

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

NATHALIA STÉFANE LOPES DE SOUZA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE UM SISTEMA RADIAL DE MEDIÇÃO DE
CONDUTIVIDADE TÉRMICA**

BELO HORIZONTE

2020

NATHALIA STÉFANE LOPES DE SOUZA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE UM SISTEMA RADIAL DE MEDIÇÃO DE
CONDUTIVIDADE TÉRMICA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado no curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: André Guimarães Ferreira

BELO HORIZONTE

2020

NATHALIA STÉFANE LOPES DE SOUZA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE UM SISTEMA RADIAL DE MEDIÇÃO DE
CONDUTIVIDADE TÉRMICA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado no curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em: 26/11/2020

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. André Guimarães Ferreira - Orientador

Prof. Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa

Prof. Dr. Tiago de Freitas Paulino

Dedico este trabalho a Daniel, Creuza e Meg.
Vocês são incríveis e nunca vou conseguir
retribuir ao mundo a beleza de tê-los.

AGRADECIMENTOS

O primeiro agradecimento de todos, é claro, é dirigido àquele que é meu guia e protetor em cada passo e decisão: obrigada Deus, por essa caminhada e por tudo que ela significou. Obrigada por não me deixar, se quer, pensar em desistir.

Agradeço a meu orientador, professor André Guimarães Ferreira, pelo conhecimento compartilhado e por toda paciência, confiança e oportunidades. Você é uma inspiração de pessoa, professor.

Agradeço também a todos os professores e funcionários do CEFET-MG que me ajudaram nas várias etapas dessa caminhada: professor João Paulo Machado de Sousa, por disponibilizar a fonte de tensão variável do laboratório de Eletrônica; a professora Aline Bruna da Silva, pela orientação sobre materiais poliméricos; ao Geraldo Mecias de Oliveira, por ter disponibilizado ajuda em praticamente todos os processos mecânicos com os corpos de prova e ao professor Carlos Eduardo dos Santos, pela preparação dos corpos de prova poliméricos.

Agradeço aos amigos com os quais fui presenteada pelo CEFET-MG: Rafael Teixeira, Ana Luiza Paulinelli, Verônica Rodrigues e Julie Stephanie. Obrigada pela companhia no laboratório nos dias de ensaios e por todo o resto.

E, por fim, agradeço às pessoas que são a base e a razão de tudo, que estiveram em todos os momentos dessa pequena parte da história e que estão sempre dispostos a participar de todo o resto dela: obrigada pai, obrigada mãe, obrigada Meg!

Será que alguém ousa desprezar esse dia de pequenos começos?

(Zacarias 4:10)

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo aprimorar, testar e analisar um sistema radial de medição de condutividade térmica, de baixo custo, para materiais cerâmicos e poliméricos, tendo como princípio de funcionamento a Lei de *Fourier*. É de significativa relevância determinar as propriedades térmicas dos materiais, tendo em vista a sua aplicação final, essencialmente, quando se trabalha com a possibilidade de utilização de materiais com alta capacidade de isolamento térmico, com o intuito de redução de gasto energético; demanda cada vez mais necessária na sociedade atual. O procedimento escolhido para desenvolvimento do trabalho tem como base o método de Placas Quentes Protegidas, adaptado para corpos de prova cilíndricos e maciços, os quais são aquecidos até o regime permanente de transferência de calor, que é gerado por um resistor elétrico cilíndrico. Pode-se concluir que os resultados de condutividade térmica encontrados estão, em sua maioria, próximos dos valores de referência fornecidos pelos fabricantes para cada tipo de material - argamassa de revestimento, polipropileno e polietileno (com diferenças de 0% a 62%). Foi elaborada uma análise de incertezas de medição do sistema de medição desenvolvido, estabelecendo a incerteza do sistema de medição de 8%.

Palavras-chave: Condutividade térmica. Materiais. Cerâmicos. Polímeros. Sistema de medição. Gasto energético.

ABSTRACT

This work aims to, improve, test and analyze a radial thermal conductivity measurement system, of low cost, for ceramic and polymeric materials, having Fourier's Law as its working principle. It is of significant relevance to determine the thermal properties of materials, considering their final application, essentially, when working with the possibility of using materials with high thermal insulation capacity, to reduce energy expenditure - a demand increasingly needed in today's society. The procedure chosen for the development of the work is based on the method of Protected Hot Plates, adapted for cylindrical and solid specimens, which are warmed up to the permanent heat transfer regime generated by a cylindrical electric resistor. It can be concluded that the thermal conductivity results are close to the reference values provided by the manufacturers of each material type - coating mortar, polypropylene, and polyethylene (with differences from 0% to 62%). An analysis of measurement uncertainties of the developed measurement system was conducted, establishing the measurement system's degree of uncertainty of 8%.

Key Words: Thermal conductivity. Material. Ceramics. Polymers. System of measurement. Energy expenditure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Faixas de condutividade térmica	16
Figura 2 - Possíveis arranjos do sistema fluximétrico para medição da condutividade térmica	19
Figura 3 - Conjunto do método da placa quente protegida	20
Figura 4 - Modelo fundamental apresentado pela ASTM 1225-E	21
Figura 5 - Método calorimétrico a água	22
Figura 6 - Materiais utilizados para montagem do corpo de prova cerâmico	31
Figura 7 - Representação esquemática do molde	32
Figura 8 - Medição do comprimento do corpo de prova.....	32
Figura 9 - Recuperação do resistor elétrico.....	33
Figura 10 - Procedimentos de preparação dos ensaios com materiais cerâmicos	33
Figura 11 - Tubos poliméricos	34
Figura 12 - Tubos poliméricos divididos em quatro partes.....	34
Figura 13 - Furo central nas quatro partes dos tubos poliméricos.....	35
Figura 14 - Furo ao longo do diâmetro.....	35
Figura 15 - Fonte de corrente contínua de tensão ajustável	36
Figura 16 - Procedimentos de preparação dos ensaios com materiais poliméricos	37
Figura 17 - Sistema para medição da condutividade térmica (k).....	38
Figura 18 - Retirada e aplicação das temperaturas de ensaio.....	39
Figura 19 - Confeção do corpo de prova com adição de carga metálica.....	39
Figura 20 - Corpo de prova cerâmico com material metálico.....	40
Figura 21 - Sistema para medição de condutividade térmica (k) para o PEAD.....	41
Figura 22 - Gráfico de distribuição de temperaturas ao longo do tempo	44
Figura 23 - Gráfico de distribuição de temperaturas ao longo do tempo	44
Figura 24 - Gráfico de distribuição de temperaturas ao longo do tempo	46
Figura 25 - Gráfico de distribuição de temperaturas ao longo do tempo	47
Figura 26 - Gráfico de distribuição de temperaturas ao longo do tempo	48
Figura 27 - Gráfico de distribuição de temperaturas ao longo do tempo	48
Figura 28 - Gráfico de distribuição de temperaturas ao longo do tempo	50
Figura 29 - Gráfico de distribuição de temperaturas ao longo do tempo	51
Figura 30 - Gráfico de distribuição de temperaturas ao longo do tempo	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Materiais de Condutividade Térmica conhecida	17
Tabela 2 - Condutividade térmica de materiais cerâmicos	24
Tabela 3 - Nomes comuns de polímeros e suas respectivas siglas	26
Tabela 4 - Características do PEAD e do PP	27
Tabela 5 - Condutividade Térmica de Materiais Poliméricos	27
Tabela 6 - Medidas das temperaturas finais do primeiro ensaio realizado	43
Tabela 7 - Dimensão do corpo de prova de argamassa de revestimento	52
Tabela 8 - Dimensão do corpo de prova de argamassa com carga metálica	54
Tabela 9 - Medição das dimensões dos materiais e equipamentos	56
Tabela 10 - Potências de ensaio	56
Tabela 11 - Resultados de condutividades térmicas obtidas	59
Tabela 12 - Incerteza de medição dos equipamentos de ensaio	60
Tabela 13 - Incertezas relativas das potências de ensaio	61
Tabela 14 - Incertezas relativas dos raios dos CP's	62
Tabela 15 - Resultados de medição do sistema e incertezas percentuais calculadas	63

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Justificativa e Relevância	13
2 OBJETIVOS	14
2.1 Objetivo geral	14
2.2 Objetivos específicos	14
3 REVISÃO DA LITERATURA	15
3.1 Transferência de Calor	15
3.1.1 <i>Condução</i>	15
3.1.2 <i>Determinação da Condutividade térmica</i>	15
3.1.3 <i>Sistemas Radiais</i>	17
3.2 Medidores de Condutividade Térmica	18
3.3 Isolantes Térmicos	22
3.3.1 <i>Materiais Cerâmicos</i>	22
3.3.2 <i>Condutividade térmica dos Materiais Cerâmicos</i>	23
3.3.3 <i>Materiais Poliméricos</i>	24
3.3.4 <i>Condutividade térmica dos Materiais Poliméricos</i>	27
3.3.5 <i>A lã de vidro</i>	27
4 METODOLOGIA	29
4.1 Materiais e equipamentos	29
4.1.1 <i>Sistemas de Medição</i>	29
4.1.2 <i>Material cerâmico</i>	30
4.1.3 <i>Material polimérico</i>	34
4.2 Procedimento experimental	37
4.2.1 <i>Argamassa de revestimento</i>	37
4.2.2 <i>Argamassa de revestimento e material metálico</i>	39
4.2.3 <i>Materiais poliméricos</i>	40
4.3 Medição de incertezas	41
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
5.1 Validação dos resultados	43
5.1.1 <i>Argamassa de revestimento</i>	43
5.1.2 <i>Argamassa de revestimento e carga metálica</i>	45
5.1.3 <i>Polietileno de Alta Densidade (PEAD)</i>	46
5.1.4 <i>Polipropileno (PP)</i>	49

5.2 Cálculo da condutividade térmica (k).....	52
5.2.1 Argamassa de revestimento	52
5.2.2 Argamassa de revestimento e carga metálica	54
5.2.3 Considerações gerais dos cálculos da condutividade térmica nos Corpos de Provas poliméricos	55
5.2.4 Polietileno de Alta Densidade (PEAD)	56
5.2.5 Polipropileno (PP)	57
5.3 Cálculo de incertezas e resultados de medição	60
6 CONCLUSÃO.....	66
7 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	68
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
APÊNDICE A – Cálculos de incertezas.....	71

1 INTRODUÇÃO

A tendência mundial é que o consumo de energia aumente de maneira cada vez mais significativa com o passar do tempo, dado que tanto a tecnologia, quanto o aumento da população levam a esse caminho; o que induz questionamentos frequentes sobre formas de evitar essa tendência e garantir um crescimento sustentável.

Pensando nisso e tendo em foco a indústria de construção civil, uma forma de lidar com a questão levantada, quando se tratam de edificações e construções em geral, seria a utilização de materiais caracterizados por uma elevada resistência térmica; como materiais com boa capacidade de isolamento térmico, que poderiam garantir maior conforto térmico em dias mais quentes e/ou mais frios, diminuindo a necessidade de uso de aquecedores e de ar condicionado.

Assim, estudos pautados no desenvolvimento de novos materiais com propriedades físico-químicas como a condutividade térmica, que atendam a essa expectativa, tem tido cada vez mais relevância, de modo que a determinação dessas propriedades é de essencial importância. Em geral, essa determinação pode ser feita, dentre outras formas, por meio empírico.

Segundo Incropera *et al.* (2008), a condutividade térmica é definida como uma propriedade de transporte, visto que fornece informações sobre a taxa de transferência de energia por difusão térmica através de um material, de modo que conhecer essa propriedade é essencial para o desenvolvimento de um sistema térmico.

Afinal, tendo em vista o que foi apresentado até então, o presente trabalho baseou-se no aprimoramento e análise de um sistema de medição de condutividade térmica de baixo custo, que possa atender materiais cerâmicos e poliméricos.

Uma vez desenvolvido, seu funcionamento possibilitou o monitoramento da temperatura em pontos específicos de amostras cerâmicas e poliméricas ao longo do tempo, até alcançar o regime permanente. Com isso, garantiu-se os dados necessários para determinação da condutividade térmica utilizando a Lei de Fourier, em argamassa de revestimento, Polipropileno e Polietileno de Alta Densidade com precisão relativamente próxima do valor

teórico, o que assegura sua aplicação em novos materiais cerâmicos e poliméricos nos quais essa propriedade é, ainda, desconhecida.

1.1 Justificativa e Relevância

Os métodos aplicados atualmente para realização da medição da condutividade térmica de materiais cerâmicos, poliméricos e metálicos, apesar de eficazes, demandam adaptações que tornem possíveis a redução de seu custo final. Pensando nisso, a criação de um novo sistema que tenha baixo custo de produção, associado à possibilidade de aplicação para os vários tipos de materiais, constituem-se como uma facilidade de utilização do sistema.

A principal questão levantada está, entretanto, na possibilidade de utilização de um sistema que, apesar de testado em laboratório sob condições controladas, seja acessível para aplicação nas mais variadas situações e localidades, por ser um sistema simples de execução, com um método básico de aplicação. Ou seja, a principal relevância está em sua acessibilidade.

Além disso, as incertezas de sistemas de medição de condutividade térmica são normalmente inversamente proporcionais à condutividade. Medidores de condutividade de isolamentos térmicos apresentam, em geral, pequena precisão ou alto custo. Neste contexto, o dispositivo desenvolvido visa apresentar uma baixa incerteza de medição com baixos custos construtivos.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo do trabalho em estudo é testar e analisar um sistema radial de medição de condutividade térmica em materiais cerâmicos e aprimorá-lo para aplicação, teste e análise em materiais poliméricos.

2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos definidos foram:

- a) Estudar a aplicação do sistema de medição de condutividade térmica em materiais cerâmicos – argamassa de revestimento e argamassa de revestimento com volume de material metálico;
- b) Estudar a modificação do sistema de medição de condutividade térmica aplicado em materiais cerâmicos, para aplicação em materiais poliméricos;
- c) Montar o sistema de medição de condutividade térmica para polímeros;
- d) Realizar medições de condutividade térmica de materiais cerâmicos e poliméricos com propriedades térmicas conhecidas (argamassa de revestimento, argamassa de revestimento com adição de partículas de aço, Polietileno de Alta Densidade e Polipropileno), para validação dos resultados;
- e) Efetuar o estudo de possíveis erros e incertezas sobre as medições de condutividade térmica realizadas utilizando o sistema de medição.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Transferência de Calor

Segundo Incropera *et al.* (2008), “Transferência de calor (ou calor) é energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperaturas no espaço”, de modo que pode-se referir aos diferentes tipos de transferência de calor por *modos*.

Partindo disso, quando existir um gradiente de temperatura em meio estacionário, podendo esse meio ser sólido ou fluido, usa-se o termo *condução* para fazer referência ao modo de transferência de calor que acontecerá nesse meio.

3.1.1 Condução

Pode-se entender por Condução a transferência de energia das partículas mais energéticas para as menos energéticas de uma substância, ocasionada pela interação entre essas partículas (INCROPERA *et al.*, 2008).

A condução quando tratada em sistemas cilíndricos e esféricos, ou seja, sistemas radiais, permite que os sistemas possam ser analisados como sistemas unidimensionais, pois, normalmente, o gradiente de temperatura segue somente na direção radial (INCROPERA *et al.*, 2008).

A vantagem de se usar um sistema radial está no fato de que as perdas de calor se darão igualmente apenas em uma direção - a radial, enquanto que, caso o sistema trabalhado fosse um cubo/caixa, a perda de calor poderia se dar em todas as interfaces.

No caso do estudo em desenvolvimento, fez-se uso de sistema montado com cilindro oco, de modo que, de acordo com Incropera *et al.* (2008), as superfícies interna e externa do sistema radial estarão expostas a fluidos de diferentes temperaturas.

3.1.2 Determinação da Condutividade térmica

Entende-se por propriedade térmica, a resposta ou reação de um material à aplicação de calor. Tendo isso em vista, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), pautada na NBR 1520/2002, define Condutividade Térmica como uma “Propriedade física de um material homogêneo e isotrópico, no qual se verifica um fluxo de calor constante, com densidade de 1 W/m², quando submetido a um gradiente de temperatura uniforme de 1 Kelvin por metro”. Ou ainda, de acordo com o Projeto 02:135.07-001/4, é o “quociente do fluxo de calor pelo gradiente de temperatura”.

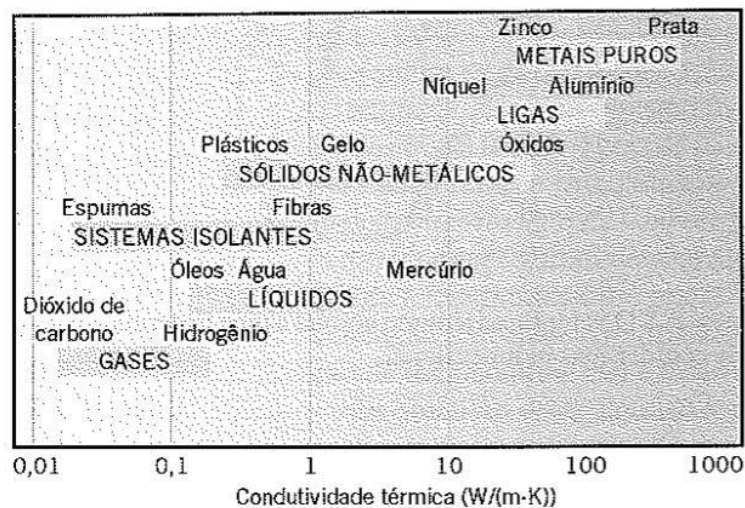
Segundo Incropera *et al.* (2008), a condutividade térmica é uma propriedade de transporte que “fornece uma indicação da taxa na qual a energia é transferida por processo de difusão” em um meio material.

Matematicamente analisando, a condutividade térmica associada à condução na direção r , pode ser definida a partir da Lei de Fourier pela Equação 1.

$$k_r = \frac{q''_r}{(\partial T/\partial r)} \quad (1)$$

Onde, q''_r é o fluxo térmico por condução na direção r , $\partial T/\partial r$ corresponde ao gradiente de temperatura, na mesma direção a que o meio é submetido (INCROPERA *et al.*, 2008). As faixas de condutividade térmica para vários estados da matéria, as temperaturas e pressões normais, podem ser observadas na Figura 1.

Figura 1 - Faixas de condutividade térmica



Fonte: INCROPERA, 2008.

Afinal, tendo-se em mente a importância de seu conhecimento, a condutividade térmica de vários materiais já é predeterminada e, no caso de alguns deles, pode ser vista na Tabela 1.

