

CONSTRUÇÃO DE MODELO PARA AVALIAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA EM ISOLANTES

Marilise Cristine Montegutti¹

Claudio Antunes Junior²

Tiago Luis Haus³

RESUMO

A condutividade térmica, a difusividade térmica e o calor específico são as três propriedades físicas mais importantes de um material. Estas propriedades são notadas quando o calor é adicionado ou retirado do material e são importantes em qualquer projeto que precise funcionar em um ambiente térmico. A determinação da condutividade térmica experimental apresenta algumas dificuldades e requer alta precisão na determinação dos fatores necessários para o seu cálculo. O objetivo deste estudo é realizar a construção de um equipamento para auxiliar no levantamento das variáveis para o cálculo da condutividade térmica dos isolantes térmicos, fazer comparações do valor da condutividade térmica especificada do isolante e o valor calculado, e, assim, ajudar na busca da melhor aplicação de cada isolante térmico. O equipamento foi construído com base no método modificado do fio quente e a aplicação do experimento foi realizada no trabalho Análise Comparativa da Eficiência de Isolantes Térmicos, elaborado pelo aluno Claudio Antunes Junior, do curso de Engenharia Mecânica, da FAE Centro Universitário.

Palavras-chave: Equipamento. Construção. Condutividade Térmica. Isolante Térmico.

¹ Aluna do 10º período do curso de Engenharia Mecânica da FAE Centro Universitário. Bolsista do Programa de Apoio à Iniciação Científica (PAIC 2015-2016). *E-mail*: marilisemontegutti@hotmail.com

² Aluno do 10º período do curso de Engenharia Mecânica da FAE Centro Universitário. Voluntário do Programa de Apoio à Iniciação Científica (PAIC 2015-2016). *E-mail*: cantunes.j@gmail.com

³ Mestre em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal do Paraná. Professor e coordenador do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da FAE Centro Universitário. *E-mail*: tiago.haus@fae.edu

INTRODUÇÃO

A condutividade térmica, a difusividade térmica e o calor específico, conhecidas como propriedades térmicas, são as três propriedades físicas mais importantes de um material do ponto de vista de cálculos térmicos. Essas propriedades são observadas quando o calor é adicionado ou removido do material, e tornam-se importantes em qualquer projeto que precise funcionar em um ambiente térmico.

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. A difusividade térmica pode ser medida mais facilmente e com maior precisão do que a condutividade térmica.

Por essa razão, muitos pesquisadores preferem medir a difusividade, e, a partir dela, calcular a condutividade térmica do material. Hoje são conhecidos vários métodos para a determinação da condutividade térmica e da difusividade térmica de um material.

Recentemente, os métodos transientes de troca de calor têm sido os métodos preferidos na determinação das propriedades térmicas de materiais. Neste trabalho, será realizada a construção de um equipamento capaz de auxiliar na determinação da condutividade térmica dos isolantes, possibilitando verificar a eficiência dos isolantes e assim evitar o mau dimensionamento dos isolantes, principalmente em ambientes industriais, evitando gastos desnecessários.

1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Como base para o trabalho, serão abordados alguns assuntos relacionados à área de transferência de calor, especialmente, a condutividade térmica dos materiais utilizados, como isolantes térmicos, assim como procedimentos para a construção de um modelo para medir a condutividade térmica.

1.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A ciência da termodinâmica trabalha com a quantidade de transferência de calor de um sistema que vai de um processo de equilíbrio a outro, independente das informações temporais em que a transferência ocorre. A transferência de calor é um segmento da ciência térmica que analisa a taxa de transferência de calor e a distribuição de temperatura de um sistema, assim como a natureza da transferência – por exemplo, a condução, a convecção e a radiação (KAPUNO; RATHORE, 2011).

1.1.1 Estado Estacionário e Transiente

Para analisar problemas são considerados dois tipos de transferência de calor: o estado estacionário e o estado transiente (KAPUNO; RATHORE, 2011).

No estado estacionário, a temperatura em qualquer lugar do sistema não varia com o tempo, e a transferência de calor é constante, porque não há variação na energia interna do sistema. Já no estado transiente, a temperatura varia em posição e em relação ao tempo, e a transferência de calor é variável devido à diferença na energia interna do sistema (KAPUNO; RATHORE, 2011).

1.1.2 Condução

A condução caracteriza-se como a transferência de energia por meio das partículas mais energizadas da substância para as partículas menos energizadas, o que resulta em uma interação entre as partículas, a qual pode ocorrer em sólidos, líquidos e gases (ÇENGEL, 2014).

Em líquidos e gases, a condução é a colisão ou difusão das moléculas durante seu movimento aleatório. Nos sólidos é a combinação das vibrações das moléculas no arranjo periódico da substância e no transporte de energia pelos elétrons livres (ÇENGEL, 2014).

