

ANÁLISE EXPERIMENTAL DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO AR.

Carlos Rian Trajano da Silva¹, Victor Wagner Freire de Azevedo²

¹ Bacharelado em Ciência e Tecnologia – UFERSA, Mossoró-RN, E-mail: carlos.silva60197@alunos.ufersa.edu.br

²Professor Orientador, DET/CE – UFERSA, Mossoró-RN, E-mail: victorwfreire@ufersa.edu.br

Resumo: A análise empírica das ciências térmicas contribui para a compreensão de vários fenômenos físicos. Um dos modos de transferência de calor mais comum em materiais é a condução de calor, especialmente em gases. A capacidade com que um material tem de transportar calor por meio de uma região é a chamada condutividade térmica. Esta é uma propriedade obtida de forma experimental, já que não há cálculos teóricos que possam determiná-la com uma precisão aceitável. Além disso, seu valor pode variar a depender do sistema que foi estabelecido em relação ao experimento. O uso de gases, como o ar, é muito utilizado em projetos nas áreas de engenharia e um conhecimento sobre como estes se comportam termicamente é de suma importância para um funcionamento satisfatório dos mesmos. A partir disso, o trabalho a seguir apresenta um estudo experimental baseado na obtenção da condutividade térmica do ar e sua comparação com os resultados apresentados na literatura.

Palavras-chave: Condução de calor; Condutividade térmica; Ar; Experimental.

1. INTRODUÇÃO

O calor é uma grandeza física que pode ser transferida entre diferentes materiais ou sistemas devido a diferença de temperatura entre eles. Vale destacar que essa transferência ocorre do meio de maior temperatura para o de menor temperatura e termina quando os dois meios atingem o equilíbrio térmico. Esse fenômeno físico pode ocorrer por diferentes formas de propagação, conhecidos por modos de transferência de calor, sendo elas condução, convecção e radiação. Sendo esse primeiro que vai ser analisado no experimento [1].

A condutividade térmica é expressa nas equações como sendo a constante “k” que representa a capacidade quantitativa com que um determinado material tem de conduzir calor. Materiais bons condutores de calor apresentam altos valores dessa grandeza física, já materiais maus condutores de calor, ou também denominados isolantes, possuem baixos valores dessa propriedade. A água, por exemplo, possui uma condutividade térmica de 0,607 W/m.°C, ao qual é considerada baixa quando comparada ao cobre que possui uma condutividade térmica de 401 W/m.°C. Por outro lado, o ar possui uma condutividade térmica menor que a da água com um valor de 0,026 W/m.°C. Todos eles analisados em temperatura ambiente [1].

Tendo em vista o exemplo supracitado, pode-se compreender que os sólidos possuem uma maior condutividade térmica quando comparados aos líquidos, e estes quando comparados aos gases. Isso pode ser explicado pelo fato de existir uma diferença nas interações intermoleculares nos diferentes estados físicos, na qual os sólidos possuem interações moleculares mais fortes e frequentes que aos demais, onde no estado líquido essas interações são mais fracas e menos recorrentes se comparado com os sólidos. No entanto, ao analisar o estado gasoso este possui interações ainda mais fracas e menos frequentes que no estado líquido. Sendo assim, os materiais que se encontram no estado líquido são geralmente condutores intermediários [2].

A condutividade térmica na maioria dos gases é diretamente proporcional a temperatura, logo quando uma aumenta a outra também cresce. O ar por exemplo é um gás bastante conhecido e usado na engenharia, de diversas formas, por isso foi escolhido como o objeto desse estudo. Sendo analisado sua condutividade térmica de forma experimental, já que não existe cálculos teóricos que determine de forma exata em sólidos e líquidos, assim como os gases [1].

Diante disso, percebe-se a importância da realização de aulas práticas experimentais dentro dos cursos de engenharia, para que grandezas físicas como a condutividade térmica sejam obtidas através de experimentos, tendo em vista uma maior confiabilidade dos valores obtidos em relação aos cálculos

teóricos. Para isso, é necessário que essa prática tenha baixo custo e vasta aplicabilidade para que possa ser empregada dentro das universidades [3].

