

ANÁLISE COMPARATIVA DA EFICIÊNCIA DE ISOLANTES TÉRMICOS

Claudio Antunes Junior¹
Marilise Cristine Montegutti²
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 aplicar, de forma experimental, o equipamento construído no trabalho *Construção de modelo para avaliação da condutividade térmica em isolantes*, realizado pela aluna Marilise Cristine Montegutti, do curso de Engenharia Mecânica, da FAE Centro Universitário. O modelo criado auxiliará no levantamento das variáveis para o cálculo da condutividade térmica dos isolantes térmicos, para realizar uma comparação 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 teste do equipamento foi realizado com cinco tipos de isolantes, os quais têm aplicações residenciais e industriais. Os resultados encontrados para a condutividade mostraram-se superiores aos valores especificados, resultando que é necessário ter maior controle das variáveis que afetam diretamente no cálculo da condutividade térmica. Apesar dos valores serem maiores, os isolantes mostraram-se capazes de serem empregados como tais para a variação de temperatura na qual foram testados.

Palavras-chave: Análise. Comparação. Condutividade térmica. Isolante térmico.

¹ 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

² 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*: marilismontegutti@hotmail.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 uma análise experimental para a determinação da condutividade térmica dos isolantes, para que seja possível 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 [m²] - normal à direção do fluxo de calor

ΔT = Diferença de temperatura [K]

k = Condutividade térmica do material [W/m · 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 [m²] - normal à direção do fluxo de calor

ΔT = Diferença de temperatura [K]

h = Coeficiente convectivo [W/m² · 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.

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

(Equação 3)

Sendo:

q = Taxa de transferência de calor [W]

ϵ = Emissividade

σ = Constante de Stefan-Boltzmann [5,67x10⁻⁸ W/m² · K⁴]

A = Área de transferência do calor [m²]

T_s = Temperatura do corpo [K]

T_{sup} = Temperatura da superfície [K]

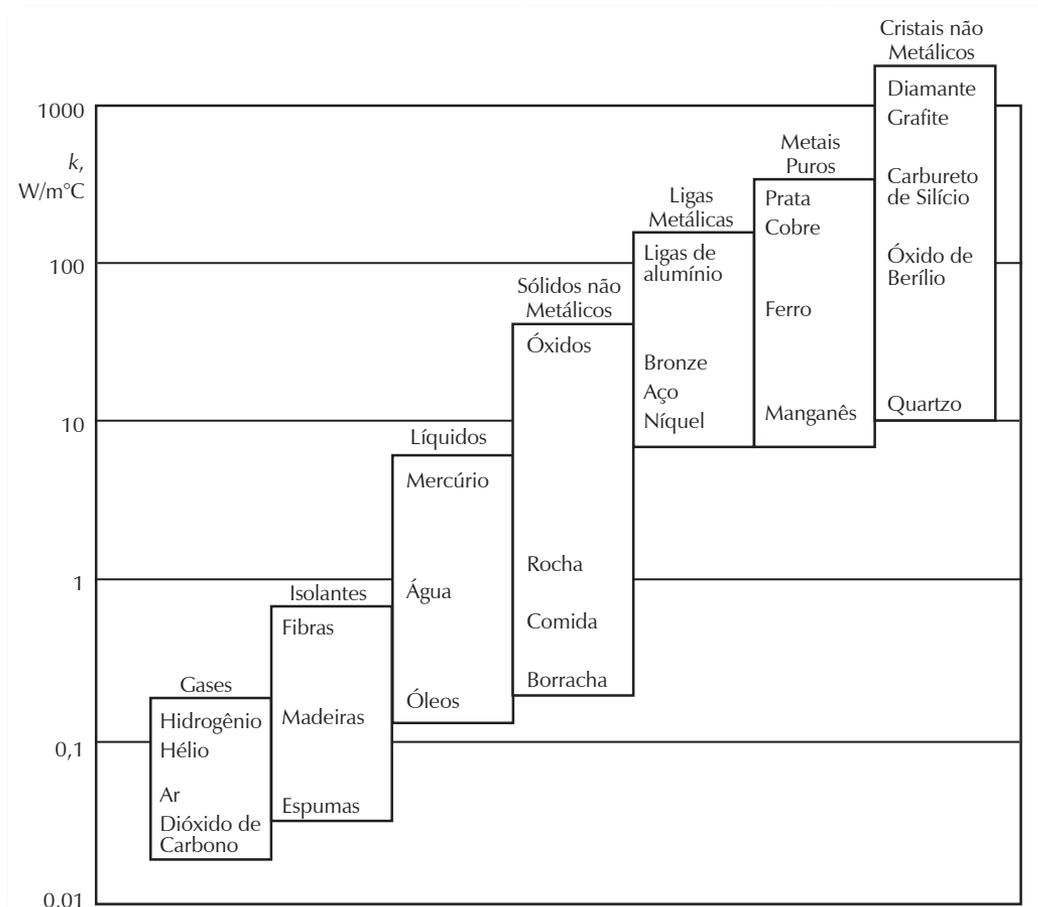
1.2 CONDUTIVIDADE TÉRMICA

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 [m^2] - normal à direção do fluxo de calor

ΔT = diferença de temperatura [K]

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

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).

$$q_r = \frac{(T_i - T_e)}{R_{total}} \quad \text{(Equação 5)}$$

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:

$$R_{T,COND} = \frac{1 \ln(r_2/r_1)}{2 \times \pi \times L \times k} \quad \text{(Equação 6)}$$

Para a convecção:

$$R_{T,CONV} = \frac{1}{(2 \times \pi \times r_2 \times L) \times h} \quad \text{(Equação 7)}$$

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 utilizado nenhuma das normas citadas acima, devido ao alto custo para adquiri-las.

