

EXPERIMENTO 05 – TROCADOR DE CALOR DE FLUXO CRUZADO

1. OBJETIVO

Deseja-se aplicar conceitos de transferência de calor na análise de um processo de troca térmica entre um cilindro (mais quente) e um escoamento cruzado de ar (mais frio). Nesse caso, almeja-se comparar os valores do coeficiente convectivo de transferência de calor medidos experimentalmente com valores calculados a partir de correlações da literatura.

2. BANCADA E EQUIPAMENTO

O equipamento desta experiência é um sistema para análise da transferência de calor de um cilindro aquecido para um escoamento cruzado de ar. Dessa forma, o sistema simula o processo de transferência de calor que ocorre em um **trocador de calor de fluxo cruzado**.

Uma fotografia da montagem experimental, modelo H350, está disponível na Figura 1.

Nota-se que o sistema é constituído, essencialmente, de um duto vertical com uma seção de testes.

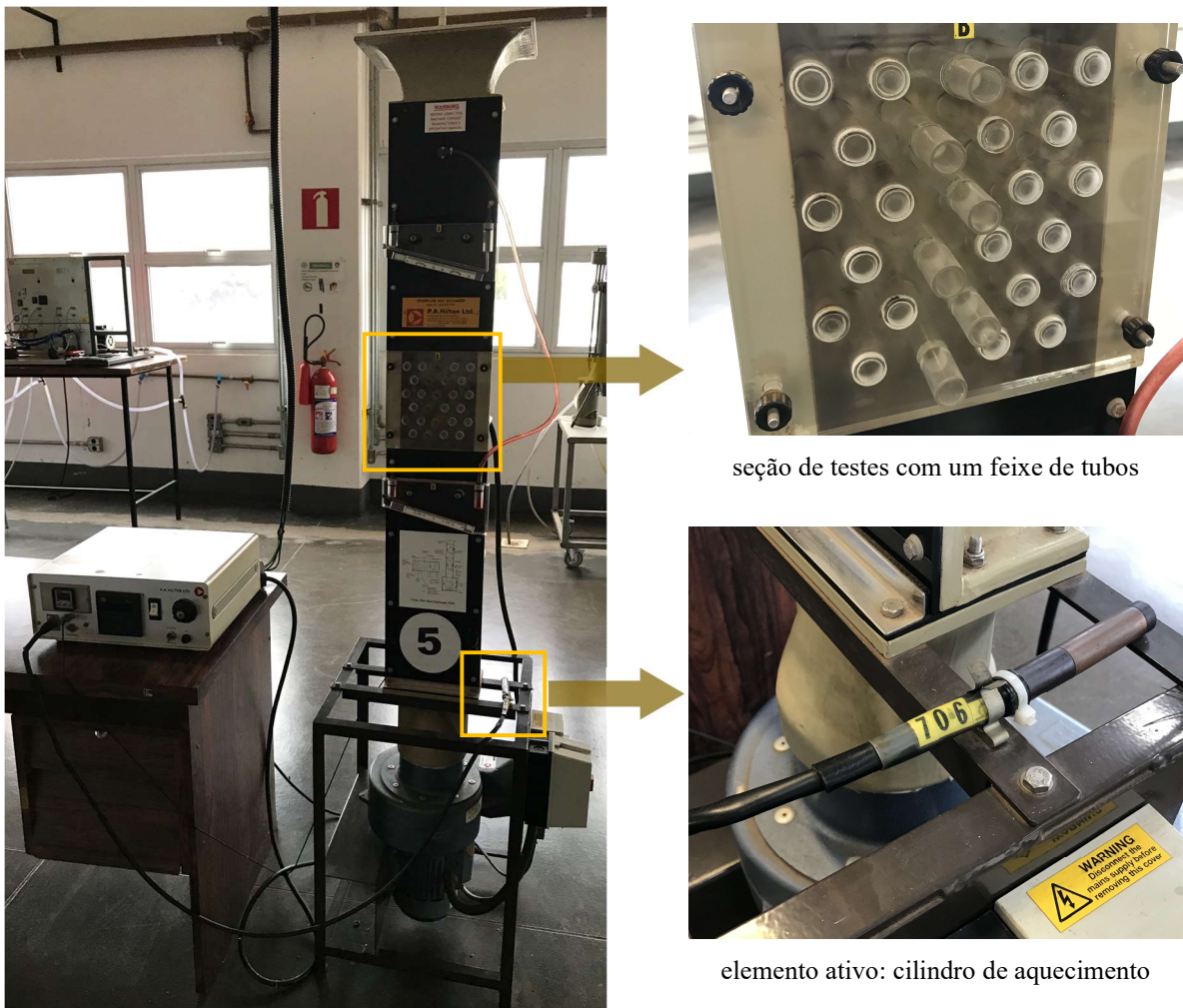


Figura 1. Trocador de calor de fluxo cruzado com destaque para banco de tubos e cilindro aquecido.

Durante o funcionamento do trocador de calor, o cilindro aquecido é posicionado no banco de tubos, que contém 27 tubos divididos em 6 fileiras. O cilindro pode ocupar diferentes posições dentro do feixe, mas seu eixo central deve ficar sempre perpendicular ao escoamento de ar, que ocorre no sentido vertical de cima para baixo. O fluxo de ar é fornecido por um ventilador, que fica na parte de baixo do sistema, como mostra a Figura 2.



Figura 2. Fluxo de ar ocasionado por ventilador de rotação variável.

O aquecimento do cilindro é realizado por efeito Joule, em consequência de uma elevada resistência elétrica. O controle do aquecimento é executado no painel de instrumentos apresentado na Figura 3. As temperaturas do cilindro e do escoamento de ar são medidas por sensores do tipo termopar, enquanto as pressões são medidas por manômetros, a fim de possibilitar a estimativa da vazão e da velocidade de ar.



Figura 3. Painel de instrumentos para controle do sistema.

INFORMAÇÕES TÉCNICAS:

