

DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO NATURAL E FORÇADA EM UM CORPO DE ALUMÍNIO

Luana Nascimento Silva ¹
Samuel Brito Ferreira Santos ²
Isaac Conceição Silva Paixão ³
Tamires dos Santos Pereira ⁴
Laercio Gomes de Oliveira ⁵

RESUMO

O coeficiente convectivo de transferência de calor, h , segundo a lei do resfriamento de Newton, é a variável de maior importância para se obter a quantidade de calor transferida de uma superfície para um fluido ou de um fluido para uma superfície. O problema central da convecção é a determinação do valor de “ h ”, que depende de muitos fatores, dentre eles: a dimensão que domina o fenômeno de convecção; viscosidade dinâmica do fluido; densidade de expansão volumétrica; velocidade do fluido; aceleração da gravidade e a diferença de temperatura entre a superfície e o fluido. O coeficiente convectivo, é essencial para controle e projeto de processos térmicos que envolvam os mecanismos da convecção. O trabalho em questão teve como finalidade a determinação do coeficiente convectivo de forma experimental, através da convecção natural e forçada para o corpo de alumínio, onde os fluidos para a convecção natural eram o ar e água e para a convecção forçada o fluido era o ar, através de um ventilador. Com base nesse contexto, os resultados para a convecção natural e forçada do alumínio foram 9,98; 75,7 ;14,09.

Palavras-chave: Coeficiente convectivo, transferência de calor, convecção, alumínio, calor.

INTRODUÇÃO

O coeficiente de transferência de calor por convecção, h , segundo a lei do resfriamento de Newton, é a variável de maior importância para se obter a quantidade de calor transferida de uma superfície para um fluido ou de um fluido para uma superfície.

O coeficiente h é uma função complexa de uma série de variáveis relacionadas na seguinte expressão: $h = f(D, \mu, \rho, Cp, k, \delta, V, g, \Delta T)$. onde: D é a dimensão que domina o

¹ Graduanda do Curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande - PB, luana.nascimento25@hotmail.com;

² Graduando do Curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande - PB, samuelbritof@gmail.com;

³ Graduado pelo Curso de Engenharia de Controle e Automação de Processos da Universidade Federal da Bahia - BA, isaacpaixao@hotmail.com;

⁴ Doutoranda pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande - PB, tsantosp16@gmail.com;

⁵ Professor orientador: Doutor, Unidade Acadêmica de Engenharia Química - PB, laercio.gomes@ufcg.edu.br;

fenômeno de convecção; μ a viscosidade dinâmica do fluido; ρ a densidade do fluido; C_p o calor específico do fluido; k a condutividade térmica do fluido; δ e o coeficiente de expansão volumétrica; V a velocidade do fluido; g a aceleração da gravidade e ΔT é a diferença de temperatura entre a superfície e o fluido. Uma equação que considera estes parâmetros seria extremamente complexa.

O problema é, então, contornado dividindo-se o estudo em casos particulares. Para cada caso são obtidas equações empíricas, correlações, através de técnicas de análise dimensional combinada com experiências, onde os coeficientes de películas são calculados a partir de equações empíricas obtidas correlacionando-se dados experimentais com o auxílio de análise dimensional. Os resultados são obtidos na forma de equações dimensionais conforme o regime de escoamento (INCROPERA, 2008).

Para alguns casos simples, pode-se calcular o h analiticamente; entretanto, para as situações mais complexas, este é determinado experimentalmente (HOLMAN, 2010). Ademais, existe ainda a possibilidade de se determinar o h a partir de métodos numéricos (GOMES, 2015; LEDEZMA; BEJAN, 1996).

Tendo em vista as inúmeras variáveis que influenciam no cálculo do h , não existem tabelas para se obter o coeficiente convectivo. Em geral, na maioria das aplicações da engenharia, o h é determinado experimentalmente (MIRANDA JR., 2010; MIRANDA JR.; GONÇALVES, 2012). A relevância de se determinar o coeficiente convectivo para uma situação particular, dentro uma faixa de precisão, é fundamental para uma delimitação adequada as necessidades térmicas em um estudo.