O fluxo térmico para a condução pode ser calculado pela Equação 1.

$$q = k \times A \times \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

(Equação 1)

Sendo:

q = Taxa de transferência de calor [W]

A = Área de transferência do calor [m^2] - normal à direção do fluxo de calor

ΔT = Diferença de temperatura [K]

k = Condutividade térmica do material [$W/m \cdot K$]

1.1.3 Convecção

A transferência por convecção ocorre entre a superfície de um sólido, líquido ou gás com o fluido em movimento, e, quanto mais rápida a movimentação dos fluidos, a transferência de calor por convecção aumenta (ÇENGEL, 2014).

Esta pode ser caracterizada como forçada, quando os fluidos são forçados a fluir nas superfícies externas devido a um ventilador, uma bomba ou o vento. Definida, também, como convecção natural quando o movimento do fluido é causado pela densidade e pela variação de temperatura do fluido (ÇENGEL, 2014).

Para a convecção é possível calcular o seu fluxo térmico por meio da Equação 2.

$$q = h \times A \times \Delta T$$

(Equação 2)

Sendo:

q = Taxa de transferência de calor [W]

A = Área de transferência do calor [m^2] – normal à direção do fluxo de calor

ΔT = Diferença de temperatura [K]

h = Coeficiente convectivo [$W/m^2 \cdot K$]

1.1.4 Radiação

A radiação é um fenômeno volumétrico, no qual todos os sólidos, líquidos e gases emitem, absorvem ou transmitem, e a energia é emitida por ondas eletromagnéticas, resultando na mudança da configuração eletrônica dos átomos ou moléculas. Assim como a condução e a convecção, a transferência de energia por radiação não necessita da presença de um meio interveniente para que ela ocorra (ÇENGEL, 2014).

Nos estudos de transferência de calor estamos, interessados na radiação térmica, a qual é emitida pelo corpo por causa da temperatura. Além da térmica, a radiação pode se apresentar de diversas formas, como: eletromagnética, raio X, raios gama, micro-ondas, ondas de rádio e ondas de televisão, que não estão relacionadas com a temperatura (ÇENGEL, 2014).

A radiação emitida por todos os corpos reais pode ser determinada pela Equação 3.

$$q = \varepsilon \times \sigma \times A \times (T_s^4 - T_{sup}^4)$$

(Equação 3)

Sendo:

q = Taxa de transferência de calor [W]

ε = Emissividade

σ = Constante de Stefan-Boltzmann [$5,67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$]

A = Área de transferência do calor [m^2]

T_s = Temperatura do corpo [K]

T_{sup} = Temperatura da superfície [K]

