Porém, a adição de vidro nas demais amostras promoveu uma redução neste desempenho.

Observou-se que todas as adições de resíduo de vidro produziram uma redução no valor da condutividade térmica das amostras em relação à amostra referência. Dentre as amostras com resíduo de vidro, devido às incertezas de medições, não se pode afirmar qual delas obteve menor ou maior valor de condutividade térmica.

As amostras com adição de resíduo de vidro mostraram que a temperatura na face externa necessitou de mais tempo para sofrer alteração em comparação à amostra referência. Quanto maior for o tempo necessário para se produzir elevação da temperatura menor é o valor da difusividade térmica. Devido a isso, as amostras com adição de resíduo de vidro apresentaram menor valor de difusividade térmica que a amostra referência. Em relação a comparação entre as amostras que contém adição de vidro, devido às incertezas de medição, não se pode afirmar qual dentre elas teve melhor ou pior desempenho térmico.

De modo geral, conclui-se que o uso de resíduo de vidro em blocos de concreto ou argamassas poderia contribuir para um maior conforto da edificação e minimizar o consumo de energia.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Desenvolvimento de estudo comparativo entre o desempenho térmico de compostos cimentícios confeccionados com areia de rio e areia artificial oriunda da trituração do gnaisse;

- Desenvolvimento de metodologias para promover a limpeza dos resíduos oriundos das indústrias beneficiadoras de vidro;

- Aprimoramento dos equipamentos para medição de condutividade térmica e difusividade térmica, com o objetivo de minimizar as incertezas de medições;

- Desenvolvimento de estudos para avaliar quantitativamente na prática o que significa redução/aumento da propriedade difusividade térmica em termos de temperatura em edificações.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15424, Ensaio Não Destrutivo – Termografia – Terminologia**. Rio de Janeiro, 2004.

_____. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220, Desempenho Térmico de Edificações**. Rio de Janeiro, 2003.

_____. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 7215, Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro, 1996

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. São Paulo, 2013. 114 p

ALVES.O.L; GIMENEZ. I .F; MAZALI O. I. **CADERNOS TEMÁTICOS – QUÍMICA NOVA NA ESCOLA – Vidros – UNICAMP**. Edição especial – FEVEREIRO 2001. 20p.

ANTÔNIO, A.P. **Potencialidades do aproveitamento do resíduo de estação de tratamento de efluentes do processo de lapidação do vidro sodo-cálcico na produção de concretos**. 2011. 163f. Dissertação (Mestrado). Curso de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Vitória, ES, 2011.

AKERMAN M. **Natureza, Estrutura e Propriedades do Vidro**. CETEV Nov. 2000.37pg.

ARAÚJO, R.A.; BARBOSA, L.C.; SINISCALCHI, R.T. Os Impactos da Aplicação da Termografia na Operação do Sistema Elétrico de Furnas e as Ações Adotadas para Buscar a Máxima Operacionalidade, Produtividade e Confiabilidade do Sistema. In: X EDAO – Encontro para Debates de Assuntos de Operação, 2008, São Paulo. **Anais...**, São Paulo, 2008.

ASKELAND, D.R.; PHULÉ, P.P. **Ciência e engenharia dos materiais**. São Paulo: Cengage Learning, 2008.

ASSIS, R. M. C. de. **Caracterização ótica de materiais transparentes e sua relação com o conforto ambiental em edificações**. 1998. 196 f. Tese (Doutorado em Saneamento e Ambiente) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998.

AVDELIDIS, N.P. et al. Infrared thermography as a nondestructive tool for materials characterisation and assessment. In: THERMOSENSE: THERMAL INFRARED APPLICATIONS XXXIII, 8013., 2011, Orlando. **Proceedings...**, Orlando, FL, Usa: Spie, 2011.

BARBOSA, P. G.. **Uma contribuição para o design do conforto: avaliação da difusividade térmica de blocos cerâmicos e de concreto utilizando a**

termografia infravermelha. 2014. 137 f. Dissertação (Mestrado em Design), Universidade Estadual de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

BERTULANE, C. Curso de Física Interativo. Instituto de Física, UFRJ. Disponível em <<http://www.if.ufrj.br/~bertu/fis2/calor/conducao.html>>. Acessado em novembro de 2014.

