

PRÁTICA 4 - CONDUÇÃO DE CALOR TRANSIENTE

LUIZ AUGUSTO DEMBICKI FERNANDES¹; PEDRO FRANCISCO DUARTE²; MANOELA SABRINE VIEIRA³,
VICTOR GUSTAVO DURAU⁴; THIAGO ZAGONEL DE LINHARES⁵

Prof. Fernando Voll

Fenômenos de Transporte Experimental II – TQ084

Universidade Federal do Paraná

¹Discentes do curso de Engenharia Química da UFPR

Grupo F-2

Resumo

O presente experimento teve como objetivo estudar a transferência de calor por convecção através da imersão de um sólido em diferentes fluidos que estavam a temperaturas consideravelmente inferiores. Mediu-se a temperatura do sólido em função do tempo com uso de um termômetro e um cronômetro. Assim, em posse de informações sobre algumas propriedades térmicas do objeto e dos fluidos, obteve-se a relação entre a temperatura adimensional θ do sólido e o tempo decorrido através da resolução numérica de uma equação diferencial, e o gráfico resultante foi comparado com os valores obtidos experimentalmente.

Palavras-chave: Transferência de calor, convecção, equação diferencial.

Abstract

The present experiment had the objective of studying the convective heat transfer by immersing a solid in different fluids, which were at considerably lower temperatures. The solid's temperature as a function of time was measured using a thermometer and a chronometer. Thus, through data with respect to some thermal properties of the solid and the fluids, the relationship between the solid's dimensionless temperature θ and the elapsed time was obtained via the numerical solution of a differential equation, and its resulting graph was compared to the experimentally obtained values.

Keywords: Heat transfer, convection, differential equation.

1. Introdução

A condução de calor transiente, ou transferência de calor transiente, é um fenômeno de extrema importância em diversas áreas da ciência e engenharia. Ela descreve o processo de transferência de calor que ocorre em um sistema quando há variações de temperatura com o tempo, diferentemente da condução de calor em estado estacionário, em que as condições de temperatura permanecem constantes ao longo do tempo, ou seja, a distribuição de temperaturas em um determinado sistema é variável.

Esse tipo de fenômeno térmico é encontrado em uma ampla gama de aplicações práticas. Por exemplo, no campo da engenharia de materiais, entender a condução de calor transiente

é crucial para a otimização de processos de soldagem, tratamentos térmicos e fabricação de peças. Em dispositivos eletrônicos, essa análise é fundamental para projetar sistemas de resfriamento eficientes e garantir o bom funcionamento dos componentes. Ainda, a condução de calor transiente também desempenha um papel vital na análise e projeto de sistemas de transferência de calor, como trocadores de calor, sistemas de refrigeração e isolamento térmico. Ao compreender como o calor se propaga e se dissipa em tais sistemas, é possível melhorar a eficiência energética, evitar danos causados pelo superaquecimento e garantir a segurança operacional.

Este relatório tem como objetivo explorar os conceitos-chave relacionados à condução de calor transiente, discutindo suas aplicações

práticas, características e as principais ferramentas e métodos utilizados para sua análise. Ao compreender e dominar esses fundamentos, será possível realizar análises mais precisas e tomar decisões embasadas em projetos e processos que envolvam a transferência de calor transiente.

2. Objetivos

2.1. Objetivo geral

Obter e analisar um fenômeno de transferência de calor por convecção natural para a água, o azeite e o ar e, a partir deles, determinar os valores para o coeficiente de transferência de calor para cada caso, a fim de identificar como os perfis de temperatura em função do tempo variam com as propriedades dos fluidos.

2.2. Objetivos específicos

Com base nas informações de tempo e temperatura obtidas no experimento, fazer os gráficos de

$\theta(t)$ versus t para cada fluido e comparar com os do modelo de parâmetros concentrados.

3. Materiais e métodos

3.1. Material

Na prática, foram utilizados os seguintes materiais: termopar 101 sem proteção soldado em sua extremidade; soprador térmico; celular; cronômetro digital; ar; água; azeite de oliva.

3.2. Procedimento experimental

A prática teve início com o aquecimento da esfera soldada na ponta do termopar por meio da utilização de um soprador térmico. Em seguida, a esfera ficou em contato com o ar a fim de ser resfriada e, consecutivamente, limpa, haja vista que o procedimento precisou ser repetido também para a água e o óleo, nessa ordem. O resfriamento foi filmado com o celular e as medidas de tempo e temperatura foram extraídas do vídeo.

4. Resultados

O vídeo capturado pelo celular permitiu a extração dos dados para a variação da temperatura da esfera com o tempo a partir de sua

imersão em água, ar e azeite que serviram para a confecção das tabelas 1, 2 e 3, dispostas abaixo.