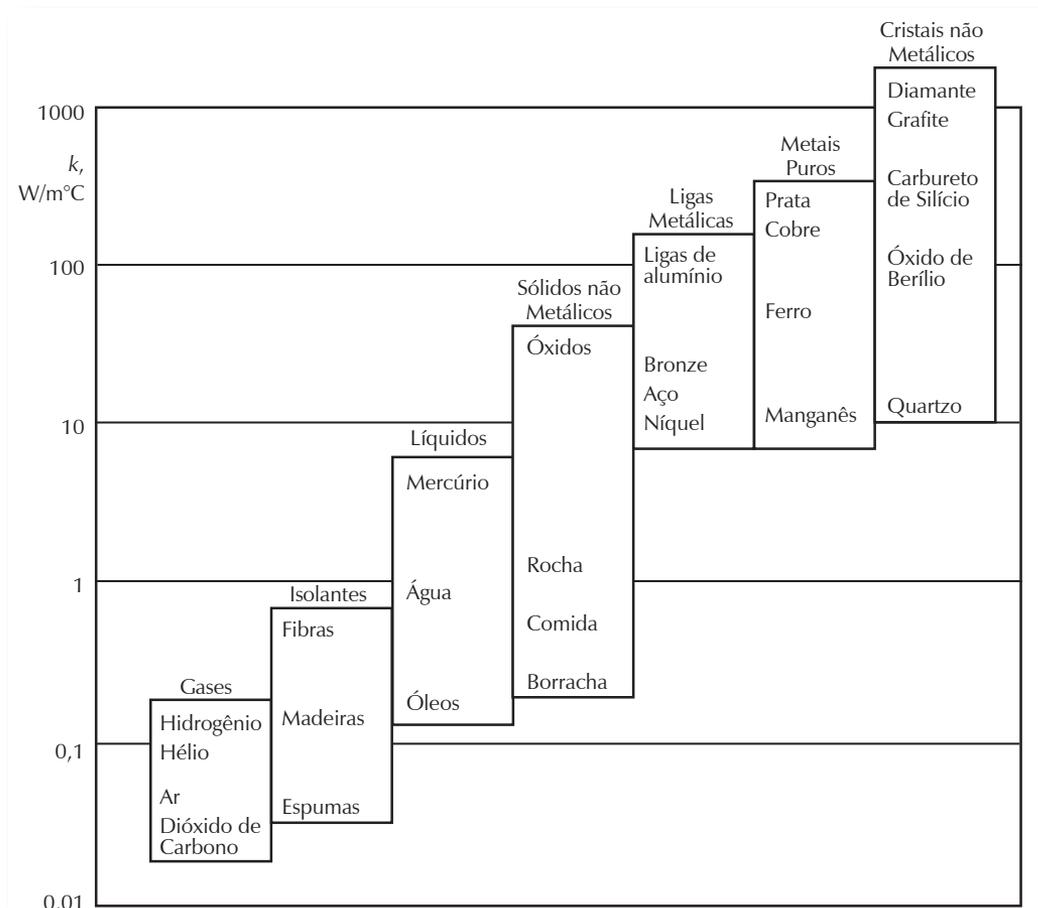
1.2 CONDUTIVIDADE TÉRMICA

A condutividade térmica é uma propriedade de transporte específica de cada material que indica a taxa em que a energia é transferida por meio do processo de difusão. Também pode ser interpretada como a taxa de transferência e calor através da espessura do material pela unidade de área e diferença de temperatura. A condutividade está sujeita à estrutura física da matéria, atômica e molecular, e as estruturas interligadas à disposição da matéria (INCROPERA, 2008; KAPUNO; RATHORE, 2011).

Um alto valor para a condutividade térmica indica que o material é um bom condutor de calor, enquanto um baixo valor mostra que o material é um mau condutor ou um isolante (ÇENGEL, 2014).

Os sólidos têm maior condutividade térmica se comparados aos líquidos, e estes se comparados aos gases. Isso ocorre pela diferença existente no espaçamento entre as moléculas nos estados físicos, a qual é especialmente alta, se comparado um sólido com um gás (INCROPERA, 2008), conforme a FIG. 1.

FIGURA 1 – Faixas de condutividade térmica para vários materiais a temperatura ambiente



FONTE: Çengel (2009, p. 21)

Os sólidos podem ser formados por elétrons livres e átomos ligados em um arranjo periódico. Com isso, o transporte de energia é separado em dois efeitos: movimentação de elétrons livres e ondas vibracionais no arranjo periódico. Se discutido como um fenômeno de partículas, para os metais puros, a transferência de calor tem o auxílio predominante dos elétrons, enquanto para não condutores ou semicondutores, os fônons são predominantes (INCROPERA, 2008).

A condutividade térmica aumenta quando a distância do livre percurso médio dos transportadores de energia aumenta (INCROPERA, 2008).

Para os líquidos e os gases, o distanciamento entre as moléculas é superior, e o deslocamento delas é mais incerto para esses estados em relação ao estado sólido, conseqüentemente, o transporte de energia térmica é pouco eficaz. Com isso, a condutividade é também inferior (INCROPERA, 2008).

1.3 DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA

Sempre que existir uma diferença de temperatura no corpo do material, ocorrerá a transferência de calor da região de alta temperatura para a de baixa temperatura do corpo por condução. A Lei de Fourier determina que a taxa de transferência por unidade de área é diretamente proporcional à diferença de temperatura, conforme a Equação 4 (KAPUNO; RATHORE, 2011).

$$k = - \frac{q}{A \times \Delta T}$$

(Equação 4)

Sendo:

q = Taxa de transferência de calor [W]

A = Área de transferência do calor [m²] – normal à direção do fluxo de calor

ΔT = Diferença de temperatura [K]

k = Condutividade térmica do material [W/m · K]

O sinal negativo é utilizado para que o fluxo de calor natural seja positivo. De acordo com a segunda lei da termodinâmica, o calor sempre tem o fluxo na direção da menor temperatura, por isso a diferença de temperatura é negativa (KAPUNO; RATHORE, 2011).

1.4 SISTEMAS RADIAIS

Nos sistemas cilíndricos e esféricos existem diferenças de temperaturas somente na direção radial, o que torna possível avaliá-los como sistemas unidimensionais (INCROPERA, 2008).

Para o cilindro, utilizando como base a lei de Fourier, é possível aplicar a Equação 5 para expressar a taxa de transferência de calor (INCROPERA, 2008).

$$q_r = \frac{(T_i - T_e)}{R_{total}}$$

(Equação 5)

Sendo:

q_r = Fluxo de calor radial [W]

T = Temperatura [K]

R_{total} = Somatório das resistências térmicas [K/W]

É possível transformar as fórmulas da condução e convecção em fórmulas para serem calculadas como um circuito em série de resistências térmicas, sendo elas as Equações 6 e 7.

