

Roteiro de experiência de laboratório:

# Transferência de calor por convecção

## 1 Introdução

A transferência de calor é energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperaturas no espaço. Seu estudo é fundamental em todos os ramos da engenharia e ela tem um papel crucial em aplicações como geração e transferência de energia, poluição ambiental, tratamento de materiais, conforto térmico de edificações, isolamento térmico, dissipação de calor em componentes eletrônicos, diversos dispositivos médicos, entre outros.

A transferência de calor pode ocorrer por três mecanismos distintos: condução, convecção e radiação, sendo que a convecção será objeto da experiência que será realizada nesta aula de laboratório. A convecção ocorre entre um fluido e uma fronteira sólida (ou entre dois fluidos), e tem como mecanismo físico uma combinação da difusão do calor na fronteira e o transporte de energia pelo movimento macroscópico (global) do fluido. Ela pode ser subdividida em convecção forçada, na qual o escoamento do fluido é imposto por fatores externos, e convecção natural, no qual o escoamento é causado pela ação da força peso num meio fluido com gradiente de massa específica originado por uma diferença de temperatura.

A experiência que será realizada lidará com convecção forçada e natural na transmissão de calor para e de uma esfera de alumínio.

## 2 Objetivos

A experiência tem como objetivos:

- a) Obter o coeficiente de troca de calor por convecção forçada num escoamento de água ao redor de uma esfera e comparar com o valor fornecido por correlações da literatura;
- b) Obter o coeficiente de troca de calor por convecção natural no resfriamento de uma esfera em ar quiescente e comparar com o valor fornecido por correlações da literatura.

## 3 Fundamentos

### 3.1 Convecção

O transporte de calor por convecção é regido pela lei de resfriamento de Newton,

$$q = \bar{h}A(T_{\infty} - T_s),$$

onde  $q$  é a taxa de calor transferido,  $\bar{h}$  é o coeficiente médio de troca de calor por convecção,  $A$  é a área da superfície onde ocorre a transferência de calor,  $T_{\infty}$  é a temperatura do fluido longe da superfície e  $T_s$  é a temperatura da superfície. O grande desafio da convecção está na determinação de  $\bar{h}$ , já que esta quantidade depende das propriedades do fluido e do escoamento. Portanto, varia com a geometria do corpo e com as condições do escoamento, especialmente

com o nível de turbulência do mesmo. A determinação do coeficiente de troca de calor por convecção usando técnicas analíticas só é possível em pouquíssimos casos. Na grande maioria das aplicações, é preciso lançar mão de correlações empíricas para a obtenção de  $\bar{h}$ .

Aplicando a análise dimensional, verifica-se que os parâmetros importantes da convecção podem ser agrupados em três números adimensionais. No caso da convecção forçada, esses números são:

$$\begin{aligned}\overline{Nu}_L &= \frac{\bar{h}L}{k_f} \rightarrow \text{Número de Nusselt} \\ Re_L &= \frac{VL}{\nu} \rightarrow \text{Número de Reynolds} \\ Pr &= \frac{\nu}{\alpha} \rightarrow \text{Número de Prandtl}\end{aligned}$$

onde  $L$  é um comprimento característico do escoamento,  $k_f$  é a condutividade térmica do fluido,  $V$  é a velocidade do fluido ao longe,  $\nu$  é a viscosidade cinemática do fluido, e  $\alpha$  é a difusividade térmica do fluido. Assim, as correlações experimentais são apresentadas na forma  $\overline{Nu}_L = \phi(Re_L, Pr)$ .

Nesta experiência, estudaremos a convecção forçada no escoamento de água ao redor de uma esfera. Para este escoamento, Whitaker (1972) propõe a seguinte correlação:

$$\overline{Nu}_D = 2 + \left(0,4Re_D^{1/2} + 0,06Re_D^{2/3}\right) Pr^{0,4} \left(\frac{\mu}{\mu_{\text{sup}}}\right)^{1/4}, \quad (1)$$

válida para  $3,5 < Re_D < 7,6 \times 10^4$ ,  $0,71 < Pr < 380$  e  $1,0 < (\mu/\mu_{\text{sup}}) < 3,2$ . Todas as propriedades são avaliadas à temperatura  $T_\infty$ , com exceção de  $\mu_{\text{sup}}$ , avaliada à temperatura  $T_s$ .