O interesse desta experiência concentra-se na determinação e na análise da transferência de calor por convecção associada ao fluxo cruzado sobre os tubos. Na montagem experimental, tem-se o escoamento de somente um fluido de trabalho, que é o ar que passa externamente aos tubos. O escoamento desse ar é suprido por um ventilador que pode ser ajustado para diferentes valores do número de Reynolds.

Para simular o escoamento de um fluido quente no interior dos tubos, usa-se um elemento aquecedor, ou seja, um cilindro com dimensões similares aos demais tubos do trocador, que dissipa calor por efeito Joule para o escoamento de ar externo.

O elemento aquecedor pode ser o único tubo no escoamento, o que configura um escoamento cruzado sobre um único cilindro. Pode também ser colocado em várias posições em um feixe de tubos, de modo a configurar um tubo único de um feixe de tubos de um trocador de fluxo cruzado.

O elemento aquecedor é denominado “elemento ativo”. Quando um feixe de tubos é posicionado no escoamento de ar, somente um tubo é o elemento ativo. Os demais tubos não adicionam calor ao sistema, mas podem influenciar o movimento do ar, do ponto de vista da mecânica dos fluidos.

O cilindro de aquecimento é construído em cobre, com extremidades isoladas para minimizar efeitos de extremidade na transferência de calor. O elemento é aquecido eletricamente, com potência dissipável ajustada por um reostato montado no painel do sistema. Para determinar a taxa de transferência de calor (\dot{Q}) fornecida pelo elemento ativo, divide-se o quadrado da diferença de tensão elétrica aplicada (U) pela resistência do dispositivo ($R = 70,6 \Omega$). Pela lei de Ohm, onde I indica a corrente elétrica que atravessa o elemento ativo, tem-se:

$$\dot{Q} = UI = U \left(\frac{U}{R} \right) = \frac{U^2}{R}$$

A temperatura superficial do cilindro é medida com um termopar de 0,1°C de precisão, com indicação no milivoltímetro existente no painel de instrumentos. A temperatura do ar no duto do trocador também é medida com um termopar e indicada no mesmo painel.