Tabela 1 - Materiais de Condutividade Térmica conhecida

Material	Condutividade Térmica (W/m.K)
Cortiça	0,039
Manta de fibra de vidro, enrolada com papel	0,046
Algodão	0,06
Água	0,64
Óleo	0,134
Madeiras de lei (carvalho, bordo)	0,16
Papel	0,18

Fonte: INCROPERA *et al.*, 2008 (ADAPTADO).

3.1.3 Sistemas Radiais

Em sistemas cilíndricos e esféricos existem gradientes de temperaturas somente na direção radial, o que garante a possibilidade de avaliá-los como sistemas unidimensionais (INCROPERA *et al.*, 2008). Assim, analisando especificamente o cilindro, é possível utilizar a Lei de Fourier para expressar a taxa de transferência de calor, como pode ser visto na Equação 2.

$$q_r = \frac{(T_i - T_e)}{R_t} \quad (2)$$

Onde T representa a temperatura em Kelvin, R_t representa o somatório das resistências térmicas em K/W e q_r representa a taxa de transferência de calor (que é uma constante na direção radial) em W.

Ainda, levando em conta que a resistência térmica tem a forma apresentada na Equação 3, é possível chegar a Equação 4 e desta obter a condutividade com um rearranjo dos termos, resultando na Equação 5.

$$R_{cond} = \frac{\ln(r_e/r_i)}{2\pi Lk} \quad (3)$$

$$q_r = \frac{2\pi Lk(T_i - T_e)}{\ln(r_e/r_i)} \quad (4)$$

$$k = \frac{q_r \ln(r_e/r_i)}{2\pi L(T_i - T_e)} \quad (5)$$

Onde L é referente ao comprimento do cilindro (m), r_i e r_e aos raios interno e externo do cilindro oco (m), respectivamente, e T_i e T_e as temperaturas interna e externa (K) do cilindro durante o processo de transferência de calor.

3.2 Medidores de Condutividade Térmica

Pode-se considerar a condutividade térmica como uma das principais propriedades de um material, de forma que existe, atualmente, uma grande variedade de métodos para medição dessa propriedade térmica. Sua determinação experimental, no entanto, requer alta precisão e pode apresentar algumas dificuldades (SANTOS, 2002).

Os métodos para determinação de propriedades térmicas dos materiais podem ser divididos em dois principais grupos: estacionários e dinâmicos (SIMIONI, 2005).

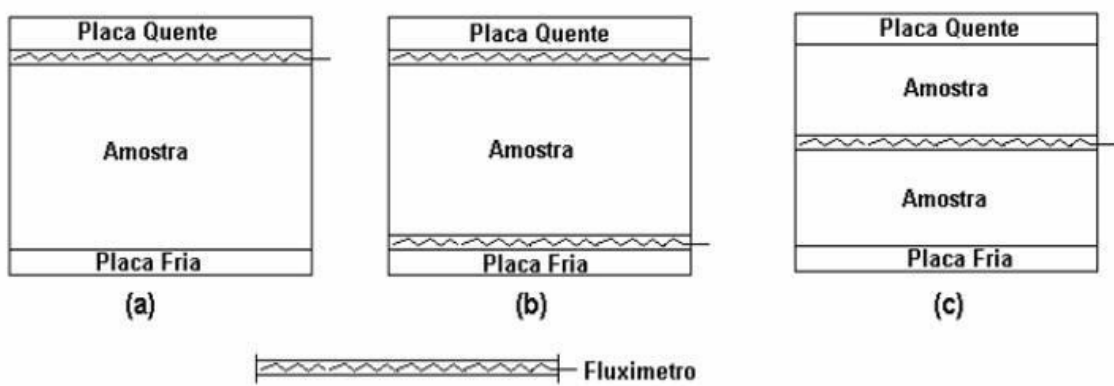
Os métodos em regime estacionário são de mais fácil realização e envolvem simplicidade na construção, todavia exigem também um grande intervalo de tempo até que se atinja o regime estacionário. Dentro desses métodos em regime estacionário existem duas grandes abordagens: o princípio da *placa quente protegida* e o princípio *fluximétrico* (BORTOLI; KNIJNIK; VIEIRA, 2010).

O método fluximétrico caracteriza-se por atingir o regime estacionário mais rapidamente e, nele, a amostra é submetida a um fluxo de calor gerado por uma resistência alimentada por uma fonte de tensão regulável, de modo que o calor flui pela amostra, sendo dissipado na placa fria; o que resulta em um fluxo aproximadamente unidimensional. Por fim, o fluxo é medido com um fluxímetro e, tendo-se as medidas auxiliares do sistema (área, comprimento da amostra e temperaturas), é possível medir a condutividade térmica utilizando a lei de Fourier (BORTOLI; KNIJNIK; VIEIRA, 2010).

Esse método é muito semelhante ao método da Placa Quente Protegida, de modo que a diferença básica para o segundo é que a medição do fluxo de calor se dá por fluxímetros previamente calibrados (MOURA, 1993).

O método de medição fluximétrico pode ser ilustrado pela Figura 2. Dentre os arranjos observados na Figura 2, (b) é o mais recomendado, pois as perdas laterais de calor são detectadas mais facilmente (MOURA, 1993).

Figura 2 - Possíveis arranjos do sistema fluximétrico para medição da condutividade térmica



Fonte: SIMIONE, 2005.

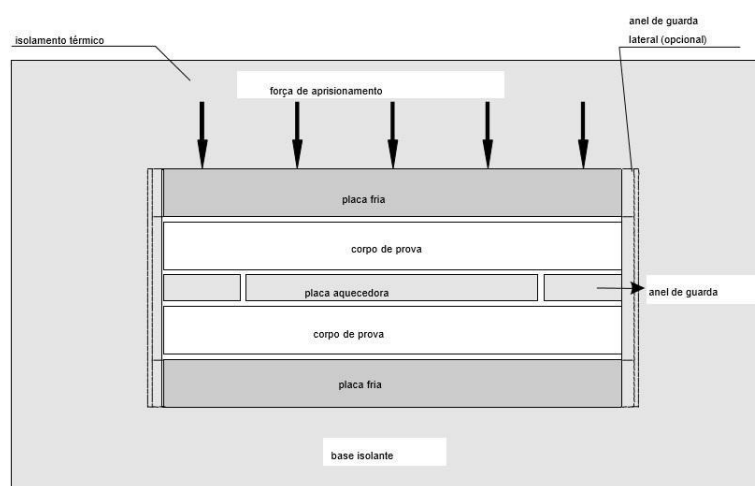
O método adotado para desenvolvimento deste estudo é o método da Placa Quente Protegida, que baseia-se na utilização de uma amostra, ou par de amostras, montadas com bom contato térmico entre placas. Essas placas são as placas de aquecimento, ou placa quente, e as placas de refrigeração, ou placas frias. O funcionamento do sistema é pautado no estabelecimento de um fluxo térmico nas amostras em regime permanente, de modo que mede-se o fluxo de calor e a diferença de temperatura através das amostras. Então, tendo-se conhecimento das espessuras das amostras, utiliza-se a equação de Fourier para determinação da condutividade térmica (MOURA, 1993).

Ainda, o método da Placa Quente Protegida baseia-se na determinação da Condutividade Térmica pela medição do gradiente de temperatura médio estabelecido sobre o corpo de prova, a partir de um certo fluxo de calor e em condições de regime permanente (ABNT NBR 13507, 2003).

Segundo a norma ABNT NBR 13507 (2003), a montagem de um sistema para aplicação do método da placa quente protegida tem como formação básica duas seções de aquecimento independentes, de modo que a central é conhecida como seção de medição e a externa, como “anel de guarda” (restringe a perdas laterais de calor possibilitando o comportamento térmico de uma placa infinita). Com isso, assume-se a existência de um fluxo de calor unidimensional na seção de medição, quando os sensores de temperatura instalados nesta seção e no anel de guarda indicarem o mesmo valor.

O conjunto possui ainda, duas placas frias isotérmicas envolvendo dois corpos-de-prova idênticos, os quais, por sua vez, envolvem a placa aquecedora, e uma camada de isolante térmico envolvendo o conjunto como um todo. Esse sistema pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 - Conjunto do método da placa quente protegida



Fonte: ABNT 13507/2003.

“Há ainda a possibilidade das placas serem construídas na forma circular ou quadrada, podendo ser montadas de forma a obter o fluxo de calor no sentido vertical ou horizontal” (MOURA, 1993, p. 16).

Esse método, de acordo com Moura (1993), pode ser utilizado sem o Anel de Guarda, de modo que a área de medição passa a compreender toda a placa de aquecimento, possibilitando a existência de erro devido às perdas laterais nas amostras. Nesse caso, é preciso empregar amostras com propriedades térmicas conhecidas, para que possam ser utilizados fatores de correção para calibração do equipamento.

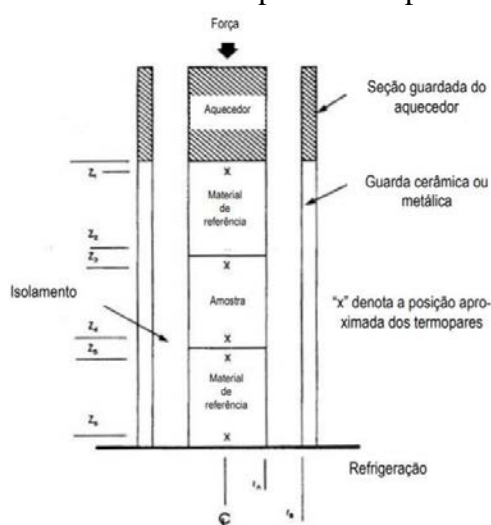
Ainda nos métodos de determinação da condutividade térmica de materiais, tem-se o método do Fio Quente Paralelo, no qual a propriedade é calculada “a partir do gradiente de temperatura gerado por uma fonte de calor em um meio material de dimensões infinitas (SACHT *et al*, 2010).” De acordo com Sacht *et al* (2010), o equipamento do fio quente conta com dois fios, em que um é fio quente e o outro um termopar Tipo K. A condutividade térmica é calculada pela aplicação de uma corrente contínua no fio quente, com a conferência contínua do gradiente de temperatura.

Outro método conhecido é a técnica de medição de condutividade térmica baseada na norma ASTM 1225-E: *Guarded-Comparative Logitudinal Heat Flow Technique*.

Esta norma descreve uma técnica de regime estacionário para determinação da condutividade térmica de sólidos homogêneos e opacos. Este teste é designado para materiais cuja condutividade térmica “ λ ” esteja na faixa de $0,2 < \lambda < 200$ W/m.K numa faixa de temperaturas de 90 e 1300 K. Esta norma pode ser usada em ensaios fora destas faixas, porém, com um decréscimo da precisão dos valores de condutividade térmica medidos (MÜLLER, 2007, p. 3).

O método da norma ASTM 1225-E pode ser ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - Modelo fundamental apresentado pela ASTM 1225-E



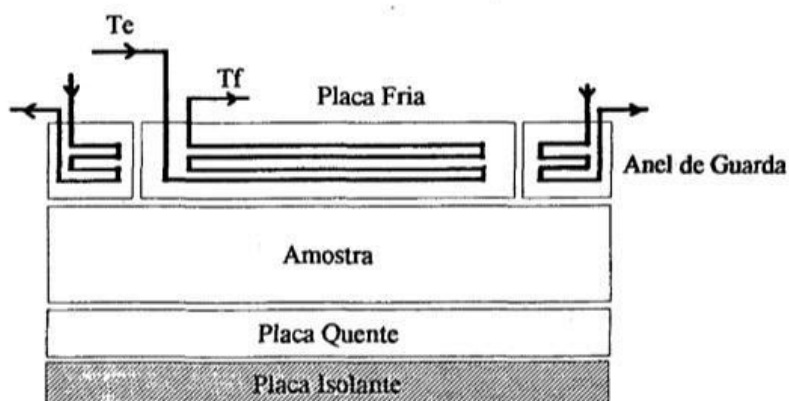
Fonte: MÜLLER, 2007.

Além dos métodos Fluximétrico, da Placa Quente Protegida e da técnica baseada na norma ASTM 1225-E, tem-se ainda o Método do Calorímetro a Água.

Neste método a área de medição do fluxo de calor e o anel de guarda são posicionados na placa fria, Figura 3.4. Mede-se as temperaturas de entrada e de saída do fluido de refrigeração que circula pelo núcleo e com a capacidade térmica por unidade de volume, calcula-se o fluxo de calor através das amostras. Este método não requer calibração e é empregado para isolantes (refratários) em temperaturas elevadas (placa de aquecimento superior a 400°C) (MOURA, 1993, p. 19).

A Figura 5 mostra a montagem básica desse método de medição de condutividade térmica.

Figura 5 - Método calorimétrico a água



Fonte: MOURA, 1993.

3.3 Isolantes Térmicos

3.3.1 Materiais Cerâmicos

Entende-se por materiais cerâmicos, materiais inorgânicos, não metálicos, com elementos metálicos e não metálicos em sua formação, que interagem entre si através de ligações, essencialmente, iônicas e/ou covalentes.

Essas ligações ditam algumas propriedades importantes dos materiais cerâmicos, tais como alta dureza, baixa tenacidade e ductilidade, boa resistência à corrosão, elevadas temperaturas de fusão e capacidade de atuar como bons isolantes térmicos e elétricos (característica justificada pela ausência de elétrons livres na constituição desses materiais).

Análises de materiais cerâmicos mostraram que eles são uma mistura de fases cristalinas e vítreas, cada uma de diferentes composições, geralmente combinadas com porosidade, em uma larga variedade de proporções e arranjos (KINGERY, 1960).

Segundo Zanutto *et al.* (1991), em termos de propriedades, os materiais cerâmicos foram subestimados por muito tempo para fins de engenharia devido a sua predisposição a ocorrência de fratura frágil quando voltados para aplicações estruturais, bem como a baixa tenacidade e resistência ao impacto, em geral, característicos e mencionados anteriormente.

Apesar disso, essa classe de materiais também apresenta propriedades de relevância para aplicações que tem como requisito alta resistência à abrasão, inércia química e boa resistência térmica, como é o caso de seu uso em biomateriais (implantes ortopédicos), no recobrimento de fornos para a indústria siderúrgica (refratários) e, mesmo, nas aplicações que mais demandam o uso de cerâmicas dos mais variados tipos: a construção civil.

Em todos esses casos, o conhecimento dessas propriedades pode ser alcançado a partir de diferentes métodos e abordagens, considerando as particularidades de cada tipo de material cerâmico.

3.3.2 Condutividade térmica dos Materiais Cerâmicos

Os materiais cerâmicos possuem determinadas propriedades que influenciaram no aumento significativo de sua utilização, o que é reforçado quando é analisada a importância dos refratários atuando como isolantes térmicos em fornos de indústrias siderúrgicas e nucleares, por exemplo.

De acordo com Kingery (1960), em geral, tem destaque o estudo da capacidade desses materiais de atuar como bons isolantes térmicos ou com capacidade elevada de resistir a choques térmicos, propriedades que sofrem influência de fatores como a porosidade - que atua como uma segunda fase dispersa, diminuindo a condutividade térmica; fases presentes - fases amorfas são menos organizadas, reduzindo a condutividade térmica; composição química - a presença de íons em solução sólida diminui a condutividade térmica; teor de umidade - para materiais refratários e temperatura.

Devido à existência de planos de deslizamento independentes, ligações iônicas e/ou covalentes e ordem à longa distância, os cerâmicos são materiais duros e frágeis com pouca tenacidade e ductilidade. A ausência de elétrons livres torna-os bons isolantes térmicos e elétricos (BARSOUM, 1997 apud LINO, 2006).

Normalmente, materiais cerâmicos tem condutividade térmica consideravelmente menor que materiais metálicos, porém maior que materiais poliméricos. Isso pode ser melhor observado quando se compara a condutividade térmica de uma argamassa de revestimento, equivalente a 0,72 W/mK de acordo com Incropera *et al.* (2008), com a do ferro, igual a 80,2 W/mK ou com a do PET, que vale em torno de 0,24 W/mK.

Na Tabela 2 é possível observar os valores de condutividades térmicas de alguns materiais cerâmicos, que, apesar de mais conhecidos por serem caracterizados como bons isolantes térmicos, também podem sofrer uma grande variação de um material para outro.

Tabela 2 - Condutividade térmica de materiais cerâmicos

Material	Condutividade Térmica (W/m.K)
Ar	0,024
Azulejo acústico	0,058
Vermiculita	0,068
Placas de gesso	0,17
Areia	0,27
Vidros	0,5-1,5
Argamassa de revestimento	0,72
Tijolo comum	0,72
Argila	1,3
Concreto (com brita)	1,400
Alumina	30-35
Berília	63-216

Fonte: INCROPERA *et al.*, 2008 (ADAPTADO).

3.3.3 Materiais Poliméricos

Em termos gerais, os materiais poliméricos são definidos como macromoléculas originadas de unidades estruturais denominadas monômeros, as quais são formadas por numerosas unidades de repetição, que são os *meros*. Essas unidades tem baixa massa molar e interagem entre si através de ligações covalentes (CANEVAROLO, 2006).

A produção de materiais poliméricos, segundo Canevarolo (2006), pode se dar a partir de matérias-primas de fontes naturais, como o látex (dando origem as borrachas naturais); de hulha ou carvão mineral (fornecendo o etileno para produção do polietileno) e do Nafta

proveniente do tratamento de petróleo (que garante, dentre outros polímeros, uma rota de produção de polipropileno).

Além disso, em geral os polímeros podem ser classificados quanto à sua estrutura química em Poliolefinas (de cadeia basicamente carbônica), Poliamidas e Poliésteres, por exemplo; quanto ao seu método de preparação, em polímeros de adição e condensação e quanto ao seu comportamento mecânico em plásticos (sendo os mais comuns, termoplásticos e termofixos), elastômeros e fibras. Por fim, quanto ao seu desempenho mecânico em termoplásticos convencionais, especiais, de engenharia, entre outros (CANEVAROLO, 2006).

As diferentes classificações permitem uma vasta gama de aplicações para esses materiais, os quais tem conquistado espaço no cenário atual tanto por suas características gerais principais; como baixa densidade, facilidade de processamento e baixo custo quando comparado a outras classes de materiais; quanto à possibilidade de emprego nos mais diversos setores; indo da indústria automobilística (no revestimento de cabos), passando pela indústria têxtil (na confecção de roupas sintéticas), até a área da saúde (com a produção de próteses em geral).