Para a condução:

$$R_{T,COND} = \frac{1n(r_2/r_1)}{2 \times \pi \times L \times k}$$

(Equação 6)

Para a convecção:

$$R_{T,CONV} = \frac{1}{(2 \times \pi \times r_2 \times L) \times h}$$

(Equação 7)

Sendo:

$R_{T,COND}$ = Resistência térmica condução [K/W]

$R_{T,CONV}$ = Resistência térmica convecção [K/W]

L = Comprimento do tubo [m]

r = Raio do cilindro [m]

k = Condutividade térmica do material [W/m · K]

h = Coeficiente convectivo [W/m² · K]

1.5 APLICAÇÕES TÉRMICAS

As aplicações térmicas envolvem a transferência de calor por condução, convecção ou radiação. A transferência de calor é necessária no aquecimento de construções, em processos industriais, para cozinhar e para descongelar. Também é utilizada no resfriamento de construções, de alimentos e de materiais industriais, na remoção do calor gerado em reações químicas como a hidratação do cimento, remoção do calor gerado pela fricção ou abrasão no freio e em muitas outras aplicações (CHUNG, 2001).

O diamante é o material com a maior condutividade térmica. Em contraste, os polímeros têm uma baixa condutividade, pois não possuem elétrons livres e suas ligações secundárias são fracas. As cerâmicas tendem a ser mais condutivas se comparadas aos polímeros devido às suas ligações iônicas e covalentes, possibilitando, assim, a propagação dos fótons (CHUNG, 2001).

1.6 ISOLANTES TÉRMICOS

Isolantes térmicos são materiais ou combinações de materiais utilizados para minimizar o fluxo de calor dos sistemas, reduzindo a condução, a convecção e a radiação, pois eles geram uma forte resistência no caminho do fluxo de calor (KAPUNO; RATHORE, 2011).

Os materiais para isolantes térmicos precisam ter uma condutividade térmica baixa, serem inertes quimicamente, estáveis dimensionalmente e serem de fácil aplicação na superfície. A maioria é produzida misturando fibras, pós ou pedaços de materiais isolantes com o ar (KAPUNO; RATHORE, 2011).

Os materiais isolantes podem ser classificados em três classes:

Fibroso: Os materiais fibrosos consistem em partículas com diâmetros pequenos e com filamentos de baixa densidade. Esses materiais têm alta porosidade (ÇENGEL, 2014; KAPUNO; RATHORE, 2011).

Celular: Isolantes celulares são materiais de células fechadas ou abertas. São utilizados nas formas flexíveis estendidas ou de placas rígidas. Podem se formar em lugares em que se deseja alcançar uma forma geométrica. Os isolamentos celulares têm uma vantagem que é a baixa densidade, baixa temperatura e relativamente uma boa resistência à compressão (ÇENGEL, 2014).

Granular: Os isolamentos granulares consistem em pequenos flocos ou partículas de materiais inorgânicos, ligados em formas pré-formadas ou pós-utilizadas (ÇENGEL, 2014).

A propriedade mais importante a ser considerada na seleção de um material para isolante é a efetividade da condutividade térmica. Porém, a densidade, o limite de temperatura, a estrutura rígida, a degradação, a estabilidade química e o custo também são importantes fatores a serem considerados (ÇENGEL, 2014).

1.7 MÉTODOS NORMALIZADOS PARA A DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA

Existem vários métodos para a determinação experimental da condutividade térmica em diferentes materiais, estes já normalizados pela American Society for Testing and Materials (ASTM) ou pela Organização Internacional para Padronização (ISO). Abaixo, encontram-se dois exemplos de cada método.

ASTM C177 – *Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus.*

ASTM E2584 – *Standard Practice for Thermal Conductivity of Materials Using a Thermal Capacitance (Slug) Calorimeter.*

ISO 8894-1: 2010 – *Refractory materials – Determination of Thermal Conductivity – Part 1: Hot-wire Methods (cross-array and resistance thermometer).*

ISO 8894-2: 2007 – *Refractory materials – Determination of Thermal Conductivity – Part 2: Hot-wire Method (parallel).*

Contudo, para o experimento, não será utilizada nenhuma das normas citadas acima, devido ao alto custo para adquiri-las.

1.8 EXPERIMENTO PARA A DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA

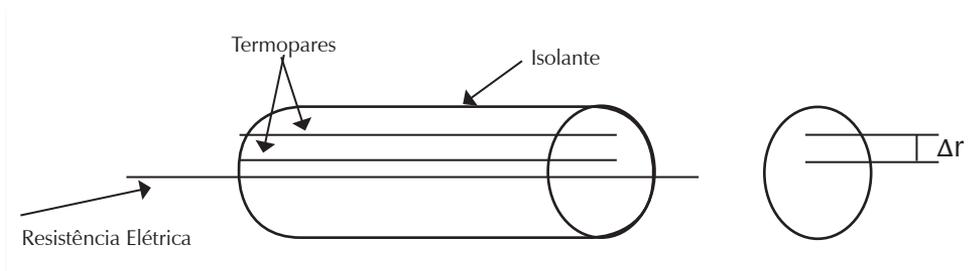
Para o desenvolvimento do experimento e para testarmos e verificarmos a condutividade térmica dos isolantes, será utilizado o método do fio quente, o qual será descrito a seguir.

