

ANÁLISE EXPERIMENTAL DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE METAIS.

André Ferreira Santos¹, Victor Wagner Freire De Azevedo²

¹Graduando em Bel. em Ciência e Tecnologia, UFRSA, Mossoró-RN, e-mail: André.santos27231@alunos.ufersa.edu.br

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

Resumo: O estudo experimental das ciências térmicas auxilia no entendimento de diversos fenômenos. A condução de calor é uma forma de transferência de calor que é muito observada em meios sólidos, onde podem ser destacados os metais. A condutividade térmica é a propriedade do material que descreve a magnitude da transferência de calor através do respectivo meio. Ela é uma propriedade obtida de forma experimental, já que métodos analíticos não demonstram resultados tão exatos quando comparados com métodos experimentais. Além disso, seu valor pode variar a depender do tipo de material e da situação em que ele está exposto. Ademais, no ramo da engenharia é empregada a utilização diversificada de metais em um mesmo projeto, e o conhecimento sobre o comportamento térmico deste sistema se faz necessário para otimização do seu funcionamento. Com base nisso, o presente trabalho propõe um estudo experimental para obtenção da condutividade térmica do alumínio, cobre, aço inox e latão utilizando uma bancada didática e comparação dos resultados obtidos com os valores já presentes na literatura. Dessa forma, a partir dos gráficos da variação da condutividade com o tempo para diferentes potências de calor, verificou-se que a condutividade térmica dos metais estudados, quando colocados em contato com um metal diferente, variou de forma a se aproximar da condutividade térmica do metal de maior quantidade no sistema em análise, nesse caso, o latão. Portanto, com o presente trabalho foi possível notar a influência da utilização de diferentes metais na condutividade térmica.

Palavras-chave: condutividade térmica; condução de calor; metais; experimental.

1. INTRODUÇÃO

A condutividade térmica é uma propriedade intrínseca do material e fornece a sua capacidade de conduzir calor. Dessa forma, materiais que possuem um alto valor de condutividade térmica são denominados bons condutores térmicos, ao passo que materiais que possuem um baixo valor de condutividade térmica são denominados maus condutores térmicos, ou isolantes [3]. No entanto, a depender do material, essa propriedade pode variar de acordo com a temperatura na qual ele se encontra. Em relação aos metais, essa variação se dá de forma significativa. Por exemplo, o cobre, o qual possui uma condutividade térmica média de 401 W/m.K, quando submetido a temperaturas muito baixas, próxima de zero Kelvin, por exemplo, possui uma condutividade térmica de aproximadamente 20.000 W/m.K. Além disso, materiais mais puros tendem a possuir uma condutividade térmica maior do que quando adicionado de outros elementos de liga [3], como exemplo, o aço adicionado 1% de cromo, que possui uma condutividade térmica média de 62 W/m.k, ao passo que a condutividade do aço e do cromo são, respectivamente, 83 e 95 W/m.K. Ademais, é sabido que um processo de transferência de calor depende fortemente da diferença de temperatura do meio e do material empregado, sendo o objeto dessa análise a condutividade térmica. No entanto, teorias não são a melhor forma para determinar de maneira exata os valores de condutividade térmica para sólidos e líquidos utilizados em problemas de engenharia reais; desse modo, eles são obtidos de forma experimental [6].

Fenômenos de transferência de calor são muitas vezes modelados por correlações complexas e que buscam descrever o comportamento de um determinado sistema. No entanto, tais correlações são muitas vezes obtidas através de resultados experimentais. Dessa forma, o estudo experimental de fenômenos de transferência de calor não só pode ser utilizado na pesquisa, mas também na visualização do comportamento da física do determinado problema. Com base nisso, a utilização das chamadas bancadas didáticas para visualização de fenômenos é bastante útil para um melhor aprendizado dos estudantes deste assunto [4].