Tendo isso em vista, esse estudo tem por objetivo caracterizar o comportamento da condutividade térmica do ar em diferentes temperaturas e comparar os resultados obtidos com os valores presentes na literatura. Dessa forma, foi utilizado uma bancada didática de transferência de calor para desenvolver uma rotina de experimentos para análise da condutividade térmica do ar.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As ciências responsáveis pelo estudo dos processos de geração, conversão, transmissão e controle de energia na forma de calor e trabalho são as ciências térmicas. Elas têm como um dos principais pilares de estudo a transferência de calor, que é essencial para diversas aplicações na engenharia [4].

2.1 Transferência de calor

Revisando conceitos da termodinâmica, a transferência de energia ocorre a partir de interações entre um sistema e sua vizinhança. Esses contatos físicos podem ocorrer por meio de trabalho e calor. A energia térmica, que faz parte da energia interna de um sistema, ou calor está associada ao movimento das moléculas dentro de um meio [5]. Como já foi dito anteriormente, a transferência de calor vai ocorrer quando existir uma diferença de temperatura entre uma ou duas regiões, onde a mesma vai ser transmitida, naturalmente, da maior temperatura para a menor temperatura até o equilíbrio térmico ser atingido [1].

Quanto maior for a diferença de temperatura entre duas extremidades que possuem uma distância específica (gradiente de temperatura), maior será a taxa de transferência de calor. Ela é representada por $\dot{q}$ e possui unidade em watts ou joules por segundo. Além disso, ela por acontecer a partir de três modos, sendo condução, radiação e convecção, como já foi dito anteriormente [6].

2.1.1 Condução

Se a energia térmica fluir de uma extremidade para outra em um meio estacionário a partir de uma diferença de temperatura ao longo de uma determinada espessura, podendo ser um sólido ou fluido, usamos o termo transferência de calor por condução [7]. A condução de calor em gases ocorre de forma diferente em comparação com sólidos e líquidos devido à natureza mais solta e aleatória das moléculas de gás. Enquanto nos sólidos o calor é conduzido por vibrações e movimentos coordenados de átomos e moléculas, nos gases as moléculas estão em constante movimento aleatório, esbarrando umas nas outras e nas paredes do recipiente [1].

No entanto, apesar do movimento aleatório, as moléculas de gás a uma temperatura mais elevada têm maior energia cinética média do que as moléculas a uma temperatura mais baixa. Quando o gás em uma extremidade do recipiente entra em contato com o gás mais frio na outra extremidade, moléculas com alta energia cinética transferem parte dessa energia para moléculas com baixa energia cinética em colisões. [8]. Esta transferência de energia térmica de molécula para molécula constitui a condução de calor nos gases. Contudo, é importante notar que devido ao movimento aleatório das moléculas, a condução de calor nos gases é geralmente menos eficiente do que nos sólidos e líquidos [1].

A Figura 1 a seguir mostra como um gás se comporta quando submetido a uma diferença de temperatura entre duas placas [8].

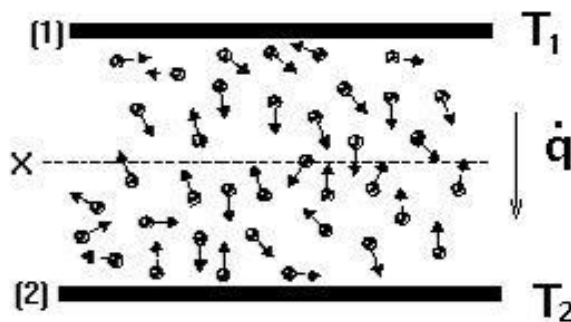


Figura 1: Um gás entre duas placas a diferentes temperaturas. Fonte: [9].

2.1.2 Lei de Fourier

A Lei de Fourier é uma das leis fundamentais da condução de calor e descreve como o calor se propaga através de um material condutor. Ela foi formulada pelo físico francês Joseph Fourier no século XIX com base em observações experimentais [10,11].

Afim de chegar numa equação que descreve como a energia térmica se comporta num material condutor foi necessário realizar alguns experimentos com materiais. O primeiro experimento consistia em analisar as variações das condições em que o problema foi exposto, onde um material de dimensões conhecidas foi submetido a uma diferença de temperatura. Ao fazer os ensaios, a relação que demonstra o comportamento dos fenômenos envolvidos é dada por [7]:

$$\dot{q} \propto A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1)$$

Que diz que a taxa de condução de calor é proporcional a diferença de temperatura, área da seção transversal e inversamente proporcional à distância com que a diferença de temperatura percorre [2].