1.8.1 Método Modificado do Fio Quente

De acordo com o princípio do método, quando um diferencial de potencial é aplicado pela amostra, por meio da resistência elétrica, será produzido calor e este será transmitido através da amostra (KULKARNI; VIPULANANDAN, 2003).

O experimento (FIG. 2) consiste em um circuito elétrico composto por uma fonte, um amperímetro, um voltímetro, uma resistência elétrica (Ni-Cr), termopares e a amostra (KULKARNI; VIPULANANDAN, 2003).

FIGURA 2 – Esquema do experimento para a determinação da condutividade térmica



FONTE: Kulkarni e Vipulanandan (2003, p. 2)

A amostra é moldada em formato cilíndrico com a resistência elétrica no seu interior, e os termopares são colocados nos lados para medir o gradiente de temperatura. Após isso, é aplicado o diferencial de potencial, gerando as mudanças de temperatura, corrente e voltagem (KULKARNI; VIPULANANDAN, 2003).

2 METODOLOGIA

O trabalho consiste em uma pesquisa exploratória por meio da construção e aplicação de um experimento para auxiliar no levantamento das variáveis para cálculo da condutividade térmica de alguns isolantes. A aplicação do experimento e cálculo da condutividade térmica será demonstrada em outro trabalho, sendo o nome deste Análise Comparativa da Eficiência de Isolantes Térmicos, elaborado pelo aluno Claudio Antunes Junior do curso de Engenharia Mecânica da FAE Centro Universitário.

2.1 CONSTRUÇÃO DO EQUIPAMENTO

Tomando como base o método modificado do fio quente, realizamos a construção de um equipamento para auxiliar no levantamento das variáveis para o cálculo da condutividade térmica dos isolantes.

A construção do equipamento se baseou no seguinte procedimento:

A escolha do material foi realizada com base nos dados de suas propriedades mecânicas, como a facilidade para usinar e soldar, e a condutividade térmica.

Inicialmente, iríamos utilizar para a construção do equipamento uma esfera de aço carbono com o diâmetro externo de 180 mm e interno de 150mm. Contudo, devido ao alto custo para a compra da esfera, foi decidido utilizar um cilindro de aço carbono.

O cilindro (FIG. 3) utilizado tem as seguintes dimensões: comprimento de 375 mm, espessura de 2,5 mm e diâmetro externo de 61 mm. Além do cilindro, foram utilizadas duas chapas retangulares de tamanho 153 mm por 113,5 mm. Após o corte, foi realizada a soldagem das chapas no cilindro, uma em cada extremidade. Estas não foram soldadas no centro, porque deixamos uma altura de 83 mm, com o objetivo de deixar o tubo elevado, utilizando-as como base. Em uma das extremidades do cilindro foi realizado um furo com diâmetro de 30 mm na chapa para que fosse possível inserir a resistência elétrica e o termopar no seu interior de forma que não ocorresse o contato direto entre os dois. Essa construção foi realizada no laboratório da FAE Centro Universitário com o auxílio do técnico responsável do laboratório.

Foi adquirida uma resistência elétrica tipo cartucho (FIG. 4) a qual foi adaptada para poder conectar diretamente na tomada, pois não se obteve sucesso ao ligá-la na fonte de energia Icel PS-1500 com o auxílio dos *plug* banana, devido à baixa tensão e corrente elétrica fornecida.

Por fim, o termopar tipo J (FIG. 6) foi adquirido com o terminal tipo forquilha, acarretando na necessidade de utilizar as garras tipo jacaré para conectá-lo ao multímetro (FIG. 5), que estava configurado para medir tensão contínua na escala de mili voltagem.

Tubo e uma chapa de aço carbono:

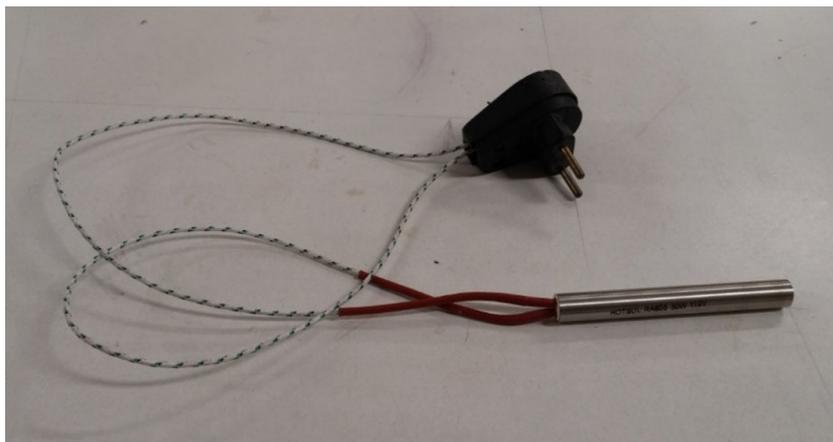
FIGURA 3 – Vista lateral do tubo



FONTE: Os autores (2016)

A resistência elétrica tipo cartucho foi utilizada e possui os seguintes dados: potência de 30W e tensão de 110V.