1.8 EXPERIMENTO PARA A DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA

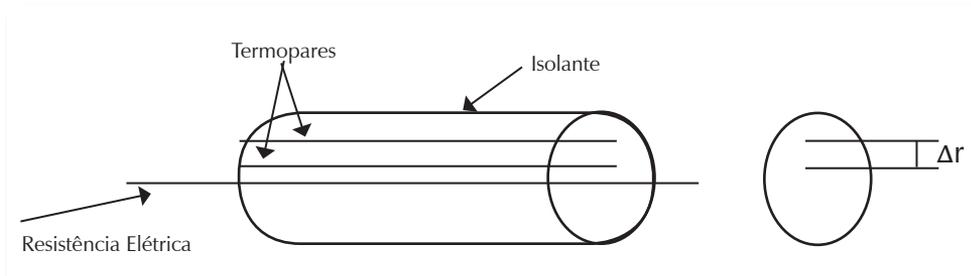
Para o desenvolvimento do experimento e para testarmos e verificarmos a condutividade térmica dos isolantes, será utilizado o método do fio quente, o qual será descrito a seguir.

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 e experimental por meio da aplicação de um equipamento, o qual foi construído pela aluna Marilise Cristine Montegutti do curso de Engenharia Mecânica da FAE Centro Universitário, no relatório Construção de Modelo para Avaliação da Condutividade Térmica em Isolantes. O equipamento será utilizado para determinar a condutividade térmica de alguns isolantes e, após os testes, os dados qualitativos serão analisados de forma estatística.

2.1 AMOSTRAS PARA O EXPERIMENTO

Foram utilizadas cinco amostras de diferentes isolantes para a realização dos testes para a determinação da condutividade térmica.

2.1.1 Duralfoil AL1

É uma cobertura secundária para residências composta por uma face de alumínio com 99% de pureza e com malha de reforço de resina termoplástica de alta densidade (DURALFOIL, 2016).

Não foi encontrada a condutividade térmica específica do material, já que este não se caracteriza especificadamente como um isolante térmico, mas sim como uma segunda camada para o telhado residencial para proteção contra goteiras.

2.1.2 Lã de Rocha Aluminizada

São feltros ou painéis de lã de rocha revestida em uma de suas faces por alumínio reforçado com fios de vidro ou poliéster, que impede a condensação superficial e a penetração de umidade no isolante. Suas principais aplicações são: dutos de ar condicionado, sob ou entre telhas e coberturas em geral, sobre forros e tubulações (ROCKFIBRAS).

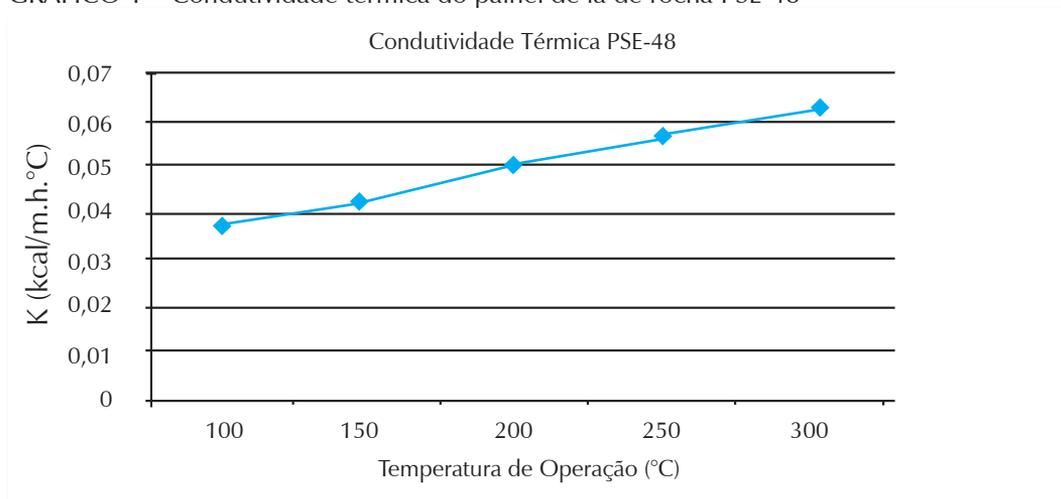
Com base no método ASTM C177, a condutividade térmica do material é de 0,032 kcal/m.h.°C a 25°C (ROCKFIBRAS, 2016).