A TABELA 1 contém as informações de temperatura em cada instante de tempo a partir da imersão da esfera em água.

TABELA 1 – Variação da temperatura com o tempo imerso em água

Tempo (s)	Temperatura (°C)	Tempo (s)	Temperatura (°C)
25,8	147,1	39,4	20,9
26,6	141,8	41,0	20,7
27,5	74,5	42,2	20,5
28,9	36,2	43,2	20,4
30,5	28,1	44,8	20,2
32,0	25,1	47,5	20,1
33,2	23,4	50,6	20,0
34,8	22,4	52,0	19,9
35,1	21,8	60,0	19,8
37,8	21,3		

FONTE: Os autores (2023).

Já a TABELA 2, menciona os resultados experimentais para o ar.

TABELA 2 – Variação da temperatura com o tempo imerso em ar

Tempo (s)	Temperatura (°C)	Tempo (s)	Temperatura (°C)
19,8	152,9	73,3	52,5
21,3	147,9	74,8	51,3
22,8	142,6	76,0	50,1
24,3	137,8	77,6	49,0
25,6	132,8	79,0	48,0
27,2	128,3	80,4	47,0
28,6	122,0	81,6	46,0
30,1	120,1	83,2	45,0
31,6	116,5	84,6	44,1
33,0	112,9	86,2	43,2
34,5	109,3	87,6	42,5
36,0	106,3	89,0	41,7
37,4	103,3	90,5	40,9
38,8	100,5	92,0	40,2
40,1	97,6	93,3	39,5
41,6	94,8	94,8	38,9
43,0	92,1	96,2	38,3
44,5	89,5	97,6	37,8
46,0	86,8	99,0	37,1
47,4	84,3	100,5	36,5
48,8	81,9	102,0	35,9
50,3	79,7	103,6	35,5
51,8	77,6	104,8	34,9
53,3	75,5	106,0	34,5
54,6	73,4	107,6	34,1
55,2	71,5	109,0	33,8
57,6	69,6	110,6	33,3
58,9	67,9	112,0	32,9
60,4	66,1	113,4	32,5

61,8	64,4	114,8	31,9
63,3	62,8	116,3	31,6
64,7	61,1	117,6	31,2
66,2	59,6	119,0	30,9
67,6	58,0	120,6	30,6
68,9	56,5	122,0	30,3
70,4	55,1	123,3	29,9
72,0	53,8		

FONTE: Os autores (2023).

Enquanto, a TABELA 3, por sua vez, expressa a variação da temperatura com a variação do tempo.

TABELA 3 – Variação da temperatura com o tempo imerso em azeite

Tempo (s)	Temperatura (°C)	Tempo (s)	Temperatura (°C)
20,8	139,6	63,0	23,4
21,4	135,3	64,5	23,2
22,8	99,5	65,8	23,1
24,3	78,4	67,4	22,9
25,8	67,0	68,8	22,7
27,0	58,5	70,2	22,6
28,6	52,1	71,6	22,5
30,0	47,3	73,0	22,4
31,5	43,4	74,5	22,3
32,8	40,3	76,0	22,2
34,3	37,8	77,4	22,1
35,8	35,6	78,8	22,0
37,1	33,9	80,1	21,9
38,6	32,6	81,6	21,8
40,2	31,4	84,5	21,6
41,4	30,3	85,9	21,5
43,0	29,3	90,2	21,4
44,3	28,6	93,0	21,3
45,8	27,8	97,4	21,2
47,3	27,3	98,8	21,1
48,6	26,7	102,0	21,0
50,0	26,2	107,4	20,9
51,6	25,8	111,6	20,8
53,0	25,4	121,6	20,7

54,5	25,0	127,4	20,6
56,0	24,7	141,6	20,5
57,3	24,4	158,8	20,4
58,8	24,1		
60,2	23,9		
61,6	23,6		

FONTE: Os autores (2023).

4.1. Solução numérica e comparação com dados experimentais

Tendo em mente os resultados observados, foi utilizado o método Runge-Kutta de quarta ordem para a obtenção de uma solução numérica para o problema. Com modelagem de parâmetros concentrados, foi utilizado um intervalo de tempo de 150 segundos e o software Scilab na resolução numérica do problema. A partir da solução numérica e dos dados experimentais foram confeccionados os gráficos de Theta variando com o tempo (t) apresentados nos gráficos 1, 2 e 3, em que os pontos vermelhos indicam os dados experimentais e as curvas azuis representam a solução numérica para os respectivos fluidos indicados.