É interessante ressaltar ainda que os materiais poliméricos são, em sua maioria, sensíveis à degradação em temperaturas extremas, altas ou baixas. Por essa razão é importante ter conhecimento, antes de trabalhar com esses materiais, de suas principais temperaturas de transição térmicas, como a Temperatura de Fusão (T_m), que corresponde ao valor médio de temperatura, no qual ocorre a fusão da região cristalina durante o processo de aquecimento do material (CANEVAROLO, 2006).

Neste ponto, a energia do sistema atinge o nível necessário para vencer as forças intermoleculares secundárias entre as cadeias da fase cristalina, destruindo a estrutura regular de empacotamento, mudando do estado borrachoso para o estado viscoso (fundido). Esta transição só ocorre na fase cristalina, portanto, só tem sentido se aplicada para polímeros semicristalinos (CANEVAROLO, 2006, p. 150).

Existem ainda, outras temperaturas de transição de relevância, como por exemplo, a Temperatura de Transição Vítrea (T_g), que é referente, em resumo, a um valor médio de temperatura a partir do qual “*as cadeias poliméricas de fase amorfa adquirem mobilidade*”,

ou seja, que vai dizer sobre a capacidade de mudança de conformação de determinado material (CANEVAROLO, 2006).

O tipo e o número de ligações, a distribuição de massa molar e o tamanho das cadeias poliméricas são os principais responsáveis pelas características físicas e químicas apresentadas pelos materiais poliméricos, como, por exemplo, sua maior ou menor densidade, cristalinidade e isolamentos térmico e elétrico.

Por fim, segundo Lucas *et al.* (2001), é comum usar siglas para citar polímeros, as quais são baseadas na escrita da nomenclatura do polímero em inglês, como por exemplo o PET, que deriva de *Poli(Ethylene Terephtalate)*.

Na Tabela 3, é possível observar alguns nomes usuais de polímeros e suas respectivas siglas.

Tabela 3 - Nomes comuns de polímeros e suas respectivas siglas

Nomes comuns de polímeros	Siglas
Polietileno	PE
Polietileno de Alta Densidade	HDPE (ou PEAD)
Polietileno de Baixa densidade	LDPE (ou PEBD)
Polipropileno	PP
Poli(metacrilato de metila)	PMMA
Poliestireno	PS
Poli(tereftalato de etileno)	PET

Fonte: LUCAS *et al.*, 2001 (ADAPTADA)

Dentre os materiais poliméricos citados na Tabela 3 e mencionados anteriormente no texto, é interessante destacar o Polietileno de Alta Densidade (PEAD) e o Polipropileno (PP), os quais serão mencionados por suas siglas no decorrer do presente estudo.

Algumas das características e propriedades de interesse dos polímeros destacados podem ser vistas na Tabela 4, como suas temperaturas de fusão e de transição vítrea.

Tabela 4 - Características do PEAD e do PP

Polímero	Temperatura de Fusão(T_m)	Temperatura de Transição Vítreia (T_g)	Mero
Polipropileno	165°C	4-12°C	$\left[\text{CH}_2 - \text{CH}_2 \right]_n$
Polietileno de Alta Densidade	135°C	-120°C	$\left[\text{CH}_2 - \underset{\text{CH}_3}{\text{CH}} \right]_n$

Fonte: CANEVAROLO, 2006 (ADAPTADO).

3.3.4 Condutividade térmica dos Materiais Poliméricos

Como mencionado anteriormente, as propriedades gerais dos materiais poliméricos tem forte dependência com a temperatura a que o polímero está sendo submetido, o que pode ser explicado pela estrutura molecular que compõe esse tipo de material.

Na Tabela 5 é possível observar os valores de condutividade térmica de alguns materiais poliméricos. Apesar da variação existente no valor de k de um polímero para outro, eles possuem valores de condutividade térmica expressivamente menores que para os materiais metálicos e, mesmo, para a maioria dos materiais cerâmicos (SANTOS, 2005).

Tabela 5 - Condutividade Térmica de Materiais Poliméricos

Polímero	Condutividade Térmica (W/m.K)
Polipropileno	0,21
Polietileno de alta densidade	0,46-0,52
Poliestireno	0,027
Teflon	0,25
Poli(cloreto de vinila)	0,15-0,21

Fonte: INCROPERA, 2008 (ADAPTADO).

O destaque, entretanto, está na observação das condutividades térmicas do Polietileno de Alta Densidade e do Polipropileno, que são materiais poliméricos termoplásticos, poliolefínicos e convencionais, os quais serão estudados neste trabalho.

3.3.5 A lã de vidro

A lã de vidro é um material formado “a partir de sílica e sódio aglomerados por resinas sintéticas em alto forno”. Dentre as principais vantagens de sua utilização destacam-se o fato de que são leves e de fácil manuseio, proporcionam isolamento acústico, não propagam chamas e não se deterioram, de maneira que são oferecidas ao mercado na forma de manta, podendo ser manta aluminizada, ensacada, entre outras (DALBELLO *et al.*, 2006).

Vale ressaltar que a lã de vidro utilizada no estudo desenvolvido é do tipo manta de fibro-cerâmica, comumente aplicada em tubulações e, como é o caso, em contextos que envolvam temperaturas elevadas, uma vez que esse material pode resistir a temperaturas de até 450°C, com uma condutividade térmica em torno de 0,045-0,046 W/mK (DALBELLO *et al.*, 2006).

4 METODOLOGIA

4.1 Materiais e equipamentos

4.1.1 Sistemas de Medição

Para desenvolvimento do presente do trabalho foram necessários alguns equipamentos e aparelhos específicos, que estavam disponíveis para utilização nos laboratórios do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAT), do CEFET-MG, como termopares Tipo K, Indicador TD-880, escala metálica, paquímetro, multímetro e fonte de tensão ajustável.

Os termopares, em geral, podem ser definidos como sensores de temperatura, os quais apresentam-se em variados tipos, dentre os quais destacam-se os tipos K, J e B. O tipo usado nesse estudo foi o Tipo K, que tem aplicabilidade em uma extensa faixa de temperaturas, desde temperaturas abaixo de 0°, a temperaturas acima de 600°C, resistindo bem a atmosferas inertes e oxidantes (OLIVEIRA, 2008). A incerteza média desses termopares acoplados ao indicador TD-880 é de 0,6°C e foram utilizados quatro termopares em cada ensaio (Termopares calibrados no CEFET-MG, *Campus II*, em um banho termostático do Laboratório do Termofluídodinâmica).

Em conjunto aos termopares, foram utilizados dois indicadores TD-880, os quais são termômetros digitais portáteis com dois canais de entrada, que podem fornecer as temperaturas °C, °F e K; tendo resolução de 0,1°C e incerteza de 0,6°C (para os termopares Tipo K utilizados). Eles aceitam o uso de termopares dos mais variados tipos, mas, no presente caso, foram utilizados com termopares do Tipo K.

Além disso, foram utilizados também uma escala metálica de 1m, com resolução de 0,005 m e incerteza de 1mm, e um paquímetro analógico com resolução de 0,00002 m e incerteza de 0,0005m. O primeiro foi usado para medição do comprimento dos corpos de prova, enquanto o último para medição do raio dos CP's.

Para obtenção da potência dos ensaios, foi utilizado um multímetro com incerteza de 1% do valor lido e uma fonte de corrente contínua com tensão ajustável da marca *THE BOOSTER*,

cuja incerteza não influenciará diretamente nas incertezas do sistema, pois a potência produzida poderia ser medida pelo multímetro.

4.1.2 Material cerâmico

Visando o desenvolvimento do sistema de medição de condutividade térmica, foi realizada a montagem da estrutura para construção do corpo de prova, composta por um molde tubular de PVC com corte longitudinal, com duas abraçadeiras metálicas envolvendo-o, evitando, dessa maneira, que o tubo abraque durante a confecção e minimizando a possibilidade de comprometimento da integridade do corpo cerâmico.

Além disso, dois furos radiais foram produzidos no tubo, um no centro e outro na periferia, para inserir pinos do mesmo diâmetro dos termopares durante a produção do corpo de prova, tornando possível realizar a medição das temperaturas internas no corpo.

Em cada uma das extremidades do tubo foi inserido um tampão polimérico com um furo central, para o encaixe do resistor elétrico de 224Ω , utilizado para o aquecimento do corpo de prova cerâmico. O resistor quando ligado a tensão elétrica monofásica de 127V, produz a potência de 71 W por efeito Joule. Os tampões tem objetivo de impedir que a massa cerâmica pastosa saia do molde cilíndrico durante a solidificação a frio e de centralizar o resistor dentro do corpo de prova em solidificação.

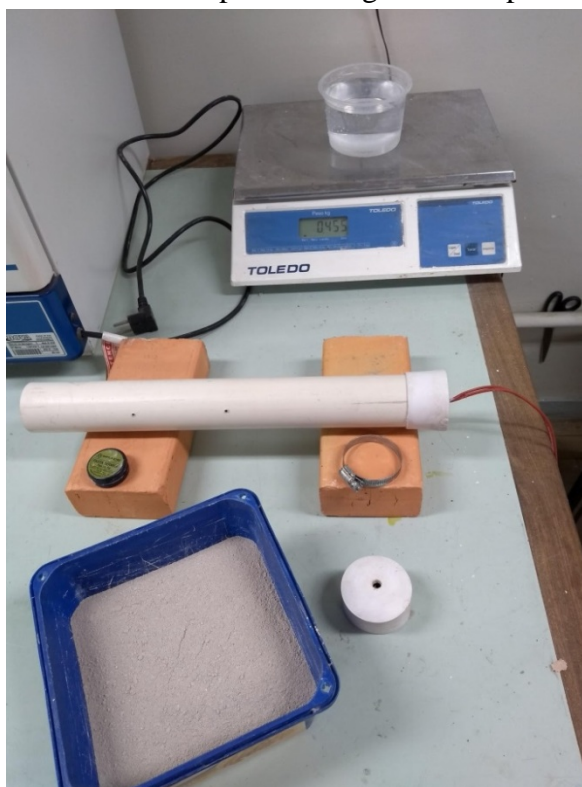
Uma pasta térmica de óxido de zinco e silicone, com adição de cobre em pó, foi utilizada para recobrir a superfície do resistor elétrico antes do preenchimento do molde tubular com a massa cerâmica pastosa para solidificação, visando à minimização de perdas térmicas no contato entre o resistor e o corpo de prova cerâmico e, com isso, reduzindo erros de medição. A possível presença de ar entre o resistor e o corpo de prova cerâmico produziria uma resistência de contato, alterando o valor de condutividade térmica medido pelo sistema de medição.

A massa cerâmica que originará o corpo de prova será produzida, basicamente, com cimento, cal, areia e água, de modo que em testes com novos materiais de propriedades desconhecidas, serão adicionados a ela segmentos de material metálico, com o objetivo de estudar a variação da condutividade térmica de materiais compósitos.

Após a solidificação, as extremidades do corpo de prova cerâmico foram isoladas com lã de vidro e os dois pinos metálicos de 2 mm de diâmetro, inseridos no início do processo de solidificação, foram removidos garantindo que o corpo de prova tenha os furos radiais para inserir os termopares para medição da temperatura interna do corpo de prova tubular.

Na Figura 6 é possível observar a fotografia do molde tubular de PVC com os orifícios central e periférico, o resistor inserido no molde, os tampões poliméricos, a embalagem de pasta térmica, as abraçadeiras e a mistura ainda seca para confecção do corpo de prova de argamassa de revestimento.

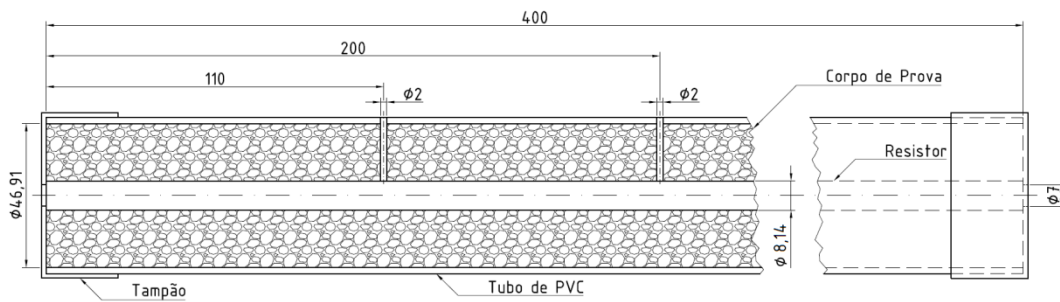
Figura 6 - Materiais utilizados para montagem do corpo de prova cerâmico



Fonte: Próprio Autor.

Esquemáticamente, a estrutura de moldagem do CP de ensaio, pode ser observada na Figura 7. Como mencionado, o molde será formado, então, por um tubo de PVC de 400mm e diâmetro de 46,91mm, com um corte vertical; dois tampões poliméricos e duas abraçadeiras para garantir a fixação do molde quando fechado, um furo de 2mm na periferia do tubo (a 110mm) e um furo de 2mm ao centro.

Figura 7 - Representação esquemática do molde



Fonte: Próprio Autor (Adaptado de Vilela, 2017).

Todas essas dimensões delimitaram as dimensões dos próprios corpos de prova cerâmicos, tanto para argamassa de revestimento, quanto para a argamassa de revestimento com carga metálica.

É interessante ressaltar ainda o furo de 7mm de diâmetro no tampão polimérico, através do qual os fios do resistor passam no momento da moldagem do corpo de prova, bem como as dimensões do próprio resistor, de 8,14mm de diâmetro.

Uma vez realizada a confecção do corpo de prova, foi utilizada uma balança digital *TOLEDO* para medição das quantidades de cada material adicionado à massa cerâmica. Foram medidas temperaturas em quatro pontos distintos: superficial central, superficial periférico, interna central, interna periférica.

Os diâmetros do resistor elétrico (antes da confecção do corpo de prova) e do corpo tubular cerâmico foram medidos com o paquímetro e os comprimentos (Figura 8) com a escala metálica conforme mencionado no item anterior, para a determinação da condutividade térmica do material ensaiado e para análise de incertezas da condutividade térmica.

Figura 8 - Medição do comprimento do corpo de prova



Fonte: Próprio Autor.

Ao final dos ensaios, os corpos de prova foram destruídos (Figura 9) com um martelo, descartados em local adequado e o resistor elétrico pode ser recuperado em perfeitas condições para novo uso.

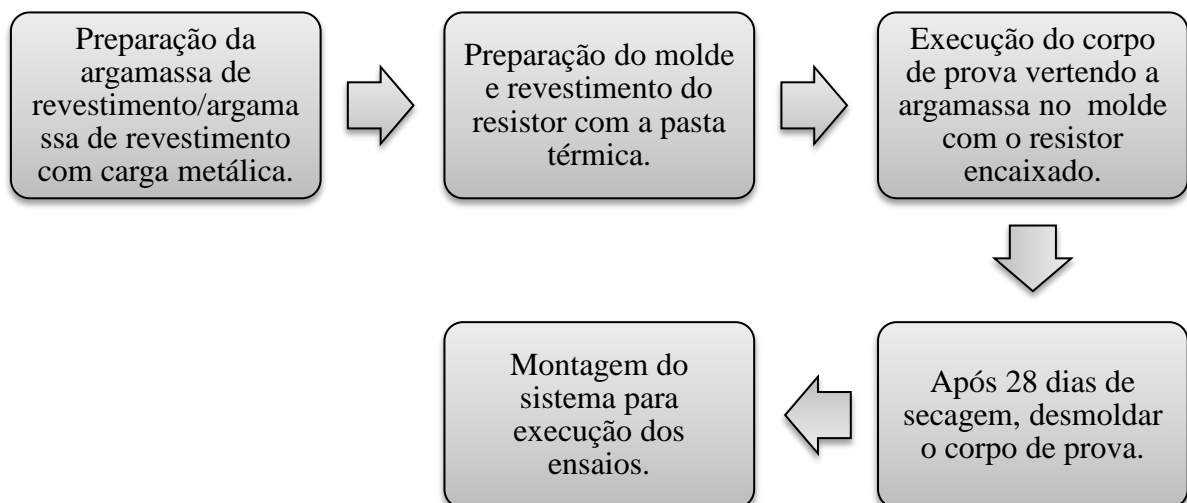
Figura 9 - Recuperação do resistor elétrico



Fonte: Próprio Autor.

De maneira geral, as etapas de preparação para realização dos ensaios com o corpo de prova de argamassa de revestimento podem ser observadas de maneira simplificada na Figura 10.

Figura 10 - Procedimentos de preparação dos ensaios com materiais cerâmicos



Fonte: Próprio autor.

4.1.3 Material polimérico

O desenvolvimento do sistema de medição de condutividade térmica para materiais poliméricos envolveu, inicialmente, o uso de dois cilindros poliméricos maciços, com dimensões iniciais de 50mm de diâmetro e 400mm de comprimento. Os materiais dos tubos foram o Polietileno de Alta de Densidade (PEAD) e o Polipropileno (PP), que possuíam propriedades térmicas conhecidas.

Os cilindros poliméricos podem ser vistos na Figura 11, sendo o PEAD o tubo marcado com tinta verde.

Figura 11 - Tubos poliméricos



Fonte: Próprio autor.

Para a realização do estudo, os cilindros poliméricos precisaram ser preparados: cortados em quatro partes cada um, por uma serra mecânica e então, furada e faceada em torno e furadeira mecânicos. O resultado desse processo pode ser observado na Figura 12.

Figura 12 - Tubos poliméricos divididos em quatro partes



Fonte: Próprio autor.

Um furo foi realizado ao longo do interior do tubo, no eixo central, com uma broca de aço rápido de 8mm de diâmetro, para comportar o resistor, e outros dois, ao longo do diâmetro, no centro de duas das partes cortadas em cada tubo, representando-se como furos central e de periferia no sistema já montado. A realização deste último foi feita com uma broca de aço rápido de, aproximadamente, 2mm de diâmetro.

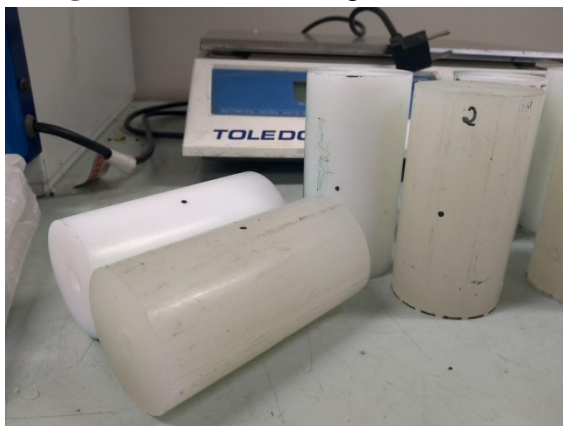
O furo central está representado na Figura 13, enquanto os furos de centro e periferia estão representados como os pontinhos pretos na Figura 14.