2.1.3 Painel de Lã de Rocha PSE-48

Painel em lã de rocha que possui aglomerados de resinas especiais e com densidade nominal de 48 kg/m³. São indicados para os tratamentos térmicos e acústicos na indústria, como em tanques, aquecedores e estufas. Também são utilizados na construção civil sobre forros e coberturas e como miolo para divisórias e alvenarias (ROCKFIBRAS).

Possui melhor desempenho em temperaturas de até 300°C e sua condutividade térmica, por meio do método da ASTM C177, pode ser verificado no GRÁF. 1 (ROCKFIBRAS):

GRÁFICO 1 – Condutividade térmica do painel de lã de rocha PSE-48



FONTE: Rockfibras (2016)

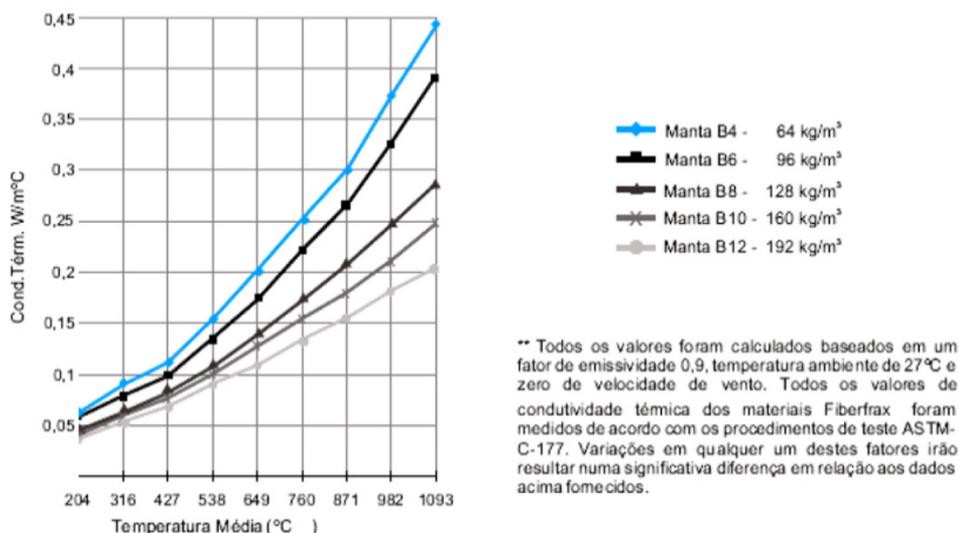
2.1.4 Manta de Fibra Cerâmica

Constituída por fibras longas que são expostas em várias direções e entrelaçadas por um processo contínuo de agulhamento. Por causa do processo não é necessária a adição de nenhum tipo de ligante. Tem como aplicação o revestimento de fornos e caldeiras, o isolamento de tubulações, reatores e turbinas a vapor, assim como o isolamento de portas corta-fogo (UNIFRAX, 2001).

Possui densidade de 96 kg/m^3 e pode trabalhar a temperaturas de até 1260°C . Por meio do teste ASTM C177 é possível verificar a condutividade térmica no GRÁF. 2 (UNIFRAX, 2001).

GRÁFICO 2 – Condutividade térmica da manta de fibra cerâmica

Condutividade Térmica vs. Temperatura Média (ASTM - C - 177)**



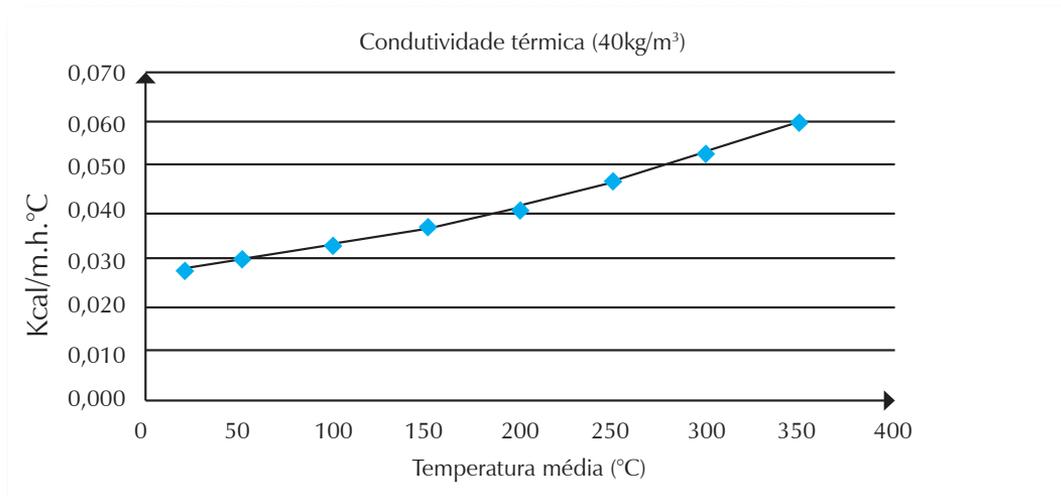
FONTE: Unifrax (2001)

2.1.5 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).