Ao longo dos anos diversos trabalhos foram desenvolvidos para estudar experimentalmente fenômenos ligados à transferência de calor. O estudo desenvolvido por Garcia et al. [4] descreveu um experimento de transferência de calor e massa que consiste na fusão de uma placa de gelo, onde foi analisado o valor quantitativo de transferência de calor por meio da radiação, convecção sobre uma placa de gelo, cujo resultados foram comparados com dados experimentais relativos à taxa mássica de fusão dessa placa, foi encontrado que a

realização de estudos experimentais sobre o assunto, mesmo elaborados com um baixo investimento, auxiliam no processo de ensino-aprendizagem dos alunos nas disciplinas das áreas térmicas. Dessa forma, instigando os mesmos a refletir sobre a dinâmica do experimento. Além disso, estudos referentes à condutividade térmica de alguns metais por meio de um aparato experimental de baixo custo foram realizados por Aquino et al. [1], que mostrou ser possível determinar valores para a condutividade térmica com exatidão satisfatória sem a necessidade de um aparato experimental sofisticado.

Diante do exposto, o presente trabalho tem por objetivo analisar o comportamento da condutividade térmica de alguns metais de uso típico nos problemas de engenharia e comparar os resultados obtidos com valores presentes na literatura. Para isso, foi utilizado uma bancada didática de transferência de calor para desenvolver uma rotina de experimentos para análise da condutividade térmica com base na leitura da temperatura em diferentes pontos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A transferência de energia ocorre entre um sistema e sua vizinhança, e pode ser ocasionada por meio do trabalho e da transferência de calor [3]. Analisando a transferência de calor, a energia presente é a energia térmica, doravante chamada de calor (Q), ela é definida como a parte da energia interna de um sistema associada à energia cinética das moléculas desse sistema. Quando um sistema é submetido a uma diferença de temperatura, que pode ser entre dois meios ou em um único meio [6], haverá uma transferência de calor, a qual flui naturalmente da maior temperatura para a menor temperatura, comportamento explicado pela segunda lei da termodinâmica. Assim, essa transferência de calor acontecerá até que o(s) meio(s) atinjam a mesma temperatura [3].

A quantidade de calor transferida por unidade de tempo é denominada de taxa de transferência de calor, representada por $\dot{Q}$, e possui unidade de joule por segundo W. Ela depende da diferença de temperatura ao longo do meio, o qual é denominado de gradiente de temperatura. Dessa forma, quanto maior for o gradiente de temperatura, maior será a taxa de transferência de calor nesse respectivo meio.

Além disso, a depender da situação em que o sistema se encontra, essa transferência de calor poderá ocorrer por diferentes processos, os quais são chamados de modos. Sendo eles: condução, convecção e radiação.

2.1 Condução

A condução é um modo de transferência de calor que consiste na interação direta das moléculas mais energéticas com as menos energéticas de um sistema [2]. Ela pode ocorrer em meios sólidos, líquidos e gasosos. Analisando a transferência de calor por condução em sólidos, ela é conduzida de duas formas: migração de elétrons livres e vibração da rede [6]. Podendo ocorrer de forma simultânea pelas duas formas. No entanto, a depender da natureza do material, se possui, predominante, propriedades condutivas ou não, haverá uma maior influência de uma das formas de condução nesse material. Como exemplo, um material de borracha conduzirá o calor apenas através da vibração da rede, já que por ser um material isolante, não permite a passagem de elétrons através de si. Já um material condutor, irá conduzir o calor através das duas formas: vibração da rede e migração de elétrons; sendo que por meio da migração de elétrons é o meio mais eficiente de condução entre os dois [2]. Dessa forma, é possível perceber que bons condutores elétricos, em geral, também são bons condutores térmicos.

Por meio de uma vasta observação experimental, foi possível desenvolver uma equação de forma empírica que descrevesse o comportamento dos processos de condução de calor, em uma primeira análise, de forma simplificada. Para os sólidos, os experimentos consistiram em analisar o comportamento da condução de calor em um objeto de material e dimensões conhecidas, preferencialmente de uma geometria simples e simétrica, onde foi mantida a superfície externa ao longo do comprimento isolada e as duas extremidades do objeto foram submetidas a uma diferença de temperatura. Desse modo, foram analisadas as dependências entre a taxa da transferência de calor com a diferença de temperatura (dT); área da seção transversal onde o calor é aplicado (A); o comprimento do objeto (dx). Dessa forma, foi obtida a relação

$$\dot{Q} \propto A \frac{dT}{dx},$$

a qual mostra que a taxa de condução de calor ao longo do objeto de superfícies planas, quando submetido a um gradiente de temperatura é proporcional a área da seção transversal e a diferença de temperatura, mas inversamente proporcional à distância da diferença de temperatura.