FIGURA 4 – Resistência elétrica cartucho



FONTE: Os autores (2016)

Foi utilizado o multímetro Icel MD-5770, que é capaz de medir tensão e corrente contínuas e alternadas, temperatura e resistência. Ele foi usado no experimento com o intuito de medir a tensão contínua no termopar, o qual foi emprestado do laboratório de física da FAE Centro Universitário.

FIGURA 5 – Multímetro Icel MD-5770

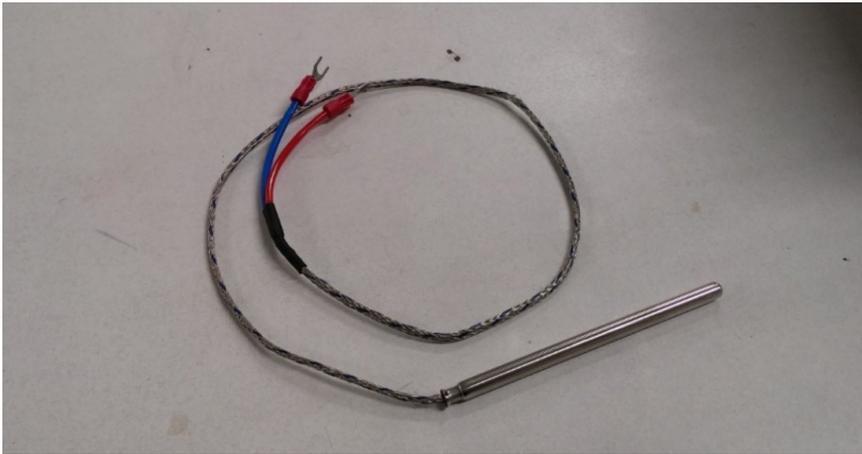


FONTE: Os autores (2016)

O termopar é um sensor de medição de temperatura que é constituído por dois condutores metálicos diferentes. Em uma de suas extremidades, os metais são soldados, a qual é denominada junta de medição e a outra, que está aberta, é chamada de junta de referência. As duas extremidades, quando expostas a temperaturas diferentes, fazem com que a composição química dos metais provoque uma força eletromotriz na ordem de mV, este princípio é intitulado de efeito Seebeck (GECOMP, 2016).

O termopar utilizado para o experimento é do tipo J com o terminal forquilha que suporta temperaturas de 0 a 800° C e tem sua utilização recomendada no vácuo e em atmosferas oxidantes, devendo evitar locais que possuam enxofre (GECOMP, 2016).

FIGURA 6 – Termopar J



FONTE: Os autores (2016)

O termômetro utilizado no experimento foi o Minipa MT-350 (FIG. 7) que tem como sistema de medição o infravermelho e é capaz de medir temperaturas entre 30 e 550° C, ele foi emprestado da empresa Minatti Fundição Técnica LTDA.

FIGURA 7 – Termômetro infravermelho Minipa MT-350



FONTE: Os autores (2016)

2.2 TESTE DO EQUIPAMENTO

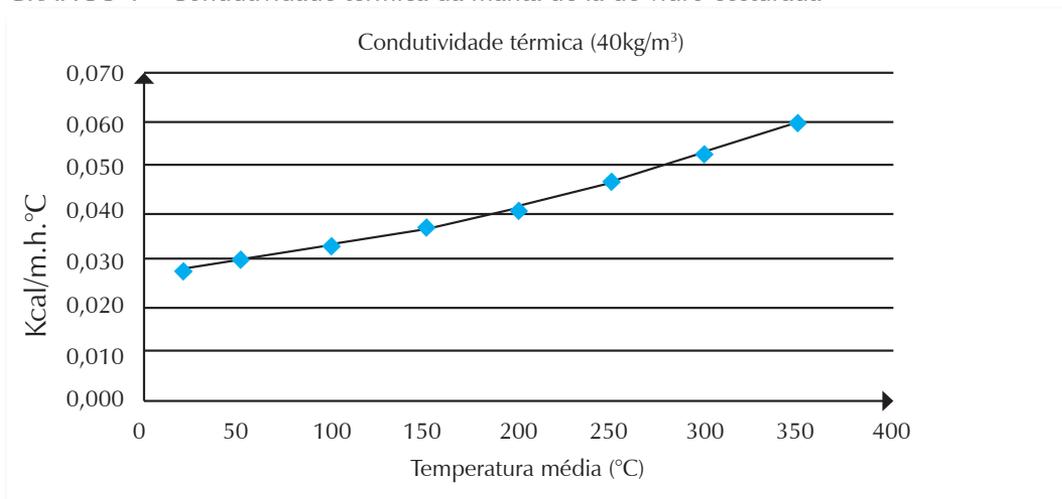
Para testar o equipamento e verificar possíveis erros em sua construção, foi realizado um teste com a manta de lã de vidro costurada, o qual está descrito a seguir.