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. 3 (VAMAPAL, 2016).

GRÁFICO 3 – Condutividade térmica da manta de lã de vidro costurada



FONTE: Vamapal (2016)

2.2 APLICAÇÃO DO EXPERIMENTO

O cilindro que foi utilizado para o teste é de aço carbono, com as seguintes medidas: comprimento de 375 mm, espessura de 2,5 mm e diâmetro externo de 61 mm. Na extremidade do cilindro, onde tem um furo de diâmetro de 30 mm, foi inserida a resistência elétrica tipo cartucho com uma tomada adaptada na ponta, a qual conectamos diretamente na tomada de 110V. Colocamos o termopar tipo J com o terminal de forquilha conectado a duas garras tipo jacaré, as quais estavam ligadas ao multímetro, que foi configurado para medir tensão contínua na marcação de até 200mV.

Depois da resistência e do termopar estarem no interior do cilindro, é necessário ter cuidado para não deixar a resistência encostada no termopar. Logo, esperamos por trinta minutos para a resistência aquecer e o multímetro estabilizar a sua marcação de tensão.

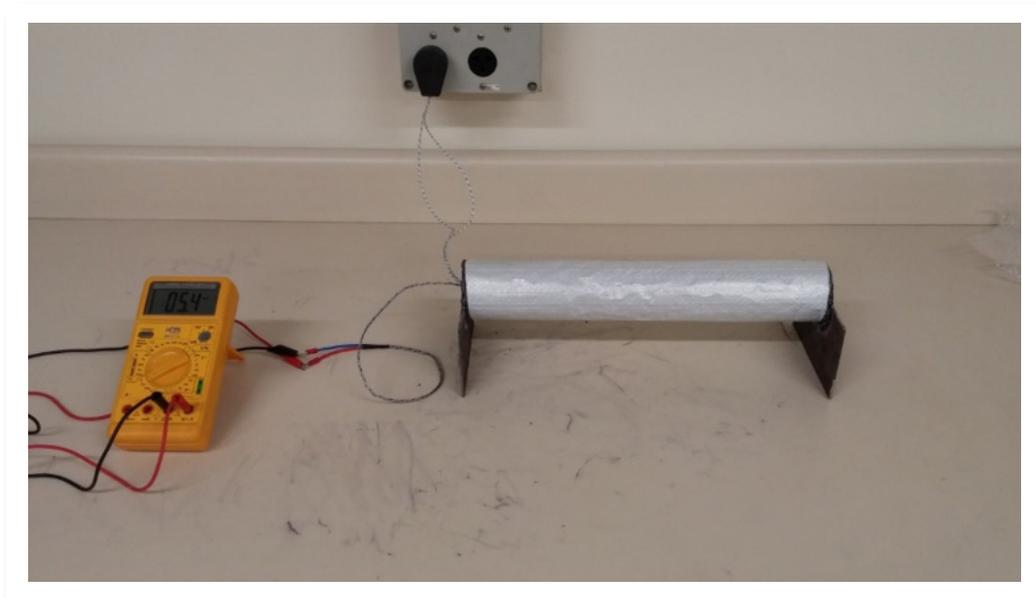
Foram analisados cinco tipos de isolantes térmicos, são eles: Duralfoil AL1: 360 x 260 mm; Lã de rocha aluminizada: 370 x 260 mm; Painel de lã de rocha: 370 x 370 mm; Manta de fibra cerâmica: 370 x 320 mm e Manta de lã de vidro: 380 x 320 mm. Cada amostra de isolante foi envolvida no cilindro, conforme demonstrado nas FIG. 3, FIG. 4, FIG. 5, FIG. 6 e FIG. 7. Depois de envolvidas, foi cronometrado o tempo de dez minutos para cada amostra, e foi realizada a medição da temperatura externa, com o auxílio do termômetro infravermelho nas duas extremidades e no meio das amostras, e anotados os valores. Em um segundo momento, repetimos o ensaio para cada amostra, porém, quando estava marcando cinco minutos no cronômetro, foi realizada uma medição da temperatura externa, com o auxílio do termômetro infravermelho da mesma

forma descrita anteriormente, medindo a temperatura das duas extremidades e do meio da amostra. As mesmas amostras tiveram suas temperaturas mensuradas novamente quando estava marcando dez minutos.

Em seguida, as amostras foram retiradas do cilindro e realizadas as medições da temperatura com termômetro infravermelho na face do isolante que estava em contato com o cilindro e também da face do cilindro. As temperaturas das amostras realizadas com cinco minutos e dez minutos foram registradas para posterior transformação e realização dos devidos cálculos.

Os resultados obtidos para cada uma das amostras, assim como sua montagem no experimento estão nas FIG. 3 a FIG. 7 e nas TAB. 1 a TAB. 5.