Figura 13 - Furo central nas quatro partes dos tubos poliméricos



Fonte: Próprio autor.

Figura 14 - Furo ao longo do diâmetro



Fonte: Próprio autor.

Uma vez preparados os tubos poliméricos, foi realizada a montagem do sistema, com a união das quatro partes obtidas tanto para o PEAD, quanto para o PP; o que foi efetuado encaixando-as entre si, ao mesmo tempo em que as encaixava em um resistor elétrico.

O resistor foi utilizado, novamente, para o aquecimento do corpo de prova polimérico, dispondo de uma resistência de 224 Ω . O equipamento foi então ligado, por meio de um *plug*

macho, a uma fonte de corrente contínua com tensão ajustável modelo PJS-0680, da marca *TRE BOOSTER*, o qual, por sua vez, precisou ser ligado à rede (127V). A fonte de corrente e tensão variáveis pode ser observada na Figura 15.

Figura 15 - Fonte de corrente contínua de tensão ajustável

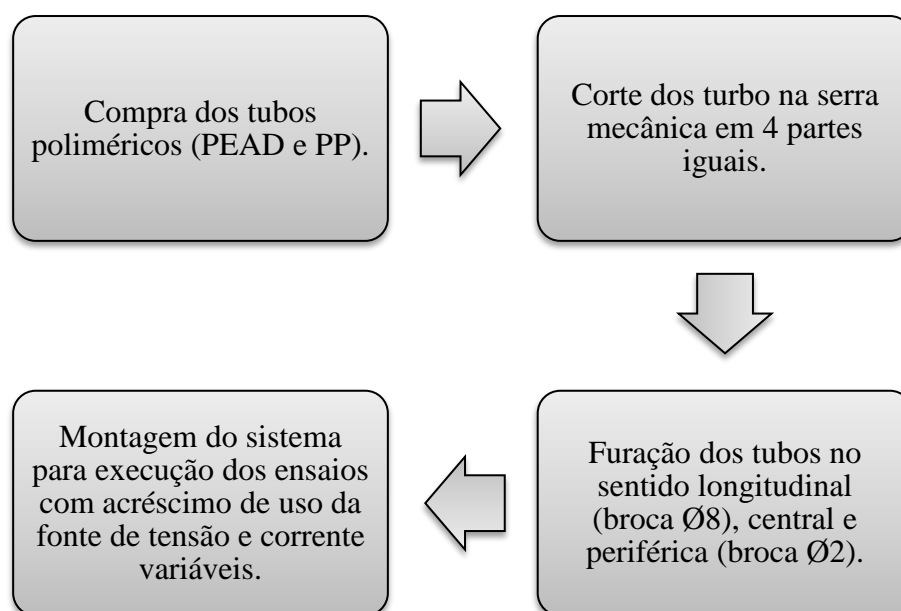


Fonte: Próprio autor.

As extremidades do corpo de prova polimérico foram isoladas com lã de vidro e a medição das temperaturas foi realizada com a utilização de quatro termopares do tipo K, lidos por dois indicadores modelo TD-880, da marca ICEL, de maneira que, durante o ensaio as temperaturas obtidas foram anotadas.

Vale ressaltar que após a preparação dos tubos poliméricos, os corpos de prova e o resistor elétrico tiveram dimensões medidas, visando à garantia do uso de valores mais exatos de comprimento e de diâmetro, que foram usados posteriormente para o cálculo da condutividade térmica e na análise de incerteza.

Na Figura 16 é mostrado de maneira mais objetiva o passo à passo de desenvolvimento das etapas de preparação dos ensaios com os materiais poliméricos, conforme descrito anteriormente.

Figura 16 - Procedimentos de preparação dos ensaios com materiais poliméricos

Fonte: Próprio autor.

4.2 Procedimento experimental

4.2.1 Argamassa de revestimento

Utilizando-se um traço de 1:1:5 (cimento, cal e areia), foram medidos 1000g de areia, 200g de cal, 200g de cimento e 322ml de água para confecção da massa cerâmica de argamassa de revestimento, a qual foi posteriormente vertida no tubo de PVC com o resistor previamente posicionado e deixada passar por processo de secagem e cura pelo período de sete dias.

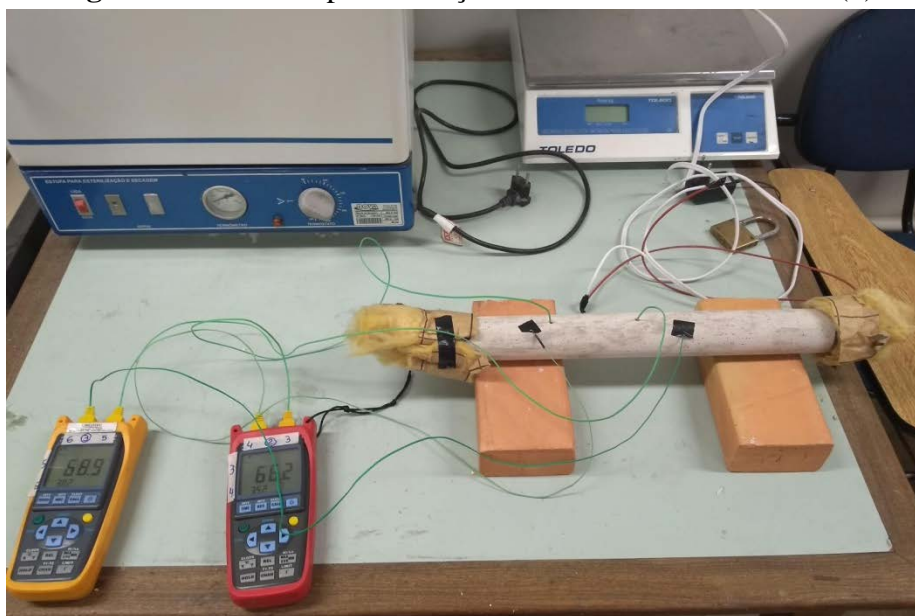
Decorrido esse tempo, o corpo de prova foi desmoldado e sua secagem final foi promovida de maneira gradual, ligando-se o resistor e deixando-o aquecer por períodos curtos - aproximadamente 30 minutos - com o intuito de garantir menor ocorrência de trincas devido à secagem abrupta, que pode ser causada pelo resistor elétrico em funcionamento.

Uma vez que o corpo de prova está suficientemente seco, realizou-se a montagem do sistema para medição das temperaturas no interior e na superfície do corpo de prova; nas regiões central e periférica, como pode ser observado na Figura 17.

A montagem apresentada na Figura 17 é a mesma utilizada para todos os materiais cerâmicos testados com esse sistema de medição no presente trabalho, visto que trata-se da estrutura básica proposta para a construção do sistema de medição de baixo custo.

A partir dessa montagem foram obtidas as temperaturas utilizando termopares tipo K que podem ser vistos na Figura 17 e, com elas, a diferença de temperatura média (ΔT) entre os dois pontos de medição, após o sistema entrar em regime permanente de temperaturas. Utilizando a Equação 5, foi possível calcular a condutividade térmica para os materiais testados - nesse caso, a argamassa.

Figura 17 - Sistema para medição da condutividade térmica (k)

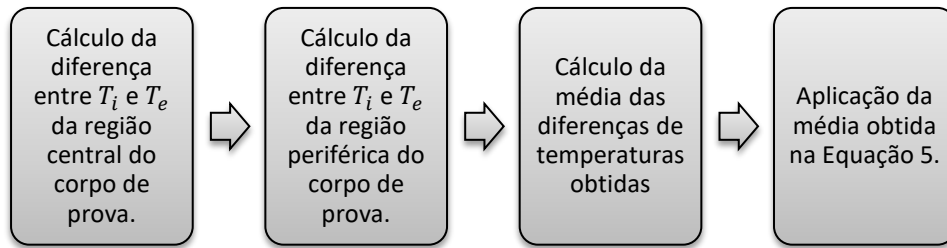


Fonte: Próprio Autor.

Vale ressaltar que, visando à obtenção de mais dados de estudo e, conseqüentemente, maior confiabilidade nos resultados, os ensaios para a argamassa de revestimento foram realizados em triplicata, de maneira que o resultado final é resultado da média dos três resultados obtidos.

Na Figura 18, o fluxograma mostra de maneira simplificada a ordem de obtenção e utilização dos dados para que seja possível a realização do cálculo da condutividade térmica. Esse raciocínio inicial foi aplicado nos testes realizados com os quatro materiais testados.

Figura 18 - Retirada e aplicação das temperaturas de ensaio



Fonte: Próprio autor.

4.2.2 Argamassa de revestimento e material metálico

O traço comum utilizado até então foi para argamassa de revestimento, 1:1:5. Porém, o traço adotado para confecção do novo material com carga metálica foi de 1:1:3 (cal, cimento, areia), de modo que 30% da areia que seria utilizada foi substituída por fragmentos de material metálico (essencialmente, aço carbono) na forma de cavaco, provindos de uma fresa mecânica do laboratório de fresagem do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAT), do CEFET-MG.

Os fragmentos metálicos utilizados e os materiais dispostos para confecção da massa cerâmica estão representados nas Figuras 19(a) e 19(b), respectivamente.

Figura 19 - Confecção do corpo de prova com adição de carga metálica



Fonte: Próprio Autor.

Após estar devidamente preparada, a massa cerâmica foi vertida no tubo de PVC, sendo deixada secar por sete dias, de modo que ao final desse tempo obteve-se o corpo de prova representado na Figura 20. Como houve ar aprisionado próximo a uma das extremidades, a formação de uma região vazia exigiu a efetivação de reparos, para que fosse possível, com isso, obter um tubo cerâmico em condições adequadas para realização dos ensaios.

Figura 20 - Corpo de prova cerâmico com material metálico



Fonte: Próprio Autor.

É importante ressaltar que o resistor elétrico utilizado na confecção do corpo de prova de argamassa com carga metálica, por questões técnicas, foi diferente do utilizado nos demais materiais. A implicação dessa informação está na realização do cálculo final do valor de condutividade térmica, uma vez que, possui uma resistência de 219Ω e o diâmetro será diferente do aplicado até então.

Diferentemente dos ensaios realizados com a argamassa de revestimento e com os materiais poliméricos, o ensaio do corpo de prova de argamassa com carga metálica não pode ser realizado em triplicata, devido ao problema estrutural proveniente da confecção do CP, mencionado anteriormente.

4.2.3 Materiais poliméricos

Utilizando-se os tubos dos materiais escolhidos para preparação dos corpos de provas, o resistor elétrico, a lã de vidro, os termopares e o transformador, pode ser realizada a montagem do sistema para medição das temperaturas no interior e na superfície dos corpos de prova; nas regiões central e periférica, como pode ser exemplificado pela Figura 21.

A partir da estrutura montada e ligada a uma fonte, como explicado anteriormente, obteve-se as temperaturas nos termômetros, os quais podem ser vistos na mesma imagem, e, com elas, a

diferença de temperatura média (ΔT) entre os dois pontos de medição, após o sistema entrar em regime permanente de transferência de temperaturas.

Figura 21 - Sistema para medição de condutividade térmica (k) para o PEAD



Fonte: Próprio autor.

Essa variação de temperatura pode ser aplicado a Equação 5, permitindo a realização do cálculo da condutividade térmica (k) para os materiais testados.

O ensaio foi realizado em triplicata visando à obtenção de resultados mais confiáveis, sendo o valor da condutividade térmica final, obtida com a média dos valores de condutividade dos três ensaios, para cada um dos materiais testados.

4.3 Medição de incertezas

Uma vez que os resultados de medição de um sistema são calculados, é essencial que exista alguma maneira de se obter uma indicação que valide a qualidade do material e que ofereça, especificamente, uma indicação quantitativa dessa qualidade, de modo que os resultados obtidos possam ser comparados entre valores referenciais ou entre si próprios (ELLER, 2014).

Embasado nessa justificativa, tem-se, então, a importância de se fazer um estudo de erros e das incertezas de medição de um sistema e de entender alguns conceitos relacionados ao assunto, como por exemplo, o conceito de medir e de incerteza.

Albertazzi e Souza (2008), entendem “medir” como um procedimento experimental que determina o valor momentâneo de uma grandeza física, a partir de uma padrão e que possa ser reconhecida internacionalmente.

Ao passo que, de acordo com o Comitê Conjunto Para Guias Em Metrologia (2008), tem-se a incerteza de medição como uma “falta de conhecimento exato do valor do mensurando”, ou seja, está relacionado às variações que podem ser inseridas nas medições obtidas de determinado equipamento, devido a efeitos aleatórios e sistemáticos de seu uso e funcionamento.

No desenvolvimento do trabalho aqui discutido, fez-se o estudo das incertezas de medição envolvidas no cálculo da condutividade térmica dos materiais, a partir das incertezas intrínsecas aos equipamentos usados para realização do estudo.

Se em um processo de medição a grandeza η é dependente de variáveis estatisticamente dependentes (x_1, x_2, \dots, x_n), avaliadas pelo mesmo Sistema de Medição, Albertazzi e Souza (2008) estabelecem que a incerteza (U) da grandeza pode ser calculada por:

$$U(\eta) = \left| \frac{\partial \eta}{\partial x_1} \right| U(x_1) + \left| \frac{\partial \eta}{\partial x_2} \right| U(x_2) + \dots + \left| \frac{\partial \eta}{\partial x_n} \right| U(x_n) \quad (6)$$

Ao contrário, se em um processo de medição a grandeza η é dependente de variáveis estatisticamente independentes (x_1, x_2, \dots, x_n), avaliadas por diferentes Sistema de Medição, Albertazzi e Souza (2008) estabelecem que a incerteza (U) da grandeza pode ser calculada por:

$$U(\eta) = \sqrt{\left[\frac{\partial \eta}{\partial x_1} U(x_1) \right]^2 + \left[\frac{\partial \eta}{\partial x_2} U(x_2) \right]^2 + \dots + \left[\frac{\partial \eta}{\partial x_n} U(x_n) \right]^2} \quad (7)$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Validação dos resultados

5.1.1 Argamassa de revestimento

Uma vez garantido que o corpo de prova estivesse suficientemente seco, realizou-se o primeiro ensaio para medição da condutividade térmica da argamassa de revestimento, o qual teve duração de 150 minutos, quando então foi alcançado o regime permanente de transferência de calor.

Assim, para o cálculo da condutividade térmica, observaram-se as temperaturas no interior (T_i) e na superfície (T_e) do corpo de prova, nos pontos central e da periferia. Na Tabela 6 são apresentadas as temperaturas finais do ensaio após entrar em regime permanente. A diferença de temperatura na região periférica do corpo de prova foi de $(68,0 \pm 1,2)^\circ\text{C}$ e na região central foi de $(65,6 \pm 1,2)^\circ\text{C}$. O valor médio da diferença de temperatura foi utilizado para o cálculo da condutividade térmica, utilizando a Equação 5.

Tabela 6 - Medidas das temperaturas finais do primeiro ensaio realizado

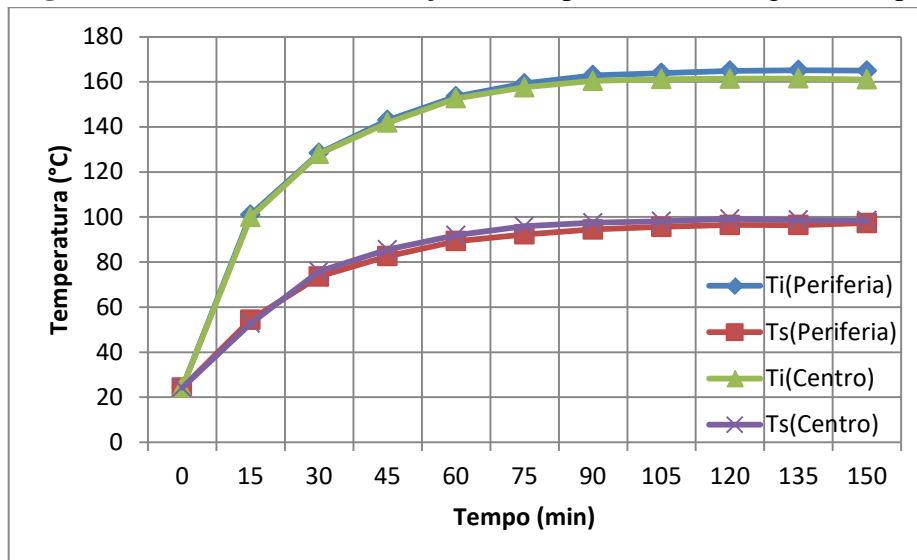
T_i (Periferia) [°C]	T_s (Periferia) [°C]	T_i (Centro) [°C]	T_s (Centro) [°C]
167,4±0,6	99,4±0,6	170,8±0,6	105,2±0,6

Fonte: Próprio Autor.

O segundo ensaio teve a duração de 165 minutos para alcançar o regime permanente. A distribuição de temperatura superficial e interna, nas posições central e periférica, durante o tempo de ensaio é apresentada na Figura 22.

A partir da Figura 22 é possível observar também o aumento gradual e significativo da temperatura com o passar do tempo, até que, após cerca de 60 minutos de ensaio, o sistema começou a entrar em regime permanente de transferência de calor, o que pode ser observado pela mudança de comportamento da curva no gráfico.

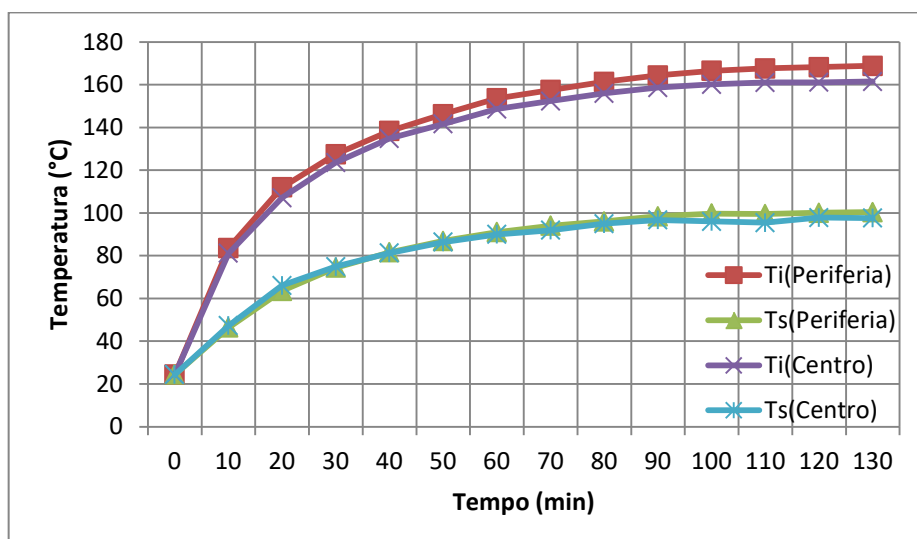
A taxa de crescimento das temperaturas foi reduzindo significativamente até se tornar pouco significativa em regime permanente.

