

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

KEILA CRISTINA VILELA

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE BAIXO CUSTO PARA MEDIÇÃO DE
CONDUTIVIDADE TÉRMICA EM CORPOS DE PROVA CERÂMICOS

BELO HORIZONTE

2017

KEILA CRISTINA VILELA

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE BAIXO CUSTO PARA MEDIÇÃO DE
CONDUTIVIDADE TÉRMICA EM CORPOS DE PROVA CERÂMICOS

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: Dr. André Guimarães Ferreira

BELO HORIZONTE

2017

KEILA CRISTINA VILELA

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE BAIXO CUSTO PARA MEDIÇÃO DE
CONDUTIVIDADE TÉRMICA EM CORPOS DE PROVA CERÂMICOS**

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: 05/12/2017

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. André Guimarães Ferreira – Orientador

Prof. Dr. Paulo Renato Perdigão de Paiva

Prof. Dr. Sidney Nicodemos da Silva

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me permitir chegar até aqui, sempre me dando forças, sabedoria e discernimento.

Ao meu orientador Prof. André Guimarães Ferreira, pela oportunidade de desenvolvimento acadêmico proporcionado, pela orientação, apoio e confiança.

À minha família, pelo incentivo de sempre, pela paciência em me ouvir, pelo apoio, suporte e amor incondicional.

Ao meu namorado Vinícius, por me acompanhar desde o início, pelo amor e apoio.

Aos amigos por entenderem minha frequente ausência.

Aos colegas de curso, em especial à Laura Fernandes, Laura Saporì, Débora, Ana Elisa e Raíssa, pela ajuda, conselhos e por estarem sempre ao meu lado.

“A jornada de mil quilômetros começa com o primeiro passo”. (O REI LEÃO)

RESUMO

Para uma aplicação correta dos novos materiais que vêm surgindo com o avanço da tecnologia, é necessário que se tenha conhecimento aprofundado de algumas de suas propriedades físico-químicas, como, por exemplo, sua condutividade térmica. Estas propriedades podem ser determinadas por modelagem matemática ou computacional ou então por meio de experimentação. O presente trabalho tem por objetivo desenvolver um sistema de baixo custo para medição de condutividade térmica (k) em corpos de prova cerâmicos. O material utilizado na constituição do corpo de prova foi a argamassa de revestimento. Foi utilizado um corpo de prova tubular, o qual apresenta 400 mm de comprimento e 46,91 mm de diâmetro e um resistor elétrico com o mesmo comprimento e um diâmetro de 9,53 mm, para que promova o aquecimento do corpo de prova. A energização deste resistor, que ocorre mediante uma passagem de corrente elétrica ao conectá-lo à rede elétrica, faz com que ele dissipe calor para seu exterior, aquecendo-o por efeito joule. Este calor, precisa atravessar o corpo de prova tubular cerâmico que envolve o resistor. As extremidades do corpo de prova tubular foram isoladas termicamente com lã de vidro, para garantir um fluxo de calor unidirecional ao longo das amostras. A medição da temperatura foi realizada por meio da utilização de termopares. O valor médio da condutividade térmica (k) encontrado para a argamassa de revestimento foi 0,609 W/mK e foi um valor muito próximo daquele encontrado na literatura, o qual é 0,72 W/mK. Algumas melhorias ainda deverão ser realizadas no presente projeto, porém, até o momento, os resultados encontrados foram positivos.

Palavras-chave: Argamassa de revestimento; Baixo custo; Sistema de medição; Condutividade térmica.

ABSTRACT

For a correct application of the new materials that have come up with the advancement of technology, it is necessary to have in-depth knowledge of some of its physicochemical properties, such as its thermal conductivity. These properties can be determined by mathematical or computational modeling or else by experimentation. The present work aims to develop a low cost system for the measurement of thermal conductivity (k) in ceramic test bodies. The material used in the constitution of the test specimen was the coating mortar. A tubular specimen was used, which is 400 mm long and 46.91 mm in diameter, and an electric resistor of the same length and a diameter of 9.53 mm, to promote heating of the specimen. The energization of this resistor, which occurs through a passage of electric current when connecting it to the electric grid, causes it to dissipate heat to its exterior, warming it by joule effect. This heat needs to pass through the ceramic tubular proof body surrounding the resistor. The ends of the tubular specimen were thermally insulated with glass wool to ensure unidirectional heat flow throughout the samples. The temperature measurement was performed using thermocouples. The average thermal conductivity (k) found for the coating mortar was 0.609 W/mK and was very close to that found in the literature, which is 0.72 W/mK. Some improvements still have to be made in this project, but so far the results have been positive.

Key-words: Coating mortar; Low cost; Measuring system; Thermal conductivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação de um exemplo de delaminação à esquerda, e à direita, uma demonstração de que o Ti_3SiC_2 ainda é fácil de maquinar.....	16
Figura 2 – Experimento de condução térmica em regime de transição.....	23
Figura 3 – Desenho do molde e do resistor elétrico em seu interior.	30
Figura 4 – Molde de PVC utilizado para a fabricação do corpo de prova cerâmico.....	32
Figura 5 – Tampão utilizado para fechamento do molde.	33
Figura 6 – Tampões com um furo no centro utilizados nas extremidades do molde de PVC..	33
Figura 7 – Argamassa de revestimento.	34
Figura 8 – Resistor elétrico.....	35
Figura 9 – Molde de PVC com argamassa e resistor elétrico inseridos em seu interior.	35
Figura 10 – Corte transversal realizado no molde.....	36
Figura 11 – Arames utilizados para a realização dos orifícios no corpo de prova.	36
Figura 12 – Orifícios formados no molde.	37
Figura 13 – Fios elétricos conectados ao resistor.....	37
Figura 14 – Argamassa após 48 horas.	38
Figura 15 – Corpo de prova após ser retirado do molde.	38
Figura 16 – Conexão do resistor à uma tomada.	40
Figura 17 – Sistema de medição de condutividade térmica, montado e em funcionamento..	41
Figura 18 – Gráfico 1 Temperatura ($^{\circ}C$) x Tempo (min).....	44
Figura 19 – Gráfico 2 Temperatura ($^{\circ}C$) x Tempo (min).....	46
Figura 20 – Gráfico 3 Temperatura ($^{\circ}C$) x Tempo (min).....	47
Figura 21 – Gráfico 4 Temperatura ($^{\circ}C$) x Tempo (min).....	49
Figura 22 – Corpo de prova após fratura e resistor elétrico.	52
Figura 23 – Resistor elétrico após ser retirado do interior do corpo de prova.	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Condutividade térmica para materiais cerâmicos.....	19
Tabela 2 – Soluções Unidimensionais, em regime estacionário, da equação do calor sem geração.....	28
Tabela 3 – Medidas das temperaturas com a variação do tempo para o primeiro ensaio realizado com termopares.....	43
Tabela 4 – Medidas das temperaturas com a variação do tempo para o segundo ensaio realizado com termopares.....	45
Tabela 5 – Medidas das temperaturas com a variação do tempo para o terceiro ensaio realizado com termopares.....	47
Tabela 6 – Medidas das temperaturas com a variação do tempo para o quarto ensaio realizado com termopares.....	49

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 Materiais Cerâmicos.....	15
3.1.1 O Futuro das Cerâmicas	15
3.1.2 A Indústria Cerâmica.....	16
3.2 Condutividade Térmica	17
3.2.1 Condutividade Térmica de Materiais Cerâmicos	18
3.3 Medição da Condutividade Térmica.....	19
3.3.1 Métodos de Medição da Condutividade Térmica.....	20
4 REFERENCIAL TEÓRICO.....	23
4.1 A Equação da taxa de Condução	23
4.2 A Equação da Difusão de Calor (Difusão Térmica).....	24
4.3 Equação da difusão de calor em coordenadas cilíndricas.....	25
4.4 Condução Unidimensional Permanente em Tubos	26
4.4.1 Condução Unidimensional em Regime Estacionário	26
4.4.2 Sistemas Radiais	26
4.4.2.1 O Cilindro.....	26
4.4.3 Resultados da Condução Unidimensional	28
5 MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
5.1 Materiais e Equipamentos	29
5.2 Dimensionamento do resistor e do molde de PVC e sistema de medição.....	29
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	32
6.1 Análise Experimental	32
6.2 Sistemas de medição	39
6.3 Validação dos resultados medidos com o sensor desenvolvido	42
6.3.1 Primeiro ensaio realizado com a utilização dos termopares.....	42
6.3.2 Segundo ensaio realizado com a utilização dos termopares.....	45
6.3.3 Terceiro ensaio realizado com a utilização dos termopares	46
6.3.4 Quarto ensaio realizado com a utilização dos termopares.....	48

6.4 Cálculo da condutividade térmica (k) para os quatro ensaios realizados	50
6.5 Viabilidade técnica e econômica do sistema de medição desenvolvido	51
6.6 Retirada do resistor elétrico do interior do corpo de prova	52
7 CONCLUSÕES	54
8 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	55
REFERÊNCIAS	56

1 INTRODUÇÃO

Diversos fatores têm contribuído para o aumento do consumo de energia em todo o mundo. A globalização difundiu mundialmente o estilo de vida dos países mais desenvolvidos, levando muitas sociedades a um ponto extremo, onde não é possível reverter o quadro e viver sustentavelmente. Um desses fatores que causam grande impacto ambiental em nações desenvolvidas é o uso de energia em edificações. Globalmente, a indústria da construção e o ambiente construído são dois dos maiores consumidores de energia e materiais (SANTIN; ITARD; VISSCHER, 2009).

De acordo com Gasparini (2005), novas formas de sustentabilidade e economia dos recursos energéticos existentes vêm sendo cada vez mais estudadas. O emprego de materiais com maior resistência térmica poderia representar, em muitos casos, uma grande redução no consumo de energia elétrica em edificações com ambientes climatizados e também representar um maior conforto dos ocupantes de edificações sem condicionamento de ar, já que estes materiais proporcionam maior isolamento térmico do ambiente a ser ocupado, diminuindo as trocas de calor com o meio externo.

O projeto de edificações energeticamente eficientes necessita de conhecimentos sobre a transferência de calor do ambiente externo para o interior das edificações, a fim de criar soluções que associem diferentes materiais e dimensões de camadas às condições desejadas de conforto térmico.

Novos materiais estão surgindo cada vez mais com o avanço da tecnologia, os quais têm por objetivo substituir materiais antigos por serem mais eficientes nas funções em que serão empregados. Para dar a aplicação correta a estes materiais, é necessário que se tenha conhecimento aprofundado das propriedades físico-químicas dos mesmos como, por exemplo, sua condutividade térmica. Estas propriedades podem ser determinadas por modelagem matemática ou computacional ou então por meio de experimentação.

De acordo com Incropera et al. (2012), a condutividade térmica é caracterizada como uma propriedade de transporte, pois fornece informações a respeito da taxa na qual a energia é transferida através de um material por meio de difusão térmica. Conhecer esta propriedade é fundamental em um sistema térmico.

Neste trabalho foi construído um sistema de medição de condutividade térmica em corpos de prova cerâmicos de baixo custo. Foi realizada a construção e a operação deste sistema. Assim, poderá ser obtido o valor da condutividade térmica da argamassa de revestimento, por meio do monitoramento da temperatura ao longo das amostras em função

do tempo. A condutividade térmica do material ensaiado foi determinada pela utilização da lei de *Fourier*.

1.1 Justificativa e Relevância

A ideia de desenvolver um sistema de baixo custo para medição de condutividade térmica em corpos de prova cerâmicos foi criada levando em consideração os métodos existentes até o momento. Todos estes métodos de medida de condutividade térmica apresentam um custo muito elevado, dificultando o acesso ao sistema de medição.

A criação deste novo sistema será de grande importância para que uma gama maior de pesquisadores deste ramo tenha acesso ao mesmo. Com isso, poderá existir uma maior eficiência na escolha do material de acordo com a finalidade do mesmo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um sistema de baixo custo para medição de condutividade térmica em corpos de prova cerâmicos.