FIGURA 3 – Teste com o duralfoil AL1



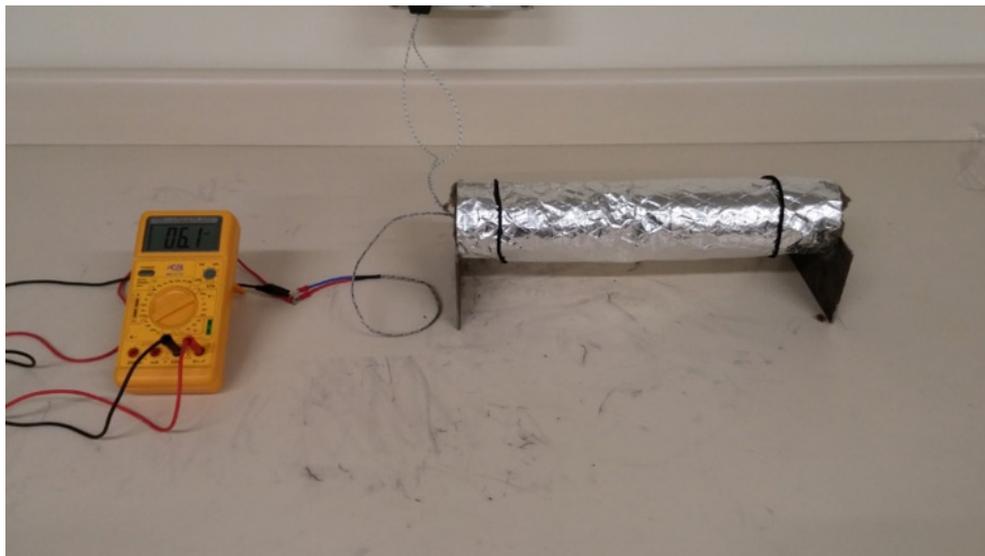
FONTE: Os autores (2016)

TABELA 1 – Resultados do duralfoil AL1

ISOLANTES	TENSÃO	TEMP. EXT.	TEMP. EXT.	TEMP. EXT.	TEMP. EXT. MÉDIA
DURALFOIL AL1	5,5 mV	32 °C	39 °C	29,5 °C	33,5 °C
	5,7 mV	31 °C	38 °C	30 °C	33 °C
	5,7 mV	30 °C	40,5 °C	32,5 °C	34,3 °C

FONTE: Os autores (2016)

FIGURA 4 – Teste com a lã de rocha aluminizada



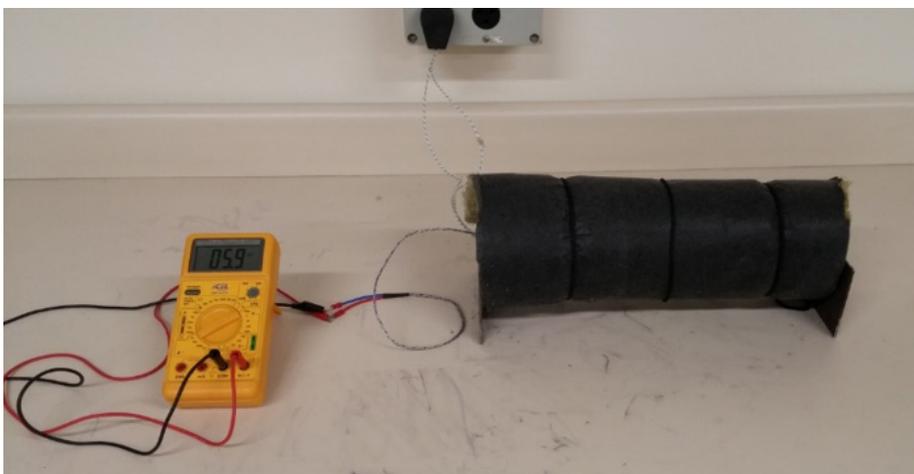
FONTE: Os autores (2016)

TABELA 2 – Resultados da lã de rocha aluminizada

ISOLANTES	TENSÃO	TEMP. EXT.	TEMP. EXT.	TEMP. EXT.	TEMP. EXT. MÉDIA
LÃ DE ROCHA ALUMINIZADA	6,1 mV	21,5 °C	24 °C	22 °C	22,5 °C
	5,6 mV	22 °C	24,5 °C	24,5 °C	23,7 °C
	5,7 mV	24 °C	23 °C	23 °C	23,3 °C

FONTE: Os autores (2016)