O processo de transmissão de energia pela ação combinada da condução de calor, armazenamento de energia e movimento de mistura chama-se convecção. Convecção e condução são similares no quesito de ambas necessitarem da presença de um meio físico para se propagar. Porém, são diferentes, uma vez que a convecção exige a presença de movimentação de fluido.

Ocorre propagação por convecção, quando a troca de calor abrange contato térmico entre fluido em movimento relativo e uma superfície. A convecção pode ser:

a) Natural: o movimento do fluido é gerado pela própria transferência de calor. Em um fluido sujeito a um gradiente de temperatura, haverá gradientes de massa resultantes que, na existência de uma força de campo, poderão resultar em um movimento macroscópico do fluido;

b) Forçada: O movimento do fluido é provocado por uma fonte de energia externa (bomba, ventilador e etc.) que possibilita estabelecer uma escala de velocidade típica: U_{∞} - velocidade longe da parede [m/s].

Lei do Resfriamento de Newton

No ano de 1701, Newton publicou anonimamente um artigo intitulado “Scala Graduum Caloris”, onde descreve um método para medir temperaturas de até 1000 °C, algo impossível aos termômetros da época (SOUZA, 2007). O método era fundamentado no que atualmente recebeu o nome de “lei do resfriamento de Newton” que afirma que “a taxa de variação temporal da temperatura de um corpo é proporcional à diferença de temperatura entre o corpo e o meio circundante” (BRONSON; COSTA, 2008)

Em termos matemáticos a lei do resfriamento pode ser escrita como:

$$H = \frac{\Delta Q}{\Delta T} = hA\Delta T \quad (1)$$

Onde:

- H é a potência térmica transferida por convecção, em W;
- h coeficiente de convectivo, em $W/m^2\text{°C}$;
- A é a área da superfície, em m^2 ;
- ΔT é a diferença de temperatura entre a superfície e o fluido, em °C ou K.

Análise Global

Na análise global, considera-se que a distribuição de temperatura dentro do sólido, em qualquer instante seja bastante uniforme, de modo que a temperatura do sólido possa a ser considerada função exclusiva do tempo, isto é, $T(t)$. A equação da energia na transferência de calor no sólido pode ser escrita como a igualdade entre a taxa de transferência de calor por convecção e o aumento da energia interna do sólido, cuja equação é:

$$-\frac{dT}{d\tau} = \frac{hA(T_0 - T_{\infty})}{\rho C_p V} \quad (2)$$

Número de Biot

O número de Biot (B_i) é um parâmetro adimensional e representa a razão entre o coeficiente convectivo de calor na superfície do sólido e a condutância específica do sólido. A hipótese de temperatura uniforme no interior do sólido é válida se a condutância específica do sólido for muito maior do que o coeficiente de convectivo de calor.

$$B_i = \frac{hL_s}{k_s} \quad (3)$$

Onde:

L_s = comprimento característico; $L_s = V/A$ (volume/área)

h = coeficiente convectivo de calor

k_s = coeficiente condutivo de calor

O Biot é usado para definir o método a ser utilizado na solução de problemas de Transferência de calor transiente. Se $B_i \geq 0,1$: usa-se as cartas de temperatura transiente e se $B_i < 0,1$: usa-se a Análise Global.

A pesquisa teve como objetivos:

- a) Determinação experimental do coeficiente de transferência de calor, por convecção natural e forçada;
- b) Comparação dos valores de h , para a convecção natural e força;
- c) Comparação do resultado experimental com resultados obtidos através de correlações empíricas e da literatura.

METODOLOGIA

Os experimentos desta pesquisa foram realizados nas dependências do Laboratório de Engenharia Química IV- LEQ IV, da Unidade Acadêmica de Engenharia Química, pertencente ao Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande, sob a orientação do Prof. Dr. Laercio Gomes de Oliveira.

Materias

- a) Termopar tipo J (Ferro- Constantan);
- b) Garrafa térmica contendo gelo;

- c) Becker contendo água;
- d) Banho termostático;
- e) Corpo de prova de alumínio(paralelepípedo), de dimensões 11,2x7,6x2(cm);
- f) Termômetro;
- g) Balança analítica;
- h) Ventilador, com velocidade de 1,5 m/s

Metodologia

O experimento seguiu a seguinte ordem:

- i. Banho termostático;
- ii. Corpo conectado ao termopar e exposto ao fluido;
- iii. Aferições da diferença de potencial (mV);
- iv. Enceramento do banho termostático quando a temperatura do corpo for igual a temperatura do fluido.