O ar é succionado pelo ventilador e entra no duto através de uma entrada tipo boca de sino. Sua vazão é controlada por um *dumper* tipo íris instalado na extremidade de descarga do duto, na parte inferior do sistema. A vazão (e, portanto, a velocidade) do ar que escoar no duto é medida pela entrada tipo boca de sino, que está acoplada a manômetros. Para medir as quedas de pressão associadas às diferentes faixas de vazão de ar, dois manômetros com diferentes fluidos manométricos e faixas de medição são usados.

Dados Importantes:

- Diâmetro d do cilindro de aquecimento: 15,8 mm
- Comprimento da sessão ativa do cilindro de aquecimento: 50 mm
- Área de aquecimento do cilindro de aquecimento: $2,482 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$
- Área da sessão transversal do duto do sistema: 65 mm x 150 mm = $9,75 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$
- Área mínima transversal no feixe de tubos: $4,16 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$
- Velocidade do ar no duto do sistema: $V = 74,294 \left(\frac{H T_{ar}}{P_{ar}} \right)^{1/2}$

Em que: V é a velocidade em m/s, H é a medida do manômetro em mmca, T_{ar} é a temperatura em K e P_{ar} é a pressão absoluta do ar em N/m².

Os valores de condutividade térmica e viscosidade cinemática do ar estão em gráficos ao final deste documento, em conjunto com o fator de correção da troca de calor (F_n) devido ao posicionamento dos tubos no feixe.

A Figura 4 contém um desenho esquemático que indica as principais partes do sistema.
 A Figura 5 exibe as possíveis configurações para o posicionamento dos tubos.