2.2 Objetivos Específicos

Foram definidos como objetivos específicos:

- a) Projetar e adquirir o resistor elétrico cilíndrico (estudando faixa de operação e dimensões do resistor e corpo de prova) com isolamento térmico nas extremidades;
- b) Projetar e confeccionar uma forma para corpo de prova cerâmico tubular com 400 mm de comprimento e diâmetro médio externo de 46,91 mm;
- c) Validar o sistema de medição desenvolvido com material de condutividade térmica conhecida.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Materiais Cerâmicos

De acordo com Barsoum (2003), as cerâmicas podem ser definidas como compostos sólidos que são formados pela aplicação de calor, e algumas vezes, por calor e pressão. São formadas por pelo menos dois elementos, em que um deles é um não-metal ou um sólido não-metálico elementar, e o outro elemento, um metal ou outro sólido não-metálico elementar.

Outra definição para as cerâmicas seria “a arte e a ciência de fazer e usar artigos sólidos, que têm como componente essencial, e são compostas em grande parte, por materiais não metálicos inorgânicos.” (KINGERY et al., 1975, tradução nossa). Em outras palavras, o que não é nem um metal, um semicondutor ou um polímero é uma cerâmica.

Para Kingery et al. (1975), as propriedades dos materiais cerâmicos geralmente são determinadas pela estrutura cristalina e pela composição química de seus constituintes essenciais, além de sofrerem grande influência da natureza e da quantidade de minerais acessórios presentes. Dependendo do ambiente geológico em que o depósito mineral foi formado, irá ocorrer uma variação nas características mineralógicas dos materiais cerâmicos e, portanto, suas propriedades estão sujeitas a ampla variação. Os materiais cerâmicos apresentam ligações iônicas e/ou covalentes.

3.1.1 O Futuro das Cerâmicas

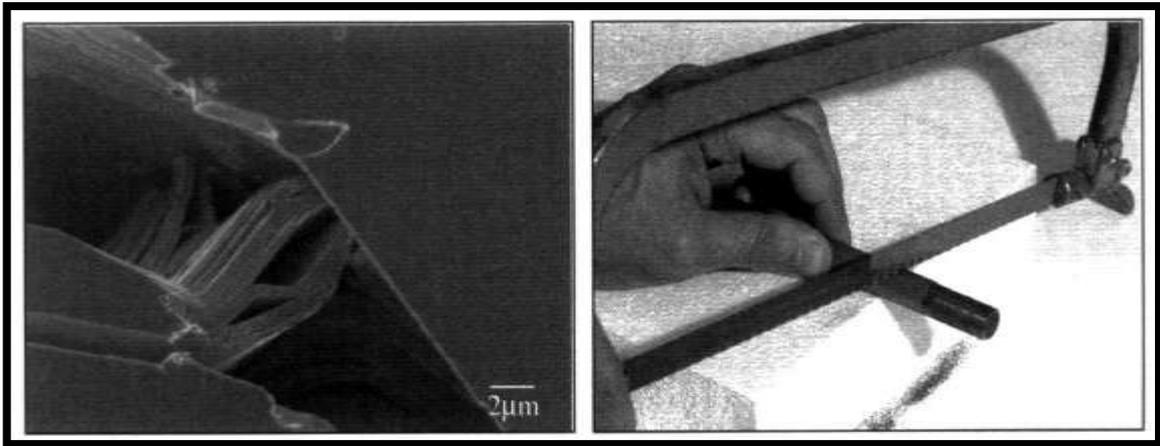
O interesse pela cerâmica moderna veio depois do interesse em metais e polímeros, e a cerâmica é considerada simultaneamente a mais antiga e mais recente dos sólidos. Existe uma multidão de compostos cerâmicos que nunca foram sintetizados, muito menos caracterizados.

Descobertas surpreendentes estão sempre ao virar da esquina, como os dois exemplos a seguir ilustram. Em 1986, a temperatura mais alta em que qualquer material se tornou supercondutor, era em torno de 23 K. Naquele ano um avanço veio quando Bednorz e Muller quebraram o registro, demonstrando que um lantânio em camadas, óxido de cobre de estrôncio tornou-se supercondutor na temperatura de 46 K. Esta descoberta provocou um interesse mundial no assunto, e alguns meses mais tarde o registro novamente quase dobrou, a cerca de 90 K. O registro de hoje é superior a 120 K. (BARSOU, 2003, p. 10, tradução nossa).

De acordo com Barsoum (2003), existem alguns compostos como, por exemplo, o carbetto de titânio silício (Ti_3SiC_2), que combinam os melhores atributos de metais e

cerâmicas. Como os metais, eles são excelentes condutores elétricos e térmicos, não são suscetíveis ao choque térmico, e se comportam plasticamente às temperaturas mais elevadas. Como a cerâmica, eles têm alta rigidez específica (aproximadamente três vezes mais rígido do que o titânio, com a mesma densidade) e, como pode ser observado na Figura 1, são maquináveis com uma serra manual. Apresentam também boas propriedades de fluência e fadiga.

Figura 1 – Representação de um exemplo de delaminação à esquerda e à direita, uma demonstração de que o Ti_3SiC_2 ainda é fácil de maquinar.



Fonte: Barsoum, 2003, p.11.

Pode ser observado na Figura 1 o Ti_3SiC_2 , na qual à esquerda está representado um exemplo de delaminação e à direita, apesar de ser bastante rígido e leve, apresenta que o Ti_3SiC_2 ainda é fácil de maquinar.

3.1.2 A Indústria Cerâmica

A cerâmica é considerada por muitos estudiosos como a mais antiga matéria-prima a ser inserida no mercado. Essa inserção da indústria cerâmica no Brasil, por exemplo, vem cada dia se tornando mais significativa.

De acordo com Kingery et al. (1975), a indústria cerâmica é considerada base para que ocorra a operação de muitas outras indústrias, sendo essa uma de suas principais características. Como exemplos existem os refratários, os quais são utilizados como componente básico da indústria metalúrgica; os abrasivos, que são utilizados em indústrias de máquinas-ferramentas e automóveis; os vidros, que além de serem essenciais para a indústria

automobilística, contribuem com a indústria eletrônica e com a arquitetura. E muitos outros como cimentos e inúmeros óxidos.

As propriedades cerâmicas são amplamente determinadas pela estrutura cristalina e pela composição química de seus constituintes essenciais, além da natureza e da quantidade de minerais acessórios presentes. As características mineralógicas de tais materiais e, portanto, suas propriedades cerâmicas estão sujeitas a ampla variação entre diferentes ocorrências ou mesmo na mesma ocorrência, dependendo do ambiente geológico em que o depósito mineral foi formado, bem como as modificações físicas e químicas que ocorreram durante a história geológica subsequente. (KINGERY et al., 1975, p. 6, tradução nossa).

De acordo com Kingery et al. (1975), as argilas, por exemplo, encontram-se disponíveis em quase todos os lugares, e por isso, a fabricação de tijolos e ladrilhos que não requerem propriedades excepcionais se torna uma indústria localizada com amplo aproveitamento da matéria-prima. Em contraste, para cerâmicas finas que exigem um maior controle no uso das matérias-primas, estas são normalmente beneficiadas pela concentração mecânica, flutuação da espuma e outros processos relativamente baratos.

As matérias-primas de maior aplicação são os minerais de argila – partículas finas de silicato de alumínio hidratado que desenvolvem plasticidade quando misturados com a água. Estes variam em grandes limites nas características químicas, mineralógicas e físicas, mas uma característica comum é sua estrutura de camada cristalina, consistindo em camadas de aluminossilicato eletricamente neutras, o que leva a um tamanho de partícula fina e a uma morfologia semelhante a uma placa e permite que as partículas se movam prontamente uma sobre a outra. (KINGERY et al., 1975).

3.2 Condutividade Térmica

“A condutividade térmica é uma das propriedades físicas mais importantes de um material. A sua determinação experimental apresenta algumas dificuldades e requer alta precisão na determinação dos fatores necessários para o seu cálculo.” (SANTOS, 2002).

A condutividade térmica depende da capacidade de um material atuar como isolante e, portanto, é considerada uma propriedade crítica desse material. Dessa forma, ela pode constituir um importante critério de seleção de materiais em projetos de engenharia. É de grande importância que sua medição seja precisa e confiável. Existem valores de referência estabelecidos na literatura para certos materiais convencionais, e para materiais menos utilizados ou cuja composição ou processo de fabricação não sejam padronizados, os valores

encontrados podem se diferenciar significativamente ao mudar a fonte de pesquisa. (BORTOLI; KNIJNIK; VIEIRA, 2010).

“A condutividade térmica é a propriedade de transporte que está diretamente ligada à taxa de transferência de energia térmica por difusão através de um meio material”. (INCROPERA et al., 2012).

De acordo com Incropera et al. (2012), a condutividade térmica associada à condução na direção x é definida pela Equação 1.

$$k_x \equiv -\frac{q''_x}{\partial T / \partial x} \quad (1)$$

Onde q''_x é o fluxo de calor [W] na direção x (direção ao longo do eixo das amostras), A é a área da seção transversal à direção x [m^2], k é a condutividade térmica do material no qual há o fluxo de calor [$W/(mk)$] e T é a temperatura [$^{\circ}C$]. O sinal negativo reflete o fato da transferência de calor ocorrer das regiões de maior temperatura para as de menor temperatura.

A condutividade térmica nas direções y e z são encontradas de maneira similar à direção x , porém para um material isotrópico, a condutividade térmica é independente da direção de transferência, $k_x = k_y = k_z = k$. (INCROPERA et al., 2012).

Na visão moderna dos materiais, um sólido pode ser composto por elétrons livres e átomos ligados em um arranjo periódico chamado *lattice*. Conseqüentemente, o transporte de energia térmica pode ser devido a dois efeitos: migração de elétrons livres, e ondas vibracionais no *lattice*. Quando visto como um fenômeno de partículas, os *quanta* da vibração do *lattice* são chamados de *fônons*. Em metais puros, a contribuição dos elétrons para a transferência de calor por condução predomina, enquanto em não-condutores e semicondutores a contribuição dos fônons é dominante. (INCROPERA, 2012, p. 39).

3.2.1 Condutividade Térmica de Materiais Cerâmicos

De acordo com Santos (1988), materiais cerâmicos possuem certas propriedades que fizeram com que a sua utilização aumentasse consideravelmente nos últimos anos. A indústria cerâmica, a siderúrgica, a eletrônica e a nuclear são exemplos de indústrias que fazem uso desse material. Em muitas dessas aplicações de materiais cerâmicos, a sua utilização se dá em regimes de trabalho sujeitos a altas temperaturas e a choques térmicos. Por essa razão, o estudo de fatores que afetam a condutividade térmica de materiais cerâmicos vem sendo cada vez mais realizado, dentre os quais se destacam a porosidade, a temperatura, e no caso do material cerâmico concreto refratário, o teor de umidade.

A Tabela 1 apresenta diversos materiais cerâmicos e a condutividade térmica para cada material.

Tabela 1 - Condutividade térmica para materiais cerâmicos.

Material	Condutividade Térmica k (W/m.K)
Al₂O₃	30 – 35
AlN	200 – 280
BeO	63 – 216
MgO	37
PSZ	2
SiC	84 – 93
SiAlON	21
SiO₂	1,4
Si₃N₄	25
MgAl₂O₄	12
Vidro de silicato de soda-lime	1,7
TiB₂	40
Ti₃SiC₂	43
Cordierita	4
Vidros	0,6 – 1,5
Forsterita	3

Fonte: BARSOUM, 2003, p.478, tradução nossa.

Pode ser observado na Tabela 1, que os materiais cerâmicos apresentam uma ampla variação em seus valores de condutividade térmica. Enquanto alguns vidros apresentam um valor da igual a 0,6 W/mK, o nitreto de alumínio (AlN) apresenta um valor de até 280 W/mK.

3.3 Medição da Condutividade Térmica

Para saber a aplicação correta de um material é necessário que se tenha conhecimento aprofundado de algumas propriedades do mesmo, as quais podem ser determinadas por modelagem matemática ou computacional, ou ainda por meio de experimentação.

Para Incropera et al. (2012), a condutividade térmica é uma propriedade de grande interesse, sendo caracterizada como uma propriedade de transporte, pois ela fornece informações a respeito da taxa na qual a energia é transferida através de um material por meio de difusão térmica.