Ao realizar o mesmo experimento, mas agora com um material diferente, foi observado a mesma relação entre as variáveis; no entanto, o valor da taxa de condução de calor $\dot{Q}$ foi diferente. Dessa forma, foi notado que há uma propriedade intrínseca do material que influencia diretamente na taxa de transferência de calor por condução. Com isso, foi introduzida uma constante de proporcionalidade k , chamada de condutividade térmica, a qual descreve o comportamento térmico do material. No entanto, ao utilizar a equação dessa forma, ela retornará um valor negativo para a taxa de condução de calor, visto que a transferência de calor ocorre no sentido oposto ao gradiente de temperatura. Com isso, foi introduzido um sinal de menos (-) no lado direito da equação, para

assegurar que esse valor seja positivo. Além disso, ao analisar a situação no caso limite, quando $dx \rightarrow 0$, obteve-se

$$\dot{Q} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (\text{Equação 1})$$

que é chamada de lei de Fourier da condução térmica, a qual implica que o fluxo térmico é uma grandeza direcional, indicando que o mesmo é perpendicular à área da seção transversal [2]. Lembrando que essa equação é um caso particular para a condução, onde ela ocorre em uma única direção e não há influência dos outros modos de transferência de calor. A Figura 1 apresenta o comportamento do gradiente térmico para um processo de transferência de calor por condução.

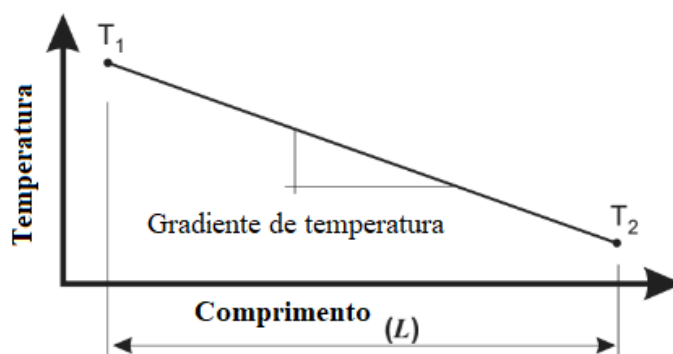


Figura 1: Comportamento do gradiente térmico para um processo de transferência de calor por condução. (Adaptado de [7])

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a execução do experimento, foi utilizado uma bancada experimental da marca TecQuipment, modelo TD1002A. É uma bancada utilizada para realizar experimentos de transferência de calor por condução, onde é analisada a condutividade térmica de 4 tipos diferentes de metais [7]. Os metais são confeccionados em seções cilíndricas intercambiáveis com 30 mm de diâmetro e 20 mm de espessura, sendo cada uma de latão (tipo CZ121), cobre, alumínio e aço inoxidável. O tipo específico dos metais, exceto para o latão, não foram detalhados pelo fabricante. Além disso, foi utilizado uma pasta térmica; um computador com software de planilhas para a aquisição de dados; uma fonte de água contínua; uma mangueira para a conexão da bancada com o sistema da água; abraçadeiras e um local para drenagem de água.

A bancada experimental foi montada sobre uma superfície sólida e plana, próxima à fonte de água, a qual foi utilizada a água encanada do laboratório, à uma fonte de energia e do local para drenagem da água (Figura 2). A temperatura ambiente era de aproximadamente 26°C. Para a montagem do suprimento de água, foram utilizadas uma mangueira e uma abraçadeira do tipo borboleta. Onde, a parte de abastecimento da água da bancada foi conectada à torneira do laboratório, a qual tinha uma vazão aproximada de 14 ml/s, não sendo necessário a utilização de um equipamento externo para promover o bombeamento da água, e a parte de drenagem foi direcionada até um sumidouro. Em seguida, foi realizada uma limpeza da superfície da seção metálica intercambiável a ser utilizada na experimentação, não havendo uma ordem preferencial de por qual começar; com isso, foi aplicada a pasta térmica na mesma. Por fim, a seção foi montada na bancada.