Figura 5 - Teste com o painel de lã de rocha



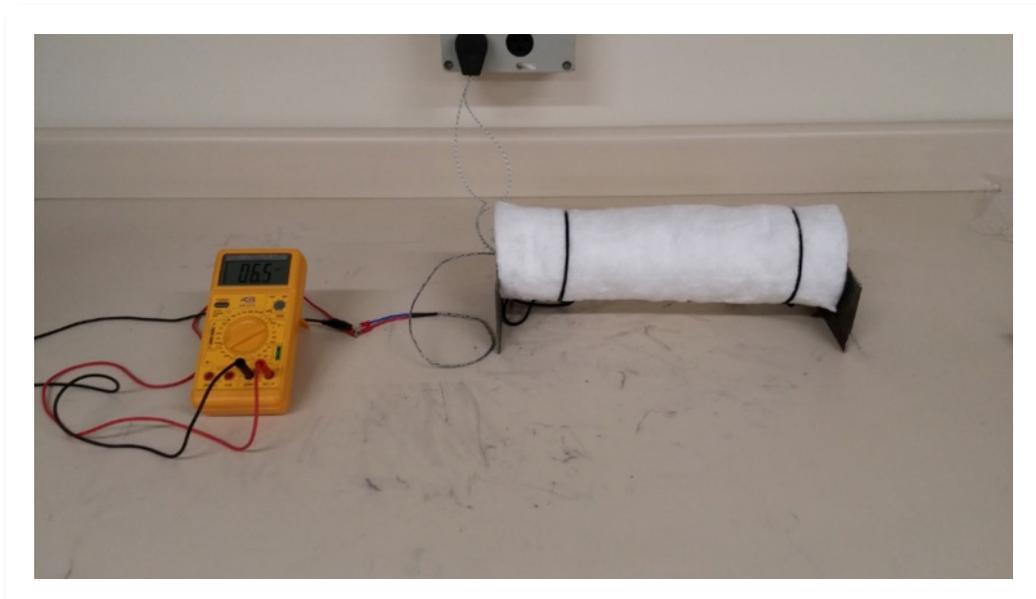
FONTE: Os autores (2016)

Tabela 3 - Resultados do painel de lã de rocha

ISOLANTES	TENSÃO	TEMP. EXT.	TEMP. EXT.	TEMP. EXT.	TEMP. EXT. MÉDIA
PAINEL DE LÃ DE ROCHA	5,9 mV	24 °C	24,5 °C	24 °C	24,2 °C
	6,4 mV	23 °C	23 °C	23 °C	23,0 °C
	6,5 mV	23 °C	24 °C	25 °C	24,0 °C

FONTE: Os autores (2016)

Figura 6 - Teste com a manta de fibra cerâmica



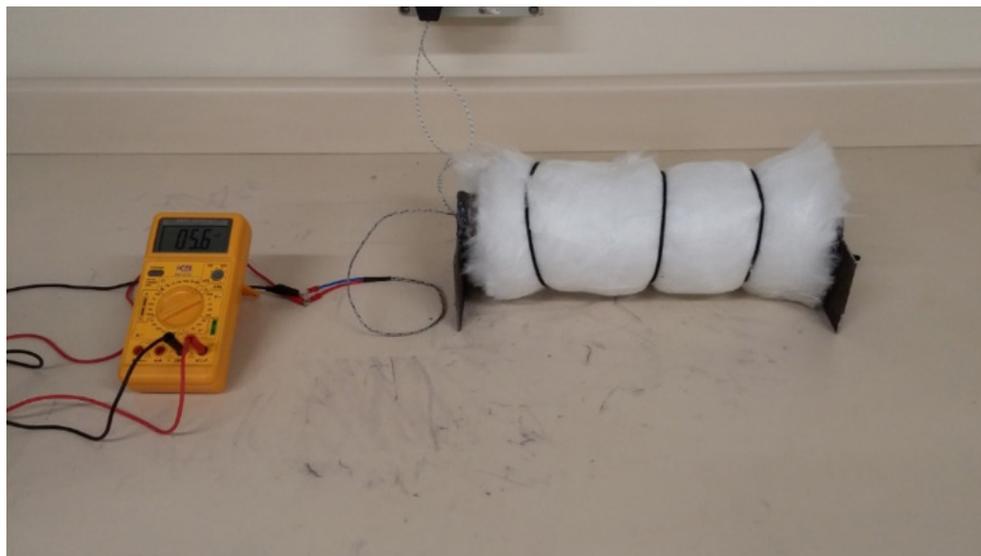
FONTE: Os autores (2016)

TABELA 4 – Resultados da manta de fibra cerâmica

ISOLANTES	TENSÃO	TEMP. EXT.	TEMP. EXT.	TEMP. EXT.	TEMP. EXT. MÉDIA
MANTA DE FIBRA CERÂMICA	6,5 mV	29 °C	34 °C	30 °C	31,0 °C
	6,4 mV	27 °C	30,5 °C	27 °C	28,2 °C
	6,5 mV	28,5 °C	32 °C	28,5 °C	29,7 °C

FONTE: Os autores (2016)

FIGURA 7 – Teste com a manta de lã de vidro



FONTE: Os autores (2016)

Tabela 5 – Resultado da manta de lã de vidro

ISOLANTES	TENSÃO	TEMP. EXT.	TEMP. EXT.	TEMP. EXT.	TEMP. EXT. MÉDIA
MANTA DE LÃ DE VIDRO	5,6 mV	27 °C	33 °C	29 °C	29,7 °C
	6,5 mV	23 °C	26,5 °C	28 °C	25,8 °C
	6,6 Mv	25 °C	28 °C	29 °C	27,3 °C

FONTE: Os autores (2016)

3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Após a coleta de dados dos testes com os cinco isolantes térmicos, foram realizados os cálculos para a determinação da condutividade térmica de cada um, sendo possível comparar os resultados obtidos com a especificação do fabricante. Para exemplificar os cálculos, foi realizado um passo a passo.