Para tanto é utilizado a definição de Runge Kutta, para um problema de valor inicial:

$$\frac{dy}{dt} = f(t, y), y(t_0) = y_0 \quad (1)$$

Temos as seguintes equações para RK4:

$$y_{n+1} = y_n + \frac{h}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (2)$$

Em que k_1, k_2, k_3 e k_4 são calculados da seguintes formas:

$$k_1 = f(t_n, y_n) \quad (3)$$

$$k_2 = f(t_n + \frac{h}{2}, y_n + h \frac{k_1}{2}) \quad (4)$$

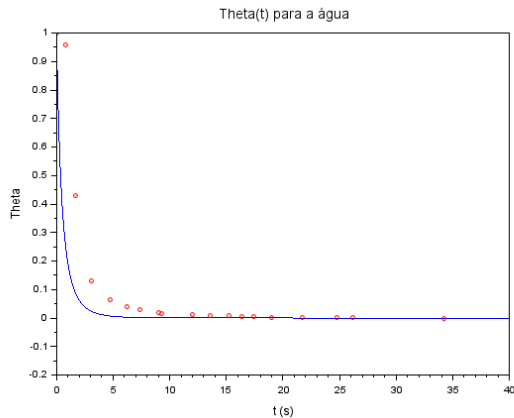
$$k_3 = f(t_n + \frac{h}{2}, y_n + h \frac{k_2}{2}) \quad (5)$$

$$k_4 = f(t_n + h, y_n + h k_3) \quad (6)$$

No qual h é o passo.

O GRÁFICO 1 representa a variação de theta com o tempo para a água, a partir dos dados experimentais e obtidos por meio da solução numérica.

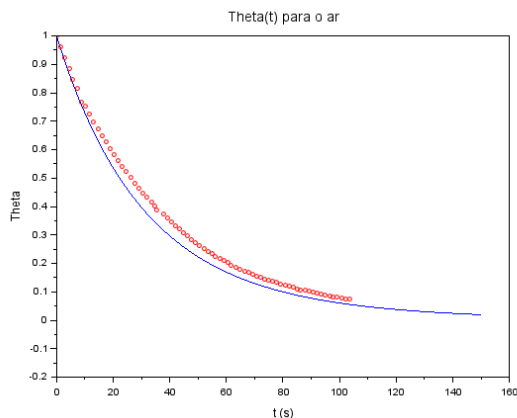
GRÁFICO 1 – SOLUÇÃO NÚMERICA E
EXPERIMENTAL, ÁGUA



FONTE: Os autores (2023).

Ainda, foi confeccionada a GRÁFICO 2 com a variação do theta com o tempo para o ar.

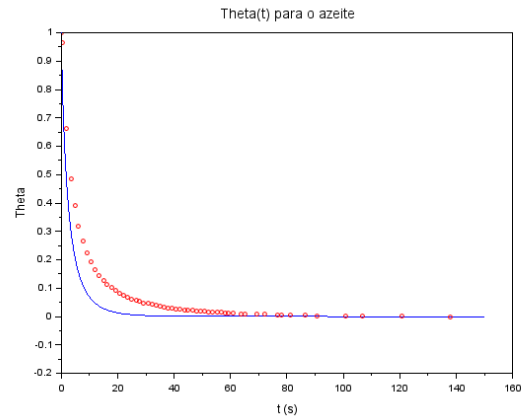
GRÁFICO 2 - SOLUÇÃO NÚMERICA E
EXPERIMENTAL, AR



FONTE: Os autores (2023).

Por fim, no GRÁFICO 3 estão os comportamentos obtidos por meio da solução numérica e dados experimentais para a variação de theta com o tempo.

GRÁFICO 3 - SOLUÇÃO NÚMERICA E
EXPERIMENTAL, AZEITE



FONTE: Os autores (2023).

5. Discussão

A taxa transferência de calor entre um objeto e o ambiente irá depender da diferença de temperatura entre o objeto e o meio ao seu redor. Quando o objeto e o ambiente são mantidos em temperatura constante, a taxa de transferência será constante. No entanto, à medida que um objeto resfria a ΔT diminui. Isso diminui a taxa de mudança na temperatura e faz com que a variação da T com o tempo não apresente um comportamento linear.

No experimento realizado, a esfera de metal troca muito mais calor por convecção do que por outros mecanismos, então é possível tratar o experimento como troca exclusivamente por convecção. Além disso, a esfera tem volume pequeno e é feita de material condutor, logo a condução de calor no interior da esfera deve ser muito mais rápida que a troca convectiva na superfície, o que permite considerar que a T é homogênea em toda a esfera.