DESENVOLVIMENTO

Curva de calibração

Para transformar as medidas observadas pelo termopar tipo “J” em mV através do voltímetro para temperatura em graus Celsius, foi realizada uma interpolação destas medidas, utilizando os dados da Tabela 1

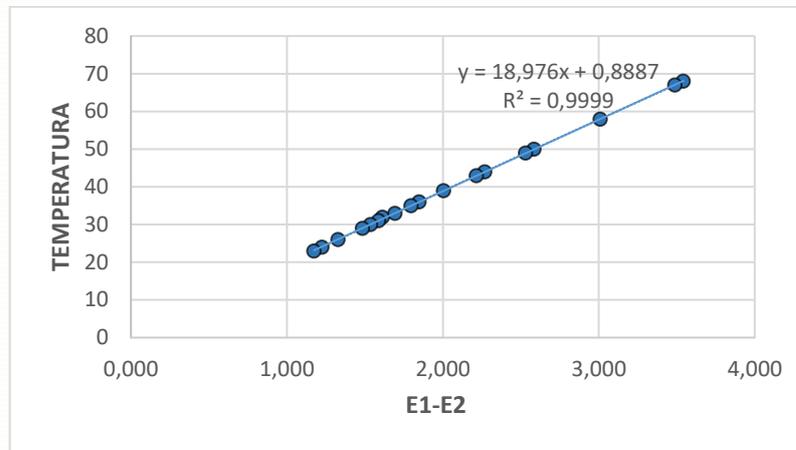
Tabela 1 -Dados da literatura para termopar tipo J (Ferro – Constantan)

$E_1 - E_2$	1,797	1,639	1,614	1,589	1,537	1,485	1,329	1,226	1,174
mV	35	33	32	31	30	29	26	24	23
$E_1 - E_2$	3,543	3,489	3,009	2,585	2,532	2,269	2,216	2,006	1,849
mV	68	67	58	50	49	44	43	39	36

Com os dados da Tabela 1, plotou-se o gráfico da Figura 1 para obtermos uma equação de curva de calibração, para em seguida convertemos dados de ddp (mV) em temperatura (°C). Observa-se pela Figura 1, que a equação obtida no ajuste é:

$$y = 18,976 * x + 0,8887 \quad (4)$$

Figura 1 – Curva de calibração



Fonte: Próprio autor (2018)

Convecção natural

Ar

Para a determinação do coeficiente convectivo, por meio da convecção natural no ar, inicialmente a temperatura do ar foi aferida em 25,9°C. O corpo de prova de alumínio foi posto em um banho termostático, até atingir a temperatura final de 85,7°C. Após atingir essa temperatura o corpo foi conectado ao termopar tipo J e exposto ao ar. Foram registrados os potenciais elétricos em intervalos de tempo de 10, 20, 30, 40, 50 e 60s, até o corpo atingir uma temperatura de equilíbrio de 25,9°C. Após isso as leituras de ddp's foram convertidas em graus Celsius.

Água

Para a determinação do coeficiente convectivo, por meio da convecção natural na água, inicialmente a temperatura da água foi aferida em 26,5°C. O corpo de prova de alumínio foi posto em um banho termostático, até atingir a temperatura final de 87,5°C. Após atingir essa temperatura, o corpo de Alumínio foi conectado ao termopar tipo J e mergulhado em um Becker contendo 608,48 mL de água. Foram registrados os potenciais elétricos em intervalos de tempo de 10, 20, 30, 40s, até o corpo atingir uma temperatura de equilíbrio de 29,9°C. Após isso as leituras de ddp's foram convertidas em graus Celsius.