3.1 EXEMPLO DE ANÁLISE

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

1. Transformar a tensão [mV] para temperatura [°C] através da interpolação com o auxílio da TAB. 6 de correlação entre a força eletromotriz e temperatura do termopar J.
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 utilizado o primeiro teste realizado na manta de fibra cerâmica:

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

Tabela 6 – 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. 6 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 elétrica (FIG. 6), o qual será o mesmo para todos os isolantes.

FIGURA 6 – 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 – $T_1 = 122,55 \text{ }^\circ\text{C}$;
- Temperatura externa – $T_e = 31 \text{ }^\circ\text{C}$;
- Potência da resistência elétrica – $q = 30 \text{ W}$

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

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

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

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

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. 3, 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.

3.2 RESULTADOS E COMPARAÇÕES DOS ISOLANTES TESTADOS

Os resultados para todos os cálculos realizados de acordo com os passos descritos anteriormente estão contidos nas TAB. 7 a TAB. 12.

TABELA 7 – Temperatura interna

ISOLANTES	TENSÃO	TEMPERATURA INTERNA	TEMPERATURA EXTERNA
DURALFOIL AL1	5,5 mV	104,24 °C	33,50 °C
	5,7 mV	107,91 °C	33,00 °C
	5,7 mV	107,91 °C	34,30 °C
LÃ DE ROCHA ALUMINIZADA	6,1 mV	115,24 °C	22,50 °C
	5,6 mV	106,09 °C	23,70 °C
	5,7 mV	107,91 °C	23,30 °C
PAINEL DE LÃ DE ROCHA	5,9 mV	107,91 °C	24,20 °C
	6,4 mV	120,73 °C	23,00 °C
	6,5 mV	122,55 °C	24,00 °C
MANTA DE FIBRA CERÂMICA	6,5 mV	122,55 °C	31,00 °C
	6,4 mV	120,73 °C	28,20 °C
	6,5 mV	122,55 °C	29,70 °C
MANTA DE LÃ DE VIDRO	5,6 mV	106,09 °C	29,70 °C
	6,5 mV	122,55 °C	25,80 °C
	6,6 mV	124,38 °C	27,30 °C

FONTE: Os autores (2016)

Os dados que foram utilizados para os cálculos para todos os isolantes foram:

- $q = 30 \text{ W}$; $h = 20 \text{ W/m}^2\text{K}$; $r_1 = 0,02925 \text{ m}$; $r_2 = 0,0305 \text{ m}$; $k_{\text{AÇO}} = 50,2 \text{ W/mK}$; $L = 0,375 \text{ m}$.

TABELA 8 – Resultados dos cálculos do duralfoil al1

DURALFOIL AL1			
DADOS	TESTE 1	TESTE 2	TESTE 3
ESPESSURA [m]	0,0005	0,0005	0,0005
r_3 [m]	0,0310	0,0310	0,0310
T_{INT} [°C]	104,24	107,91	107,91
T_{EXT} [°C]	33,50	33,00	34,30
$R_{\text{COND,AÇO}}$ [K/W]	0,00035	0,00035	0,00035
R_{CONV} [K/W]	0,68454	0,68454	0,68454
k [W/mK]	0,00413	0,00381	0,00390
k [kcal/mh°C]	0,00355	0,00327	0,00335

FONTE: Os autores (2016)

O isolante Duralfoil AL1 mostrou-se capaz de ser empregado para o isolamento térmico, apesar da sua pequena espessura e de não ser sua função primária. Contudo, não foi possível comparar a condutividade térmica calculada com a especificada, pois ela não foi encontrada.

Este se mostra eficiente para ser utilizado em residências tanto para evitar goteiras, que é sua principal função, mas também para evitar o aquecimento demasiado das residências em dias quentes, principalmente pela elevação das temperaturas nos dias de hoje. Além de cumprir bem suas funções, ele tem baixo custo e é de fácil instalação.

TABELA 9 – Resultados dos cálculos da lâ de rocha aluminizada

LÃ DE ROCHA ALUMINIZADA			
DADOS	TESTE 1	TESTE 2	TESTE 3
ESPESSURA [m]	0,0254	0,0254	0,0254
r_3 [m]	0,0559	0,0559	0,0559
T_{INT} [°C]	115,24	106,09	107,91
T_{EXT} [°C]	22,50	23,70	23,30
$R_{COND,AÇO}$ [K/W]	0,00035	0,00035	0,00035
R_{CONV} [K/W]	0,37962	0,37962	0,37962
k [W/mK]	0,09433	0,10866	0,10536
k [kcal/mh°C]	0,08154	0,09343	0,09059

FONTE: Os autores (2016)