CARAM, R. M. A de. **Caracterização ótica de materiais transparentes e sua relação com conforto ambiental em edificações.** 1998. 196 f. Tese (Doutorado em Saneamento e Ambiente) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998.

CEMPRE. COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. *Associação sem fins lucrativos.* Disponível em <www.cempre.org.br>. Acesso em: outubro de 2014.

Cebrace – **Companhia Brasileira de Cristal.** Disponível em: <<http://www.cebrace.com.br>>.

CRISIGIONANNI C. L. M. **Uma abordagem socioambiental e tecnológica da reciclagem dos resíduos de vidro.** 2010.101 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia para o Desenvolvimento) – LACTEC. Instituto de Engenharia do Paraná (IEP). CURITIBA 2010.

COMPOSIÇÕES QUÍMICA: Disponível em: <<http://www.vipelarte.com.br>>. Acesso em: novembro 2014.

CORREA, P. R. **Desenvolvimento de uma interface de comunicação para determinação da difusividade térmica em função da temperatura por termografia no infravermelho.** 2013. 66 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2013.

DIAS. G. G.; CRUZ. T. M. de Sá. **Plano de Gerenciamento Integrado de Resíduos Vítreos PGIRV.** Fundação Estadual do Meio Ambiente : Fundação Israel Pinheiro, Belo Horizonte. 2009. 24 p. ; II.

FERREIRA, R. A. M. **Modelagem matemática aplicada ao diagnóstico de falha de componentes elétricos de subestação.** 2015. 153 f. Dissertação (Mestrado em Curso de Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

Güths, S.; Lamberts, R.; Ordenes, M. **Transferência de Calor na Envolvente da Edificação.** Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Florianópolis, 2008.41p.

Gallery of Rotatable Structures disponível em: <http://www.chemtube3d.com/gallery/structurepages/SiO44-.html>. Acesso em: fevereiro 2015.

HOLMAN, J. P. **Transferência de Calor**. São Paulo: Mcgraw-hill, 1983. 639 p.

INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6. ed., Rio de Janeiro: LTC, 2008. 643 p.

JCGM 100. **Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. GUM 1995 with Minor Corrections**. Sèvres, France: Joint Committee for Guides in Metrology (BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISSO, IUPAC, IUPAP and OIML), 2008.

KREITH, F. **Princípios de transmissão de calor**. São Paulo: Blücher, 1977.550p

KREITH, Frank; BOHN, Mark. **Princípios da transferência de Calor**. 6. ed. São Paulo: Thomson Pioneira, 2003. 650 p.

LAMBERTS, R. et al. **Desempenho Térmico de Edificações**. Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Florianópolis, 2011.239p.

MALDAGUE, X.P. **Applications of Infrared Thermography in Nondestructive Evaluation. Trends in Optical Nondestructive Testing**. Pramod Rastogi ed., 2000. p. 591-609. 2000.

MALDAGUE, X.P. Introduction to NDT by active infrared thermography. **Materials Evaluation**, v. 6, p. 1060-1073, 2002.

MARAN, A. **ISOLADORES VÍTREOS**. In: MATERIAIS ELÉTRICOS: COMPÊNDIO DE TRABALHOS. Foz de Iguaçu: Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2010. p. 3-26

MARIO, M. **Uso da termografia como ferramenta não destrutiva para avaliações de manifestações de patologias ocultas**. 2011. 70f. TCC (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

MATOS, A. M. **Estudo de argamassas com substituição parcial de cimento por resíduos de vidro moídos**. 2010. 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia , Universidade do Porto, Porto, 2010.

MATERIAL ECOLOGICAMENTE CORRETO. Disponível em: <http://www.abividro.org.br> . Acesso em: novembro 2014.

MENDONÇA, L. V.; AMARAL, M. M.; CATARINO, P. S.. A termografia por infravermelho como ferramenta para auxílio à inspeção e manutenção dos edifícios. In: JORNADA DE ENGENHARIA DE MANUTENÇÃO, 2013, Lisboa. **Anais...** . Lisboa: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (isel), 2013. Disponível em: <https://docs.google.com/file/d/0B3tF-4KsCSu1MnNKTEtoazNiaVE/edit> . Acesso em: janeiro 2016.