Segundo descrito em Incropera et. Al (2008), uma relação para o comportamento da temperatura ao longo do tempo pode ser obtida igualando a taxa de transferência de calor na superfície com a taxa de variação da energia interna do sólido.

$$-h \cdot A(T - T_{\infty}) = \rho \cdot V \cdot C_p \cdot \frac{dT}{dt} \quad (7)$$

Substituindo a diferença entre as temperaturas por Theta, e rearranjando foi obtida a expressão da equação 7.

$$-\frac{h \cdot A}{\rho \cdot V \cdot C_p} = \frac{1}{\theta(t)} \cdot \frac{dT}{dt} \quad (8)$$

A equação 6 é uma equação diferencial, no entanto ela não pode ser resolvida analiticamente, pois o valor de C_p varia em função da temperatura, que varia em função do tempo. O valor de h também irá variar ao longo do tempo, pois depende da densidade e de viscosidade do fluido que em contato com a superfície do sólido. Por isso foi necessário o uso de um método computacional para obter a solução.

Entretanto, se simplificarmos o problema considerando que h e C_p são constantes, a equação diferencial pode ser resolvida de forma analítica. Na equação 8 o termo do lado direito foi substituído pelo parâmetro b e os dois lados da expressão são integrados em relação ao tempo.

$$\int_{t_1}^{t_2} -b \cdot dt = \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{\theta} \cdot \frac{dT}{dt} \cdot dt \quad (9)$$

$$-bt + C = \ln \theta$$

$$\theta(t) = C_2 \cdot e^{-bt}$$

Aplicando a condição inicial, de θ em $t = 0$ s, obtém-se uma aproximação para o comportamento da temperatura em função do tempo, representado na equação 9. A expressão obtida apresenta a variável t no expoente, o que indica que o gráfico deve ter comportamento exponencial. O sinal negativo no expoente indica que o valor de θ irá reduzir com o tempo, tendendo a 0 em $t = \infty$, quando a temperatura da esfera e do fluido se igualam.

$$\theta(t) = \theta_0 \cdot e^{-bt} \quad (10)$$

Nas figuras 1, 2 e 3, pode-se observar que o comportamento dos dados experimentais e das funções obtidas é compatível com o esperado para essa função. Nos três gráficos os pontos experimentais estão localizados mais à direita que a solução obtida. Esse achado provavelmente se deve ao atraso na medida do termômetro, visto que o intervalo de tempo em que todo o resfriamento ocorreu é curto, então pequenas diferenças no dado experimental apresentam um efeito relativamente grande.

Também é possível observar a diferença no tempo necessário para o resfriamento nos três fluidos. Conforme esperado, o tempo de resfriamento no ar foi mais prolongado, o que se deve a um coeficiente convectivo mais baixo no ar, pois o ar tem densidade e C_p pequenos. A água apresentou o menor tempo de resfriamento, com uma queda mais acentuada no gráfico, enquanto o azeite apresentou um comportamento parecido com o da água, mas com um tempo de resfriamento

mais prolongado. Isso se deve às diferenças nas propriedades dos dois líquidos. A água apresenta uma densidade maior que a do azeite e também uma viscosidade menor, o que favorece o movimento do líquido e uma troca de calor mais rápida.

6. Conclusões

Analizando os resultados, foi possível observar o fenômeno da convecção natural para ar, água e o óleo, e diante dos resultados obtidos nas simulações matemáticas em comparação às curvas experimentais plotadas com os dados do laboratório, foi possível demonstrar a aplicação dos assuntos estudados em fenômenos de transferência de calor de maneira a demonstrar o comportamento no perfil de temperatura durante o resfriamento de um sólido utilizando diferentes fluidos.

Com o experimento foi possível observar os aspectos do fluido que provocam essa diferença no tempo de troca de calor entre fluido e sólido, sobretudo, os fenômenos que facilitam ou dificultam a transferência de calor. O fluido que melhor desempenhou a troca térmica foi a água com sua baixa viscosidade, alta capacidade calorífica e densidade moderada, seguida pelo óleo, com um desempenho um pouco inferior e, por fim, o ar que mostrou-se um péssimo fluido para a troca térmica, haja vista sua baixíssima densidade e capacidade calorífica, características muito negativas para desempenhar essa função. Consequentemente, o ar serve melhor como isolante do que como condutor térmico.

Referências

- CHASE M.W., Jr. NIST-JANAF Thermochemical Tables, Fourth Edition, **J. Phys. Chem. Ref. Data.** 9 ed, 1998, p. 1-1951.
- INCROPERA, F.P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de transferência de calor e de massa.** 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- JANNA, W. S.; **Projetos de sistemas fluidotérmicos.** São Paulo: Cengage Learning, 4 ed. 2016.
- SMITH, J.M.; VAN NESS, H.C.; ABBOTT, M.M. **Introdução à termodinâmica da engenharia química.** 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

CALLISTER, W. D.; **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.