Figura 2. Imagem da bancada experimental já montada. (Autoria própria)

O funcionamento da bancada consiste no aquecimento da extremidade esquerda da barra metálica do equipamento por meio de uma fonte de calor elétrica ajustável, onde a superfície externa está isolada termicamente para evitar influência de outros meios de transferência de calor. Há, dispostos ao longo do comprimento da barra, 7 termopares igualmente espaçados, sendo um desses termopares na seção intercambiável. Por fim, na extremidade direita da barra metálica, há um sistema de dissipação de calor por meio de um fluxo de água, conforme representado na Figura 3.

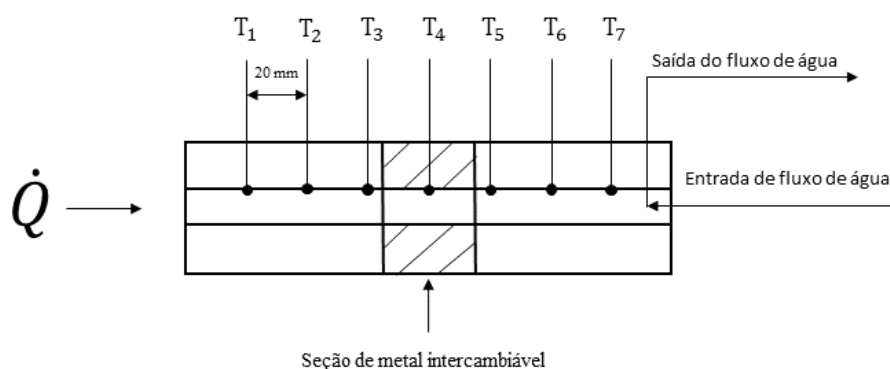


Figura 3. Esquematização do funcionamento da bancada. (Autoria própria)

Com a bancada e seus periféricos devidamente montados, foi executado o experimento em duas situações distintas, as quais foram: 1) determinação da condutividade da seção metálica intercambiável utilizando um metal do mesmo tipo de metal do equipamento da bancada; 2) determinação da condutividade da seção metálica intercambiável utilizando metais de tipos diferentes. Além disso, para cada situação citada anteriormente, foram utilizadas três configurações da fonte de calor, sendo 30, 37,5 e 45 W.

Inicialmente, foi aberto o sistema de abastecimento de água, em seguida foi ligada a fonte de calor e selecionada a potência. Mas, antes de iniciar a coleta de dados, foi esperado a temperatura de T_1 atingir 70°C . Com isso, é coletado o valor da temperatura dos termopares, e, a cada 5 min, é coletado novamente as temperaturas. Contabilizadas 5 medições e um total de 25 minutos, onde foram anotados em uma planilha eletrônica. Dessa forma, com base nesses dados foram calculadas as respectivas condutividades térmicas ao longo do tempo utilizando a Equação 1 para as temperaturas T_3 e T_5 em cada situação e configuração. Por fim, esses dados foram comparados com valores presentes na literatura.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Gráfico 1 mostra o comportamento da condutividade térmica do alumínio ao longo do tempo, quando submetido a diferentes taxas de calor. É possível notar que o valor da condutividade inicial é maior conforme aumenta-se o gradiente térmico no material. No entanto, ao longo do tempo, o valor da condutividade para todas as amostras tende a um mesmo valor, aproximadamente 115 W/m.K . Consultando o valor da condutividade térmica do alumínio na literatura [2], foi encontrado o valor de 237 W/m.K para uma temperatura ambiente de 26°C , no entanto, a condutividade térmica de ligas de alumínio pode variar entre 88 e 251 W/m.K [5]. Dessa forma, uma vez que o alumínio disponibilizado pelo fabricante da bancada experimental não foi caracterizado, não pode

ser afirmado sobre a proximidade do valor obtido no experimento. No entanto, vale ressaltar que as condições empregadas nos experimentos aqui presente, utilização de metais diferentes, difere das condições utilizadas pela literatura, que analisa exclusivamente o comportamento da condutividade do material em questão.