Figura 22 - Gráfico de distribuição de temperaturas ao longo do tempo

Fonte: Próprio Autor.

A diferença de temperatura na região periférica do corpo de prova foi de $(67,7 \pm 1,2)^\circ\text{C}$ e na região central foi de $(62,7 \pm 1,2)^\circ\text{C}$. O valor médio da diferença de temperatura foi utilizado para o cálculo da condutividade térmica.

Um terceiro ensaio foi realizado para reduzir as incertezas do resultado final de determinação da condutividade térmica do material. A curva de aquecimento da argamassa, nas posições interna e superficial, na região periférica e central do corpo de prova, pode ser observada na Figura 23.

Figura 23 - Gráfico de distribuição de temperaturas ao longo do tempo

Fonte: Próprio Autor.

Novamente, é possível observar o aumento da temperatura com o passar do tempo, até que, como no primeiro e no segundo ensaio, o sistema começou a entrar em regime permanente com 60 minutos de ensaio, tornando possível, dessa forma, obter os dados necessários para cálculo da condutividade térmica. Pode-se observar na Figura 23 que a diferença de temperatura na região periférica do corpo de prova foi de $(68,4 \pm 1,2)^\circ\text{C}$ e na região central foi de $(63,9 \pm 1,2)^\circ\text{C}$.

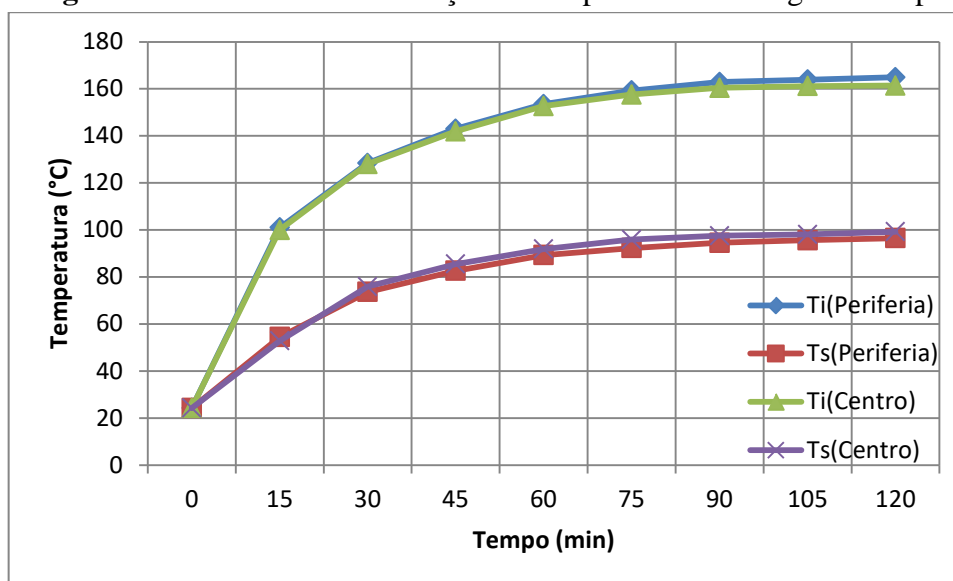
5.1.2 Argamassa de revestimento e carga metálica

O ensaio para realização do cálculo da condutividade térmica do material cerâmico formado pela adição de material metálico a argamassa foi feito em uma única etapa, visto que o objetivo do teste tinha caráter apenas comparativo com a argamassa de revestimento, de modo que mediu-se as temperaturas do interior e da superfície do corpo de prova a cada 15 minutos, pelo período de 120 minutos.

Apesar da obtenção dos dados de temperatura tanto para o orifício central do corpo de prova, quanto para o da periferia, apenas as temperaturas do interior e da superfície da região central foram consideradas para realização do cálculo da condutividade térmica. Isso porque, como pode ser visto na Figura 20, houve um aprisionamento de ar próximo a uma das extremidades, de modo que foi formado um espaço vazio, o qual passou por reparo.

Os reparos foram realizados um dia antes da realização do ensaio, o que implica que quando o ensaio ocorreu, a argamassa utilizada no local não estava seca o suficiente, de maneira que pode ter influenciado na temperatura, causando disparidade significativa entre as diferenças de temperatura do centro e da periferia.

Pode-se observar na Figura 24 que a diferença de temperatura na região periférica do corpo de prova foi de $(68,4 \pm 1,2)^\circ\text{C}$ e na região central foi de $(62,2 \pm 1,2)^\circ\text{C}$.

Figura 24 - Gráfico de distribuição de temperaturas ao longo do tempo

Fonte: Próprio Autor.

5.1.3 Polietileno de Alta Densidade (PEAD)

Uma vez efetuada a montagem do sistema e determinada a tensão para realização do teste com o tubo de PEAD, levando em consideração suas temperaturas de transição térmica - essencialmente, a temperatura de fusão (T_m), realizou-se o primeiro ensaio. Ele teve duração de 150 minutos e foi o primeiro de três, uma vez que os testes foram realizados em triplicata.

Assim, para o cálculo da condutividade térmica, foram observadas as temperaturas no interior e na superfície do tubo de PEAD, nos pontos central e da periferia. Então, a partir da média das três últimas faixas de temperaturas medidas (vistas na Figura 25) foi possível realizar o cálculo da propriedade buscada de acordo com a Equação 5.

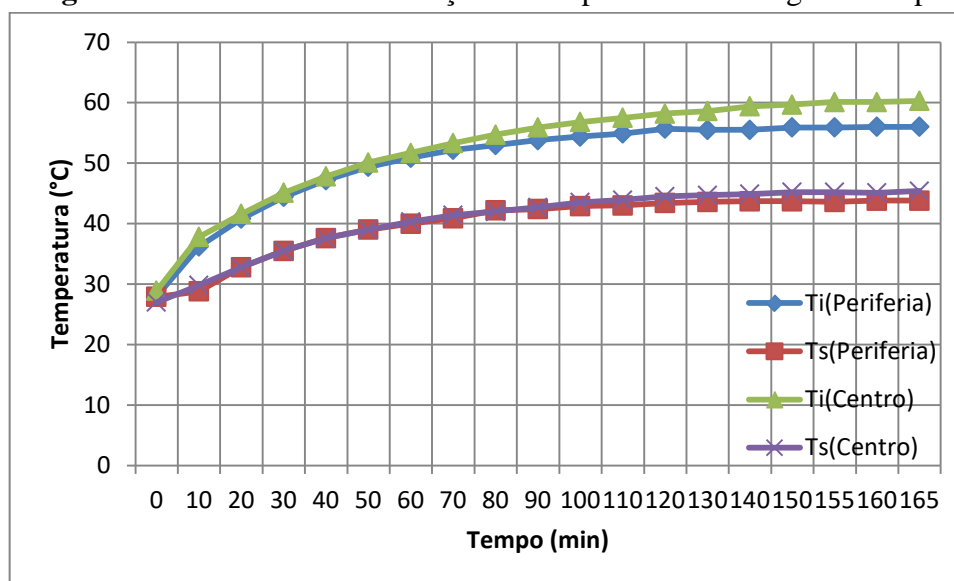
A medição na forma como é feita a proposta só é possível porque o momento em que as diferenças de temperatura começam a se mostrar constantes indica a entrada do sistema no regime permanente de transferência de calor.

Analisando a Figura 25 é possível observar o aumento gradual da temperatura com o passar do tempo, até que, após pouco mais de 60 minutos de ensaio, o sistema apresentou comportamento de entrada no regime permanente de transferência de calor.

A ocorrência é visível, principalmente, pela mudança de comportamento da curva no gráfico. A curva, que apresentava taxa de crescimento crescente, com o passar do tempo teve a taxa de crescimento se tornando pouco significativa até alcançar o regime permanente.

Pode-se observar na Figura 25 que a diferença de temperatura na região periférica do corpo de prova foi de $(12,2 \pm 1,2)^\circ\text{C}$ e na região central foi de $(14,9 \pm 1,2)^\circ\text{C}$.

Figura 25 - Gráfico de distribuição de temperaturas ao longo do tempo

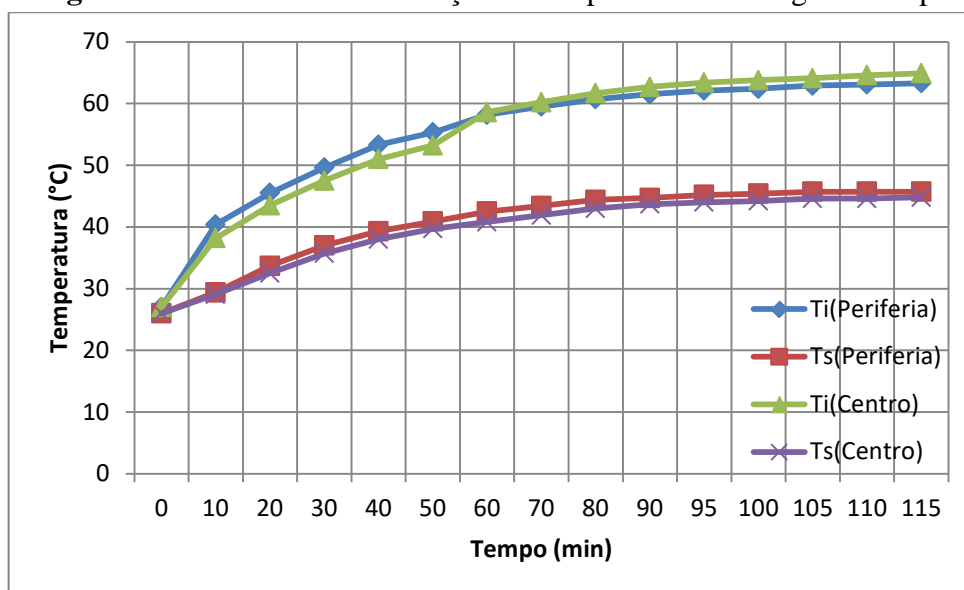


Fonte: Próprio autor.

Em sequência, realizou-se o segundo ensaio, considerando as mesmas condições, para realização do cálculo de condutividade térmica para o PEAD. Ele teve duração de 115 minutos e, assim como no primeiro, a condutividade foi calculada de acordo com a Equação 5, considerando as últimas temperatura de ensaio (as quais podem ser vistas na Figura 26).

Assim como no primeiro ensaio, no segundo foi possível observar o crescimento gradual da temperatura com o tempo, de modo que a curva tem inicialmente aspecto crescente, até alcançar o regime permanente de transferência de calor. Pode-se observar na Figura 26 que a diferença de temperatura na região periférica do corpo de prova foi de $(17,6 \pm 1,2)^\circ\text{C}$ e na região central foi de $(20,1 \pm 1,2)^\circ\text{C}$.

Figura 26 - Gráfico de distribuição de temperaturas ao longo do tempo

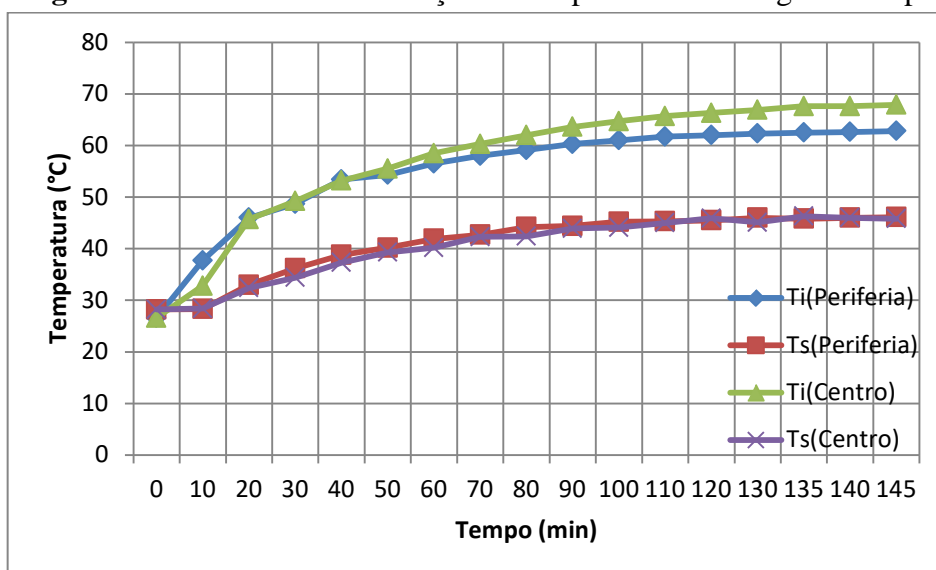


Fonte: Próprio autor.

Nesse caso, o regime é alcançado em torno dos 60 minutos de ensaio e a quase perfeita sobreposição das curvas referentes às temperaturas da superfície e do interior, para as regiões central e periferia, indicam um resultado mais satisfatório quando realizado o cálculo da condutividade térmica do polímero.

Por fim, foi realizado o terceiro ensaio, no qual as temperaturas foram medidas a cada 10 minutos, totalizando um tempo de ensaio de 145 minutos (Figura 27).

Figura 27 - Gráfico de distribuição de temperaturas ao longo do tempo



Fonte: Próprio autor.

Um característico aumento da temperatura pode, novamente, ser observado, até que, assim como no primeiro e no segundo ensaio, o sistema começou a entrar em regime permanente com aproximadamente 2 horas de ensaio. Pode-se observar na Figura 27 que a diferença de temperatura na região periférica do corpo de prova foi de $(16,7 \pm 1,2)^\circ\text{C}$ e na região central foi de $(22,1 \pm 1,2)^\circ\text{C}$.

5.1.4 Polipropileno (PP)

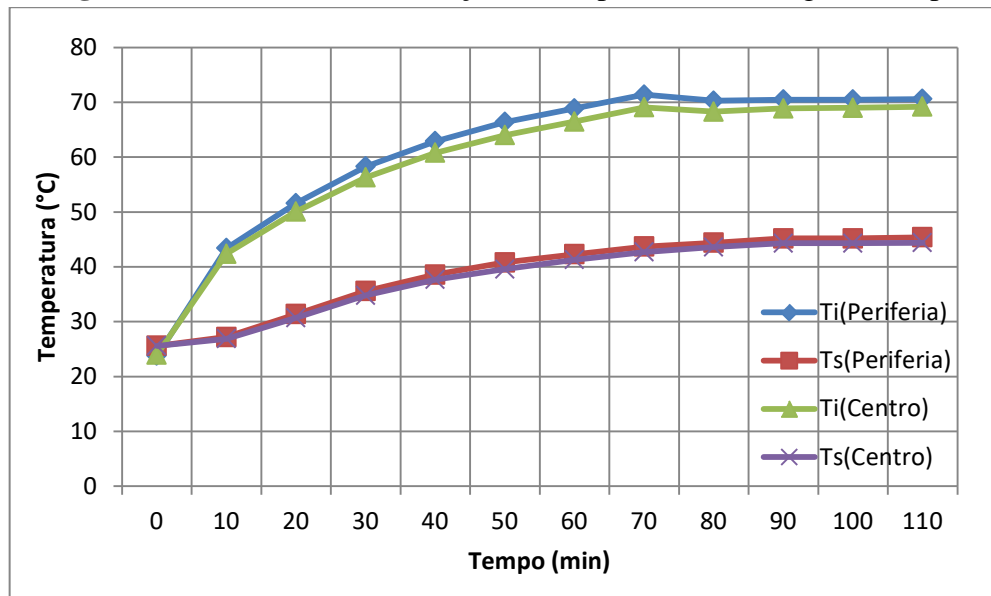
Assim como foi feito para o PEAD, após a montagem do sistema com o PP, determinou-se a tensão (V) para realização do ensaio, considerando a temperatura que o sistema poderia alcançar para cada potência utilizada e comparando-a com a temperatura de fusão do material polimérico, já que seria necessário promover o aquecimento do sistema garantindo a estabilidade do material. Ou, basicamente, garantir seu aquecimento sem amolecimento ou fusão.

Uma vez determinada a tensão, foi realizado o primeiro ensaio, que teve duração de 110 minutos, e, a partir do qual, obteve-se as temperaturas necessárias para realização do cálculo da condutividade térmica.

Similarmente ao PEAD, para o cálculo de k , foram observadas as temperaturas no interior e na superfície do tubo polimérico, nos pontos central e da periferia. Com as últimas temperaturas medidas (T) foi possível realizar o cálculo da propriedade buscada de acordo com a Equação 5.

A partir das medições de temperatura foi apresentada a curva de aquecimento do corpo de prova, na Figura 28. Pode-se observar nesta que a diferença de temperatura na região periférica do corpo de prova foi de $(25,2 \pm 1,2)^\circ\text{C}$ e na região central foi de $(24,8 \pm 1,2)^\circ\text{C}$.

Assim como pode ser observado para o caso do PEAD, é possível observar a partir da Figura 28, que a temperatura aumenta gradualmente com o tempo, de modo que as curvas do gráfico seguem crescentes, até atingir um comportamento que tendencia uma reta. Esse comportamento tem início, nesse caso, com cerca de 80 minutos de ensaio e pode ser justificado pela entrada do sistema no regime permanente de transferência de calor.

Figura 28 - Gráfico de distribuição de temperaturas ao longo do tempo

Fonte: Próprio autor.

Em seguida, o segundo ensaio com o polipropileno foi realizado sendo suas temperaturas medidas de 10 em 10 minutos, partindo de um tempo 0, em temperatura ambiente (o que se repetiu em todos os ensaios realizados até então).