MICHELATO, R. **Avaliação do desempenho térmico de vidros reflexivos: estudo de caso em células testes.** 2007. 226 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

OMAR, L. G. **Influência dos vidros no Desempenho Térmico e conforto Ambiental em Edificações de Escritório- Um Estudo de Caso.** 2011 187f.,. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2011.

ORDENES, M. *et al.* **Transferência de calor na envolvente da edificação.** Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Civil, Florianópolis, Março de 2008.41p.

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, Belo Horizonte, 2011.

PEREIRA, R. R. **Características térmicas de assento de cadeiras escolares por termografia.** 2013. 91 f. Dissertação (Mestrado em Design) – Universidade do Estado de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

PINTO-COELHO, Ricardo Motta. Produção, Consumo e Reciclagem de Vidro no Brasil. **Reciclagem e desenvolvimento sustentável no Brasil.** Belo Horizonte: Recóleo Coleta e Reciclagem de Óleos Vegetais Editora, Ltda, 2009. Cap. 6. p. 173-194.

PRS – Portal de Resíduo Sólido. **Disponível em:** Reciclagem de Vidro < <http://www.portalresiduossolidos.com/reciclagem-de-vidro/>>. 2013

Portal laboratórios visuais de processos químicos. Disponível em: http://labvirtual.eq.uc.pt/siteJoomla/index.php?option=com_content&task=view&id=248&Itemid=422. Acessado em: Janeiro 2016.

RIVERO, R. **Arquitetura e Clima: condicionamento térmico natural.** 2 ed. Porto Alegre: D.C. Luzzatto Editores, 1986. 240p.

RIBEIRO, S.; LUZ, A.P. **Uso de pó de vidro como fundente para produção de grés porcelanato.** Revista Matéria, v. 13, n. 1, pp. 96 – 103, 2008

SALES, F.; Estudo **da Atividade pozolânica de micropartículas de vidro soda-cal, incolor e âmbar e sua influência no desempenho de compostos de cimento Portland.** 2014. 139 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas), Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

SALES, R.B.C. **Estudo de compostos de cimento Portland utilizando o ensaio de frequência ressonante forçada e termografia.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

SALOMÃO, M.C.F. *et al.* *Estudo sobre a utilização de resíduo de vidro em argamassas cimentícias.* In: 52º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. Fortaleza, 2010, Fortaleza: IBRACON. **Anais...**, 2010.

SIMÕES. L.J. **Estudo da Aplicação de Resíduo de Vidro Laminado na Produção de.** Dissertação apresentada ao Programa de Pós - Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo. VITÓRIA-ES 2013.

SMITH, W.F. **Princípios de ciência e Engenharia dos Materiais.** 3. ed. McGraw-Hill, Lisboa, 1998

Taylor, B. N., Kuyatt, C. E., **Guidelines for evaluating and expressing uncertainty in NIST measurement results**, NIST technical note 1297, 1994, National Institute of Standards and Technology

TEIXEIRA, G.G.D. **Confiabilidade Metrológica em Termografia Aplicada em Sistemas Elétricos.** 2012. 164f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

RECICLAGEM DO VIDRO: Disponível em:
<www.sobiologia.com.br/conteudos/reciclagem/reciclagem1.php> Acesso em: novembro 2014.

UBV - **UNIAO BRASILEIRA DE VIDRO:** <http://www.vidrosubv.com.br/vidro-historia-fabricacao-reciclagem>. Acessado em Novembro 2014.

VALARINHO, L. G. C. S.. **Construção em Vidro Estrutural. Comportamento Estrutural de Vigas Mistas Vidro-Gfrp.** 2010. 232 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Superior Técnico Universidade Técnica de Lisboa.. Lisboa, 2010.

ANEXO A – Valores de medição utilizados para cálculo da condutividade térmica

As tabelas abaixo se referem à valores de medição utilizados para determinação da condutividade térmica das amostras com resíduo de vidro. Os valores do tempo das tabelas abaixo não se referem ao tempo real de experimento.