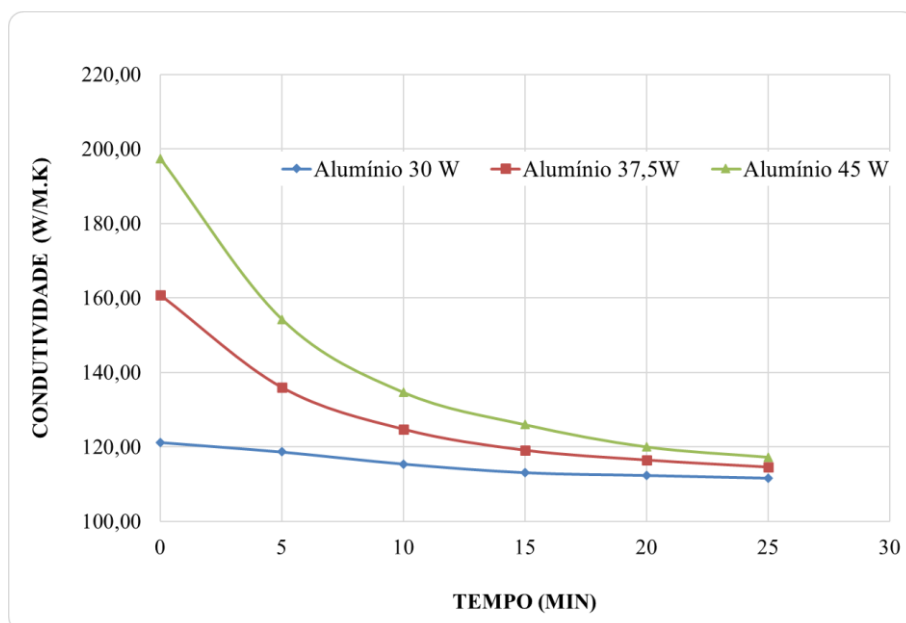


Gráfico 1. Valores da condutividade térmica do alumínio para diferentes taxas de calor e tempo. (Autoria própria)

O Gráfico 2 exibe o comportamento da condutividade térmica do cobre. A situação se dá de forma semelhante ao do alumínio. Inicialmente, a condutividade assume valores maiores conforme aumenta-se o gradiente térmico, e todas as amostras tendem a estabilizar em um mesmo valor, aproximadamente 100 W/m.K. No entanto, para a potência de 37,5 W há uma variação atípica, onde os valores da condutividade do cobre, para essa configuração, superam os valores da potência de 45 W, o que pode caracterizar erros ao conduzir o experimento. Uma das possíveis causas, pode-se citar a vazão d'água da torneira, que pode não ter mantido um fluxo constante.

O valor médio da condutividade desse metal encontrado na literatura é aproximadamente 400 W/m.K para o cobre puro [2], ao passo que o valor encontrado na situação proposta neste experimento foi de, aproximadamente, 100 W/m.K. Portanto, percebe-se uma redução mais acentuada da condutividade do que no caso anterior, e um valor final semelhante, apesar do material empregado ser diferente. A caracterização da bancada para o cobre ainda precisa de maiores estudos para que sejam verificadas as razões pela diferença no valor obtido.