Convecção forçada

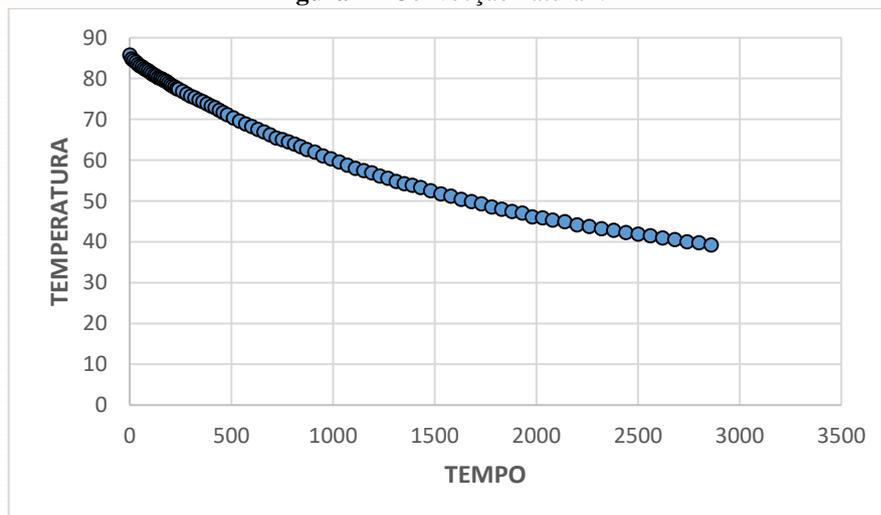
Ar

Para a determinação do coeficiente convectivo, por meio da convecção forçada no ar, inicialmente a temperatura do ar foi aferida em $25,9^{\circ}\text{C}$. O corpo de prova de alumínio foi posto em um banho termostático, até atingir a seguinte temperatura final de $85,7^{\circ}\text{C}$. Após atingir essa temperatura, o corpo foi conectados ao termopar tipo J e exposto ao ar proveniente de um ventilador, cuja velocidade era de $1,5\text{ m/s}$. Foram registrados os potenciais elétricos em intervalos de tempo de 10, 20, 30, 40, 50s, até o corpo atingir uma temperatura de equilíbrio de $26,13^{\circ}\text{C}$. Após isso as leituras de ddp's foram convertidas em graus Celsius.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

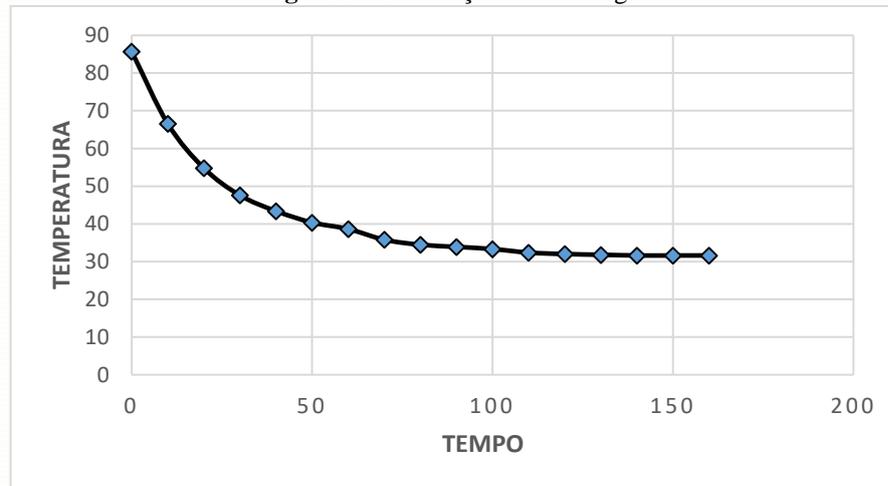
Com os dados de temperatura e tempo coletados dos experimentos de convecção natural e forçada para este metal, construiu-se as curvas de resfriamento, para cada um dos experimentos. Os gráficos obtidos demonstram a dinâmica do comportamento do resfriamento em função do tempo. Observa-se através dos gráficos, que a temperatura do corpo apresenta um decaimento polinomial, com uma tendência de atingir uma temperatura de equilíbrio, em um determinado tempo.