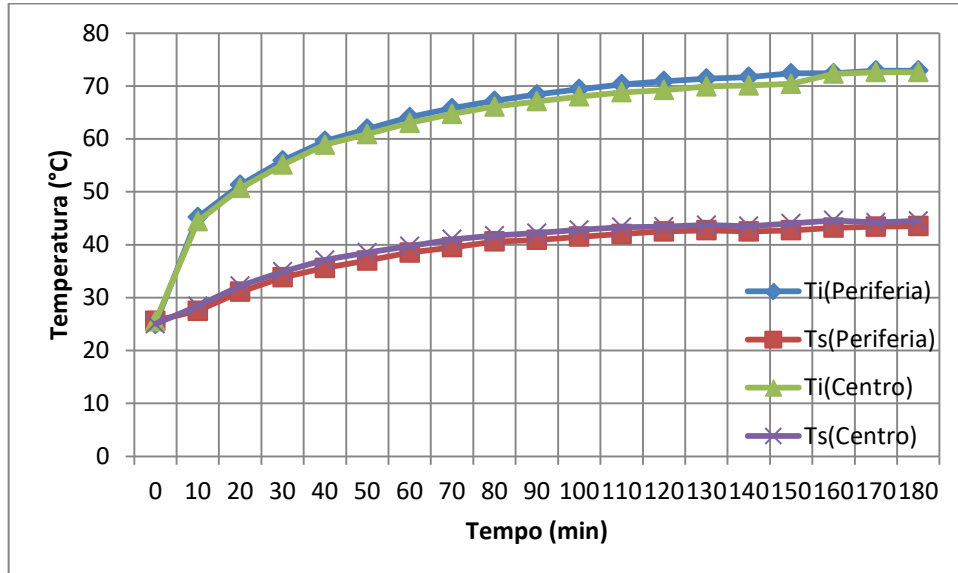
Na Figura 29 são apresentadas as temperaturas medidas no corpo de prova durante o aquecimento, até alcançar regime permanente. Pode-se observar nele, ainda, que a diferença de temperatura na região periférica do corpo de prova foi de $(29,4 \pm 1,2)^\circ\text{C}$ e na região central foi de $(28,1 \pm 1,2)^\circ\text{C}$.

Pode ser interessante lembrar a essa altura que essas temperaturas são obtidas da seguinte maneira: é calculada a diferença entre as temperaturas interna e externa na região central do corpo de prova. Em seguida, o mesmo cálculo é feito para as temperaturas da região periférica. Por fim, é calculada a média aritmética dessas diferenças de temperatura obtidas, as quais foram obtidas com a média das três últimas temperaturas de ensaio obtidas após a entrada do sistema no regime permanente de transferência de calor (procedimento seguido em todos os ensaios, com exceção do ensaio realizado com a argamassa de revestimento com a carga metálica).

Observando a Figura 29 é possível notar que as curvas de temperatura mantêm a tendência de crescimento com o passar do tempo, até que, com cerca de 150 minutos de ensaio, começam a

assumir certa constância, indicando a entrada do sistema no regime permanente de transferência de calor.

Figura 29 - Gráfico de distribuição de temperaturas ao longo do tempo



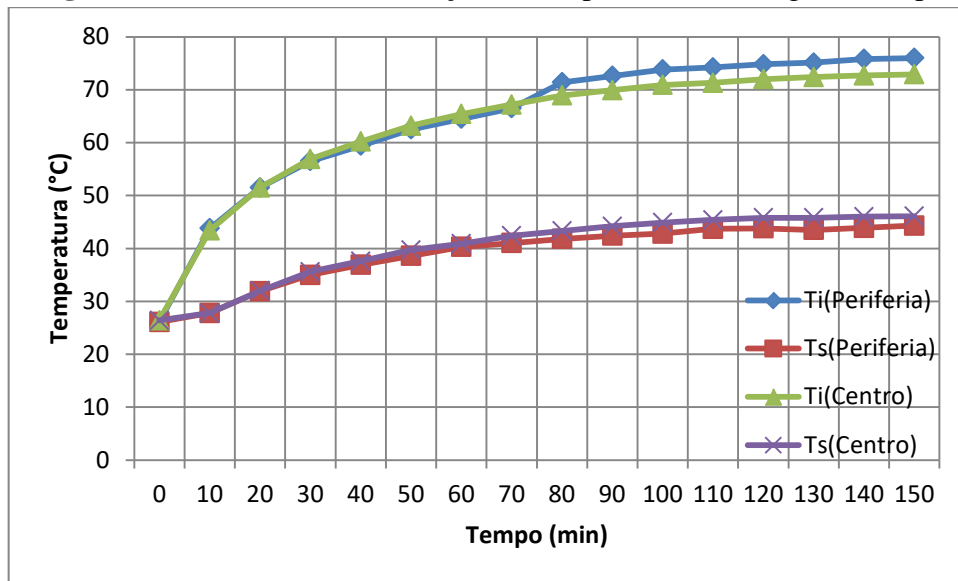
Fonte: Próprio autor.

Por fim, foi realizado o terceiro e último ensaio, o qual teve duração de 150 minutos, de modo que as temperaturas foram medidas também a cada 10 minutos, partindo do tempo 0 na temperatura ambiente.

A mesma tendência observada na Figura 29 pode ser notada também nos resultados do terceiro ensaio, de modo que a entrada do sistema no regime permanente pode ser observado após passados 100 minutos de teste.

Novamente, é possível observar a curva de aquecimento do material, tendo-se a temperatura crescente em relação ao tempo, até a entrada do sistema no regime permanente de transferência de calor.

Pode-se observar na Figura 30 que a diferença de temperatura na região periférica do corpo de prova foi de $(31,7 \pm 1,2)^\circ\text{C}$ e na região central foi de $(26,8 \pm 1,2)^\circ\text{C}$, sendo essas temperaturas utilizadas para cálculo da média de temperatura aplicado no cálculo da condutividade térmica, ΔT .

Figura 30 - Gráfico de distribuição de temperaturas ao longo do tempo

Fonte: Próprio autor.

5.2 Cálculo da condutividade térmica (k)

5.2.1 Argamassa de revestimento

O cálculo da condutividade térmica foi realizado para cada um dos três ensaios realizados a partir da Equação 5, obtendo-se o valor de k. Para isso, obteve-se os valores correspondentes às dimensões do resistor e do corpo de prova, os quais estão representados na Tabela 7.

Tabela 7 - Dimensão do corpo de prova de argamassa de revestimento

Comprimento do corpo de prova (mm)	Raio do corpo de prova (mm)	Raio do resistor (mm)
387,00±1,0	23,46±0,03	4,07±0,03

Fonte: Próprio autor.

A potência do resistor foi medida por multímetro sendo equivalente a (71±1)W durante o ensaio.

Na primeira medição, o valor médio encontrado para variação de temperatura foi de (66,9±1,2)°C, de modo que o valor encontrado para k foi equivalente a:

$$k = \frac{71W \cdot \ln\left(\frac{0,02346}{0,00407}\right)}{2\pi \cdot 0,387m \cdot (66,92K)}$$

$$k = 0,765 \text{ W/mK.}$$

Na segunda medição, o valor médio encontrado para variação de temperatura foi de $(65,8 \pm 1,2)^\circ\text{C}$, de modo que o valor encontrado para k foi equivalente a:

$$k = \frac{71W \cdot \ln\left(\frac{0,02346}{0,00407}\right)}{2\pi \cdot 0,387m \cdot (65,84K)}$$

$$k = 0,777 \text{ W/mK.}$$

Já na terceira medição, o valor médio encontrado para variação de temperatura foi de $(66,2 \pm 1,2)^\circ\text{C}$, de modo que o valor encontrado para k foi equivalente a:

$$k = \frac{71W \cdot \ln\left(\frac{0,02346}{0,00407}\right)}{2\pi \cdot 0,387m \cdot (66,23K)}$$

$$k = 0,773 \text{ W/mK.}$$

Com os valores de condutividade térmica obtidos em cada ensaio, foi possível calcular o valor médio dessa propriedade.

$$k_{\text{média}} = (0,765 + 0,777 + 0,773)W/mK$$

$$k_{\text{média}} = 0,772W/mK$$

Dessa forma, o valor encontrado para a condutividade térmica foi correspondente a aproximadamente $0,772 \text{ W/mK}$. Esse valor medido apresenta um erro de 7% quando comparado com a referência teórica do material ($0,72\text{W/mK}$).

Além disso, o fato da condutividade térmica medida ser superior ao valor teórico pode ser explicado pelas próprias condições de preparação do corpo de prova cerâmico. Teoricamente, uma argamassa que teve maior adição de água em sua composição tenderá a ser mais porosa

e, portanto, apresentaria menor condutividade térmica se comparada a outras, tendo em vista a alta capacidade isolante do ar. Do mesmo modo, a ideia oposta também poderia ser válida.

São considerados, ainda, como fatores que influenciam no resultado final e que podem justificar a diferença encontrada, fatores contextuais e ambientais, uma vez que as condições granulométricas da areia, bem como o tipo de cimento, podem influenciar nas propriedades do material, o que também se aplica a umidade e temperatura ambiente nos dias de realização dos ensaios.

Ademais, as incertezas dos instrumentos de medição utilizados também poderiam ser consideradas na justificativa da diferença existente e, por isso, foram posteriormente mensuradas no presente trabalho.

5.2.2 Argamassa de revestimento e carga metálica

Para realização do cálculo da propriedade térmica requerida, foi obtida a dimensão do corpo de prova, as quais estão dispostas na Tabela 8.

Tabela 8 - Dimensão do corpo de prova de argamassa com carga metálica

Comprimento do corpo de prova (mm)	Raio do corpo de prova (mm)	Raio do resistor (mm)
399,7±1,0	24,02±0,03	4,04±0,03

Fonte: Próprio Autor.

Novamente, a potência do resistor medida por multímetro foi de $(71 \pm 1)W$ durante do ensaio.

Com base na Equação 5, uma mesma lógica foi seguida para a realização do cálculo da condutividade térmica para a amostra ensaiada. Diferentemente do primeiro ensaio realizado com a argamassa de revestimento, o ensaio com o material acrescido de carga metálica não foi realizado em triplicata; isso porque o corpo de prova ficou com um vazio em sua extensão. Esse vazio foi corrigido para possibilidade realização do ensaio, mas a falta de rugosidade necessária impediu a completa união da parte tratada, de modo que não foi possível repetir o ensaio.

Logo, o valor médio encontrado no ensaio para ΔT foi de $(62,7 \pm 1,2)^\circ\text{C}$, de modo que o valor calculado de k foi:

$$k = \frac{71W \cdot \ln\left(\frac{0,02402}{0,00404}\right)}{2\pi \cdot 0,399m \cdot (62,73K)}$$

$$k = 0,799 \text{ W/mK.}$$

O valor de k equivalente a aproximadamente $0,8 \text{ W/mK}$ está abaixo do que era previsto, uma vez que a condutividade térmica do aço fica em torno de 60 W/mK , ou seja, trata-se de um bom condutor que, portanto, tenderia a causar aumento mais significativo na condutividade térmica do novo material.

Contudo, é importante considerar que na amostra de material metálico havia a presença de impurezas, como pequenos filamentos de material polimérico, o que pode influenciar no resultado final do teste. Essas impurezas são provenientes da coleta da amostra de filamentos metálicos, proveniente do descarte de uma fresa.

Além disso, a porção com maior quantidade de água, relativa à região do reparo localizado próximo ao orifício da periferia do corpo de prova, pode ter influenciado na transferência de calor ao longo do corpo de prova. Isso, por sua vez, pode ter exercido influência nas temperaturas obtidas durante o aquecimento do corpo de prova, que, conseqüentemente, altera o valor final da condutividade térmica calculada.

5.2.3 Considerações gerais dos cálculos da condutividade térmica nos Corpos de Provas poliméricos

A condutividade térmica dos tubos poliméricos foi calculada para cada polímero estudado - PP e PEAD - e para cada um dos três ensaios realizados, considerando a Equação 5. Para isso, foram medidos os valores referentes às dimensões do resistor e do corpo de prova, os quais foram representados na Tabela 9.

Tabela 9 - Medição das dimensões dos materiais e equipamentos

	Comprimento do corpo de prova (mm)	Raio do corpo de prova (mm)	Raio do resistor (mm)
PEAD	450,0±1,0	25,23±0,03	4,070±0,03
PP	463,3±1,0	28,63±0,03	4,070±0,03

Fonte: Próprio autor.

Além disso, também foram obtidos, para os ensaios realizados com os polímeros, os valores de tensão e corrente, fornecidos pela própria fonte, usados durante o ensaio. Esses valores possibilitaram o cálculo da potência para cada ensaio relacionando a tensão e a corrente através da seguinte equação:

$$P = Vxi \quad (8)$$

Os valores de Tensão (V), Corrente (A) e Potência (W), tanto para o PEAD, quanto para o PP, estão dispostos na Tabela 10. Uma vez que todos os dados necessários foram obtidos, foi possível, então, realizar o cálculo da condutividade térmica (k).

Tabela 10 - Potências de ensaio

	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
PEAD			
1º Ensaio	49,7±0,5	0,220±0,002	10,9±0,2
2º Ensaio	55,4±0,5	0,250±0,002	13,9±0,3
3º Ensaio	55,2±0,5	0,250±0,002	13,8±0,3
PP			
1º Ensaio	55,3±0,5	0,250±0,002	13,8±0,3
2º Ensaio	55,3±0,5	0,250±0,002	13,8±0,3
3º Ensaio	55,3±0,5	0,250±0,002	13,8±0,3

Fonte: Próprio autor.

5.2.4 Polietileno de Alta Densidade (PEAD)

No primeiro ensaio com Polietileno de Alta Densidade, o valor médio encontrado para ΔT foi de (13,6±1,2) °C, de maneira que, uma vez substituído na equação 5, o valor encontrado para a condutividade térmica (k), foi equivalente a:

$$k = \frac{(49 \pm 0,22)W \cdot \ln\left(\frac{0,02523}{0,00407}\right)}{2\pi \cdot 0,45m \cdot (13,583K)}$$

$$k = 0,52 \text{ W/mK.}$$

Do mesmo modo, no segundo ensaio, o valor médio de ΔT foi correspondente a $(18,6 \pm 1,2)$ °C, de modo que a condutividade térmica calculada foi correspondente a:

$$k = \frac{(55,4 \pm 0,25)W \cdot \ln\left(\frac{0,02523}{0,00407}\right)}{2\pi \cdot 0,45m \cdot (18,633K)}$$

$$k = 0,48 \text{ W/mK.}$$

Finalmente, no terceiro ensaio, o valor médio de ΔT foi correspondente a $(19,2 \pm 1,2)$ °C, sendo o valor de condutividade térmica equivalente a:

$$k = \frac{(55,2 \pm 0,25)W \cdot \ln\left(\frac{0,02523}{0,00407}\right)}{2\pi \cdot 0,45m \cdot (19,167K)}$$

$$k = 0,48 \text{ W/mK.}$$

Por fim, tendo os valores de condutividade térmica calculados para cada ensaio, foi realizado o cálculo das médias dos valores de k , visando à obtenção de um valor que melhor represente os resultados obtidos nos três ensaios.

$$k_{\text{média}} = (0,5194 + 0,47861 + 0,465)W/mK$$

$$k_{\text{média}} = 0,488W/mK$$

Assim, o valor de condutividade térmica foi de aproximadamente 0,488 W/m.K, o qual está dentro da faixa de valores ideais de condutividade térmica do Polietileno de Alta Densidade, como mostrado na Tabela 5 - de 0,46 à 0,52 W/m.K.

5.2.5 Polipropileno (PP)

De forma semelhante, para o primeiro ensaio com o Polipropileno foi obtido um valor médio de ΔT referente à, aproximadamente, $(28,7 \pm 1,2)$ °C, de modo que, sendo substituído na Equação 5, resultou em um valor de k equivalente a:

$$k = \frac{(55,3 \times 0,25)W \cdot \ln\left(\frac{0,0286323}{0,00407}\right)}{2\pi \cdot 0,46m \cdot (28,717K)}$$

$$k = 0,323 \text{ W/mK.}$$

Em sequência, do segundo ensaio obteve-se um valor médio de ΔT relativo à $(25,0 \pm 1,2)$ °C, com um valor de k resultante de:

$$k = \frac{(55,3 \times 0,25)W \cdot \ln\left(\frac{0,0286323}{0,00407}\right)m}{2\pi \cdot 0,46m \cdot (24,9833K)}$$

$$k = 0,371 \text{ W/mK.}$$

Por fim, no terceiro ensaio, o valor médio encontrado para ΔT foi de, aproximadamente, $(29,2 \pm 1,2)$ °C, de modo que a condutividade térmica resultante foi correspondente a:

$$k = \frac{(55,3 \times 0,25)W \cdot \ln\left(\frac{0,0286323}{0,00407}\right)}{2\pi \cdot 0,46m \cdot (24,2167K)}$$

$$k = 0,318 \text{ W/mK.}$$

Após a realização dos ensaios, foi realizado o cálculo da média dos valores de condutividade térmica para cada ensaio, com o intuito de garantir maior segurança e menores erros nos resultados obtidos.

$$k_{\text{média}} = (0,32263 + 0,37084 + 0,318)W/mK$$

$$k_{\text{média}} = 0,340W/mK$$

O valor de condutividade térmica (k) equivalente a aproximadamente 0,340 W/m.K está acima do valor de k previsto pela literatura para o Polipropileno, que foi de 0,21 W/m.K.

Isso pode ser justificado pelas condições de realização dos ensaios, que foram efetuados em condições ambientes, as quais podem não ser exatamente iguais às condições de realização deste na literatura.

Um fator preponderante a ser considerado também é o histórico térmico do próprio material durante a fabricação dos tubos de PP, o que pode gerar mudanças da estrutura do polímero e, conseqüentemente, em suas propriedades. Outro detalhe importante é que a condutividade térmica dos materiais pode variar significativamente com sua temperatura.

Além disso, é possível notar ainda um desvio relativo nos valores obtidos entre cada um dos ensaios, o que pode ser explicado pelo fato de que cada teste foi realizado em dias diferentes e, portanto, em condições ambientes diferentes.

Afinal, os resultados obtidos podem ser observados juntamente com seus respectivos valores teóricos para cada material, de forma mais rápida e dinâmica, na Tabela 11.

Tabela 11 - Resultados de condutividades térmicas obtidas

Material	Condutividade Térmica Teórica (W/m.K)	Condutividade Térmica Calculada(W/m.K)	Diferença Teórico X Calculado (%)
Argamassa de revestimento	0,720	0,772	7
Argamassa de revestimento + Carga metálica	-	0,799	-
PEAD	0,460-0,520	0,488	0
PP	0,210	0,340	62

Fonte: Próprio autor

Em geral, as diferenças médias foram relativamente baixas, variando de 0 a 62% de diferença com o valor teórico e foram calculadas considerando:

$$Diferença(\%) = \frac{|k_{teórico} - k_{calculado}|}{k_{teórico}} \times 100 \quad (9)$$

Os resultados foram apresentados sem as incertezas de medição, que serão apresentadas no tópico seguinte, para garantir a clareza na visualização destes, a fim de facilitar a comparação entre os valores teóricos e os experimentais.