Ao realizar mais estudos e experimentos, percebeu-se que poderia trocar a proporcionalidade por uma igualdade a partir da introdução de um coeficiente de condutividade térmica. Dessa forma, a relação passaria a ficar [7]:

$$\dot{q} = -k \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2)$$

Na equação acima, k representa a condutividade térmica do material, A representa a área de seção transversal ao qual o fluido vai percorrer, $\Delta T/\Delta x$ caracteriza o gradiente de temperatura na seção e $\dot{q}$ representa a quantidade de calor transportada por condução [12].

O sinal negativo indica que como o calor flui do ponto de maior temperatura para o de menor temperatura (gradiente de temperatura negativo), a taxa de condução de calor só vai ser positiva se a diferença de temperatura ao longo de uma determinada distância for positivo. Logo teremos que multiplicar por (-1) [13]. Para exemplificar, a figura 2 mostra como se dar a condução de calor em torno de um cilindro.

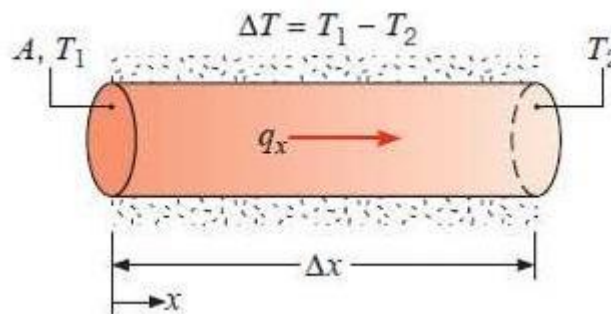


Figura 2 – Transferência de calor ao longo de um cilindro com uma das extremidades aquecidas e com uma área lateral isolada. Fonte: [7].

2.1.3 Condutividade Térmica

Como já dito antes, a condutividade térmica é uma propriedade muito importante de um material. Ela varia de acordo com a temperatura e interações moleculares num processo de condução nos diferentes estados físicos [13]. O valor da condutividade térmica de um material pode ser calculado experimentalmente por meio da aplicação da lei de Fourier, Equação 2 adaptada, isolando o k , ficando [7]:

$$k = \frac{\dot{q} \cdot \Delta x}{A \cdot \Delta T} \quad (3)$$

O valor da condutividade na Tabela 1 a seguir mostra o valor de condutividade térmica que pode ser expresso em $\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$ ou $\frac{W}{m \cdot K}$ para diferentes materiais. Onde os metais possuem maiores valores de condutividade térmica e os gases menores valores de condutividade térmica [8].

Tabela 1 – Condutividade térmica de materiais sólidos, líquidos, gasosos e alguns metais. Fonte: [8]

Material (at 298 K)(24.85°C)		Typical Thermal Conductivity (k) W.m ⁻¹ K ⁻¹
Metals	Aluminium (pure)	205 to 237
	Aluminium (grade 6082)	170
	Brass (type CZ121)	123
	Brass (63% copper)	125
	Brass (70% copper)	109 to 121
	Copper (pure)	353 to 386
	Copper (type C101)	388
	Mild Steel	50
	Stainless Steel	16
Gas	Air	0.026
	Carbon Dioxide	0.0146
	Hydrogen	0.172
Others	Asbestos	0.28
	Castor Oil	0.18
	Glass	0.8
	Water	0.6
	Wood (softwood to hardwood)	0.07 to 0.2

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização do experimento, foi utilizado uma bancada experimental da marca TecQuipament de modelo TD1002D; Ar como fluido; um computador para fazer as tabelas por meio de um software (excel); uma fonte de água para o resfriamento com vazão constante; mangueiras para conectar a bancada com o sistema de água; abraçadeiras para evitar vazamentos nas mangueiras; pia para drenagem de água.

A bancada foi montada sobre um local, sólido e plano, próximo a uma fonte de água e de energia para ligar o aquecedor. Além disso, foi utilizada a água encanada disponível na torneira do laboratório. A montagem do suprimento de água foi feita a partir das mangueiras e abraçadeiras. Com relação a água, ela tinha uma boa pressão de saída permitindo um fluxo de água favorável em seu percurso no experimento, não precisando utilizar algum acessório para aumentar sua vazão. Antes de avançar com o ensaio, foi feito uma limpeza ao redor do cilindro afim de eliminar qualquer tipo de impureza.