Amostra RVI 10%	Temperatura bloco inferior		Temperatura bloco superior		ΔT bloco inferior	ΔT bloco superior	Potência dissipada	K bloco inferior	K bloco superior
	Face inferior	Face superior	Face inferior	Face superior					
Tempo									
0 min	30,31	40,20	38,87	29,22	9,89	9,65	10,93	0,98	1,06
30 min	30,35	40,29	38,86	29,20	9,94	9,65	10,93	0,98	1,06
60 min	30,85	40,30	38,85	29,26	9,45	9,59	10,93	0,98	1,06
90 min	30,29	40,27	38,86	29,25	9,97	9,61	10,93	0,97	1,06

Amostra RVI 10%	Média [K] W/m.K	Incertezas das medições de [K]		Média [K] + incerteza
0 min		0,98 \pm 0,10	1,06 \pm 0,11	
30 min	1,02	0,98 \pm 0,10	1,06 \pm 0,11	1,02 \pm 0,10
60 min		0,98 \pm 0,10	1,06 \pm 0,11	
90 min		0,97 \pm 0,10	1,06 \pm 0,11	

Amostra RVI 20%	Temperatura bloco inferior		Temperatura bloco superior		ΔT bloco inferior	ΔT bloco superior	Potência dissipada	K bloco inferior	K bloco superior
	Face inferior	Face superior	Face inferior	Face superior					
Tempo									
0 min	40,39	29,53	29,23	41,99	10,86	12,92	13,42	1,00	0,90
30 min	40,29	29,50	29,23	41,89	10,80	12,92	13,42	1,01	0,90
60 min	40,52	29,55	29,25	42,16	10,97	12,92	13,71	0,99	0,88
90 min	40,75	29,51	29,25	42,43	11,24	12,92	13,67	0,97	0,87

Amostra RVI 20%	Média [K] W/m.K	Incertezas das medições de [K]		Média [K] + incerteza
0 min		1,00 \pm 0,094	0,90 \pm 0,07	
30 min	0,95	1,01 \pm 0,096	0,90 \pm 0,07	k=0,95 \pm 0,07
60 min		0,99 \pm 0,093	0,88 \pm 0,07	
90 min		0,97 \pm 0,088	0,87 \pm 0,06	

Amostra RVA 10%	Temperatura bloco inferior		Temperatura bloco superior		ΔT bloco inferior	ΔT bloco superior	Potência dissipada	K bloco inferior	K bloco superior
	Face inferior	Face superior	Face inferior	Face superior					
Tempo									
0 min	28,19	44,04	28,39	43,80	15,85	15,41	17,84	1,13	1,00
30 min	28,28	44,03	28,39	43,81	15,75	15,42	17,84	1,14	1,00
60 min	28,30	44,11	28,47	43,85	15,81	15,38	17,84	1,14	1,00
90 min	28,22	44,06	28,46	43,85	15,85	15,38	17,84	1,14	1,00

Amostra RVA 10%	Média [K] W/m.K	Incertezas das medições de [K]		Média [K] + incerteza
0 min		1,13 \pm 0,07	1,00 \pm 0,06	
30 min	1,07	1,14 \pm 0,07	1,00 \pm 0,06	1,07 \pm 0,06
60 min		1,14 \pm 0,07	1,00 \pm 0,06	
90 min		1,14 \pm 0,07	1,00 \pm 0,06	

Amostra RVA 20%	Temperatura bloco inferior		Temperatura bloco superior		ΔT bloco inferior	ΔT bloco superior	Potência dissipada	K bloco inferior	K bloco superior
	Face inferior	Face superior	Face inferior	Face superior					
Tempo									
0 min	29,84	44,46	27,82	42,89	14,61	15,07	17,13	1,08	0,89
30 min	29,80	44,42	27,82	42,87	14,62	15,05	17,12	1,08	0,89
60 min	29,79	44,46	27,78	42,85	14,66	15,07	17,14	1,08	0,89
90 min	29,79	44,46	27,79	42,89	14,66	15,10	17,12	1,07	0,89

Amostra RVA 20%	Média [K] W/m.K	Incertezas das medições de [K]		Média [K] + incerteza
0 min		1,08 \pm 0,07	0,89 \pm 0,06	
30 min	0,99	1,08 \pm 0,07	0,89 \pm 0,06	0,99 \pm 0,06
60 min		1,08 \pm 0,07	0,89 \pm 0,06	
90 min		1,07 \pm 0,07	0,89 \pm 0,06	