Para determinar propriedades térmicas de materiais em laboratórios utilizam-se métodos regidos por normas brasileiras e internacionais como a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e a Organização Internacional de Normalização (ISO), respectivamente. Para que sejam obtidos resultados precisos, dentro destas normas, existem alguns equipamentos que realizam os testes, tornando a atividade relativamente mais fácil que há alguns anos atrás.

3.3.1 Métodos de Medição da Condutividade Térmica

Os métodos utilizados para determinar experimentalmente a condutividade térmica, geralmente são voltados para uma determinada classe de materiais. Podem ser classificados da seguinte maneira (CARSLAW e JAEGER, 1959):

- (i) Métodos em regime estacionário (para materiais isolantes): as extremidades de uma placa plana do material são mantidas a temperaturas diferentes, e então é medida a temperatura em dois pontos afastados delas o suficiente;
- (ii) Métodos térmicos em regime estacionário (para materiais metálicos): as extremidades de uma barra de metal utilizada como amostra são mantidas a diferentes temperaturas prescritas;
- (iii) Métodos elétricos em regime estacionário (para materiais metálicos): é utilizado um metal em forma de fio, o qual é atravessado por uma corrente enquanto suas extremidades são mantidas a temperaturas prescritas;
- (iv) Métodos de escoamento em regime estacionário (para líquidos): é medida a temperatura num líquido em escoamento entre dois reservatórios mantidos a temperaturas diferentes.
- (v) Métodos de aquecimento periódico: variam-se periodicamente as condições impostas às extremidades de uma amostra e, quando o sistema fica estável, estuda-se a evolução da temperatura em um dado ponto.
- (vi) Métodos em regime transiente: explora-se a medição da variação da temperatura no entorno de um fio inserido no material e aquecido instantaneamente por uma corrente elétrica.

Santos (2002) divide em duas grandes classes, os métodos utilizados para a medição da condutividade térmica de um material. Estes métodos são nomeados como diretos e indiretos. Os métodos diretos são aqueles que medem diretamente a condutividade térmica a

partir dos resultados experimentais, e para exemplificar, pode ser citado o método calorimétrico de placa quente - placa fria. Já os métodos indiretos medem experimentalmente uma determinada propriedade do material, e o valor da condutividade térmica é obtido a partir dessa propriedade. Como exemplo pode ser citado o método de pulso de energia, no qual é determinado experimentalmente o valor da difusividade térmica e, a partir do conhecimento de propriedades como calor específico e densidade do material, a condutividade térmica será determinada.

O método mais utilizado de medida de condutividade térmica para materiais refratários hoje em todo o mundo, tanto nos centros de pesquisa, quanto nos laboratórios industriais, é o Método do Fio Quente, onde a condutividade térmica é calculada a partir do transiente de temperatura gerado por uma fonte de calor ideal, infinitamente longa e fina num meio material infinito. (SANTOS, 2002, p. 87).

Santos (2002), além das duas classes citadas acima, divide os métodos de medição de condutividade térmica em comparativos e absolutos. Os métodos comparativos requerem um ou mais corpos calibrados, que são tomados como referência. Como exemplo pode ser citado o método da coluna fracionada, que utiliza dois corpos padrão como referência. Os métodos absolutos fazem a medida da condutividade térmica diretamente, dispensando o uso de padrões de comparação, e como exemplo de ser citado o método do fio quente.

De acordo com Santos (2002), hoje em dia o método do fio quente é considerado como uma técnica precisa na determinação da condutividade térmica de materiais cerâmicos. Nesta técnica de medida o conceito de temperatura média entre a face quente e a face fria de uma amostra, utilizados nos cálculos dos métodos calorimétricos é eliminado, uma vez que o cálculo da condutividade é feito a uma dada temperatura fixa. O gradiente de temperatura através da amostra é muito baixo, o que é sem dúvida outra virtude deste método, uma vez que um método ideal de medida de condutividade térmica seria aquele capaz de medir essa propriedade segundo um gradiente de temperatura zero através da amostra.

De acordo com o regime de troca de calor utilizado, os métodos existentes podem ainda ser classificados em dois grandes grupos: métodos estacionários e não estacionários. Os métodos estacionários são aqueles que medem a condutividade térmica em um regime estacionário de troca de calor. Como exemplos podem ser citados todos os métodos calorimétricos. Já os métodos não estacionários medem a condutividade térmica durante um regime transiente de troca de calor (SANTOS, 2002).

Segundo Janno (2009), dos principais métodos utilizados para determinação de propriedades térmicas em materiais, se destacam alguns como: o método da placa quente

protegida, o método do fio quente, o método de tiras quentes, o sistema de disco quente e o método do dispositivo de três camadas.

Janno (2009) realizou estudos para a obtenção de coeficientes de condutividade térmica de materiais altamente isolantes, o que deixa o problema com uma dificuldade maior do que materiais com altos coeficientes. Para este estudo, usou-se o método da placa quente protegida.

De acordo com Simioni (2005), o método da placa quente protegida é utilizado para ensaiar amostras planas de materiais homogêneos que apresentam baixa condutividade térmica. Este método funciona pela aplicação de um fluxo de calor conhecido em duas amostras do material, montadas de maneira simétrica em torno de uma placa quente central. O fluxo de calor é gerado pelo aquecimento desta placa. Conhecendo-se a potência dissipada para o aquecimento e medindo-se as temperaturas das faces das amostras com o sistema em regime permanente, aplica-se a lei de *Fourier* para determinar a condutividade térmica do material.

No método fluximétrico o regime permanente é atingido mais rapidamente. A amostra é submetida a um fluxo de calor gerado por uma resistência alimentada por uma fonte de tensão regulável. O calor flui através da amostra e é dissipado na placa fria, formando um fluxo aproximadamente unidimensional. Com o auxílio de um fluxímetro, determina-se o valor deste fluxo. Com medidas auxiliares de área, comprimento da amostra e temperaturas, é possível obter todos os elementos para a determinação da condutividade térmica por meio da lei de *Fourier*. (SIMIONI, 2005).

O método *Flash*, introduzido por Parker em 1961, consiste em um método direto na determinação da difusividade térmica, onde um pulso de energia radiante e de curta duração é incidido sobre uma das faces da amostra, sendo medida a variação de temperatura na face oposta. Neste método, considera-se que o pulso de energia provoca um aumento de temperatura dentro da amostra suficientemente pequeno, para que se possam considerar as propriedades físicas constantes. (PARKER, 1961).

Outro experimento apresentado por Güths (2005) é denominado como Caixa Quente Protegida, o qual traz em sua concepção o fluxo de calor (q) gerado por uma resistência aquecedora instalada no interior de uma câmara de cinco lados chamada "caixa de medição". As perdas de calor ao ambiente são anuladas por uma "caixa de guarda" cuja temperatura é controlada de forma a permanecer idêntica à temperatura da caixa de medição durante todo o ensaio.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 A Equação da taxa de Condução

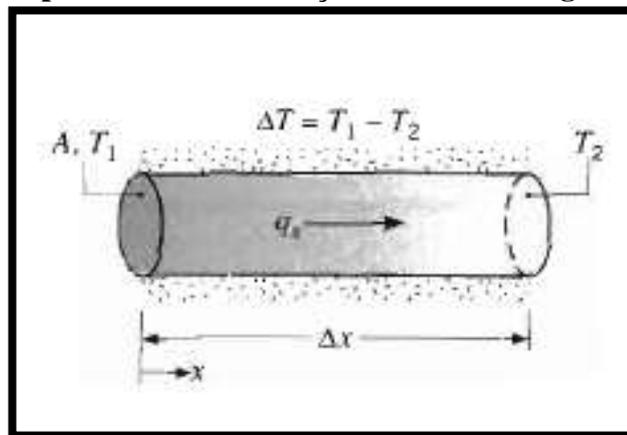
De acordo com Incropera et al. (2012), a lei de Fourier pode ser escrita de uma forma mais geral reconhecendo-se que o fluxo térmico é uma grandeza vetorial, como mostrado na Equação 2.

$$q'' = -k\nabla T = -k \left(\hat{i} \frac{\partial T}{\partial x} + \hat{j} \frac{\partial T}{\partial y} + \hat{k} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2)$$

Onde $T(x, y, z)$ é o campo escalar de temperaturas e k é a condutividade térmica.

Para entender melhor esta lei, pode-se considerar um experimento de condução de calor, em regime permanente, que é representado na Figura 2.

Figura 2 – Experimento de condução térmica em regime estacionário.



Fonte: Incropera et al., 2012, p.38.

Uma forma alternativa da lei de Fourier é apresentada na Equação 3.

$$q''_n = -k \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) \quad (3)$$

Onde q''_n é o fluxo térmico em uma direção n que é normal a uma isoterma.

O vetor fluxo térmico pode ser decomposto em componentes, de tal forma que em coordenadas cartesianas, a expressão geral é mostrada na Equação 4.

$$q'' = (\hat{i}q''_x + \hat{j}q''_y + \hat{k}q''_z) \quad (4)$$

4.2 A Equação da Difusão de Calor (Difusão Térmica)

Para Incropera et al. (2012), as taxas de transferência de calor por condução, são indicadas pelos termos q_x, q_y e q_z respectivamente, através das superfícies de controle na posição das coordenadas x, y e z . As taxas de transferência de calor por condução nas superfícies opostas podem ser expressas como uma expansão da série de Taylor na qual, na qual se despreza os termos de ordens superiores, como é mostrado nas Equações 5, 6 e 7.

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \quad (5)$$

$$q_{y+dy} = q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \quad (6)$$

$$q_{z+dz} = q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \quad (7)$$

No interior do meio em que será utilizado pode existir um termo que representará fonte de energia, o qual está associado à taxa de geração de energia térmica, como está representado na Equação 8.

$$\dot{E}_g = \dot{q} dx dy dz \quad (8)$$

Onde \dot{q} é a taxa na qual a energia é gerada por unidade de volume do meio (W/m^3).

Podem ocorrer também variações na quantidade de energia interna térmica armazenada pela matéria no interior do volume de controle. No caso de ausência de mudança de fase, os efeitos da energia latente não são pertinentes, e o termo referente ao acúmulo de energia pode ser escrito como é apresentado na Equação 9.

$$\dot{E}_{acu} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (9)$$

Onde o termo $\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}$ significa a taxa de variação com o tempo da energia sensível do meio por unidade de volume.

Ainda de acordo com Incropera et al. (2012), utilizando as equações de taxas apresentadas anteriormente, é possível representar a conservação da energia, como mostra a Equação 10.

$$\dot{E}_{ent} + \dot{E}_g - \dot{E}_{sai} = \dot{E}_{acu} \quad (10)$$

As taxas de condução de calor constituem a entrada e a saída de energia, e ao substituir as Equações 7 e 8, obtém-se a Equação 11.

$$-\frac{\partial q_x}{\partial x} dx - \frac{\partial q_y}{\partial y} dy - \frac{\partial q_z}{\partial z} dz + \dot{q} dx dy dz = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (11)$$

As taxas de transferência de calor por condução podem ser determinadas pela lei de Fourier, de acordo com as Equações 12, 13 e 14.

$$q_x = -k dy dz \frac{\partial T}{\partial x} \quad (12)$$

$$q_y = -k dx dz \frac{\partial T}{\partial y} \quad (13)$$

$$q_z = -k dy dx \frac{\partial T}{\partial z} \quad (14)$$

4.3 Equação da difusão de calor em coordenadas cilíndricas

De acordo com Incropera et al. (2012), quando o operador grad é representado em coordenadas cilíndricas, a forma geral do vetor fluxo térmico e assim, a lei de Fourier é representada pela Equação 15.

$$q'' = -k \nabla T = -k \left(\mathbf{i} \frac{\partial T}{\partial r} + \mathbf{j} \frac{\partial T}{r \partial \phi} + \mathbf{k} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (15)$$

Ao aplicar um balanço de energia no volume de controle diferencial, a forma geral da equação do calor é obtida pela Equação 16.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(k \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (16)$$

4.4 Condução Unidimensional Permanente em Tubos

4.4.1 Condução Unidimensional em Regime Estacionário

Para Incropera et al. (2012), os gradientes de temperatura existem ao longo de uma única direção e a transferência de calor ocorre exclusivamente nesta direção. Além disso, no regime estacionário, a temperatura em cada ponto do sistema é independente do tempo.