2.2.1 Manta de Lã de Vidro Costurada

Composta somente pela manta de lã de vidro, costurada com fios de algodão e sem qualquer tipo de resina aglomerante. É utilizada em fornos, estufas, turbinas, válvulas e proteção contra fogo (VAMAPAL, 2016).

Possui densidade de 40 kg/m^3 , espessura de 1 polegada e pode ser aplicada em temperaturas de -200°C a 550°C . A condutividade térmica do material pode ser vista no GRÁF. 1 (VAMAPAL, 2016).

GRÁFICO 1 – Condutividade térmica da manta de lã de vidro costurada



FONTE: Vamapal (2016)

2.2.2 Aplicação de Funcionamento

Para a análise de dados de todas as amostras testadas foram seguidos os seguintes passos:

1. Transformar a tensão [mV] para temperatura [$^\circ \text{C}$] por meio da interpolação com o auxílio da TAB. 1 de correlação entre a força eletromotriz e temperatura do termopar].
2. Transformar o conjunto do equipamento com o isolante para um sistema de resistências térmicas.

3. Realizar os cálculos para encontrar a condutividade térmica de cada isolante pelo uso das fórmulas do tópico 1.4.
4. Comparar a condutividade encontrada com a condutividade fornecida pelos fabricantes.

Como exemplo dos passos descritos acima, foi realizado o primeiro teste utilizando a manta de fibra cerâmica:

1. Necessário verificar na tabela quais são os valores para a interpolação.

TABELA 1 – Dados para interpolação

FONTE / DADO	TENSÃO [mV]	TEMPERATURA [°C]
TABELA	6,470	122
EXPERIMENTO	6,5	T
TABELA	6,525	123

FONTE: Os autores (2016)

Com base na TAB. 1 foi realizada a interpolação para acharmos a temperatura correspondente à tensão de 6,5 mV.

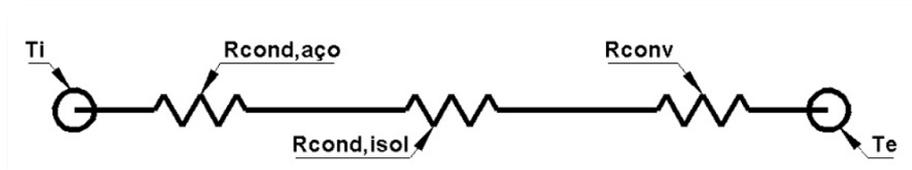
$$\frac{6,525 - 6,470}{6,525 - 6,5} = \frac{123 - 122}{123 - T}$$

$$\frac{0,055}{0,025} = \frac{1}{123 - T}$$

$$T = 122,5 \text{ °C}$$

2. Transformando em um sistema de resistência térmica (FIG. 8), o qual será o mesmo para todos os isolantes.

FIGURA 8 – Sistema de resistências térmicas



FONTE: Os autores (2016)

3. Para o cálculo da resistência térmica de condução do aço, são necessários os seguintes dados:
 - Raio interno do tubo – r_1 : 0,02925 m
 - Raio externo do tubo – r_2 : 0,0305 m
 - Condutividade térmica do aço – $k_{\text{AÇO}}$: 50,2 W/m.K
 - Comprimento do tubo – L: 0,375 m

$$R_{\text{COND, AÇO}} = \frac{1 \ln \frac{r_2}{r_1}}{2 \times \pi \times L \times k_{\text{AÇO}}}$$

$$R_{\text{COND, AÇO}} = \frac{1 \ln \frac{0,0305}{0,02925}}{(2 \times \pi \times 0,375 \times 50,2)}$$

$$R_{\text{COND, AÇO}} = 0,00035 \text{ K/W}$$

Para o cálculo da resistência térmica de convecção, são necessários os seguintes dados:

- Espessura isolante – e: 0,0254 m
- Raio externo do tubo somado a espessura do isolante – r_3 : 0,0559 m
- Coeficiente de transferência de calor – h: 20 W/m².K
- Comprimento do tubo – L: 0,375 m

$$R_{\text{CONV}} = \frac{1}{(2 \times \pi \times L \times r_3) \times h}$$

$$R_{\text{CONV}} = \frac{1}{(2 \times \pi \times 0,375 \times 0,0559) \times 20}$$

$$R_{\text{CONV}} = 0,37962 \text{ K/W}$$

Para o cálculo da resistência térmica de condução do isolante, são necessários os seguintes dados:

- Raio externo do tubo – r_2 : 0,0305 m
- Espessura isolante – e: 0,0254 m
- Raio externo do tubo somado a espessura do isolante – r_3 : 0,0559 m
- Comprimento do tubo – L: 0,375 m

Como não possuímos a condutividade térmica do isolante, não será realizado o mesmo cálculo que foi feito para a resistência térmica de condução do aço. Por causa disso, será necessário fazer uso da fórmula do fluxo da transferência de calor.