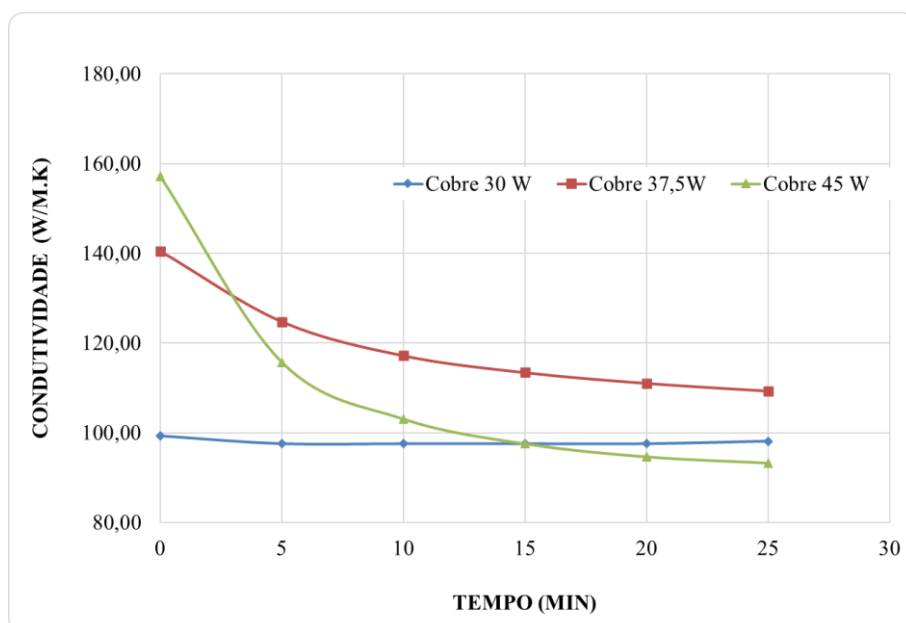


Gráfico 2. Valores da condutividade térmica do cobre para diferentes níveis de calor e tempo. (Autoria própria)

O Gráfico 3 mostra as mesmas informações para o aço inox. Como nos outros metais, a condutividade térmica inicial aumenta de acordo com o aumento do gradiente térmico. Além disso, os valores finais da condutividade de todas as amostras se aproximam de 45 W/m.K. No entanto, para a potência de 45 W, houve um leve aumento no valor da condutividade final em relação às demais medidas. Como citado anteriormente, uma das possíveis causas para esse efeito se deve ao fluxo de água não ter sido constante nessa parte do experimento. Além disso, é recomendado pelo fabricante que a água esteja entre 10 °C e 15 °C, o que nas condições da região Nordeste do Brasil só é possível com a utilização de um banho térmico, o que não ocorreu no presente trabalho.

Ao consultar o valor da condutividade térmica desse metal na literatura [2], foi obtido o valor na faixa de 14 a 15 W/m.K, contra 45 W/m.K encontrado na presente prática. Também foi possível notar que o valor final da condutividade não foi semelhante aos dois casos anteriores, de 100 W/m.K, e que, ao contrário dos demais experimentos, onde houve um decréscimo na condutividade térmica, nesse caso, houve um aumento nesta propriedade. No entanto, os pontos demonstraram ainda não estar em um regime permanente para esse experimento, o que leva a conclusão que mais tempo de experimento seria necessário para uma melhor verificação do valor da condutividade térmica para o aço inox.