4.4.2 Sistemas Radiais

Em sistemas cilíndricos e esféricos existem gradientes de temperatura somente na direção radial, e isso irá possibilitar analisá-los como sistemas unidimensionais. Em condições de regime estacionário em que não há geração de calor, esses sistemas podem ser analisados através de um método padrão, o qual começa com a forma apropriada da equação do calor, ou ainda, pelo método alternativo, o qual se inicia com a forma apropriada da lei de Fourier (INCROPERA et al., 2012).

4.4.2.1 O Cilindro

De acordo com Incropera et al. (2012), é comum citar como exemplo o tubo (cilindro oco), no qual as superfícies interna e externa estão expostas a fluidos com diferentes temperaturas. Considerando estado estacionário sem geração de calor, a forma apropriada da equação do calor é representada pela Equação 17.

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(kr \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (17)$$

Onde k é tratada como uma variável.

A taxa na qual a energia é conduzida através de qualquer superfície cilíndrica no sólido pode ser representada pela Equação 18.

$$q_r = -kA \frac{dT}{dr} = -k(2\pi rL) \frac{dT}{dr} \quad (18)$$

Onde $2\pi rL$ é a área normal à direção da transferência de calor.

Segundo Incropera et al. (2012), a equação 17 dita que a grandeza $kr \frac{dT}{dr}$ é independente de r , e a partir da Equação 18 conclui-se que a taxa de transferência de calor q_r é uma constante na direção radial.

É possível determinar a distribuição de temperaturas no cilindro resolvendo a equação 16 e utilizando condições de contorno apropriadas. Supondo constante o valor de k , a equação 16 pode ser integrada duas vezes para se obter a solução geral representada pela Equação 19.

$$T(r) = C_1 \ln r + C_2 \quad (19)$$

Para que sejam obtidas as constantes de integração C_1 e C_2 , são introduzidas as seguintes condições de contorno: $T(r_1) = T_{s,1}$ e $T(r_2) = T_{s,2}$.

Depois que se encontra C_1 e C_2 , substituindo-os na solução geral, encontra-se a Equação 20.

$$T(r) = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)} \ln\left(\frac{r}{r_2}\right) + T_{s,2} \quad (20)$$

“A distribuição de temperaturas associada à condução radial através de uma parede cilíndrica é logarítmica, não linear.” (INCROPERA et al., 2012, p. 74).

Se a distribuição de temperaturas for utilizada com a lei de Fourier, é possível obter a expressão para a taxa de transferência de calor, representada pela Equação 21.

$$q_r = \frac{2\pi Lk(T_{s,1} - T_{s,2})}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (21)$$

Nesse caso, para a condução radial em uma parede cilíndrica, a resistência térmica tem a forma mostrada na Equação 22.

$$R_{t,cond} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi Lk} \quad (22)$$

4.4.3 Resultados da Condução Unidimensional

“Muitos problemas importantes são caracterizados pela condução unidimensional, em regime estacionário, em paredes planas, cilíndricas ou esféricas, sem geração de energia térmica.” (INCROPERA et al., 2012, p.78).

Na Tabela 2 apresentam-se as soluções unidimensionais, em regime estacionário, da equação do calor sem geração.

Tabela 2 - Soluções Unidimensionais, em regime estacionário, da equação do calor sem geração.

	Parede Plana	Parede Cilíndrica ^a	Parede Esférica ^a
Equação de calor	$\frac{d^2T}{dx^2} = 0$	$\frac{1}{r} \left(\frac{d}{dr} \right) \left(r \left(\frac{dT}{dr} \right) \right) = 0$	$\frac{1}{r^2} \left(\frac{d}{dr} \right) \left(r^2 \left(\frac{dT}{dr} \right) \right) = 0$
Distribuição de temperaturas	$T_{s,1} - \Delta T \frac{x}{L}$	$T_{s,2} + \Delta T \frac{\ln\left(\frac{r}{r_2}\right)}{\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)}$	$T_{s,1} - \Delta T \left[\frac{1 - \left(\frac{r_1}{r}\right)}{1 - \left(\frac{r_1}{r_2}\right)} \right]$
Fluxo térmico (q")	$\frac{k\Delta T}{L}$	$\frac{k\Delta T}{r \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$	$\frac{k\Delta T}{r^2 \left[\left(\frac{1}{r_1}\right) - \left(\frac{1}{r_2}\right) \right]}$
Taxa de transferência de calor (q)	$\frac{kA\Delta T}{L}$	$\frac{2\pi Lk\Delta T}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$	$\frac{4\pi k\Delta T}{\left[\left(\frac{1}{r_1}\right) - \left(\frac{1}{r_2}\right) \right]}$
Resistência térmica (R_{t, cond})	$\frac{L}{kA}$	$\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi Lk}$	$\frac{\left(\frac{1}{r_1}\right) - \left(\frac{1}{r_2}\right)}{4\pi k}$

^aO raio crítico do isolante é $r_a = k/h$ para o cilindro e $r_a = 2k/h$ para a esfera.

Fonte: INCROPERA et al., 2012, p.78.

É possível observar na Tabela 2 os principais resultados para as três geometrias, sendo paredes planas, cilíndricas ou esféricas, onde ΔT se refere à diferença de temperaturas, $T_{s,1} - T_{s,2}$, entre as superfícies interna e externa.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Materiais e Equipamentos

Para a construção do sistema de medição de condutividade térmica em corpos de prova cerâmicos, utilizou-se um molde tubular de PVC (policloreto de vinila) e dois tampões poliméricos que foram colocados nas extremidades.

Foram utilizadas duas abraçadeiras metálicas ao redor do molde, para que este não abraisse enquanto estivesse com o corpo de prova em seu interior, uma vez que apresentava um corte transversal de uma extremidade à outra.

O corpo de prova foi feito de argamassa, mais especificamente uma argamassa de revestimento. Para isso, utilizou-se cimento, cal, areia e água.

Para que pudesse ocorrer o aquecimento do corpo de prova, em seu interior foi colocado um resistor elétrico, conectado a um plug macho através de cabos conectores de cobre, que foi ligado a uma fonte de 127 V (rede elétrica). O resistor elétrico apresentava uma potência de 75,7 W (medida com alicate Wattímetro).

Utilizou-se lã de vidro nas extremidades do corpo de prova, funcionando como isolante térmico durante o aquecimento do mesmo, para minimizar transferência de calor longitudinal e conseqüentemente minimizar erros de medição do sistema.

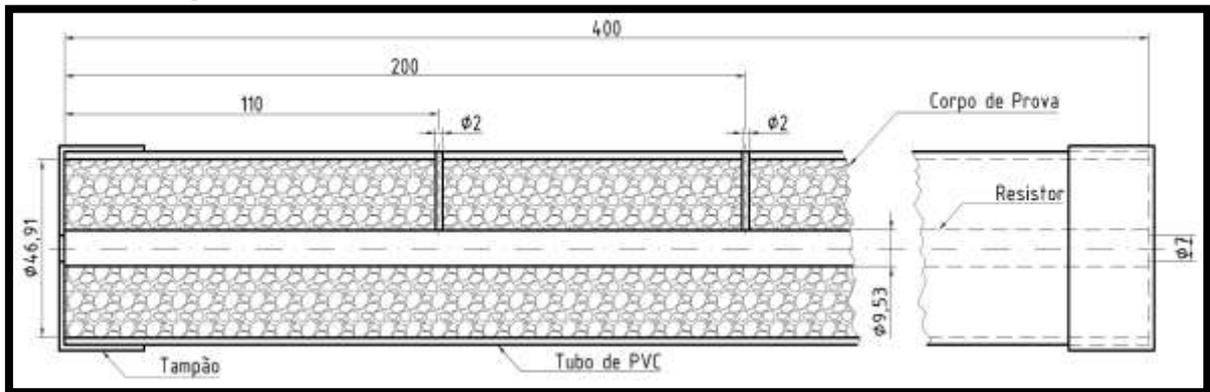
Foi colocada pasta térmica na superfície do resistor elétrico, antes deste ser colocado no interior do corpo de prova, minimizando a resistência térmica de contato entre o resistor e a argamassa. A pasta térmica convencional de óxido de zinco e silicone com adição de cobre em pó em sua composição aumenta a condutividade da pasta e minimiza erros de medição.

Realizou-se dois furos no molde tubular e por meio da utilização de um arame de 2 mm de diâmetro, o corpo de prova cerâmico terá orifícios, para a medição da temperatura no interior do corpo de prova por meio da utilização dos termopares.

5.2 Dimensionamento do resistor e do molde de PVC e sistema de medição

As dimensões utilizadas para o resistor e para o molde de PVC utilizados estão apresentadas na Figura 3.

Figura 3 – Desenho do molde e do resistor elétrico em seu interior.



Fonte: Próprio Autor.

A partir da Figura 3, é possível observar o molde utilizado para confecção do corpo de prova e, em seu interior, o resistor elétrico. O diâmetro médio do molde é 46,91 mm e o do resistor 9,53 mm. O diâmetro aproximado das abraçadeiras utilizadas foi de 10 mm. Foram realizados dois orifícios tanto no molde quanto no corpo de prova de 2 mm cada. Um dos orifícios se encontra a 110 mm da extremidade esquerda e o outro se encontra no centro do corpo de prova. O comprimento utilizado tanto para o molde quanto para o resistor elétrico foi 400 mm.

As dimensões tanto do resistor elétrico cilíndrico quanto do corpo de prova cerâmico tubular, foram definidas por meio do estudo de faixas de operação. Realizaram-se diferentes tentativas de cálculos, com a utilização de diferentes valores para as variáveis existentes na equação 21.

Considerou-se que o valor que seria encontrado para o ΔT , o qual seria utilizado na equação 21, não deveria ser um valor muito pequeno, devido à incerteza do termopar utilizado para as medições das temperaturas no corpo de prova. E assim, os valores das dimensões foram definidos.

O sistema de medição desenvolvido com material de condutividade térmica conhecida foi validado a partir da realização de quatro ensaios diferentes, nos quais as temperaturas do corpo de prova foram medidas em função do tempo. Mediu-se a temperatura da superfície (T_s) no centro e na periferia do corpo de prova, que é o ponto mais próximo de uma das extremidades deste. Mediu-se também a temperatura no interior (T_i) tanto no centro quanto na periferia do corpo de prova, e para isso, o termopar foi colocado dentro do corpo de prova por meio do orifício realizado com a utilização de um arame de 2 mm.

Para cada ensaio realizado foi encontrado um valor de condutividade térmica, e posteriormente, realizou-se o cálculo da média destes valores.

Após o término dos ensaios, a próxima etapa foi a recuperação do resistor elétrico, o qual se encontrava no interior do corpo de prova cerâmico.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Análise Experimental

Para a construção do novo sistema de medição de condutividade térmica foi feito um corpo de prova tubular cerâmico. Como molde deste corpo de prova utilizou-se um tubo de PVC, conforme apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Molde de PVC utilizado para a fabricação do corpo de prova cerâmico.



Fonte: Próprio Autor.

Nas extremidades do tubo foram utilizados dois tampões poliméricos, um em cada extremidade, como está apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Tampão utilizado para fechamento do molde.



Fonte: Próprio Autor.

Foi feito um furo no centro de cada tampão utilizado, como pode ser observado na Figura 6. Em uma das extremidades, o furo foi realizado com o intuito de criar uma passagem para os fios do resistor elétrico, e assim conectar estes à tomada. Na outra extremidade, realizou-se o furo no tampão para facilitar no processo de permanência do resistor elétrico na posição correta, ou seja, no centro do corpo de prova.

Figura 6 – Tampões com um furo no centro utilizados nas extremidades do molde de PVC.



Fonte: Próprio Autor.

O material cerâmico utilizado para a fabricação do corpo de prova foi a argamassa de revestimento. Esta argamassa apresenta traço de 1:1:5 (cimento, cal e areia). De acordo com

Incropera et al. (2012), a condutividade térmica deste tipo de argamassa é de $0,72 \text{ W/m.K}$, considerando um calor específico de 780 J/kg.K e uma massa específica de 1860 kg.m^3 .