5.3 Cálculo de incertezas e resultados de medição

Uma vez concluídos os cálculos das condutividades térmicas dos materiais, partiu-se para realização das medições das incertezas dos aparelhos de medição utilizados em cada caso. Para cada equipamento usado, há a necessidade de consideração de uma incerteza, como pode ser observado na Tabela 12.

Tabela 12 - Incerteza de medição dos equipamentos de ensaio

Equipamentos	Incerteza
Paquímetro	0,05mm
Multímetro	1% do valor lido
Termopares	0,6°C
Escala Graduada	1,0mm

Fonte: Próprio autor.

Tendo-se conhecimento das incertezas relativas a cada equipamento utilizado, passou-se para execução dos cálculos das incertezas, considerando as duas situações possíveis e presentes no atual estudo: cálculo de incertezas de um mesmo sistema de medição e a do sistema completo.

Para isso, será necessário entender algumas informações, como se aplica ao caso o aparelho medidor das temperaturas de ensaio. A incerteza do termopar foi de 0,6°C por Termopar do Tipo K, e foram utilizados dois termopares, por isso, a incerteza referente à subtração de temperaturas (ΔT) é a soma das incertezas absolutas, portanto, 1,2°C.

Considerou-se então:

$$u_{\Delta T} = u_{T_e} + u_{T_i}$$

$$u_{\Delta T} = (0,6 + 0,6)^\circ C = 1,2^\circ C$$

Seguindo o mesmo raciocínio, no caso dos testes realizados em polímeros, a incerteza considerada da potência será de 2%, uma vez que no produto de grandezas independentes, somam-se as incertezas relativas. Nesse caso, como foi usado o medidor de sensor da fonte utilizada durante o ensaio, tem-se então que considerar a incerteza de 1% para a Tensão e 1% para a Corrente. Assim, a incerteza relativa ficaria:

$$u_r(q) = u_r(V) + u_r(i)$$

$$u_r(q) = (1 + 1)\% = 2\%$$

Dessa maneira, considerando as incertezas de 1% e 2% dos valores de medição, como cada respectivo caso, foram obtidas as incertezas das potências de ensaio, as quais estão dispostas na Tabela 13.

Tabela 13 - Incertezas relativas das potências de ensaio

Corpo de prova	Incertezas relativas (W)
CP's cerâmicos	0,71
	0,219
PEAD	0,277
	0,276
PP	0,277

Fonte: Próprio autor.

Além disso, o cálculo das incertezas da razão entre os raios, por ser uma medida direta, pode ser obtida com o a razão entre a incerteza do paquímetro e a medida obtida tanto para o raio externo, quanto para o raio interno. Após isso, a razão entre os valores encontrados para os raios externo e interno, fornece a incerteza dessa etapa de medição, de modo que o Δr obtido pode ser considerado para cálculo das incertezas indiretas.

$$u_{r_e} = \frac{u_{paquímetro}}{r_e}$$

$$u_{r_i} = \frac{u_{paquímetro}}{r_i}$$

Para realização dos cálculos das incertezas indiretas considerou-se:

$$\frac{r_e}{r_i} = \Delta r$$

$$u_{\Delta r} = u_{r_e} + u_{r_i}$$

As incertezas calculadas e obtidas para cada corpo de prova estão expostas na Tabela 14.

Tabela 14 - Incertezas relativas dos raios dos CP's

Corpo de prova	Incerteza relativa (m)
Argamassa de revestimento	$[8,650 \times 10^{-3}]$
Argam. de revestimento com carga metálica	$[8,677 \times 10^{-3}]$
PEAD	$[8,560 \times 10^{-3}]$
PP	$[8,419 \times 10^{-3}]$

Fonte: Próprio autor.

Uma vez que as incertezas diretas foram calculadas, foi realizado o estudo das incertezas indiretas. Assim, considerando a Equação 5 para o cálculo da condutividade térmica do sistema e a Equação 6 para medida das incertezas do sistema, o cálculo da incerteza será:

$$u(k) = \sqrt{\left[\frac{\partial k}{\partial q} u(q)\right]^2 + \left[\frac{\partial k}{\partial(\Delta r)} u(\Delta r)\right]^2 + \left[\frac{\partial k}{\partial(\Delta T)} u(\Delta T)\right]^2 + \left[\frac{\partial k}{\partial(L)} u(L)\right]^2}$$

Para melhor visualização, foram realizadas as derivadas parciais, dispostas separadamente abaixo, a fim de facilitar a observação dos cálculos:

$$\frac{\partial k}{\partial q} u(q) = \frac{\ln(\Delta r)}{2\pi L(\Delta T)}$$

Onde $U(q)$, equivaleria a derivada parcial da Equação 5 em relação a potência q .

$$\frac{\partial k}{\partial(\Delta r)} u(\Delta r) = \frac{1 \cdot \Delta r^{-1}}{2\pi L(\Delta T)}$$

Onde $U(\Delta r)$, equivaleria a derivada parcial da Equação 5 em relação ao raio.

$$\frac{\partial k}{\partial(\Delta T)} U(\Delta T) = \frac{-q \cdot \ln(\Delta r)}{2\pi L(\Delta T)^2}$$

Onde $U(\Delta T)$, equivaleria a derivada parcial da Equação 5 em relação a Temperatura, T.

$$\frac{\partial k}{\partial(L)} U(L) = \frac{q \cdot \ln(\Delta r) (-1)}{2\pi(\Delta T)^2 L^2}$$

Onde $U(L)$, é a derivada parcial da Equação 5 em relação ao comprimento do CP, L.

Desse modo, tomando como base as incertezas de cada equipamento, a Equação 6 e o raciocínio e informações apresentados anteriormente, foram obtidos os resultados de medição finais para cada material estudado, conforme pode ser visto na Tabela 15.

Tabela 15 - Resultados de medição do sistema e incertezas percentuais calculadas

Material	Resultado de medição	Incerteza calculada (%)	Diferença Teórico X Calculado (%)
Argamassa de revestimento <i>k_{médio}</i>	[0,765±0,016]W/m.K	~ 2,1	7
	[0,770±0,016]W/m.K		
	[0,773±0,016]W/m.K		
	[0,770±0,016] W/m.K		
Argamassa de revestimento + Carga metálica <i>k_{médio}</i>	[0,799±0,017]W/m.K	~ 2,1	-
	[0,799±0,017]W/m.K		
PEAD <i>k_{médio}</i>	[0,519±0,047]W/m.K	~ 7,7	0
	[0,480±0,033]W/m.K		
	[0,480±0,037] W/m.K		
PP <i>k_{médio}</i>	[0,323±0,015]W/m.K	~ 4,7	62
	[0,371±0,018]W/m.K		
	[0,340±0,016] W/m.K		

Fonte: Próprio autor

Conforme pode ser observado, a partir dos cálculos de incertezas do sistema, tem-se uma incerteza máxima atribuída de 7,7%. O cálculo detalhado de todas as incertezas é descrito no Apêndice A.

Em um dos materiais estudados, especificamente, no caso do Polietileno de Alta Densidade, a incerteza calculada ficou menor que o erro percentual resultante da diferença entre o valor de k calculado e o valor previsto na teoria. Isso pode ser explicado pelo fato de que, em geral, trabalha-se com uma incerteza subdimensionada, ou seja, é impossível incluir todas as fontes de erro existentes atribuídos ao sistema.

Já nos casos da argamassa de revestimento e do Polipropileno, o erro percentual obtido a partir do comparativo entre k teórico e k calculado foi maior que a incerteza do sistema de medição – erro de 2% para a argamassa, com incerteza de 2,1% do sistema e erro de 61,9% para o PP, com incerteza de 4,7%.

É interessante observar que o erro percentual identificado na medição da condutividade térmica para o Polipropileno foi consideravelmente maior que o erro associado aos outros materiais testados e que possuíram referência teórica para comparação.

Essa diferença pode ser justificada com base em algumas hipóteses, como por exemplo, o fato de que o aquecimento do material polimérico pode influenciar de alguma maneira no valor da condutividade térmica. Isso também pode significar que o valor da condutividade térmica da amostra testada não necessariamente é condizente com o valor previsto pela literatura.

Além disso, outros fatores também podem exercer influência, como a existência de fontes de erros não identificadas (algum dos equipamentos poderia estar defeituoso, por exemplo) e mensuradas, perdas de calor no sentido horizontal (pelas extremidades dos cilindros), ajuste entre o resistor e o corpo de prova com folga, criando resistência de contato e erros humanos no momento da execução do ensaio.

Outro ponto a ser considerado é que quanto menor é a condutividade térmica do material, ou seja, quanto mais isolante o material é, maior é a tendência de obtenção de erros com valores mais elevados. E no presente trabalho, o Polipropileno tem a menor condutividade térmica entre os materiais testados.

Apesar dessas considerações, existe uma possibilidade relevante de o erro, nesse caso, ser associado ao fato de que a condutividade térmica da amostra de Polipropileno comprada pode não corresponder, de fato, ao valor de referência da literatura, tendo em vista que os demais materiais testados tiveram erros significativamente menores.

Finalmente, dos materiais testados, a maior confiabilidade dos valores medidos pode ser atribuída ao ensaio da argamassa de revestimento, o qual teve uma incerteza calculada de aproximadamente 2,1%, sendo a menor entre os 4 materiais testados. Em seguida, tem-se, respectivamente, a argamassa com carga metálica, o Polipropileno e o Polietileno de Alta Densidade.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi testado e analisado um sistema radial de medição de condutividade térmica com materiais cerâmicos (argamassa de revestimento), compósitos (argamassa de revestimento com volume de material metálico) e poliméricos (PEAD e PP).

Os ensaios para medição da condutividade térmica apresentaram duração entre 80 minutos e 180 minutos, até que os corpos de prova alcançassem o regime permanente de distribuição térmica. A partir de então, as variações de temperatura tendiam a valores constantes, sendo usadas para o cálculo da condutividade térmica.

Além disso, a potência consumida pelo resistor utilizadas nos ensaios para corpos de prova cerâmicos foi de 71W e para materiais poliméricos variou de 10W a 14W. Para o tempo de ensaio relatado, os custos devido aos gastos energéticos do resistor, não são elevados.

Nos ensaios de materiais poliméricos, o uso da fonte de tensão elétrica e corrente ajustáveis impediu que a potência dissipada pelos resistor através dos corpos de prova elevassem a temperatura acima do permitido para o material (não ocasionando mudanças físicas).

Na construção do sistema foram utilizados corpos de prova na forma de tubos, tanto na montagem para medição da condutividade térmica em polímeros, quanto na medição desta propriedade para materiais cerâmicos. A realização das medições de condutividade térmica de materiais cerâmicos e poliméricos com propriedades conhecidas permitiu a validação dos resultados, a partir da comparação entre os valores obtidos nos ensaios e os valores propostos pela literatura, por meio da quantificação do erro percentual.

Foi realizada a análise de incertezas do sistema de medição radial desenvolvido. A incerteza máxima calculada, em função das incertezas dos sistemas de medição secundários utilizados no medidor, foi de 8%.

Apesar de o sistema ter apresentado erro nulo na medição da condutividade térmica do PEAD, encontrou um erro máximo na medição da condutividade térmica do polipropileno de 62%.

De maneira geral, o sistema de medição construído e testado apresenta vantagens em relação ao sistema tradicional de placas paralelas por garantir um fluxo de calor unidimensional, ao contrário do medidor de placas paralelas. E os resultados na medição de condutividades de materiais isolantes térmicos, onde os erros de medição são grandes para a maioria dos sistemas de medição, foram promissores, indicando que o sistema proposto poderia, com os devidos aperfeiçoamentos, apresentar viabilidade técnica e econômica (devido ao pequeno custo de construção e operação).

7 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista tudo o que foi desenvolvido e estudado, podem ser apontados como possíveis trabalhos futuros:

- I. Realização de testes com materiais calibrados, em que a condutividade térmica seja verdadeiramente conhecida;
- II. Realização de testes em argamassa de revestimento com adição de fibras metálicas de procedência e propriedades verdadeiramente conhecidas;
- III. Realização de testes em novos materiais poliméricos, a fim de reforçar a viabilidade do uso do sistema de medição e observar a influência do processo de produção destes na propriedade física estudada nesse trabalho – condutividade térmica;
- IV. Realização de testes em materiais metálicos, como aço 1020 e alumínio, a fim de viabilizar a utilização do sistema de medição para determinação da condutividade térmica também de materiais condutores;
- V. Execução dos ensaios em ambiente com temperatura uniforme, para garantir menor influência do ambiente nos resultados de ensaio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERTAZZI, A.; SOUZA, A. R. **Fundamentos de metrologia científica e industrial**. 1 ed. Rio de Janeiro. Editora Manole, p. 403; 2008;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220: Desempenho térmico de edificações: Definições, símbolos e unidades**. Rio de Janeiro, p. 2. 2003;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto 02:135.07-001/4: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida**. Rio de Janeiro, p. 2. 2003;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7212: Execução de concreto dosado em central: Procedimento**. Rio de Janeiro, p. 16., 2012;

CALLISTER, W. D. J. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5 ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2015, 589 p.;

CANEVAROLO, S.V.C. **Ciência dos polímeros: Um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 2 ed. São Paulo: Artliber Editora Ltda, 2006;

CATAI, R. E.; et al. **Materiais, técnicas e processos para isolamento acústico**. 17º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Paraná, 2006;

COMITÊ CONJUNTO PARA GUIAS EM METROLOGIA. **JCM 100:2008: Avaliação de dados de medição – Guia para a expressão de incerteza de medição**. Setembro, p.138, 2008;

ELLER, S. C. W. S. **Estudo da incerteza de medição em análises toxicológicas de substâncias psicoativas em urina**. Tese de mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 152, 2014;

INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. Tradução e revisão técnica: Eduardo Mach Queiroz e Fernando Luiz Pellegrini Pessoa. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. Tradução de: *Fundamentals of heat and mass transfer*, 6th ed;

KINGERY, W.D.; BOWEN, H. K.; UHLMANN, D. R. **Introduction to ceramics**. 2 ed. New York: John Wiley Sons, 1975;

KREVELEN, D.W.V; NIJENHUIS, K. T. **Properties of polymers: Their correlation with chemical structure; their numerical estimation and prediction from additive group contribution**. 4th ed. Slovenia: Elsevier, 2009;

LIMA, J. P.. **Modelagem e Teste de Condutividade Térmica em Placa de Gesso e Fibra Vegetal, *Mauritia vinifera* Martius, para uso na Construção Civil**. Tese de Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, p. 117, 2008;

LINO, F.J. **Cerâmicos: Materiais em que vale a pena pensar**. Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Portugal, Porto, p. 31 2006. **Disponível em:** <falves@fe.up.pt>;

LUCAS, E. F.; SOARES, B. G.; MONTEIRO, E. E. C. **Caracterização de Polímeros: Determinação de Peso Molecular e Análise Térmica**. 1 ed. Rio de Janeiro: E-papers Serviços Editoriais LTDA, 2001;

MOURA, L. M.. **Desenvolvimento de um protótipo de equipamento de placa quente protegida**. Tese de mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p.150. 1993;

OLIVEIRA, M.T. **Desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados via USB utilizando termopares**. Monografia, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, p. 80, 2008;

PADILHA, A.F. **Materiais de engenharia: Microestrutura e propriedades**. 1 ed. Curitiba: HEMUS, 2000, p. 343;

SANTOS, W. N. dos. **O método de fio quente: Técnica em paralelo e técnica de superfície**. Cerâmica, São Carlos, v. 306, n. 48, p.86-91, jun. 2002.

SANTOS, W. N. **Métodos transientes de calor na determinação das propriedades térmicas de polímeros**. São Paulo: 8º Congresso Brasileiro de Polímeros, 2005;

SACHT, H.M. ROSSIGNOLO, J. A. SANTOS, W.N. **Avaliação da condutividade térmica de concretos leves com argila expandida**. Matéria, Rio de Janeiro, vol. 15, n. 01, p. 32-39; 2010;

SENGER, S. C. T., SPECHT, L. P., KHATCHATORIAN, O. **10ª Conferência Brasileira de Dinâmicas, Controle e Aplicações**. Rio Grande do Sul, 2011;

SIMIONI, W. S. **Análise de Erros na Medição de Condutividade Térmica de Materiais Através do Método Fluximétrico**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 116. 2005.

VILELA, K.C. **Desenvolvimento de sistema de baixo custo para medição de condutividade térmica em corpos de prova cerâmicos**. Trabalho de Conclusão de Curso, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), Belo Horizonte, 2017, p. 56;

ZANOTTO, E.D., JÚNIOR, A.R.M. **Propriedades mecânicas de materiais cerâmicos: Uma introdução**. Universidade Federal de São Carlos. Cerâmica. São Paulo, p. 37, 1991.

APÊNDICE A – Cálculos de incertezas

Os cálculos de incerteza realizados no desenvolvimento do presente trabalho foram dispostos a seguir, a fim de facilitar o entendimento do raciocínio adotado.