Tabela 10 – Resultados dos cálculos do painel de lâ de rocha

PAINEL DE LÃ DE ROCHA			
DADOS	TESTE 1	TESTE 2	TESTE 3
ESPESSURA [m]	0,0500	0,0500	0,0500
r_3 [m]	0,0805	0,0805	0,0805
T_{INT} [°C]	107,91	120,73	122,55
T_{EXT} [°C]	24,20	23,00	24,00
$R_{COND,AÇO}$ [K/W]	0,00035	0,00035	0,00035
R_{CONV} [K/W]	0,26361	0,26361	0,26361
k [W/mK]	0,16304	0,13732	0,13635
k [kcal/mh°C]	0,14019	0,11807	0,11724

FONTE: Os autores (2016)

TABELA 11 – Resultados dos cálculos da manta de fibra cerâmica

MANTA DE FIBRA CERÂMICA			
DADOS	TESTE 1	TESTE 2	TESTE 3
ESPESSURA [m]	0,0254	0,0254	0,0254
r_3 [m]	0,0559	0,0559	0,0559
T_{INT} [°C]	122,55	120,73	122,55
T_{EXT} [°C]	31,00	28,20	29,70
$R_{COND,AÇO}$ [K/W]	0,00035	0,00035	0,00035
R_{CONV} [K/W]	0,37962	0,37962	0,37962
k [W/mK]	0,09624	0,09508	0,09470
k [kcal/mh°C]	0,08275	0,08175	0,08143

FONTE: Os autores (2016)

TABELA 12 – Resultados dos cálculos da manta de lã de vidro costurada

MANTA DE LÃ DE VIDRO COSTURADA			
DADOS	TESTE 1	TESTE 2	TESTE 3
ESPESSURA [m]	0,0254	0,0254	0,0254
r_3 [m]	0,0559	0,0559	0,0559
T_{INT} [°C]	106,09	122,55	124,23
T_{EXT} [°C]	29,70	25,80	27,30
$R_{COND,AÇO}$ [K/W]	0,00035	0,00035	0,00035
R_{CONV} [K/W]	0,37962	0,37962	0,37962
k [W/mK]	0,11723	0,09038	0,09019
k [kcal/mh°C]	0,10080	0,07771	0,07755

FONTE: Os autores (2016)

Para os quatro isolantes restantes, a lã de rocha aluminizada, o painel de lã de rocha, a manta de fibra cerâmica e a manta de lã de vidro costurada os valores calculados para a condutividade térmica em cada um dos testes mostraram-se duas a três vezes maior em relação aos valores especificados pelos fabricantes para as temperaturas testadas. Apesar da divergência de valores, os isolantes se apresentam eficazes para o propósito, que são construídos principalmente na faixa de temperatura em que foram testados, a qual variou de 104 °C a 125 °C. As aplicações destes quatro isolantes são similares tanto no âmbito residencial quanto no industrial. O que varia entre eles é a faixa de temperatura de trabalho em que cada um é capaz de ser empregado e o seu custo, o que pode influenciar na decisão.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O intuito deste projeto era aplicar um equipamento que auxiliasse na obtenção dos dados necessários para determinar a condutividade térmica dos isolantes testados, para então comparar os valores obtidos com os já especificados pelos fabricantes, assim como auxiliar a verificar de se o isolante que será utilizado em determinada aplicação não pode ser substituído por outro com condutividade térmica próxima e que possa ter um custo inferior ao do já especificado. Além de promover a possível troca de isolante em aplicações já existentes, o equipamento pode auxiliar na escolha para novas aplicações, já que para o teste não é necessário alto investimento, pois a amostra a ser utilizada é pequena. Igualmente, auxilia na descoberta, claro que em escala reduzida, da temperatura externa que cada isolante irá ter no processo em que ele poderá ser utilizado e também a sua condutividade térmica.

O equipamento mostrou ser capaz de ser utilizado perfeitamente para o que foi destinado, no entanto é necessária melhoria para o posicionamento do termopar e da resistência para que eles não fiquem encostados.

Como já visto, as condutividades térmicas calculadas apresentaram-se superiores às já especificadas, porém elas não interferem significativamente na aplicação para a temperatura testada, uma vez que os valores encontrados são muito pequenos. Entretanto, se faz necessário um melhor controle das variáveis que influenciam diretamente na determinação da condutividade, como a temperatura interna gerada pela resistência, a fixação do isolante ao redor do tubo, assim como o próprio formato utilizado para moldar o isolante, para que assim exista maior confiabilidade no processo utilizado.

REFERÊNCIAS

ÇENGEL, Y. A. **Heat and mass transfer: fundamentals & applications**. 5th. ed. 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, 2001.

DURALFOIL AL1. Disponível em: <http://www.duralfoil.com.br/produto_res_durAl1.aspx>. Acesso em: 15 maio 2016.

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. de 2015.

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

MANTA Durablanket. Disponível em: <<http://www.unifrax.com.br/pdf/Manta%20Durablanket.pdf>>. Acesso em: 15 maio 2016.

ROCKFIBRAS. Paineis Pse-48. Disponível em: <http://www.rockfibras.com.br/produtos_LR_paineis_PSE48.html>. Acesso em: 15 maio 2016.

_____. Thermax-Flex. Disponível em: <http://www.rockfibras.com.br/produtos_LR_thermaxflex.html>. Acesso em: 15 maio 2016.