- Temperatura interna – $T_i = 122,55^\circ \text{C}$;
- Temperatura externa – $T_e = 31^\circ \text{C}$;
- Potência da resistência elétrica – $q = 30 \text{ W}$

$$q = \frac{(T_1 - T_e)}{R_{\text{total}}}$$

$$q = \frac{(T_1 - T_e)}{R_{\text{COND, AÇO}} + R_{\text{COND, ISOL}} + R_{\text{CONV}}}$$

$$30 = \frac{(122,55 - 31)}{1n \frac{0,0559}{0,0305} + 0,00035 + \frac{0,37962}{(2 \times \pi \times 0,375 \times k_{\text{ISOL}})}}$$

$$k_{\text{ISOL}} = 0,09624 \text{ W/mK}$$

Como todas as especificações dos isolantes estão com a condutividade térmica na unidade de kcal/m.h.°C, é necessário transformar a condutividade encontrada para a unidade das especificações para posteriormente compará-las.

$$1 \text{ W/mK} = 0,85958 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$$

$$k_{\text{ISOL}} = 0,09624 \times 0,85985$$

$$k_{\text{ISOL}} = 0,08275 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$$

Conforme o GRÁF. 1, a condutividade térmica encontrada está acima do que a especificada para a temperatura de 25,8° C, contudo o isolante se mostra capaz de ser utilizado para tal finalidade. A diferença na condutividade que foi encontrada evidencia a necessidade de ter um melhor controle das variáveis que influenciam no resultado, principalmente a temperatura interna.

3 ANÁLISE DE DADOS

Para a elaboração do equipamento, a intenção inicial era realizar a usinagem de uma esfera oca de alumínio com 180 mm de diâmetro e 15 mm de espessura no laboratório da FAE Centro Universitário, entretanto quando foi realizado o orçamento com os possíveis fornecedores do alumínio, foi constatado que o custo do material estava fora da alçada dos integrantes da equipe, já que seriam necessários outros itens para a construção. Além da tentativa da compra e posterior usinagem da esfera, foi realizado o orçamento para a compra da esfera oca já usinada, contudo ela também apresentou um alto valor para ser adquirida. Ainda assim, foi cogitada a ideia de usar uma esfera de plástico impressa em

3D, no entanto, como é necessário um material com alta condutividade térmica, a ideia foi descartada. Por fim, o aluno Claudio Antunes Junior conseguiu na empresa em que trabalha o cilindro e as duas chapas que foram empregadas para a construção do equipamento.

A resistência tipo cartucho e o termopar tipo J foram adquiridos através da compra direta com fornecedores de Curitiba.

Conforme descrito no teste realizado, é necessário criar formas de controle no equipamento das variáveis que mais influenciam nos resultados, sendo esta a temperatura interna.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para a construção do equipamento com o objetivo de realizar testes com isolantes térmicos é necessário levar em consideração algumas dicas: o material para o corpo e base do equipamento deve ter boa condutividade térmica e ser simétrico, para que esses fatores não interfiram no fluxo de calor. A resistência elétrica deve ter potência suficiente para esquentar o material e formato definido para o equipamento. O termopar deve ter sua faixa de temperatura de trabalho próxima à temperatura que a resistência é capaz de alcançar para ter medidas mais precisas.

Após a construção, será realizada a aplicação do equipamento, sendo esta efetuada com cinco tipos de isolantes térmicos, que são: Duralfoil AL1, Lã de Rocha Aluminizada, Painel de Lã de Rocha PSE-48, Manta de Fibra Cerâmica e Manta de Lã de Vidro Costurada.

REFERÊNCIAS

ÇENGEL, Y. A. **Heat and mass transfer: fundamentals & applications**. 5th. New York: McGraw-Hill Education, 2014.

_____. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**. 3. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2009.

CHUNG, D. D. L. **Applied materials science: applications of engineering materials in structural, electronics, thermal, and other industries**. New York: CRC Press, 2001.

GECOMP. Disponível em: <<http://www.gecomp.com.br/gefran.asp>>. Acesso em: 13 maio 2015.

INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

KAPUNO, R. R. A.; RATHORE, M. M. **Engineering heat transfer**. 2nd. ed. Massachusetts: Jones & Bartlett Learning, 2011.

KULKARNI, S. P.; VIPULANANDAN, C. **Thermal conductivity of insulators**. Disponível em: <http://www2.egr.uh.edu/~civeb1/CIGMAT/03_poster/10.pdf>. Acesso em: 26 out. 2015.

MANTA costurada. Disponível em: <<http://www.vamapal.com.br/manta-costurada>>. Acesso em: 15 maio 2016.