Figura 3 – Imagem da bancada experimental montada sobre a superfície. Fonte: (Autoria Própria)

A bancada funciona de modo que um aquecedor gera energia térmica (calor) em um cilindro central, envolto de um reservatório de água de resfriamento (dissipador de calor). Um fluido de ensaio preenche um pequeno espaço fino que está entre a fonte de calor e o fluido de arrefecimento. A fonte de água fria ao lado da bancada flui em torno do dissipador para reduzir o calor. A unidade ao qual comporta o aquecedor é isolada termicamente para reduzir qualquer perda de energia térmica. É colocado dois termopares em cada extremidade da parede fina ao qual o fluido está contido, onde uma ponta tem superfície mais quente devido ao aquecedor e a outra possui extremidade mais fria devido está em contato com a água de resfriamento. A figura 4 a seguir mostra como se dar o funcionamento da unidade [8].

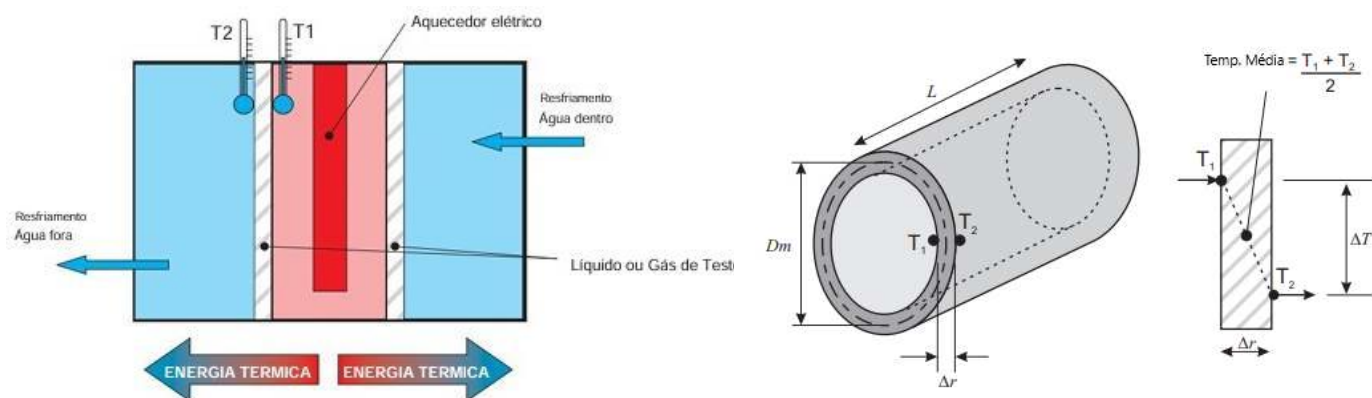


Figura 4 – Esquema de funcionamento da bancada experimental de condutividade de líquidos e gases. Fonte: Adaptado [8]

Com relação ao experimento, como a espessura da parede do cilindro onde o fluido vai percorrer é muito pequena, os efeitos da convecção e da radiação não serão levados em consideração no cálculo da condutividade térmica. Somente o modo de transferência por condução será considerado [8].

Com a bancada completamente montada, foi realizado o experimento de duas formas: o primeiro consiste na realização de uma calibração do equipamento utilizando ar seco normal; o segundo fundamenta-se em determinar a condutividade térmica do fluido (ar). Na primeira situação, a calibração tem a função de detectar possíveis perdas de calor em que a unidade possa ter. Primeiramente, como mostra na Figura 5, 6 e 7, foi realizada uma limpeza do experimento abrindo a unidade e limpando a parte de fora do cilindro e o local onde vai ser encaixado o mesmo. Após a unidade ter sido desmontada e montada, foi adicionado o fluido (ar) como mostra a Figura 8 [8].