Para a fabricação da argamassa de revestimento utilizou-se 800 g de areia, 160 g de cal, 160 g de cimento e 286 mL de água. Na Figura 7 está apresentada a argamassa formada.

Figura 7 – Argamassa de revestimento.



Fonte: Próprio Autor.

Após a formação da argamassa, o produto formado foi inserido dentro do molde de PVC, onde se encontrava o resistor elétrico centralizado. Este resistor foi energizado mediante uma passagem de corrente elétrica ao conectá-lo a uma fonte de 127 volts, o que faz com que ele dissipe calor para seu exterior, aquecendo-o por efeito joule. Este calor, precisa atravessar o corpo de prova tubular cerâmico que envolve o resistor.

A superfície do resistor elétrico foi coberta por pasta térmica, a qual apresentava uma mistura em sua composição de pó de cobre, óxido de zinco e silicone. A pasta térmica foi utilizada com o intuito de aumentar o contato entre a argamassa e o resistor.

Na Figura 8 está apresentado o resistor elétrico que foi utilizado.

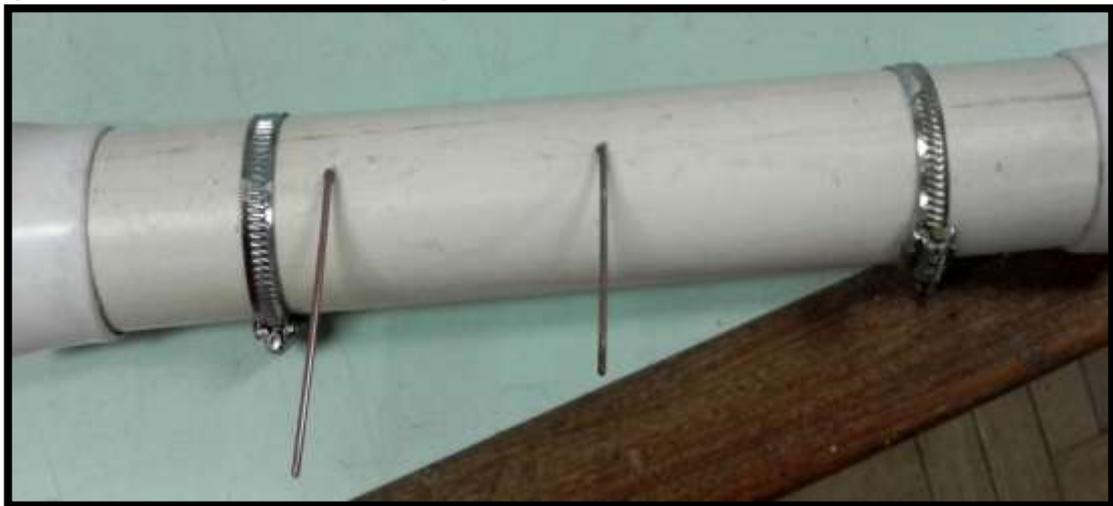
Figura 8 – Resistor elétrico.



Fonte: Próprio Autor.

Na Figura 9 pode ser observado o molde de PVC já com a argamassa e o resistor elétrico inseridos em seu interior.

Figura 9 – Molde de PVC com argamassa e resistor elétrico inseridos em seu interior.



Fonte: Próprio Autor.

Na parte externa, o molde foi envolvido por duas abraçadeiras metálicas, pois antes de ser preenchido pela argamassa, foi realizado um corte transversal em todo o corpo deste, de uma extremidade à outra, conforme apresentado na Figura 10. Este corte serve para facilitar no momento da retirada do corpo de prova do molde. As abraçadeiras servem para que o molde não abra depois de preenchido.

Figura 10 – Corte transversal realizado no molde.



Fonte: Próprio Autor.

É possível observar ainda na Figura 9, a presença de dois arames metálicos inseridos no molde (os mesmos foram utilizados na Figura 10, para facilitar a visualização do corte realizado). Estes arames foram colocados logo após ser inserida a argamassa no interior do molde, para que formasse um orifício entre a superfície do corpo de prova e a superfície do resistor elétrico (o qual se localizava no interior do corpo de prova), antes que ocorresse a secagem da argamassa.

Foram formados dois orifícios, um no centro do corpo de prova e outro mais próximo de uma das extremidades (110 mm da extremidade mais próxima), para que pudessem ser colocados os termopares, e assim, realizar a medição da temperatura no interior do corpo de prova em dois pontos diferentes. Os arames utilizados apresentam 2 mm de diâmetro e podem ser observados na Figura 11.

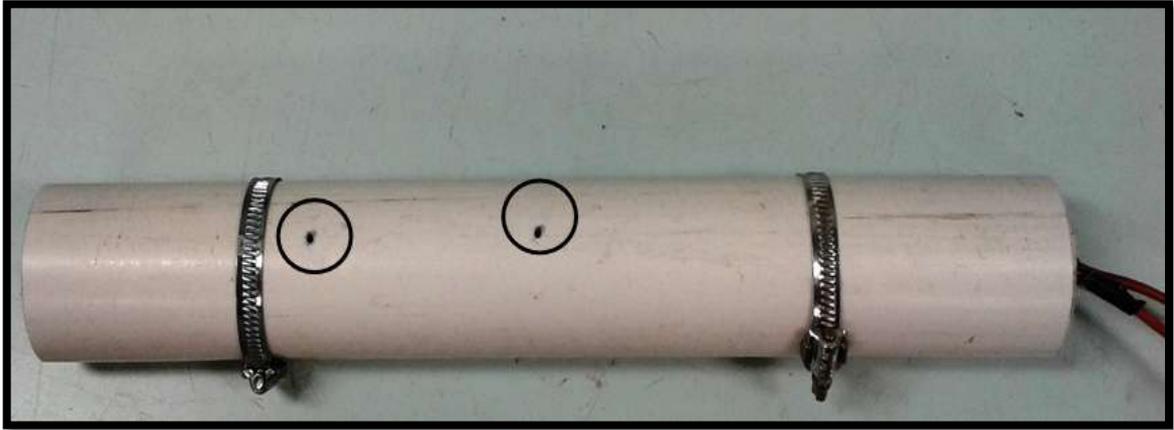
Figura 11 – Arames utilizados para a realização dos orifícios no corpo de prova.



Fonte: Próprio Autor.

Na Figura 12 está representado o molde após a retirada dos arames que formaram os orifícios, os quais foram destacados para uma melhor visualização dos mesmos.

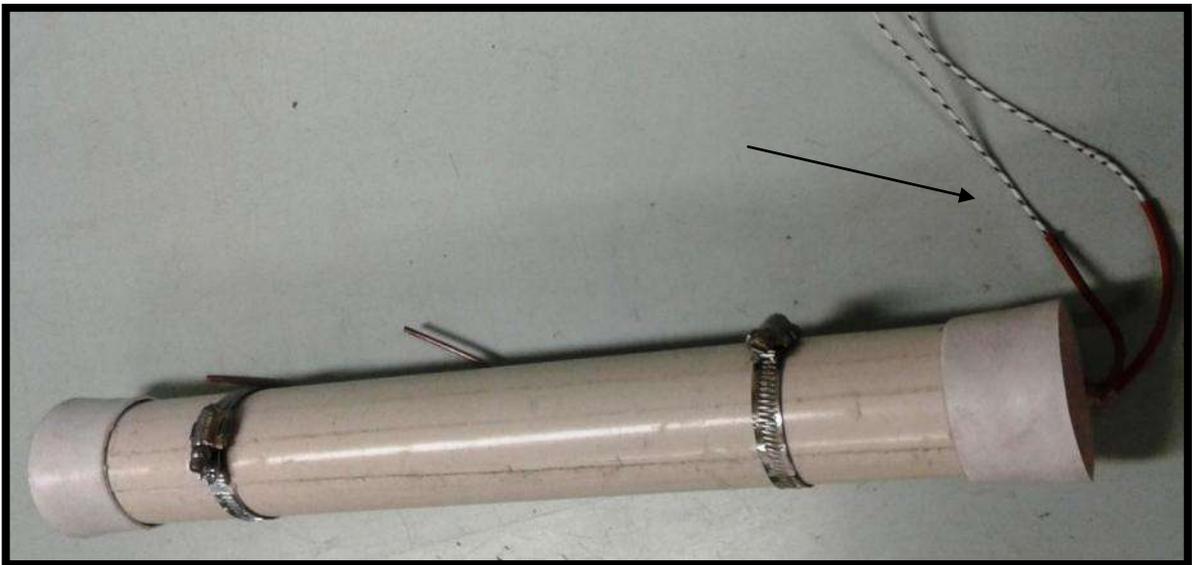
Figura 12 – Orifícios formados no molde.



Fonte: Próprio Autor.

O resistor elétrico apresentava em uma de suas extremidades dois fios elétricos, para que pudessem ser conectados a um plug macho e assim, serem ligados à rede elétrica. Estes fios podem ser observados na Figura 13, a qual apresenta uma seta indicativa.

Figura 13 – Fios elétricos conectados ao resistor.



Fonte: Próprio Autor.

Após 48 horas em que a argamassa foi colocada no molde, já havia se solidificado, conforme é apresentado na Figura 14.

Figura 14 – Argamassa após 48 horas.

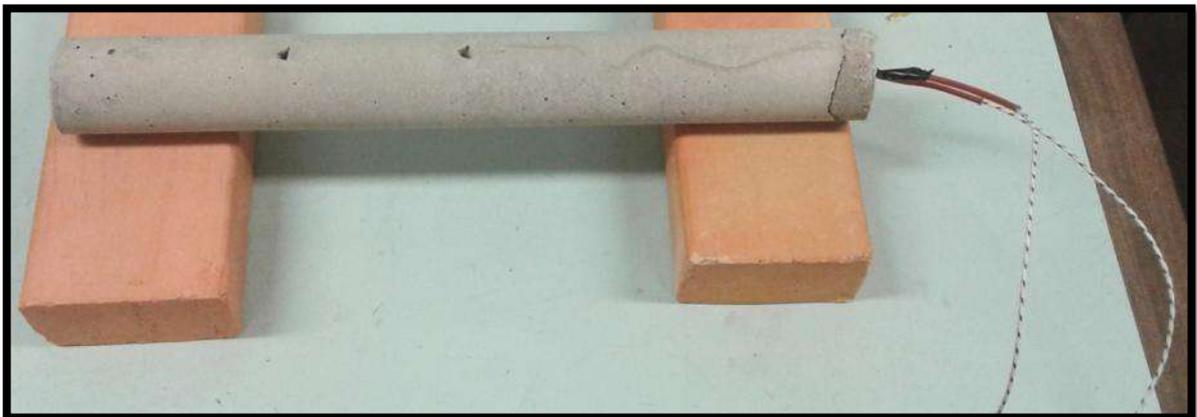


Fonte: Próprio Autor.

Pode-se observar na Figura 14, a argamassa depois de solidificada no interior do molde de PVC. Foi retirado um dos tampões para que isso pudesse ser observado. É possível identificar ainda a presença do resistor elétrico no centro do corpo de prova.

A próxima etapa do processo foi a retirada do corpo de prova que se encontrava dentro do molde. Primeiramente, foram retirados os tampões poliméricos e as abraçadeiras metálicas, e assim, o corpo de prova foi removido com facilidade, o qual pode ser observado na Figura 15.

Figura 15 – Corpo de prova após ser retirado do molde.



Fonte: Próprio Autor.