Já na convecção natural, o fluido não tem velocidade ao longe e o valor da massa específica do fluido em si não tem importância. Por outro lado, passam a ser importantes a aceleração da gravidade  $g$  e o coeficiente de expansão volumétrica térmica  $\beta$ , que é a taxa de variação da massa específica em resposta a uma variação de temperatura a pressão constante, ou seja,

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p.$$

Para gases ideais vale  $p = \rho RT$  e portanto

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial}{\partial T} \frac{p}{RT} \right)_p = \frac{1}{\rho} \frac{p}{RT^2} = \frac{1}{\rho T} = \frac{1}{T}.$$

Fazendo a análise dimensional, chega-se a  $\overline{Nu}_L = \phi(Ra_L, Pr)$ , onde o número de Rayleigh,  $Ra_L$ , é expresso por

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha}.$$

Nesta experiência, estudaremos a convecção natural em uma esfera sendo resfriada em ar ambiente quiescente. Para esta situação, Churchill (2002) propõe a seguinte correlação:

$$\overline{Nu}_D = 2 + \frac{0,589Ra_D^{1/4}}{[1 + (0,469/Pr)^{9/16}]^{4/9}}, \quad (2)$$

válida para  $Ra_D \leq 10^{11}$  e  $Pr \geq 0,7$ . Para esta correlação, as propriedades do fluido devem ser avaliadas à temperatura de filme,  $T_f \equiv (T_s + T_\infty)/2$ .

### 3.2 Método experimental para a determinação do coeficiente médio de transferência de calor por convecção

Nesta aula de laboratório, determinaremos experimentalmente coeficientes de transferência de calor por convecção e compararemos com os valores fornecidos pelas correlações apresentadas na seção 3.1. Para a determinação experimental dos coeficientes, utilizaremos o chamado *método de regime transiente*. Neste método será feita a análise do aquecimento ou resfriamento de um sólido, em regime transiente, admitindo-se que a resistência térmica de condução no interior do sólido é desprezível diante da resistência térmica de convecção na transferência de calor para o fluido adjacente. Isto é, no sólido tem-se uma temperatura uniforme que depende apenas do tempo, ou seja,  $T = T(t)$ , e a técnica conhecida como método da *análise concentrada* ou da *capacitância global* pode ser empregada na análise da transferência de calor.

A hipótese acima estabelecida é razoável sempre que o número de Biot for menor que 0,1 ( $Bi < 0,1$ ). O número de Biot é uma medida da importância relativa dos processos de transferência de calor e é expresso pela razão entre a resistência de convecção na transferência de calor para o fluido e a resistência de condução no interior do sólido,

$$Bi = \frac{\frac{L}{k_s A}}{\frac{1}{\bar{h} A}} = \frac{\bar{h} L}{k_s},$$

onde  $\bar{h}$  é o coeficiente médio de transferência de calor por convecção,  $k_s$  é a condutividade térmica do sólido e  $L$  é a dimensão característica de comprimento. Convém ressaltar a semelhança do número de Biot com o número de Nusselt. A diferença é que o número de Nusselt é uma relação entre as resistências de condução e convecção no fluido, enquanto que o número de Biot relaciona as resistências no sólido e no fluido.

Além do número de Biot, o número de Fourier,  $Fo$ , e um parâmetro adimensional de temperatura,  $\theta/\theta_i$  complementam as variáveis adimensionais de interesse quando do estudo da condução em regime transiente, com

$$Fo = \frac{\alpha_s t}{L^2}$$
$$\frac{\theta}{\theta_i} = \frac{(T - T_\infty)}{(T_i - T_\infty)}$$

onde  $T$  é a temperatura do sólido no instante  $t$ ,  $T_i$  a temperatura do sólido no instante inicial,  $T_\infty$  a temperatura do fluido ao longe, e  $\alpha_s$  a difusividade térmica do sólido dada por

$$\alpha = \frac{k_s}{\rho_s c_s}$$

com  $\rho_s$  sendo a massa específica do sólido e  $c_s$  o calor específico do sólido.

No método da análise concentrada, consideramos um corpo sólido, inicialmente a uma temperatura  $T_i$ , em um meio fluido infinito em estagnação ou em movimento uniforme, a uma temperatura  $T_\infty$ , e admitimos as seguintes hipóteses:

- i. a temperatura é uniforme no interior do sólido (incluindo a superfície) durante todo o tempo em que se efetua a troca de calor;
- ii. na superfície do sólido o fluido assume o valor da temperatura do sólido;
- iii. as propriedades físicas do sólido são constantes.