Figura 2 - Convecção natural :Ar



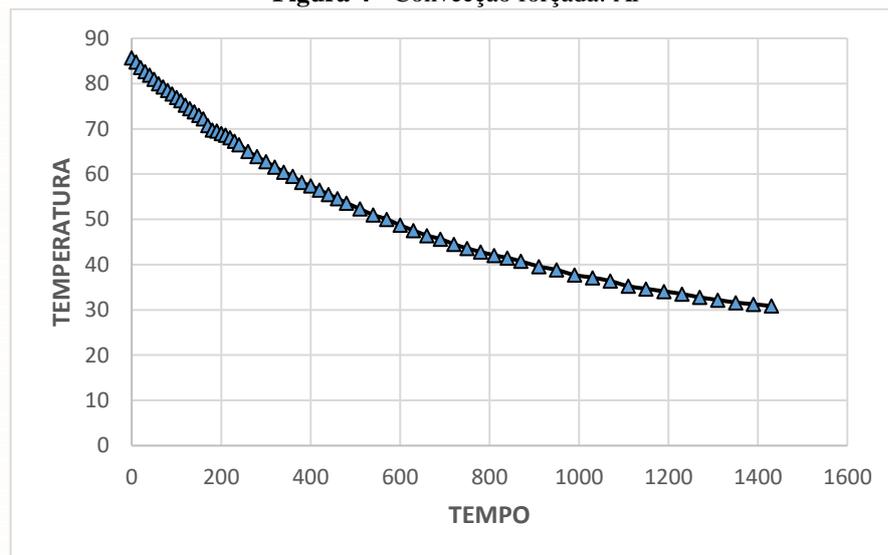
Fonte: Próprio autor (2018)

Figura 3 - Convecção natural: Água



Fonte: Próprio autor (2018)

Figura 4 - Convecção forçada: Ar



Fonte: Próprio autor (2018)

A partir dos gráficos é realizado o ajuste não linear dos dados dos experimentos de convecção natural e forçada, para o metal Alumínio. Após vários testes, selecionamos os modelos que mais se adequassem aos dados experimentais. Os modelos escolhidos para os experimentos foram:

$$T = -9x10^{-10}t^3 + 8x10^{-6}t^2 - 0,0319t + 84,716 \quad (5)$$

$$T = -5x10^{-5}x^3 + 0,0145x^2 - 1,4629x + 81,89 \quad (6)$$

$$T = -5x10^{-16}t^5 + 9x10^{-12}t^4 - 4x10^{-8}t^3 + 8x10^{-5}t^2 - 0,0966t + 85,661 \quad (7)$$

Onde 5, 6 e 7 são as Equações dos modelos dos ajustes para o experimento de convecção natural no ar e na água, e para o experimento de convecção forçada no ar, que estão representados pelas Figuras 2, 3 e 4.

Para o cálculo do coeficiente convectivo de troca de calor do metal, utilizou-se a metodologia da análise global, na qual admite-se que a distribuição de temperatura dentro do sólido, em qualquer instante seja suficientemente uniforme, de tal modo que a temperatura do sólido passa a ser considerada dependente do tempo.

Assume-se que ao final dos experimentos, a temperatura do corpo de alumínio seja a mesma do fluido de contato, no caso dos experimentos de convecção natural, ar e água, cuja temperatura inicial era 25,9°C e 29,9°C, respectivamente, e no experimento de convecção forçada, ar, cuja temperatura inicial era 25,9°C.

No experimento de convecção natural no ar e na água, o corpo metálico levou em média 4060 e 110 segundos, respectivamente, para atingir a temperatura de equilíbrio e no experimento de convecção forçada no ar, o corpo metálico levou em média 1580 segundos para atingir a temperatura de equilíbrio.

Como a temperatura do sólido é uma função exclusiva do tempo, obtida no ajuste não linear, determinou-se a temperatura de equilíbrio, com o tempo de 4160 e 110 segundos para o experimento da convecção natural no ar e na água e 1580 segundos para o experimento de convecção forçada no ar.

Derivando as Equações 5, 6 e 7, obtidas nos ajustes não lineares, para obtermos a taxa de resfriamento do metal nos tempos de equilíbrio, obtém-se três novas equações, cada uma referente a um experimento e o valor das taxas de resfriamento nos tempos de equilíbrio.

Assumindo que a taxa de transferência de calor por convecção é igual ao aumento da energia interna do sólido, é calculado o valor do coeficiente convectivo para a convecção natural no ar e água e para a convecção forçada no ar.