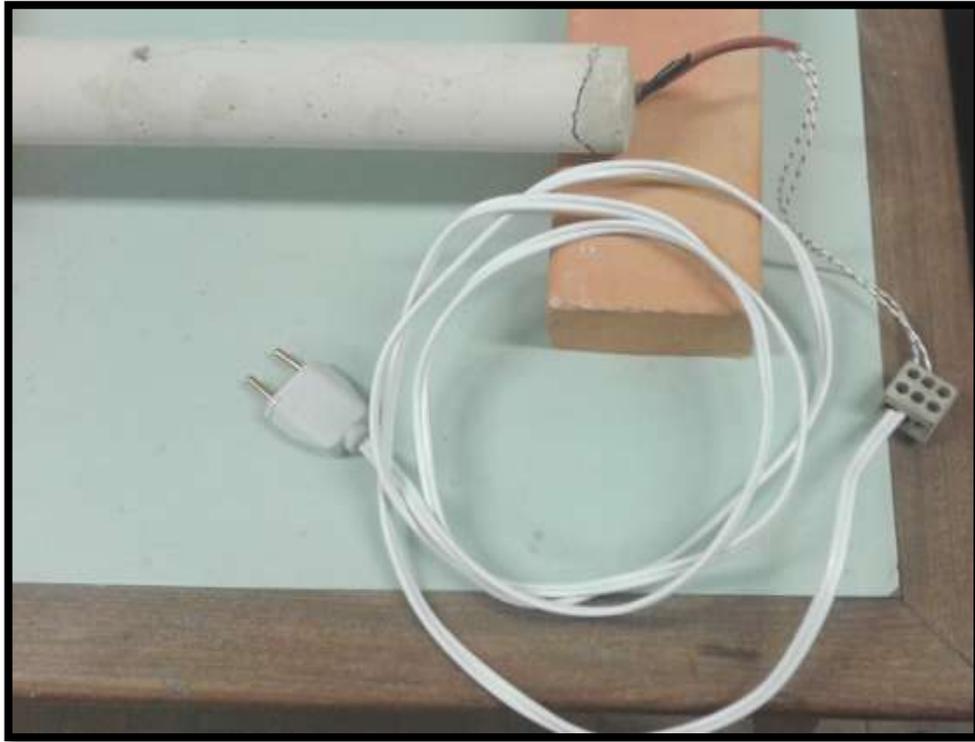
É possível observar a presença dos dois orifícios que foram formados pelos dois arames antes que a argamassa se solidificasse. Observa-se também a presença dos fios em uma das extremidades do corpo de prova, os quais serão conectados a uma tomada.

Nota-se ainda na Figura 15, uma rachadura que ocorreu no corpo de prova. Esta rachadura foi formada devido à necessidade da realização de um novo preenchimento do molde com argamassa, uma vez que, ao se solidificar, o corpo de prova perdeu água, o que fez com que faltasse material para completar o molde. Por isso, produziu-se mais argamassa para completar este preenchimento. No momento em que isto ocorreu, a argamassa adicionada anteriormente, já havia se solidificado, e assim, esta não se juntou perfeitamente àquela adicionada posteriormente. A rachadura observada não afetou significativamente nos resultados encontrados.

6.2 Sistemas de medição

Com a criação do corpo de prova constituído pela argamassa de revestimento e com um resistor no interior do mesmo, a próxima etapa do projeto foi colocar o sistema de medição de condutividade térmica em funcionamento. Na Figura 16 pode ser observada a conexão dos cabos do resistor elétrico com o plug para a tomada.

Figura 16 – Conexão do resistor à uma tomada.



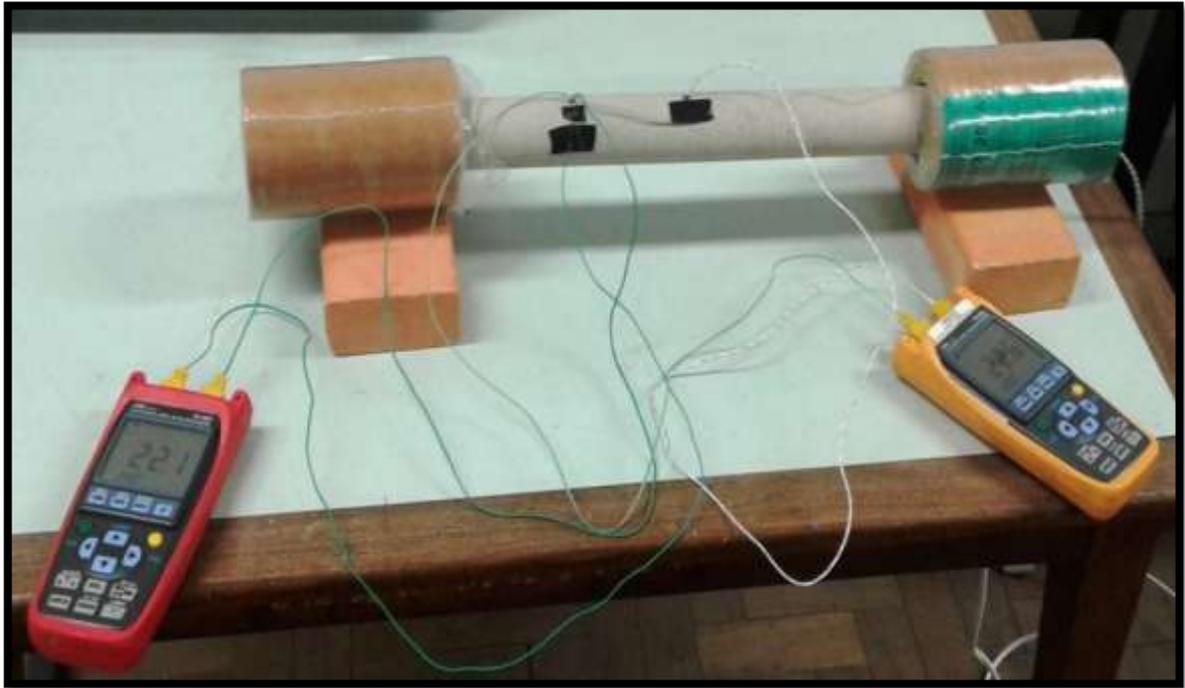
Fonte: Próprio Autor.

As temperaturas no corpo de prova foram medidas em quatro pontos diferentes, por meio da utilização de termopares do modelo TD-880, da marca ICEL. Foram utilizados dois termopares do tipo K, cada um era capaz de medir a temperatura em duas regiões diferentes.

O TD-880 de cor amarela foi utilizado para medir as temperaturas da superfície e do interior (neste caso, temperatura encontrada no resistor) da parte central do corpo de prova. Já o TD-880 de cor vermelha, foi utilizado para medir as temperaturas da superfície e do interior da parte próxima a uma das extremidades do corpo de prova, a uma distância de 110 mm da extremidade mais próxima.

Na Figura 17 está representado o sistema de medição de condutividade térmica, montado e em funcionamento, após ligar o resistor à fonte de energia de 127 V.

Figura 17 - Sistema de medição de condutividade térmica, montado e em funcionamento.



Fonte: Próprio Autor.

É possível observar na Figura 17, que as extremidades do corpo de prova tubular cerâmico, foram isoladas termicamente para garantir um fluxo de calor exclusivamente radial no corpo de prova. Este isolamento se deu através da utilização da lã de vidro.

As temperaturas foram medidas a cada 10 minutos, sendo que a primeira medição foi realizada antes do resistor ser ligado à fonte de energia. Isto foi feito até o sistema entrar em regime estacionário, e assim, as temperaturas pararem de variar.

O ensaio de medição de temperatura com a utilização dos termopares foi realizado quatro vezes. Em cada vez em que se realizou o ensaio, calculou-se a variação da temperatura (ΔT) entre o interior e a superfície do corpo de prova, tanto no centro quanto no ponto próximo a uma das extremidades. Isto foi feito na última medida da temperatura, e assim, o ΔT foi calculado quando o sistema já havia entrado em regime estacionário.

A partir do valor encontrado para o ΔT , foi possível então, calcular o valor da condutividade térmica (k) para cada vez em que o ensaio foi realizado. Este valor foi encontrado por meio da equação 21. Isolando o k na equação encontra-se a equação 23.

$$k = \frac{q_r \ln(r_2/r_1)}{2\pi L(T_{s,1} - T_{s,2})} \quad (23)$$

O valor de q_r é o valor da potência do resistor, que foi medida com a utilização de um Alicata Wattímetro, enquanto este se encontrava ligado á fonte de 127 V. O valor encontrado para q_r foi 75,7W.

O valor de r_2 é o valor do raio do corpo de prova, que é 0,02346 m e o valor de r_1 é o valor do raio do resistor elétrico, que é 0,004765 m.

O valor de L é o comprimento do corpo de prova, o qual é igual a 0,4 m.

O valor de $(T_{s,1} - T_{s,2})$, ou seja, o ΔT , é o valor da diferença entre as temperaturas da superfície e do centro do corpo de prova. Como estas temperaturas foram medidas em duas regiões diferentes em cada ensaio realizado, foram encontrados dois valores de ΔT , sendo necessário, portanto, encontrar a média destes valores. O valor médio encontrado foi utilizado na equação 22.

Após a realização de todas as medições necessárias, a próxima etapa do projeto foi a recuperação do resistor elétrico. Para isso, o mesmo foi retirado do interior do corpo de prova, para que possa ser reutilizado em testes futuros.

6.3 Validação dos resultados medidos com o sensor desenvolvido

6.3.1 Primeiro ensaio realizado com a utilização dos termopares

Na Tabela 3 estão representados os resultados encontrados no primeiro ensaio realizado. A primeira temperatura medida foi no tempo 0, ou seja, antes que o resistor fosse ligado a uma fonte de energia. Posteriormente, as temperaturas passaram a ser medidas de 5 em 5 minutos até completarem 30 minutos que o resistor elétrico havia sido ligado. A partir deste tempo, as temperaturas passaram a ser medidas de 10 em 10 minutos até o tempo total de 250 minutos, ou seja, 4 horas e 10 minutos.

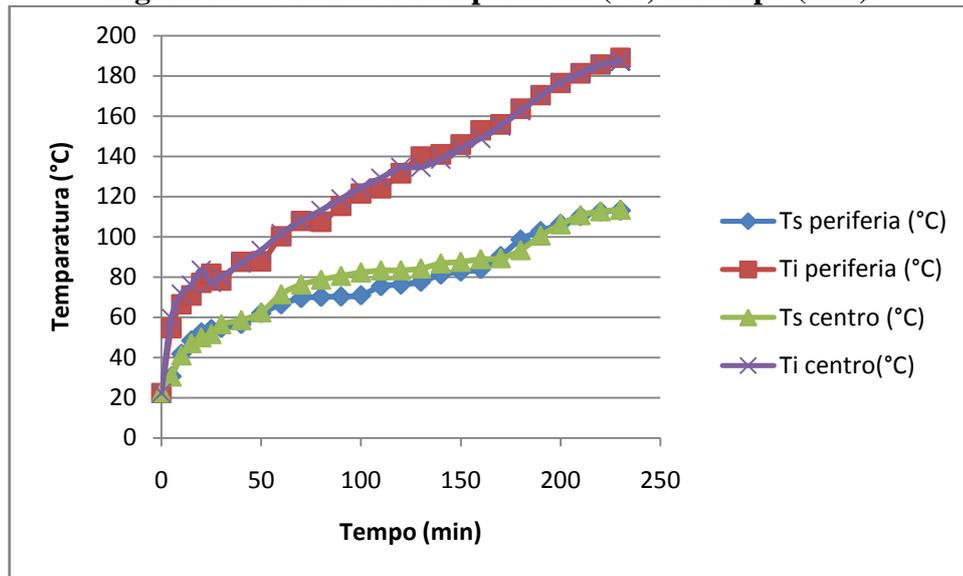
Tabela 3 – Medidas das temperaturas com a variação do tempo para o primeiro ensaio realizado com termopares.

Tempo (min)	Ts periferia (°C)	Ti periferia (°C)	Ts centro (°C)	Ti centro(°C)
0	22,5	22,3	22,7	22,4
5	30,6	54,6	30,6	59,5
10	41,8	66,4	41,1	71,5
15	48,4	70,8	47,2	75,9
20	52,4	77,1	50,1	83,5
25	54,1	81,6	51,7	77,3
30	54,6	78,2	56,6	79,8
40	56,6	87,5	58,6	86,9
50	62	87,8	62,5	93,3
60	66,4	100,3	71,5	101,6
70	69,5	107,9	76,3	107,6
80	70,1	107,5	78,7	113,1
90	70,3	115,3	80,6	118,8
100	70,9	121,5	82,3	124,4
110	75,4	124,1	83,3	129,2
120	76,2	131,6	83,4	134,5
130	77,6	140	84,3	134,5
140	81,2	141	86,8	138,6
150	82,7	145,9	87,6	143,7
160	83,9	153	88,9	148,9
170	90,4	155,9	89,4	155,1
180	98,6	163,7	93,4	162,6
190	102,8	170,4	100,6	170,1
200	106,4	176,5	106,2	176,8
210	110,2	181,3	110,8	181,2
220	112,5	185,7	112,7	185,5
230	113,1	189	113,5	187,2
240	113,1	189	113,5	187,2
250	113,1	189	113,5	187,2

Fonte: Próprio Autor.