Figura 5 – Retirada dos parafusos da tampa da extremidade frontal. Fonte: (Autoria Própria)



Figura 6 – Retirada do núcleo para limpeza. Fonte: (Autoria Própria)



Figura 7 – Limpeza do núcleo. Fonte: (Autoria Própria)

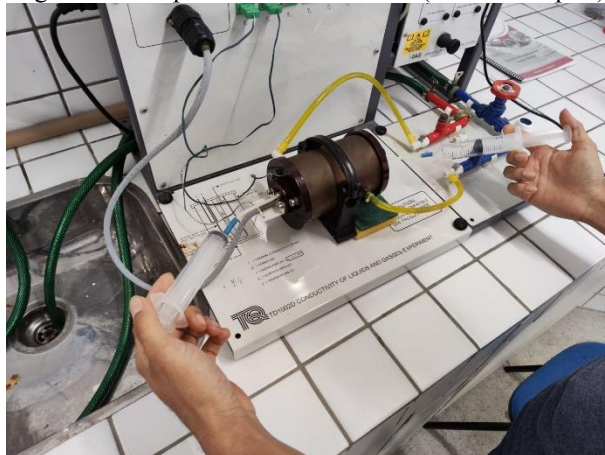


Figura 8 – adicionando o fluido de ensaio Fonte: (Autoria Própria)

A calibração foi realizada de acordo com as especificações do fabricante. Dando início, ligou-se o sistema de água e o aquecedor ajustando-o numa potência de 90W. Com os termopares conectados na unidade, foi esperado as temperaturas T_1 e T_2 estabilizarem e anotado os seus respectivos valores. Foi feito esse mesmo processo com passos decrescentes de 10W (Watts) até chegar na potência de 10W do equipamento. Após isso, desliga-se o sistema de água e o aquecedor. Depois, ir na página 20 do livro da Tecquipment e encontrar o valor da condutividade térmica do ar, por meio do gráfico 1 disponibilizado, em todas as potências a partir da temperatura média entre T_1 e T_2 . Dando continuidade, calcula-se a potência para todos os valores de condutividade encontrados anteriormente usando a Equação 4, adaptada da Equação 2, a seguir [8]:

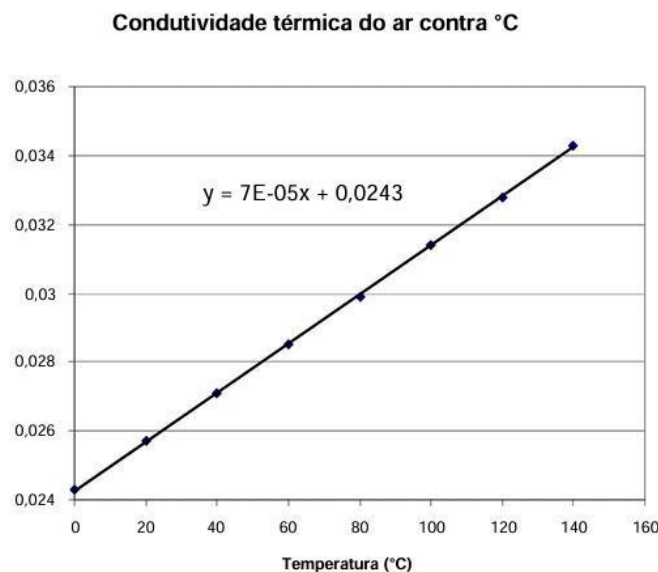


Gráfico 1 – Condutividade térmica do ar versus temperatura (°C). [8]

$$W = \frac{k.A.(T_1 - T_2)}{\Delta r} \quad (4)$$

Subtrai-se esse valor pela potência do aquecedor para encontrar a perda de potência no equipamento. Por fim, foi feito um gráfico de perda de potência, em watts, versus diferença de temperatura (T_1 e T_2) em °C. Onde este gráfico vai ser utilizado no experimento para identificar a quantidade de perda de calor numa determinada diferença de temperatura [8].