Através dos valores do coeficiente de transferência de calor encontrado para o Alumínio, calculou-se o número de Biot para verificar se método utilizado na solução do problema de transferência de calor transiente, é consistente. Como em todos os casos o valor do número de Biot foi menor que 0,1 comprova-se que a metodologia da análise global, se mostrou adequada para a determinação do coeficiente convectivo de transferência de calor para o Alumínio em diferentes situações.

Os resultados de todos os parâmetros calculados, descritos acima estão organizados da Tabela 2.

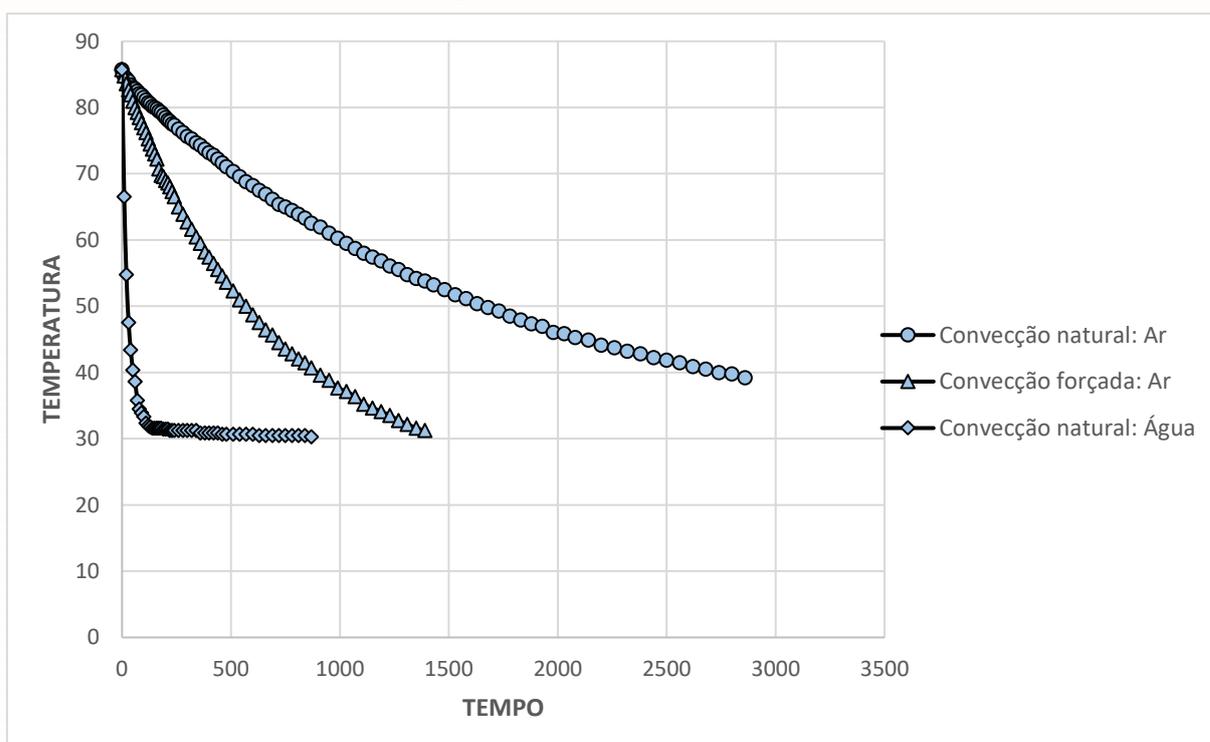
Tabela 2 - Resultado dos parâmetros

	T. Equilíbrio (°C)	t. Equilíbrio (s)	Taxa	H(w/m ² .°C)	Biot
Convecção natural: Ar	25,9	4060	-0,01207	9,98	0,000832
Convecção natural: Água	29,9	110	-0,0879	75,7	0,00632
Convecção forçada: Ar	25,9	1580	-0,01695	14,09	0,00117584

Fonte: Próprio autor (2018)

A Figura 5 apresenta os resultados de Temperatura versus Tempo, para os experimentos de convecção (Natural e Forçada) no ar e na água.