A partir dos resultados encontrados na Tabela 3, foi produzido um gráfico das temperaturas encontradas no ensaio 1 em relação ao tempo, conforme está apresentado no gráfico da Figura 18.

Figura 18 – Gráfico 1 Temperatura (°C) x Tempo (min).



Fonte: Próprio Autor.

A partir da Figura 18, é possível observar que todas as temperaturas medidas foram aumentando com o passar do tempo, porém, o corpo de prova não entrou em regime permanente antes de 230 minutos, como mostra a Tabela 3. Somente a partir de 230 minutos em que o resistor elétrico se encontrava ligado foi que as temperaturas que estavam sendo medidas começaram a se repetir, mostrando que o sistema estava começando a entrar em regime permanente.

O ensaio 1 apresentou resultados menos satisfatórios. Foi observado que isto aconteceu devido ao fenômeno de secagem que estava ocorrendo enquanto estavam sendo realizadas as medições das temperaturas. No momento em que o resistor elétrico foi ligado na fonte de energia, foi possível perceber que o corpo de prova passou a mudar sua coloração, devido à ocorrência da secagem.

É válido ressaltar que durante a secagem do corpo de prova, este apresentava tanto calor sensível quanto calor latente. O calor sensível é responsável por provocar apenas variação na temperatura do corpo, sem que ocorra mudança em seu estado físico. Já o calor latente, atua na mudança de estado físico do material, e não na variação de temperatura do mesmo.

O corpo de prova apresentou os dois tipos de calor durante quase todo o ensaio, somente no final do experimento passou a existir apenas o calor sensível. Por isso, este ensaio não colaborou muito para o estudo do regime permanente no corpo de prova cerâmico em questão.

6.3.2 Segundo ensaio realizado com a utilização dos termopares

Na Tabela 4 estão representados os resultados encontrados no segundo ensaio realizado. A primeira temperatura medida foi no tempo 0, ou seja, antes que o resistor fosse ligado a uma fonte de energia. Posteriormente, as temperaturas passaram a ser medidas de 10 em 10 minutos até o tempo total de 200 minutos, ou seja, 3 horas e 20 minutos.

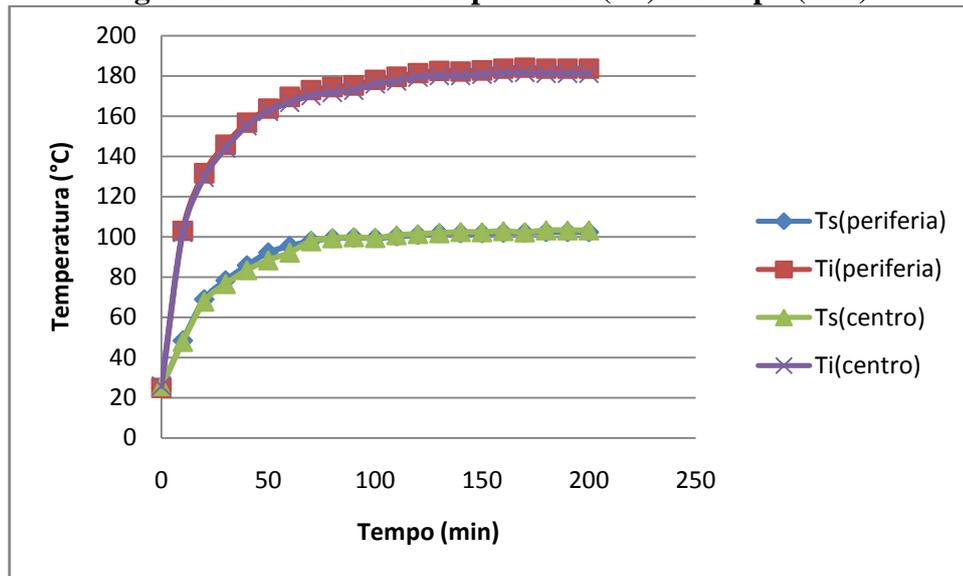
Tabela 4 – Medidas das temperaturas com a variação do tempo para o segundo ensaio realizado com termopares.

Tempo (min)	Ts periferia (°C)	Ti periferia (°C)	Ts centro (°C)	Ti centro(°C)
0	24,9	24,9	25,8	25,8
10	48,4	102,9	47,8	102,1
20	68,9	131,6	67,8	129,4
30	78,3	145,8	76,6	144
40	85,8	156,7	83,5	155,1
50	92,2	163,7	88,4	162,3
60	95,4	169,5	92,2	166,8
70	97,9	172,9	97,9	170,1
80	99,2	174,4	99,4	171,7
90	99,6	175,2	99,9	172,8
100	99,3	178	99,5	175,9
110	100,2	179,5	100,9	177,4
120	100,9	181,3	101,5	179,2
130	101,7	182,4	101,9	180
140	101,7	182,1	102,5	180
150	101,7	182,7	102,4	180,7
160	102	183,5	102,9	181,4
170	102	184	102,3	181,6
180	102,3	183,5	103,3	181,2
190	102,3	183,5	103,3	181,2
200	102,3	183,5	103,3	181,2

Fonte: Próprio Autor.

As temperaturas foram medidas até não haver mais variação destas com o passar do tempo. A partir dos resultados encontrados na Tabela 4, foi produzido um gráfico das temperaturas encontradas no ensaio 2 em relação ao tempo, conforme está apresentado no gráfico da Figura 19.

Figura 19 – Gráfico 2 Temperatura (°C) x Tempo (min).



Fonte: Próprio Autor.

A partir da Figura 19, é possível perceber que as temperaturas aumentaram com o passar do tempo, e que em aproximadamente 50 minutos, as quatro regiões que estavam sendo analisadas, começaram a entrar em regime permanente, uma vez que a reta crescente que o gráfico apresentava até então, passou a se tornar uma reta constante.

Como a secagem ocorreu completamente no ensaio 1, no ensaio 2 houve somente a presença do calor sensível. Foi possível observar de forma muito satisfatória que o sistema entrou em regime permanente, atendendo aos objetivos do presente trabalho, sendo possível assim, calcular a condutividade térmica do material cerâmico utilizado.

6.3.3 Terceiro ensaio realizado com a utilização dos termopares

Na Tabela 5 estão representados os resultados encontrados no terceiro ensaio realizado. A primeira temperatura medida foi no tempo 0, ou seja, antes que o resistor fosse ligado a uma fonte de energia. Posteriormente, as temperaturas passaram a ser medidas de 10 em 10 minutos, como no segundo ensaio, porém até o tempo total de 140 minutos, ou seja, 2 horas e 20 minutos.

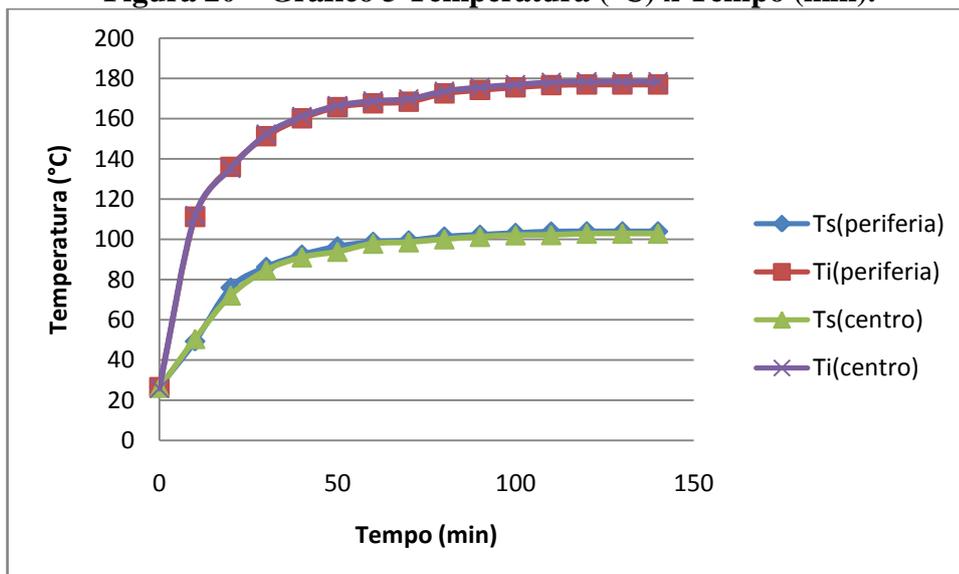
Tabela 5 – Medidas das temperaturas com a variação do tempo para o terceiro ensaio realizado com termopares.

Tempo (min)	Ts periferia (°C)	Ti periferia (°C)	Ts centro (°C)	Ti centro (°C)
0	26,6	26,4	26,1	25,8
10	49,2	111,1	50,4	111,8
20	75,9	135,9	72	135,1
30	86,2	151,2	84,6	152,2
40	92,3	160,1	91	161
50	96,4	165,7	93,8	166,4
60	98,7	167,6	97,8	168,7
70	99,4	168,4	98,5	169,7
80	101,3	172,5	100	173,6
90	102,2	174,2	101,2	175,5
100	103,1	175,5	102	176,8
110	103,8	176,6	102,1	178
120	103,9	176,9	102,8	178,3
130	103,9	176,9	102,8	178,3
140	103,9	176,9	102,8	178,3

Fonte: Próprio Autor.

As temperaturas foram medidas até não haver mais variação destas com o passar do tempo. A partir dos resultados encontrados na Tabela 5, produziu-se um gráfico das temperaturas encontradas no ensaio 3 em relação ao tempo, conforme está apresentado no gráfico da Figura 20.

Figura 20 – Gráfico 3 Temperatura (°C) x Tempo (min).



Fonte: Próprio Autor.

A partir da Figura 20, é possível perceber que as temperaturas aumentaram com o passar do tempo, e que em aproximadamente 50 minutos, as duas regiões que se encontravam no centro do corpo de prova começaram a entrar em regime permanente, e as outras duas regiões da periferia apresentaram esta característica em aproximadamente 75 minutos, uma vez que as retas crescentes que o gráfico apresentava até então, passaram a se tornar retas constantes.

Assim como no ensaio 2, o ensaio 3 também apresentou somente a presença do calor sensível. Foi possível observar de forma muito satisfatória que o sistema entrou em regime permanente, atendendo aos objetivos do presente trabalho, sendo possível assim, calcular a condutividade térmica do material cerâmico utilizado.

6.3.4 Quarto ensaio realizado com a utilização dos termopares

Na Tabela 6 estão representados os resultados encontrados no quarto ensaio realizado. A primeira temperatura medida foi no tempo 0, ou seja, antes que o resistor fosse ligado a uma fonte de energia. Posteriormente, as temperaturas passaram a ser medidas de 10 em 10 minutos, como no segundo e no terceiro ensaio, porém até o tempo total de 160 minutos, ou seja, 2 horas e 40 minutos.