Inicialmente, foi realizado o cálculo das incertezas relacionadas a obtenção das temperaturas de ensaio, as quais foram somadas, pois foram usados dois indicadores.

$$\Delta T = T_e - T_i$$

$$u_{\Delta T} = u_{T_e} + u_{T_i}$$

$$u_{\Delta T} = (0,6 + 0,6)^\circ C = 1,2^\circ C$$

Posteriormente, a incerteza referente aos raios medidos dos corpos de prova ensaiados foram calculadas, de modo que foi necessário fazer o cálculo para incerteza associada ao uso do paquímetro. A equação geral segue abaixo.

$$u_{r_e} = \frac{u_{\text{paquímetro}}}{r_e}$$

$$u_{r_i} = \frac{u_{\text{paquímetro}}}{r_i}$$

$$\frac{r_e}{r_i} = \Delta r$$

$$u_{\Delta r} = u_{r_e} + u_{r_i}$$

Assim, a incerteza dos raios do corpo de prova da argamassa de revestimento foi:

$$u_{r_e} = \frac{0,03}{23,46} = 1,279 \times 10^{-3}$$

$$u_{r_i} = \frac{0,03}{4,07} = 7,371 \times 10^{-3}$$

$$\frac{r_e}{r_i} = \Delta r$$

$$u_{\Delta r} = (1,279 \times 10^{-3}) + (7,371 \times 10^{-3})$$

$$u_{\Delta r} = 8,650 \times 10^{-3}$$

De maneira semelhante, a incerteza para os raios da argamassa com carga metálica (com a resistência de outras a dimensões):

$$u_{r_e} = \frac{0,03}{24,02} = 1,249 \times 10^{-3}$$

$$u_{r_i} = \frac{0,03}{4,039} = 7,428 \times 10^{-3}$$

$$\frac{r_e}{r_i} = \Delta r$$

$$u_{\Delta r} = (1,249 \times 10^{-3}) + (7,428 \times 10^{-3})$$

$$u_{\Delta r} = 8,677 \times 10^{-3}$$

No caso do Polietileno de Alta Densidade, a incerteza associada ao raio do corpo de prova foi:

$$u_{r_e} = \frac{0,03}{25,23} = 1,189 \times 10^{-3}$$

$$u_{r_i} = \frac{0,03}{4,07} = 7,371 \times 10^{-3}$$

$$\frac{r_e}{r_i} = \Delta r$$

$$u_{\Delta r} = (1,189 \times 10^{-3}) + (7,371 \times 10^{-3})$$

$$u_{\Delta r} = 8,560 \times 10^{-3}$$

Por fim, a incerteza associada a medição do raio do corpo de prova polimérico de polipropileno foi:

$$u_{r_e} = \frac{0,03}{28,63} = 1,048 \times 10^{-3}$$

$$u_{r_i} = \frac{0,03}{4,07} = 7,371 \times 10^{-3}$$

$$\frac{r_e}{r_i} = \Delta r$$

$$u_{\Delta r} = (1,048 \times 10^{-3}) + (7,371 \times 10^{-3})$$

$$u_{\Delta r} = 8,419 \times 10^{-3}$$

Afinal, finalização os cálculos diretos de incertezas de mesmo sistema de medição, foi calculada a incerteza associada a potência dissipada durante o ensaio. Inicialmente, considerando os ensaios com materiais cerâmicos, tem-se que a incerteza associada ao multímetro foi de 1% da potência medida. Portanto, para um valor de q de 71 W, tem-se:

$$q = 0,01 \times 71$$

$$q = 0,71$$

Já no caso dos polímeros, os ensaios foram realizados utilizando uma fonte de corrente contínua controlável, de modo que a incerteza deve ser associada as medidas de Tensão (V) e Corrente (i). Logo:

$$u_r(q) = u_r(V) + u_r(i)$$

$$u_r(q) = (1 + 1)\% = 2\%$$

Pontualmente, associando as incertezas às medidas obtidas, foram calculadas três medidas de incerteza associada à potência dissipada de ensaio:

$$\mathbf{1^\circ \text{ Ensaio: } } U_r(q) = 0,02 \times 10,934$$

$$\mathbf{1^\circ \text{ Ensaio: } } U_r(q) = \pm 0,219$$

$$\mathbf{2^\circ \text{ Ensaio: } } U_r(q) = 0,02 \times 10,86$$

$$\mathbf{2^\circ \text{ Ensaio: } } U_r(q) = \pm 0,277$$

$$\mathbf{3^\circ \text{ Ensaio: } } U_r(q) = 0,02 \times 10,80$$

$$\mathbf{3^\circ \text{ Ensaio: } } U_r(q) = \pm 0,276$$

Já para as incertezas associadas aos ensaios com o Polipropileno:

$$U_r(q) = 0,02 \times 10,825$$

$$U_r(q) = \pm 0,277$$

Após a realização dos cálculos das incertezas de mesmo sistema de medição, partiu-se para o cálculo das incertezas indiretas. Para isso, foi realizada as derivadas parciais da Equação 5 (para determinação da condutividade térmica) em relação a cada variável do sistema.

$$u(k) = \sqrt{\left[\frac{\partial k}{\partial q} u(q)\right]^2 + \left[\frac{\partial k}{\partial(\Delta r)} u(\Delta r)\right]^2 + \left[\frac{\partial k}{\partial(\Delta T)} u(\Delta T)\right]^2 + \left[\frac{\partial k}{\partial(L)} u(L)\right]^2}$$

Separando a equação nas quatro derivadas parciais presentes, a fim de facilitar a visualização do sistema, tem-se que:

$$\frac{\partial k}{\partial q} = \frac{\ln(\Delta r)}{2\pi L(\Delta T)}$$

$$\frac{\partial k}{\partial(\Delta r)} = \frac{q \cdot \Delta r^{-1}}{2\pi L(\Delta T)}$$

$$\frac{\partial k}{\partial(\Delta T)} = \frac{-q \cdot \ln(\Delta r)}{2\pi L(\Delta T)^2}$$

$$\frac{\partial k}{\partial(L)} = \frac{q \cdot \ln(\Delta r) (-1)}{2\pi(\Delta T)^2 L^2}$$

Aplicando os valores de cada ensaio realizado, tem-se que, para a argamassa de revestimento, os valores associados ao primeiro ensaio foram:

$$\frac{\partial k}{\partial q} = \frac{\ln(\Delta r)}{2\pi L(\Delta T)} = \frac{\ln(0,02346/0,00407)}{2\pi(0,387)(66,92)} = 0,01076$$

$$\frac{\partial k}{\partial(\Delta r)} = \frac{71 \cdot (0,02346/0,00407)^{-1}}{2\pi(0,387)(66,92)} = 0,0757$$

$$\frac{\partial k}{\partial(\Delta T)} = \frac{-71 \cdot \ln(0,02346/0,00407)}{2\pi(0,387)(66,92)^2} = 0,0114$$

$$\frac{\partial k}{\partial(L)} = \frac{71 \cdot \ln(0,02346/0,00407) (-1)}{2\pi(66,92)^2 0,387^2} = 1,9750$$

Assim, a incerteza final do primeiro ensaio com a argamassa de revestimento pode ser dada por:

$$u(k) = \sqrt{[0,01076 \times 0,71]^2 + [0,0757 \times (8,65 \times 10^{-3})]^2 + [0,0114 \times 1,2]^2 + [1,975 \times 0,001]^2}$$

$$u(k) = \pm[0,0158] W/m.K$$

Com isso, o resultado de medição foi:

$$k = [0,765 \pm 0,016] W/m.K$$

Seguindo o mesmo raciocínio, foram realizados os cálculos para a segunda medição:

$$\frac{\partial k}{\partial q} = \frac{\ln(\Delta r)}{2\pi L(\Delta T)} = \frac{\ln(0,02346/0,00407)}{2\pi(0,387)(65,84)} = 0,0109$$

$$\frac{\partial k}{\partial(\Delta r)} = \frac{71 \cdot \left(0,02346/0,00407\right)^{-1}}{2\pi(0,387)(65,84)} = 0,0769$$

$$\frac{\partial k}{\partial(\Delta T)} = \frac{-71 \cdot \ln\left(0,02346/0,00407\right)}{2\pi(0,387)(65,84)^2} = 0,0118$$

$$\frac{\partial k}{\partial(L)} = \frac{71 \cdot \ln\left(0,02346/0,00407\right) (-1)}{2\pi(65,84)^2} \frac{1}{0,387^2} = 2,0070$$

$$u(k) = \sqrt{[0,0109 \times 0,71]^2 + [0,0769 \times (8,65 \times 10^{-3})]^2 + [0,0118 \times 1,2]^2 + [2,007 \times 0,001]^2}$$

$$u(k) = \pm[0,0163] \text{ W/m.K}$$

Com isso, o resultado de medição foi:

$$k = [0,770 \pm 0,016] \text{ W/m.K}$$

E, por fim, para a terceira medição:

$$\frac{\partial k}{\partial q} = \frac{\ln(\Delta r)}{2\pi L(\Delta T)} = \frac{\ln\left(0,02346/0,00407\right)}{2\pi(0,387)(66,23)} = 0,0109$$

$$\frac{\partial k}{\partial(\Delta r)} = \frac{71 \cdot \left(0,02346/0,00407\right)^{-1}}{2\pi(0,387)(66,23)} = 0,0765$$

$$\frac{\partial k}{\partial(\Delta T)} = \frac{-71 \cdot \ln\left(0,02346/0,00407\right)}{2\pi(0,387)(66,23)^2} = 0,0117$$

$$\frac{\partial k}{\partial(L)} = \frac{71 \cdot \ln\left(0,02346/0,00407\right) (-1)}{2\pi(66,23)^2} \frac{1}{0,387^2} = 1,9950$$

$$u(k) = \sqrt{[0,0109 \times 0,71]^2 + [0,07659 \times (8,65 \times 10^{-3})]^2 + [0,0117 \times 1,2]^2 + [1,995 \times 0,001]^2}$$

$$u(k) = \pm [0,0162] \text{ W/m.K}$$

Com isso, o resultado de medição foi:

$$k = [0,773 \pm 0,016] \text{ W/m.K}$$

O ensaio com a argamassa com carga metálica, diferentemente dos ensaios anteriores, foi realizado em uma única medição, respeitando a estrutura do corpo de prova. Assim, tem-se:

$$\frac{\partial k}{\partial q} = \frac{\ln(\Delta r)}{2\pi L(\Delta T)} = \frac{\ln(0,02402/0,00404)}{2\pi(0,399)(62,73)} = 0,0113$$

$$\frac{\partial k}{\partial(\Delta r)} = \frac{71 \cdot (0,02402/0,00404)^{-1}}{2\pi(0,399)(62,73)} = 0,0438$$

$$\frac{\partial k}{\partial(\Delta T)} = \frac{-71 \cdot \ln(0,02402/0,00404)}{2\pi(0,399)(62,73)^2} = 0,0128$$

$$\frac{\partial k}{\partial(L)} = \frac{71 \cdot \ln(0,02402/0,00404)}{2\pi(62,73)^2} \frac{(-1)}{0,399^2} = 2,01$$

$$u(k) = \sqrt{[0,0113 \times 0,71]^2 + [0,0438 \times (8,677 \times 10^{-3})]^2 + [0,0128 \times 1,2]^2 + [2,01 \times 0,001]^2}$$

$$u(k) = \pm [0,0174] \text{ W/m.K}$$

Com isso, o resultado de medição foi:

$$k = [0,799 \pm 0,017] \text{ W/m.K}$$

No cálculo das incertezas para o sistema aplicado a materiais poliméricos, a lógica e embasamento usados foram os mesmo, considerando as especificidades dos ensaios para esses materiais. Assim, para a primeira medição com o Polietileno de Alta Densidade tem-se:

$$\frac{\partial k}{\partial q} = \frac{\ln(\Delta r)}{2\pi L(\Delta T)} = \frac{\ln(0,02526/0,00407)}{2\pi(0,45)(13,58)} = 0,0475$$

$$\frac{\partial k}{\partial(\Delta r)} = \frac{10,934 \cdot (0,02526/0,00407)^{-1}}{2\pi(0,45)(13,58)} = 0,1441$$

$$\frac{\partial k}{\partial(\Delta T)} = \frac{-10,934 \cdot \ln(0,02526/0,00407)}{2\pi(0,45)(13,58)^2} = 0,0383$$

$$\frac{\partial k}{\partial(L)} = \frac{10,934 \cdot \ln(0,02526/0,00407) \cdot (-1)}{2\pi(13,58)^2 \cdot 0,45^2} = 1,1552$$

$$u(k) = \sqrt{[0,0475 \times 0,219]^2 + [0,1441 \times (8,56 \times 10^{-3})]^2 + [0,0383 \times 1,2]^2 + [1,155 \times 0,001]^2}$$

$$u(k) = \pm [0,0471] \text{ W/m.K}$$

Com isso, o resultado de medição foi:

$$k = [0,519 \pm 0,047] \text{ W/m.K}$$

Já para segunda medição, obteve-se:

$$\frac{\partial k}{\partial q} = \frac{\ln(\Delta r)}{2\pi L(\Delta T)} = \frac{\ln(0,02526/0,00407)}{2\pi(0,45)(18,6)} = 0,0347$$

$$\frac{\partial k}{\partial(\Delta r)} = \frac{10,934 \cdot \left(0,02526/0,00407\right)^{-1}}{2\pi(0,45)(18,6)} = 0,0425$$

$$\frac{\partial k}{\partial(\Delta T)} = \frac{-10,934 \cdot \ln\left(0,02526/0,00407\right)}{2\pi(0,45)(18,6)^2} = 0,0259$$

$$\frac{\partial k}{\partial(L)} = \frac{10,934 \cdot \ln\left(0,02526/0,00407\right) (-1)}{2\pi(18,6)^2 \cdot 0,45^2} = 1,0692$$

$$u(k) = \sqrt{[0,0347 \times 0,277]^2 + [0,0425 \times (8,56 \times 10^{-3})]^2 + [0,0259 \times 1,2]^2 + [1,07 \times 0,001]^2}$$

$$u(k) = \pm [0,0326] W/m.K$$

Com isso, o resultado de medição foi:

$$k = [0,48 \pm 0,033] W/m.K$$

Afinal, para o terceiro com o PEAD obteve-se:

$$\frac{\partial k}{\partial q} = \frac{\ln(\Delta r)}{2\pi L(\Delta T)} = \frac{\ln\left(0,02526/0,00407\right)}{2\pi(0,45)(19,17)} = 0,0337$$

$$\frac{\partial k}{\partial(\Delta r)} = \frac{10,8 \cdot \left(0,02526/0,00407\right)^{-1}}{2\pi(0,45)(19,17)} = 0,0410$$

$$\frac{\partial k}{\partial(\Delta T)} = \frac{-10,8 \cdot \ln\left(0,02526/0,00407\right)}{2\pi(0,45)(19,17)^2} = 0,0243$$

$$\frac{\partial k}{\partial(L)} = \frac{10,8 \cdot \ln\left(0,02526/0,00407\right) (-1)}{2\pi(19,17)^2 \cdot 0,45^2} = 1,033$$

$$u(k) = \sqrt{[0,0337 \times 0,276]^2 + [0,041 \times (8,56 \times 10^{-3})]^2 + [0,0243 \times 1,2]^2 + [1,033 \times 0,001]^2}$$

$$u(k) = \pm [0,0306] \text{ W/m.K}$$

Com isso, o resultado de medição foi:

$$k = [0,48 \pm 0,031] \text{ W/m.K}$$

Por fim, foram realizados em triplicata os ensaios com o PP. Para a primeira medição de condutividade térmica, as incertezas associadas foram:

$$\frac{\partial k}{\partial q} = \frac{\ln(\Delta r)}{2\pi L(\Delta T)} = \frac{\ln(0,02863/0,00407)}{2\pi(0,463)(28,7)} = 0,0234$$

$$\frac{\partial k}{\partial(\Delta r)} = \frac{10,825 \cdot (0,02863/0,00407)^{-1}}{2\pi(0,463)(28,7)} = 0,0263$$

$$\frac{\partial k}{\partial(\Delta T)} = \frac{-10,825 \cdot \ln(0,02863/0,00407)}{2\pi(0,463)(28,7)^2} = 0,0113$$

$$\frac{\partial k}{\partial(L)} = \frac{10,825 \cdot \ln(0,02863/0,00407)}{2\pi(28,7)^2} \frac{(-1)}{0,463^2} = 0,6977$$

$$u(k) = \sqrt{[0,0234 \times 0,277]^2 + [0,0263 \times (8,419 \times 10^{-3})]^2 + [0,0113 \times 1,2]^2 + [0,6977 \times 0,001]^2}$$

$$u(k) = \pm [0,0150] \text{ W/m.K}$$

Com isso, o resultado de medição foi:

$$k = [0,323 \pm 0,015] \text{ W/m.K}$$

Já para a segunda medição tem-se:

$$\frac{\partial k}{\partial q} = \frac{\ln(\Delta r)}{2\pi L(\Delta T)} = \frac{\ln(0,02863/0,00407)}{2\pi(0,463)(24,98)} = 0,0268$$

$$\frac{\partial k}{\partial(\Delta r)} = \frac{10,825 \cdot (0,02863/0,00407)^{-1}}{2\pi(0,463)(24,98)} = 0,0270$$

$$\frac{\partial k}{\partial(\Delta T)} = \frac{-10,825 \cdot \ln(0,02863/0,00407)}{2\pi(0,463)(24,98)^2} = 0,0140$$

$$\frac{\partial k}{\partial(L)} = \frac{10,825 \cdot \ln(0,02863/0,00407)}{2\pi(24,98)^2} \frac{(-1)}{0,463^2} = 0,801$$

$$u(k) = \sqrt{[0,0268 \times 0,277]^2 + [0,027 \times (8,419 \times 10^{-3})]^2 + [0,0140 \times 1,2]^2 + [0,801 \times 0,001]^2}$$

$$u(k) = \pm [0,0184] W/m.K$$

Com isso, o resultado de medição foi:

$$k = [0,371 \pm 0,018] W/m.K$$

Afinal, as incertezas calculadas para o PP foram:

$$\frac{\partial k}{\partial q} = \frac{\ln(\Delta r)}{2\pi L(\Delta T)} = \frac{\ln(0,02863/0,00407)}{2\pi(0,463)(24,22)} = 0,0230$$

$$\frac{\partial k}{\partial(\Delta r)} = \frac{10,825 \cdot (0,02863/0,00407)^{-1}}{2\pi(0,463)(24,22)} = 0,0231$$

$$\frac{\partial k}{\partial(\Delta T)} = \frac{-10,825 \cdot \ln\left(\frac{0,02863}{0,00407}\right)}{2\pi(0,463)(24,22)^2} = 0,0109$$

$$\frac{\partial k}{\partial(L)} = \frac{10,825 \cdot \ln\left(\frac{0,02863}{0,00407}\right) (-1)}{2\pi(24,22)^2} \frac{(-1)}{0,463^2} = 0,686$$

$$U(k) = \sqrt{[0,023 \times 0,277]^2 + [0,0231 \times (8,419 \times 10^{-3})]^2 + [0,0109 \times 1,2]^2 + [0,686 \times 0,001]^2}$$

$$U(k) = \pm[0,0146] W/m.K$$

Com isso, o resultado de medição foi:

$$k = [0,318 \pm 0,015] W/m.K$$

As incertezas percentuais associadas ao sistema foram calculadas a partir da razão entre a incerteza média calculada para os teste de cada material e o valor de k médio obtido, multiplicados por 100.

$$U_k = \frac{\text{Incerteza calculada}}{k} \times 100 \quad (10)$$

Assim, a incerteza associada ao sistema nos testes com a argamassa de revestimento será:

$$U_k = \frac{0,016}{0,770} \times 100 \sim 2,1\%$$

Para a argamassa de revestimento com carga metálica:

$$U_k = \frac{0,017}{0,799} \times 100 \sim 2,1\%$$

Já para o Polietileno de Alta Densidade:

$$U_k = \frac{0,037}{0,488} \times 100 \sim 7,7\%$$

E, por fim, para o Polipropileno:

$$U_k = \frac{0,016}{0,340} \times 100 \sim 4,7\%$$

Assim, fica evidenciada a metodologia de realização dos cálculos desenvolvidos para medição e análise das incertezas do sistema.