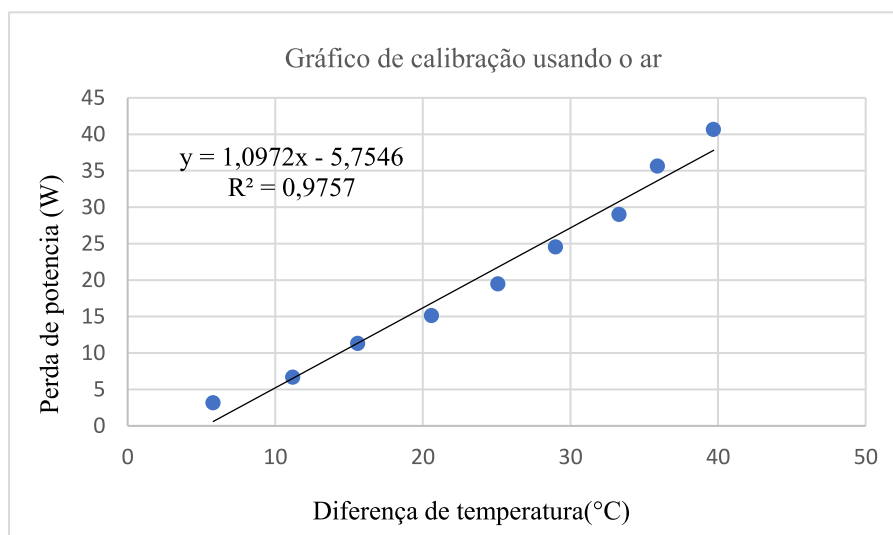
Antes de realizar o experimento foi feita outra limpeza, igual a anterior, antes de adicionar o fluido afim de recolher qualquer tipo de umidade oriunda de vazamentos. Após isso, o equipamento foi configurado da mesma forma da calibração com o mesmo fluido. Mais uma vez, foi ligado o sistema de água e depois o aquecedor numa potência em que a diferença de temperatura atendesse ao gráfico de calibração. Em seguida, foi esperado o sistema estabilizar e anotado os devidos valores de T_1 e T_2 . Foi feito esse processo mais duas vezes, porém com potências mais altas. Ao final do experimento, foi desligado o aquecedor e o sistema de água. Com os valores obtidos, foi calculado a diferença de temperatura entre T_1 e T_2 e usado a equação da reta do gráfico de calibração para encontrar a perda de potência do equipamento na diferença de temperatura correspondente [8].

Depois foi calculado a potência corrigida, subtraindo a potência do equipamento pela perda de potência correspondente. Usando a Equação 5 mostrada abaixo, adaptada da Equação 3, foi calculado o valor de k usando a potência corrigida e comparado com o valor de k na temperatura ambiente, encontrado nas literaturas. [8].

$$k = \frac{W.\Delta r}{A.(T_1 - T_2)} \quad (5)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O gráfico 2 mostra o comportamento da perda de potência com relação a diferença de temperatura



2 - Gráfico Calibração do equipamento usando o ar. (Autoria Própria)

É possível notar que o comportamento do gráfico se assemelha a uma reta, razoavelmente, crescente. Além disso, pode-se perceber que quanto maior a diferença de temperatura, maior a perda de potência. Isso se dá pelo fato de quando estávamos realizando a calibração, a temperatura T_1 estava aumentando consideravelmente, por estar mais perto do aquecedor, diferente de T_2 que aumentava com menor intensidade. Assim, quanto maior o gradiente de temperatura maior a perda de calor, já que são diretamente proporcionais.

A tabela 2 a seguir mostra os valores de condutividade térmica em três potências diferentes do equipamento corrigidas comparadas com seus respectivos valores em temperatura ambiente.

Tabela 2 – Valores de condutividade térmica para diferentes potencias em comparação com os valores da literatura. (Autoria própria)

Cálculo da condutividade térmica do Ar										
Potencia do Aquecedor (W)	T1 (°C)	T2 (°C)	Temperatura média (°C)	T1 - T2 (°C)	Perda de potência pelo gráfico de calibração (W)	Potência corrigida (W)	k calculado (W/m.°C)	k comparado (W/m.°C)	Erro em %	
18	41,1	31,1	36,1	10	6,0738	11,9262	0,026975929	0,026	3,753571429	
45	54,6	32,1	43,35	22,5	21,2463	23,7537	0,023879381	0,026	8,156227106	
70	65,1	32,8	48,95	32,3	33,14154	36,85846	0,025811246	0,026	0,725975005	

Na potência corrigida de 11,9W, aproximadamente, foi obtido um valor de condutividade de aproximadamente 0,02697 W/m.°C. Comparando-o com o valor na literatura (ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J. [1]) possui um erro de aproximadamente 3,75%, o qual é menor que 10%. Dessa forma, o valor calculado está dentro da faixa de tolerância aceitável, de acordo com o manual da Tecquipment.