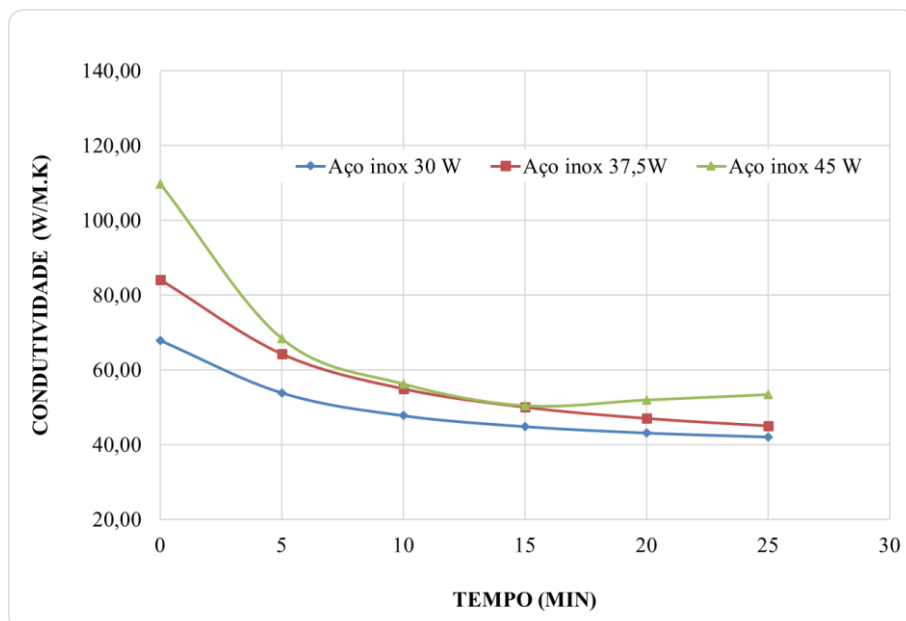


Gráfico 3. Valores da condutividade térmica do aço inox para diferentes níveis de calor e tempo. (Autoria própria)

O Gráfico 4 mostra o comportamento da condutividade para o latão ao longo do tempo. No entanto, nesse caso, vale ressaltar que o metal da seção intercambiável e o metal da bancada experimental são iguais. Analisando o gráfico, é possível notar que o comportamento da condutividade se dá de forma semelhante aos demais experimentos, havendo um aumento da condutividade inicial de acordo com o aumento do gradiente térmico, e uma estabilização do valor com o passar do tempo em 100 W/m.K. Houve apenas uma divergência no valor para a potência de 45 W, onde a condutividade teve um leve aumento, que, como citado anteriormente, pode ter sido ocasionado pelo fluxo de água ou também ao tempo de realização do experimento.

Ao consultar a literatura [2], foi encontrado um valor da condutividade para esse material de 110 W/m.K, enquanto o valor encontrado no presente experimento foi de 100 W/m.K. Dessa forma, houve um erro relativo de 9%, que, ao comparar com os demais experimentos aqui realizados, se mostrou ser a menor variação com o valor presente na literatura.

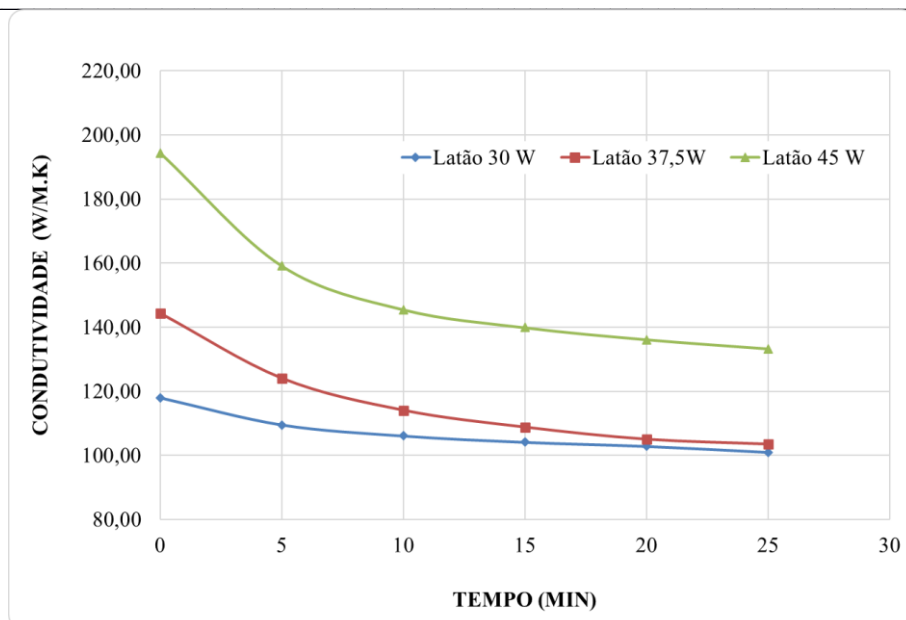


Gráfico 4. Valores da condutividade térmica do latão para diferentes níveis de calor e tempo. (Autoria própria)

Além disso, foi possível notar, ao analisar o comportamento dos gráficos anteriores, que o formato dos mesmos caracteriza uma queda curvilínea na condutividade térmica ao longo do tempo.

A Tabela 1 traz os valores presentes nos gráficos de forma a facilitar a análise do comportamento da condutividade térmica dos metais analisados.