Aplicando a 1ª Lei da Termodinâmica para o sólido, escrita em termos de taxas, considerando que não haja realização de trabalho e que as variações de energia cinética e potencial sejam desprezíveis, temos

$$q = \frac{dU}{dt} = \rho_s \mathcal{V}_s c_s \frac{dT_s}{dt}, \quad (3)$$

onde  $q$  é a taxa de transferência de calor,  $U$  é a energia interna e  $\mathcal{V}_s$  o volume do sólido. Já a lei de resfriamento de Newton fornece

$$q_{\text{conv}} = \bar{h} A_s (T_\infty - T_s), \quad (4)$$

onde  $A_s$  é a área da superfície onde ocorre a troca por convecção e  $T_s$  a temperatura da superfície do sólido, que neste caso é igual à temperatura uniforme do sólido  $T$ . Substituindo a eq. (4) na eq. (3), obtemos

$$\rho_s \mathcal{V}_s c_s \frac{dT}{dt} = -\bar{h} A_s (T - T_\infty). \quad (5)$$

Definimos então uma variável auxiliar,  $\theta \equiv T - T_\infty$ , e fazemos uma mudança de variáveis na eq. (5), que rearranjada se torna

$$\frac{d\theta}{\theta} = -\frac{\bar{h}}{\rho_s c_s \mathcal{V}_s} A_s dt. \quad (6)$$

Integrando a eq. (6) entre o instante inicial,  $t = 0$  e um instante qualquer  $t$ , chegamos a

$$\int_{\theta_i}^{\theta} \frac{d\theta}{\theta} = -\frac{\bar{h}}{\rho_s c_s \mathcal{V}_s} A_s \int_0^t dt \quad \Rightarrow \quad \ln\left(\frac{\theta}{\theta_i}\right) = -\frac{\bar{h}}{\rho_s c_s \mathcal{V}_s} A_s t,$$

onde  $\theta_i \equiv T_i - T_\infty$ . Com base nesta equação, para um dado fluido e uma determinada condição de escoamento o valor de  $\bar{h}$  poderá ser obtido medindo-se a variação da temperatura do sólido ao longo do tempo, traçando um gráfico relacionando  $\ln(\theta/\theta_i)$  e calculando o coeficiente angular da reta de ajuste dos pontos, que será igual a  $-\bar{h} A_s / (\rho_s c_s \mathcal{V}_s)$ .

Observe ainda que se  $L = \mathcal{V}_s / A_s$ , teremos  $\ln(\theta/\theta_i) = -BiFo$ .

## 4 Aparato experimental

A bancada experimental é composta de dois reservatórios cilíndricos de água interconectados, como mostra a figura 1. No reservatório 1, ocorre o aquecimento e homogeneização da temperatura da água pela ação de uma resistência elétrica e de um misturador, respectivamente. No reservatório 2, que tem diâmetro interno  $D_t = 0,27$  m, ocorre o escoamento ao redor do corpo esférico para o qual se deseja determinar o coeficiente de troca de calor por convecção forçada,  $\bar{h}_f$ . A água flui do reservatório 1 para o 2 impulsionada por uma bomba, com vazão regulada por uma válvula e medida por um rotâmetro. No reservatório 2, a água primeiro passa por uma placa perfurada para regularizar perfil de velocidades antes de escoar através da esfera. Do reservatório 2, a água retorna para o reservatório 1 por uma tubulação inclinada onde escoar por ação da gravidade. Há também um suporte externo para posicionar a esfera para ser resfriada por convecção natural após a finalização das medições no banho de água. A esfera testada tem diâmetro  $D_e = 50,8$  mm e é feita de alumínio.

Nesta bancada são medidas as temperaturas do banho de água no reservatório 2, da esfera e do ar ambiente com o uso de um termômetro digital multicanal. Além disso, será necessário também utilizar um cronômetro para medição do tempo de aquecimento e resfriamento da esfera.