Nas potências de 23,75 e 36,85W, aproximadamente, foi obtido os valores de condutividade de 0,02387 W/m.°C e 0,0258 W/m.°C, respectivamente. Ambos os resultados quando comparados com a literatura obtiveram um erro relativo menores que 10%, indicando que não existe uma grande discrepância entre eles, ou seja, são aceitáveis.

Vale destacar que os valores obtidos de condutividade térmica foram comparados com os valores teóricos de k em temperatura ambiente, fornecendo um erro considerável. Entretanto, ao utilizar o valor de condutividade conseguido pelo gráfico 1 de aproximadamente 0,0268 W/m.°C e compara-lo com o valor de k calculado, temos um erro somente de 0,63%.

5. CONCLUSÕES

Ao analisar os resultados do experimento realizado no trabalho acima, foi possível perceber que os valores de condutividade térmica obtidos possuem erros relativos menores que 10% quando comparados com a literatura. Dessa forma, estes são considerados aceitáveis. Além disso, conclui-se que a bancada experimental (TD1002D) surge como uma alternativa para determinar a condutividade térmica de líquidos e gases de forma aceitável para fins didáticos, de acordo com o manual da Tecquipment.

REFERÊNCIAS

- [1] ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**. 4. ed. New York: Amgh Editora Ltda, 2012. 904 p.
- [2] INCROPERA, Frank P. *et al.* **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 6. ed. [S.L.]: John Wiley & Sons, 2007. 643 p.
- [3] VILELA, Keila Cristina. **DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE BAIXO CUSTO PARA MEDIÇÃO DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA EM CORPOS DE PROVA CERÂMICOS**. 2017. 56 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Departamento de Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.
- [4] MORAN, Michael J. et al. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. 8. ed. Rio de Janeiro: Grupo Editorial Nacional, 2018. 1417 p.
- [5] KREITH, Frank; MANGLIK, Raj M.; BOHN, Mark S. **Princípios de Transferência de Calor**. 7. ed. [S.L.]: Shaligramtiwari, 2016. 676 p.
- [6] ORDENES, Martin; LAMBERTS, Roberto; GÜTHS, Saulo. **TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA ENVOLVENTE DA EDIFICAÇÃO**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2008. 40 p.
- [7] OLIVEIRA, Santiago del Rio. **CONDUÇÃO TÉRMICA**. Bauru: Faculdade de Engenharia de Bauru – Unesp, 2017. 444 p. Disponível em: https://pessoas.feb.unesp.br/santiago/files/Apostila_Conducao_Termica1.pdf. Acesso em: 12 abr. 2024.
- [8] TECQUIPMENT (São Paulo). **Experimentos de Transferência de calor**. São Caetano do Sul: Nova Didática, 2012. 56 p.
- [9] CORREA, Felipe. **Transferência de Calor**. Góias: Puc - Góias, 2018. 87 slides, color. Disponível em: <https://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/17297/material/Transfer%C3%AAncia%20de%20Calor.pdf>. Acesso em: 05 abr. 2024.
- [10] BRIONIZIO, Júlio Dutra. **Estudo do Método de Medição de Condutividade Térmica e Teor de Água por Meio de Geometria Esférica: Aplicação em Soluções Aquosas de Etanol**. 2013. 168 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da Puc-Rio, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=22034@1>. Acesso em: 14 abr. 2024.
- [11] QUIRINO, Jonatas Motta. **Transferência de Calor com interação de aletas e condutividade térmica variável**. 2018. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia e Ciências, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <http://www.bdtd.uerj.br/handle/1/17135>. Acesso em: 12 abr. 2024.
- [12] BARROSA, Marcelo Rosário da. **Princípios Fundamentais da Transferência de Calor**. [S.L.]: Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, 2004. 48 p. Disponível em: http://sites.poli.usp.br/p/jesse.rebello/termo/Trabalho_Transcal.pdf. Acesso em: 12 abr. 2024.
- [13] VILCENT, Wedson. **CÁLCULO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA EM UM PROBLEMA DE CONDUÇÃO DO CALOR**. 2021. 91 f. TCC (Graduação) - Curso de Matemática, Universidade Federal da Fronteira Sul, Chapecó, 2021. Disponível em: <https://rd.uffs.edu.br/handle/prefix/4704>. Acesso em: 12 abr. 2024.