Tabela 1. Valor da condutividade térmica em um intervalo de 25 min para diferentes níveis de calor e com diferentes metais utilizando $\Delta T = T_5 - T_3$. (Autoria própria)

Potência	Alumínio			Cobre			Aço inox			Latão		
	30 W	37,5 W	45 W	30 W	37,5 W	45 W	30 W	37,5 W	45 W	30 W	37,5 W	45 W
0 min	121	161	197	99	140	157	68	84	110	118	144	194
5 min	119	136	154	97	125	116	54	64	68	109	124	159
10 min	115	125	135	97	117	103	48	55	56	106	114	145
15 min	113	119	126	97	113	97	45	50	50	104	109	140
20 min	112	117	120	97	111	95	43	47	52	103	105	136
25 min	112	115	117	98	109	93	42	45	53	101	103	133

5. CONCLUSÃO

Ao analisar os resultados dos experimentos propostos no presente trabalho, foi possível notar uma influência na condutividade térmica dos diferentes metais utilizados, seções intercambiáveis, quando colocados em contato com um metal diferente, metal do aparato experimental da bancada. Onde, para a maioria das amostras, o valor da condutividade tendeu ao valor do metal da bancada, que, nesse caso, foi o latão, obtendo o valor aproximado de 100 W/m.K, havendo um decréscimo no valor dessa propriedade nos metais utilizados. Apenas diferindo para o aço inox, onde obteve uma condutividade térmica média de 45 W/m.K. Nesse caso, a condutividade térmica do material da seção intercambiável era menor do que a condutividade do metal da bancada. Assim, ao invés de diminuir o valor dessa propriedade, foi detectado um aumento, mas que não conseguiu atingir o mesmo valor que os demais.

Além disso, foi possível notar que o comportamento da condutividade para a maioria das amostras tendia a estabilizar em um período de tempo de aproximadamente 25 min, cuja as variações sensíveis nos resultados próximas a esse tempo foram decorrentes de problemas na execução do experimento, sendo uma possível causa a temperatura maior da água em relação ao que é recomendado pelo fabricante. Dessa forma, evidenciando a importância de um bom sistema de extração de calor para o funcionamento seguro de sistemas que empregam a utilização de materiais metálicos.

Portanto, pode-se concluir com a presente pesquisa que a condutividade térmica de um metal pode variar de forma considerável a depender da situação e do ambiente exposto. Desse modo, se faz necessário o conhecimento prévio desse comportamento térmico a fim de se evitar possíveis problemas futuros decorrentes da influência desta propriedade.

6. REFERÊNCIAS

- [1] AQUINO, Josué Alexandre; SILVA, José Antônio. RESULTADOS DE MEDIDAS DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE METAIS OBTIDOS PELO MÉTODO FLUXIMÉTRICO EM APARATO EXPERIMENTAL DE BAIXO CUSTO. **UIIPS**, Santarém. Vol. 3, nº 2, 22 set. 2015. Disponível em: <https://revistas.rcaap.pt/uiips/article/view/14351>. Acesso em: 7 de outubro de 2022.
- [2] BERGMAN, Theodore L; LAVINE, Adrienne S. Incropera - Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa. 8ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2019.
- [3] ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J. Transferência de calor e massa: uma abordagem prática. 4ª edição. São Paulo: Mc Graw Hill, 2012.
- [4] GARCIA, Renato Letizia. Transferência de calor e massa: Fusão de uma placa de gelo. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, vol. 39, nº 3, 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/JBskqJRDNCQJhJkzh53B9Rh/?lang=pt>. Acesso em: 8 de agosto de 2022.
- [5] KAUFMAN, J. Gilbert. Fire resistance of aluminum and aluminum alloys. **Materials Park, OH: ASM International**, 2016.
- [6] KREITH, Frank; MANGLIK, Raj M.; BOHN, Mark S. Princípios de transferência de calor - Tradução da 7ª edição norte-americana. São Paulo: Cengage Learning, 2016.
- [7] TecQuipment Ltd. TD1002 Heat Transfer Experiments User Guide. 2012. 66 p.