Figura 5 - Curvas de resfriamento



Fonte: Próprio autor (2018)

Com os resultados obtidos, observou-se na Figura 5, que nas mesmas condições, mudando apenas o tipo de convecção, a convecção forçada no ar necessita de um menor tempo para atingir a temperatura de equilíbrio se comparada a convecção natural no ar. A explicação para este comportamento, é que, o coeficiente convectivo na convecção forçada é maior do que na convecção natural. Como mencionado na revisão bibliográfica, h , é uma dependente de várias variáveis. Neste caso, a influência que explica este comportamento é a velocidade do fluido que afeta diretamente o valor do coeficiente convectivo.

Observa-se ainda, que a convecção natural, utilizando como fluido refrigerante a água, necessita-se de um tempo muito menor para atingir a temperatura de equilíbrio, se comparada a convecção natural no ar e forçada no ar. A explicação para este comportamento está associada ao maior valor do calor específico (c_p) da água e a condutividade térmica, quando comparados a dor ar, como apresentados pelas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 - Condutividade térmica

Condutividade térmica	W/(m.k)
Ar	0,026
Água	0,610

Fonte: Adaptado de Incropera et al (2008)

Tabela 4 - calor específico a 25°C

Calor específico	Cal/g.°C
Ar	0,240
Água	1,0

Fonte: Adaptado de Incropera et al (2008)

A Tabela 5 abaixo, apresenta a faixa de valores típicos para o coeficiente convectivo, para a convecção natural e forçada e para fluidos distintos.

Tabela 5 – Faixa de valores típicos do coeficiente convectivo

Processo	H(W/m ² .°C)
<i>Convecção Natural</i>	
Gases	2-25
Líquido	50-1000
<i>Convecção forçada</i>	
Gases	10-300
Líquido	60-25000

Fonte: Adaptado de Bird et al. (2007)

Fazendo uma análise comparativa entre os valores da Tabela 5 e da Tabela 2 apresentada anteriormente, pode-se constatar que os valores do coeficiente convectivo para o experimento realizado estão todos dentro das faixas apresentadas na Tabela 5.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através dos dados obtidos na realização dos experimentos para o corpo de Alumínio, podemos notar que a convecção natural na água, foi o processo mais eficiente em relação ao tempo para o resfriamento do corpo, dentre os realizados, seguido da convecção forçada no ar e por último a convecção natural no ar. Esse comportamento demonstra a influência do calor específico, da capacidade térmica e da velocidade do fluido no valor do coeficiente convectivo. Foram obtidos resultados ideais para o coeficiente convectivo e dentro da faixa de valores encontrados na literatura.

REFERÊNCIAS

BIRD, R. B; STEWART, W. E; LIGHTFOOT, P. T. **Transport phenomena (2nd ed.)**, John Wiley & Sons, New York, 2007.

BRONSON, R.; COSTA, G. **Equações Diferenciais – Coleção Schaum**. 3. ed. São Paulo: Bookman, 2008.

GOMES, L.A.C.N. **Estudo da transferência de calor por convecção natural em dissipadores usando OpenFoam**. 2015. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, 2015

HOLMAN, J. P. **Heat Transfer**. 10 ed. Mc Graw Hill, 2010

INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. 5. ed. John Wiley & Sons, 2008.

LEDEZMA, G.; BEJAN, A. **Heat sinks with sloped plate fins in natural and forced convection**. International Journal of Heat and Mass Transfer, 39 (9), p. 1773-1783, 1996)

MIRANDA JR., E.J.P. **Aulas práticas em termofluidodinâmica no Departamento de Mecânica e Materiais do curso de Engenharia Mecânica Industrial do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão**. 2010. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica Industrial) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão, Maranhão, 2010.

MIRANDA JR., E.J.P.; GONÇALVES, R.S. **Determinação experimental do coeficiente de transferência de calor por convecção**. Em: Anais do VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2012.

SOUZA, Luiz Fernando. **Um experimento sobre a dilatação térmica e a lei de resfriamento.**
2007. 25 f. TCC (Graduação) - Curso de Licenciatura em Física, Universidade Federal do Rio
de Janeiro, Rio de Janeiro- RJ, 2007