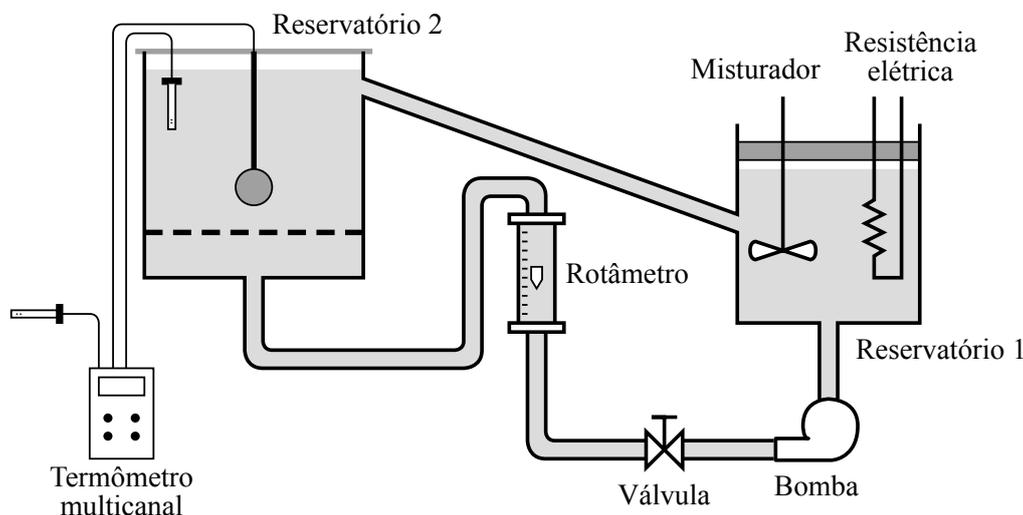


FIGURA 1 – Desenho esquemático da bancada experimental da experiência A.

## 5 Procedimento experimental

A tomada de dados desta experiência é relativamente rápida, levando somente alguns minutos para ser completada. O procedimento experimental é o seguinte:

1. Antes de começar a experiência, designar um membro do grupo para a leitura da temperatura, outro para cronometragem e outro para registro dos dados;
2. Verificar se a esfera está fora do banho e se sua temperatura está estável;
3. No início da experiência, conferir se a bomba está acionada e a resistência elétrica e misturador desligados e regular a válvula para a vazão desejada (cada grupo fará a experiência com uma vazão diferente);
4. Verificar se o nível do reservatório 1 está numa altura adequada, cobrindo a resistência elétrica, e completar com mais água se necessário;
5. Ligar a resistência elétrica e o misturador;
6. Aguardar a temperatura da água atingir estabilizar em torno de  $50^{\circ}\text{C}$  no reservatório 2 e registrar esta temperatura, bem como o valor da vazão;
7. Inserir a esfera no banho, sincronizado com a contagem do tempo, e registrar a sua temperatura para os instantes de tempo inicial (0s), 5s, 10s, 15s, 20s, 25s, 30s, 35s, 40s, 50s, 60s, 80s, 100s e 120s;
8. Registrar novamente a temperatura do banho e o valor da vazão;
9. Retirar a esfera do banho, secá-la bem, posicioná-la no suporte externo, registrar a temperatura do ar ambiente, iniciar uma nova contagem de tempo e registrar a temperatura da esfera para os instantes de tempo inicial (0s), 30s, 60s, 90s, 120s, 150s, 180s, 210s, 240s, 270s, 300s, 330s, 360s e 390s.

## 6 Questões propostas

Onde necessário, utilize o valor de  $g = 9,79\text{ m/s}^2$  para a aceleração da gravidade <sup>1</sup>.

<sup>1</sup>[www.iag.usp.br/geofisica/geodesia/laboratorio.htm](http://www.iag.usp.br/geofisica/geodesia/laboratorio.htm)

1. Trace gráficos de  $\ln(\theta/\theta_i)$  em função do tempo para o aquecimento da esfera em banho de água e resfriamento da esfera em ar quiescente.
2. Determine o valor do coeficiente de troca de calor por convecção forçada para a esfera nas condições da experiência do banho em água utilizando o método de regime transiente e compare com o valor fornecido pela correlação experimental (1).
3. Determine o valor do coeficiente de troca de calor por convecção natural para a esfera nas condições do resfriamento em ar e compare com o valor fornecido pela correlação experimental (2).
4. Calcule o número de Biot para o aquecimento e o resfriamento e verifique se a metodologia de análise concentrada utilizada pode ser considerada de fato válida.

## Referências

- CHURCHILL, S. W. 2002. Free convection around immersed bodies. *Cap. 2.5.7 de: HEWITT, G. F. (editor), Heat exchanger design handbook*. New York: Begell House.
- WHITAKER, S. 1972. Forced convection heat transfer correlations for flow in pipes, past flat plates, single cylinders, single spheres, and for flow in packed beds and tube bundles. *AIChE Journal*, **18**(2), 361–371.