Amostra RS 10%	Temperatura bloco inferior		Temperatura bloco superior		ΔT bloco inferior	ΔT bloco superior	Potência dissipada	K bloco inferior	K bloco superior
	Face inferior	Face superior	Face inferior	Face superior					
Tempo									
0 min	29,43	42,31	29,51	43,02	12,88	13,51	15,40	1,07	1,01
30 min	29,39	42,23	29,46	42,85	12,84	13,39	15,42	1,08	1,02
60 min	29,42	42,38	29,50	43,07	12,96	13,58	15,42	1,07	1,01
90 min	29,37	42,25	29,48	42,90	12,88	13,42	15,42	1,08	1,02

Amostra RS 10%	Média [K] W/m.K	Incertezas das medições de [K]		Média [K] + incerteza
0 min		1,07 ±0,07	1,01 ±0,07	
30 min	1,05	1,08 ±0,08	1,02 ±0,07	1,05 ±0,07
60 min		1,07 ±0,07	1,01 ±0,07	
90 min		1,08 ±0,08	1,02 ±0,07	

Amostra RS 20%	Temperatura bloco inferior		Temperatura bloco superior		ΔT bloco inferior	ΔT bloco superior	Potência dissipada	K bloco inferior	K bloco superior
	Face inferior	Face superior	Face inferior	Face superior					
Tempo									
0 min	28,10	42,17	42,28	28,26	14,07	14,02	15,3972	0,97	1,02
30 min	28,13	42,19	42,27	28,26	14,06	14,01	15,3972	0,97	1,02
60 min	28,13	42,22	42,33	28,33	14,10	14,00	15,3972	0,97	1,02
90 min	28,15	42,23	42,29	28,28	14,07	14,01	15,3972	0,97	1,02

Amostra RS 20%	Média [K] W/m.K	Incertezas das medições de [K]		Média [K] + incerteza
0 min		0,97 ±0,07	1,0 ±0,07	
30 min	1,00	0,97 ±0,07	1,02 ±0,07	1,00 ±0,07
60 min		0,97 ±0,07	1,02 ±0,07	
90 min		0,97 ±0,07	1,02 ±0,07	

Amostra RL 10%	Temperatura bloco inferior		Temperatura bloco superior		ΔT bloco inferior	ΔT bloco superior	Potência dissipada	K bloco inferior	K bloco superior
	Face inferior	Face superior	Face inferior	Face superior					
Tempo									
0 min	28,71	43,55	43,55	28,39	12,24	14,84	15,16	0,97	0,97
30 min	28,70	43,54	43,55	28,37	12,26	14,84	15,18	0,97	0,97
60 min	28,69	43,57	43,56	28,36	12,28	14,88	15,19	1,05	1,05
90 min	28,69	43,49	43,55	28,52	12,30	14,80	15,03	1,05	1,06

Amostra RL 10%	Média [K] W/m.K	Incertezas das medições de [K]		Média [K] + incerteza
0 min		0,96 ±0,06	0,97 ±0,06	
30 min	1,01	0,96 ±0,06	0,96 ±0,06	1,01 ±0,07
60 min		1,05 ±0,07	1,05 ±0,07	
90 min		1,05 ±0,07	1,06 ±0,07	

Amostra RL 20%	Temperatura bloco inferior		Temperatura bloco superior		ΔT bloco inferior	ΔT bloco superior	Potência dissipada	K bloco inferior	K bloco superior
	Face inferior	Face superior	Face inferior	Face superior					
Tempo									
0 min	28,38	42,28	28,39	42,02	13,89	13,63	14,8261	0,97	1,05
30 min	28,37	42,24	28,38	42,03	13,88	13,65	14,8261	0,97	1,05
60 min	28,36	42,26	28,41	42,03	13,90	13,62	14,8261	0,96	1,06
90 min	28,36	42,29	28,44	41,61	13,93	13,17	14,8261	0,96	1,09

Amostra RL 20%	Média [K] W/m.K	Incertezas das medições de [K]		Média [K] + incerteza
0 min		0,97 \pm 0,07	1,05 \pm 0,07	
30 min	1,02	0,97 \pm 0,07	1,05 \pm 0,07	1,02 \pm 0,07
60 min		0,96 \pm 0,07	1,05 \pm 0,07	
90 min		0,96 \pm 0,07	1,09 \pm 0,08	