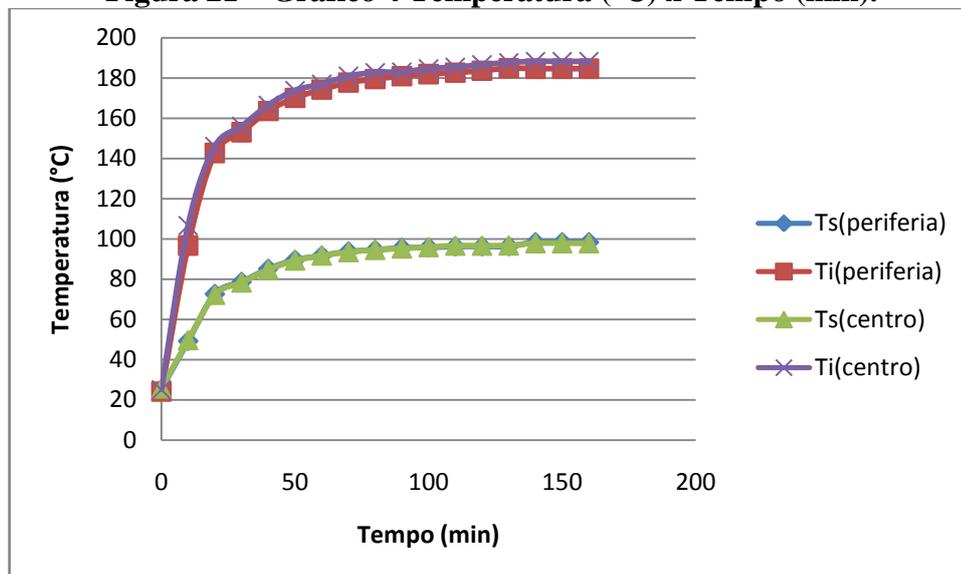
Tabela 6 – Medidas das temperaturas com a variação do tempo para o quarto ensaio realizado com termopares.

Tempo (min)	Ts periferia (°C)	Ti periferia (°C)	Ts centro (°C)	Ti centro (°C)
0	25,4	24,1	25,7	25,1
10	49,2	96,7	49,7	106,7
20	72,6	142,7	72,2	146
30	78,6	153	78,3	156
40	85,1	163,6	84,7	166,5
50	89,5	170,1	89,2	173,8
60	91,6	174,2	91,7	176,9
70	93,7	177,7	93,4	180,9
80	94,5	179,4	94,5	182,7
90	95,5	180,9	95,2	183
100	95,7	181,9	95,9	184,6
110	96,2	182,6	96,6	185,3
120	96,2	183,6	96,6	186,6
130	96,3	184,8	96,7	187,6
140	98,3	184,6	97,8	188,2
150	98,3	184,6	97,8	188,2
160	98,3	184,6	97,8	188,2

Fonte: Próprio Autor.

As temperaturas foram medidas até não haver mais variação destas com o passar do tempo. A partir dos resultados encontrados na Tabela 6, produziu-se um gráfico das temperaturas encontradas no ensaio 4 em relação ao tempo, conforme está apresentado no gráfico da Figura 21.

Figura 21 – Gráfico 4 Temperatura (°C) x Tempo (min).



Fonte: Próprio Autor.

A partir da Figura 21, é possível perceber que as temperaturas aumentaram com o passar do tempo, e que em aproximadamente 50 minutos, as quatro regiões que estavam sendo analisadas, começaram a entrar em regime permanente, uma vez que a reta crescente que o gráfico apresentava até então, passou a se tornar uma reta constante.

Assim como os ensaios 2 e 3, o ensaio 4 também apresentou somente a presença do calor sensível. Foi possível observar de forma muito satisfatória que o sistema entrou em regime permanente, atendendo aos objetivos do presente trabalho, sendo possível assim, calcular a condutividade térmica do material cerâmico utilizado.

6.4 Cálculo da condutividade térmica (k) para os quatro ensaios realizados

Foi realizado o cálculo da condutividade térmica (k) para cada ensaio realizado. O valor de k foi encontrado por meio da Equação 22.

No ensaio 1, o valor médio encontrado para o ΔT foi 74,80 K. O valor encontrado para k foi:

$$k = \frac{75,7W * \ln\left(\frac{0,02346m}{0,004765m}\right)}{2\pi * 0,4m * (74,80K)}$$

$$k = 0,642 W/mK$$

No ensaio 2, o valor médio encontrado para o ΔT foi 79,55 K. O valor encontrado para k foi:

$$k = \frac{75,7W * \ln\left(\frac{0,02346m}{0,004765m}\right)}{2\pi * 0,4m * (79,55K)}$$

$$k = 0,603 W/mK$$

No ensaio 3, o valor médio encontrado para o ΔT foi 74,25 K. O valor encontrado para k foi:

$$k = \frac{75,7W * \ln\left(\frac{0,02346m}{0,004765m}\right)}{2\pi * 0,4m * (74,25K)}$$

$$k = 0,647 W/mK$$

No ensaio 4, o valor médio encontrado para o ΔT foi 88,1 K. O valor encontrado para k foi:

$$k = \frac{75,7W * \ln\left(\frac{0,02346m}{0,004765m}\right)}{2\pi * 0,4m * (88,10K)}$$

$$k = 0,545 W/mK$$

O valor encontrado para a condutividade térmica média foi:

$$k_{méd} = \left(\frac{0,642 + 0,603 + 0,647 + 0,545}{4} \pm \text{Desvio Padrão} \right)$$

$$k_{méd} = 0,609 \pm 0,0471 W/mK$$

O valor encontrado para a condutividade térmica no presente trabalho de 0,609 W/mK foi considerado muito próximo daquele encontrado na literatura para a argamassa de revestimento (0,72 W/mK).

Alguns fatores devem ser considerados, como por exemplo, a estrutura porosa que o corpo de prova apresentou, pode ter interferido na transferência de calor. A presença de bolhas de ar na estrutura do corpo de prova reduz a condutividade térmica do material, podendo explicar o motivo do valor medido ser inferior ao esperado.

Vale ressaltar que cada um dos ensaios foi realizado em dias diferentes, permitindo que a variação climática interferisse nos valores de condutividade térmica encontrados, uma vez que, em dias mais frios, o corpo de prova perdia mais calor para o meio ambiente do que em dias mais quentes. Isto pode ter colaborado para que o valor do ΔT encontrado para cada ensaio fosse diferente.

6.5 Viabilidade técnica e econômica do sistema de medição desenvolvido

O sistema de medição de condutividade térmica em corpos de prova cerâmicos utilizado neste trabalho foi um sistema de baixo custo comparado com sistemas tradicionais comercializados, o que faz com que este seja completamente viável. Algumas melhorias deverão ser realizadas no mesmo, para que sejam obtidos resultados ainda melhores. Entretanto, considerando que estes foram os primeiros ensaios realizados com o sistema de medição até o momento, os resultados encontrados foram considerados positivos.

6.6 Retirada do resistor elétrico do interior do corpo de prova

Para recuperar o resistor elétrico, foi necessário retirá-lo do interior do corpo de prova. Para isso, realizou-se a quebra do corpo de prova cerâmico. Este processo foi realizado com a utilização de um martelo.

A argamassa de revestimento se apresentou como um material muito frágil e, por isso, com leves golpes sobre o corpo de prova com a utilização do martelo, o material se fraturou facilmente. Foi possível então, a recuperação do resistor elétrico sem nenhum tipo de danos.

Na Figura 22 pode ser observado o corpo de prova após ser fraturado juntamente com o resistor elétrico.

Figura 22 – Corpo de prova após fratura e resistor elétrico.



Fonte: Próprio Autor.

O corpo de prova fraturado foi descartado de maneira correta e, depois de realizada uma limpeza no resistor elétrico, percebeu-se que não houve nenhum tipo de dano com o mesmo, como está apresentado na Figura 23.

Figura 23 – Resistor elétrico após ser retirado do interior do corpo de prova.



Fonte: Próprio Autor.

O resistor elétrico foi recuperado de maneira eficiente e poderá ser reutilizado em testes posteriores.

7 CONCLUSÕES

Foi possível projetar e adquirir o resistor elétrico cilíndrico e também projetar e confeccionar uma forma para corpo de prova cerâmico tubular com 400 mm de comprimento e diâmetro médio externo de 46,91 mm.

Em todos os ensaios realizados, observou-se que as temperaturas medidas com a utilização dos termopares no corpo de prova, foram aumentando com o passar do tempo e, que, as temperaturas medidas no interior do mesmo apresentaram valores maiores do que aquelas que foram medidas na superfície do mesmo.

No ensaio 1, o corpo de prova demorou mais para começar a entrar em regime permanente e apresentou resultados menos satisfatórios. Isto aconteceu devido ao fenômeno de secagem que estava ocorrendo enquanto estavam sendo realizadas as medições das temperaturas. No momento em que o resistor elétrico foi ligado na fonte de energia, foi notou-se que o corpo de prova passou a mudar sua coloração, devido à ocorrência da secagem.

Os outros ensaios foram mais eficientes. Foi possível observar de forma muito satisfatória que o sistema entrou em regime permanente, atendendo aos objetivos do presente trabalho, sendo possível assim, calcular a condutividade térmica do material cerâmico utilizado.

O valor de k encontrado para ambos os ensaios foram valores muito próximos àquele encontrado na literatura. Alguns fatores podem ter interferido no resultado encontrado para a condutividade térmica da argamassa, como o fato de o corpo de prova apresentar uma estrutura bastante porosa, o que pode ter interferido na distribuição do calor no mesmo, fazendo com que o sistema perdesse um pouco sua eficiência.

Além disso, os ensaios foram realizados em dias diferentes, permitindo que a variação climática interferisse nos valores de condutividade térmica encontrados, uma vez que, em dias mais frios, o corpo de prova perdia mais calor para o meio ambiente do que em dias mais quentes.

Por fim, o novo sistema de medição de condutividade térmica em corpos de prova cerâmicos foi obtido com grande sucesso, apresentando baixo custo e resultados satisfatórios. Além disso, o resistor elétrico pôde ser recuperado de forma eficiente e assim, poderá ser reutilizado mais tarde.

8 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Como possíveis trabalhos futuros, pode-se apontar:

- Realização de testes com novos materiais cerâmicos, cada qual com diferente valor de condutividade térmica, sendo possível assim, verificar ainda mais a viabilidade do novo sistema de medição criado;
- Obtenção de um corpo de prova menos poroso que aquele criado no presente trabalho, obtendo resultados mais precisos, uma vez que a porosidade interfere na condutividade térmica do corpo de prova testado;
- Realização das medições das temperaturas com a utilização dos termopares em um ambiente em que não haja variação climática, obtendo assim, uma temperatura constante em todos os ensaios realizados;
- Criação de um método mais eficiente no posicionamento do resistor elétrico no interior do corpo de prova, garantindo que não haja variação na posição do mesmo.

REFERÊNCIAS

- BARSOUM, M. W. *Fundamentals of ceramics*. McGraw-Hill, Singapore, 2003.
- BORTOLI, Daniel de; KNIJNIK, Daniel Costi; VIEIRA, Júlio César da Silva Freitas. **Medição da condutividade térmica de um material sólido**. 2010. 21 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- CARSLAW, H. S.; JAEGER, N. C. *The conduction of heat in solids*. 2th ed. London: Oxford University, 1959. 510 p.
- GASPARINI, R.R. **Modelagem da transferência de calor combinada por condução e radiação em isolantes térmicos de edificações**. 2005. 104 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2005.
- GÜTHS, S. et al. **Desenvolvimento e avaliação de um dispositivo caixa quente protegida**. In: ENCAC, 1., 2005, Maceió. Santa Catarina: 2005. p. 854 - 863.
- INCROPERA, Frank 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. 643 p. Tradução de: *Fundamentals of heat and mass transfer*, 6th ed.
- JANNO, Y. **A centered hot plate method for measurement of thermal properties of thin insulating material**, 2009.
- KINGERY, W.D.; BOWEN, H. K.; UHLMANN, D. R. *Introduction to ceramics*. 2 ed. John Wiley Sons, New York, 1975.
- PARKER, W. J. *et al.*; *J. Appl. Phys.*, v. 32, p. 1679-1681, 1961.
- SANTIN, O. G; ITARD, L., VISSCHER, H. The Effect of Occupancy and Building Characteristics on Energy Use for Space and Water Heating in Dutch Residential Stock. *Energy and Buildings*, v. 41, n. 11, p. 1223-1232, 2009.
- SANTOS, Wilson Nunes dos. **Contribuição ao estudo da condutividade térmica do material cerâmico concreto refratário utilizando a técnica de fio quente com ajuste por regressão não linear**. 1988. 160 f. Tese (Doutorado) - Curso de Tecnologia Nuclear, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 1988.
- 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.
- 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.