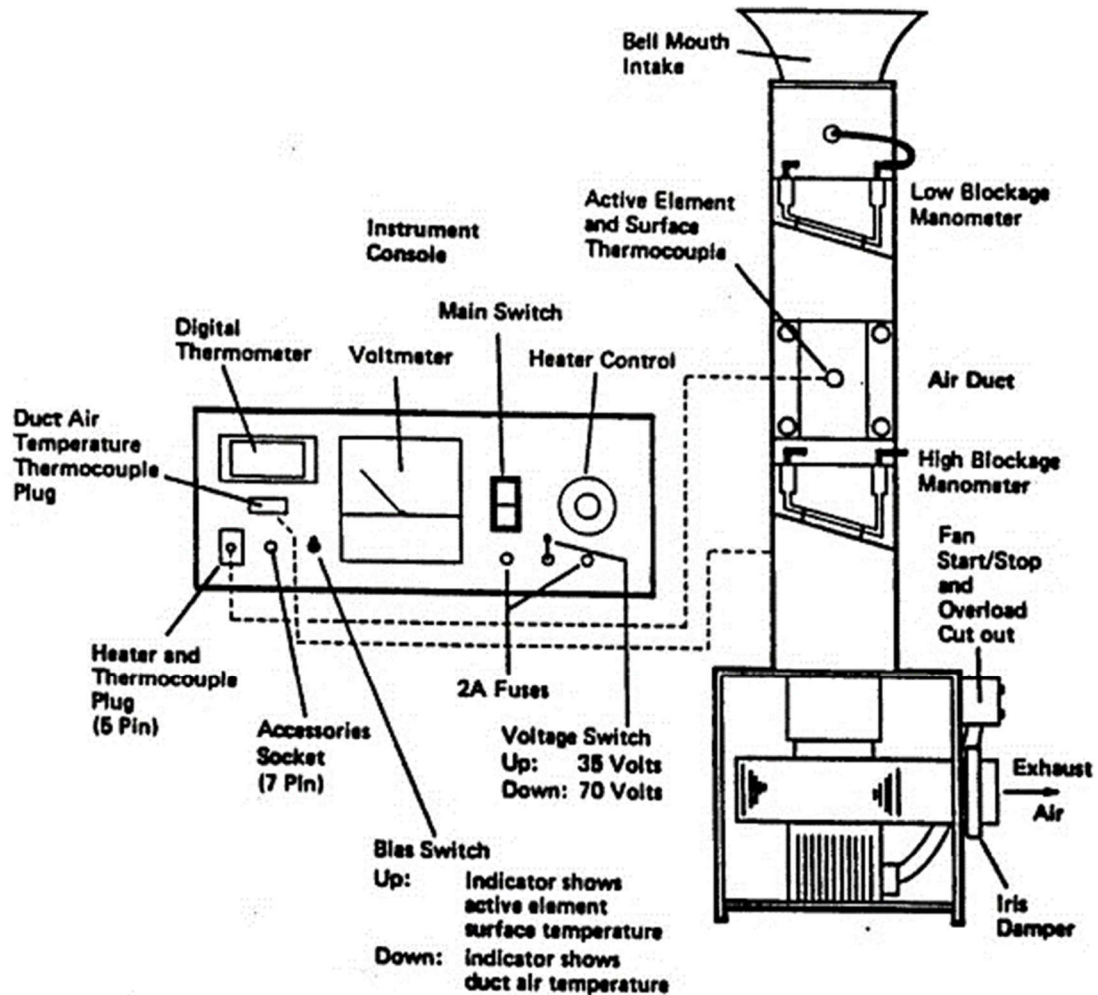


Figura 4. Diagrama esquemático com os componentes do trocador de calor H350.

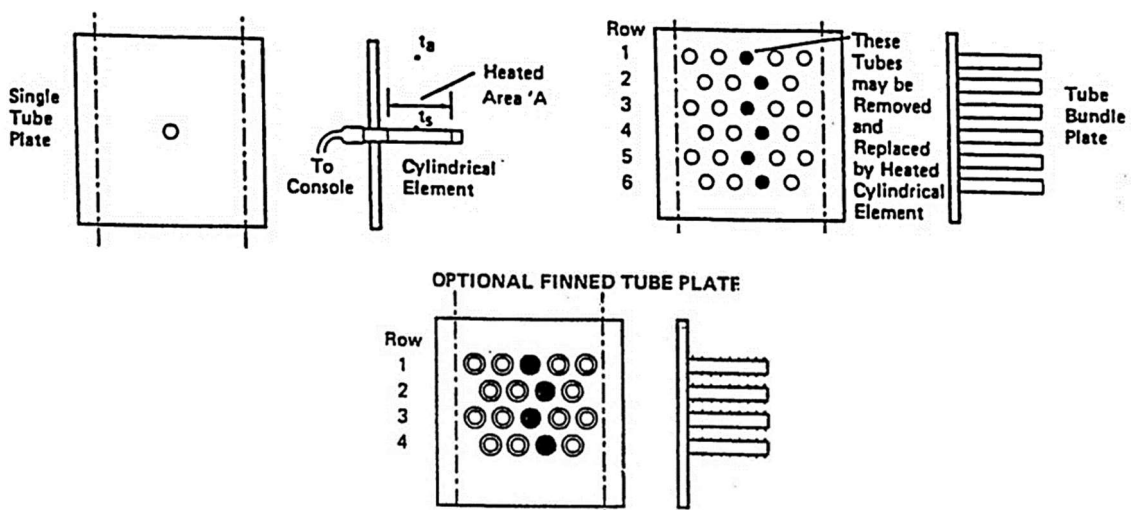


Figura 5. Configurações de posição dos tubos na seção de testes do trocador de calor.

3. PROCEDIMENTO DE OPERAÇÃO

Ligando o sistema:

1. No dispositivo boca de sino, retirar a tampa que cobre a abertura de entrada do ar.
2. No banco de tubos da seção de testes, certifique-se de que o cilindro de aquecimento esteja na posição à montante em relação ao escoamento descendente de ar.
3. Confirme que uma extremidade da mangueira de medida de pressão esteja conectada ao manômetro inferior e que a outra extremidade esteja conectada à entrada da seção de testes.
4. Assegure que a válvula *dumper* tipo íris, localizada na saída do escoamento de ar, esteja na posição de abertura mínima. Nunca ligue o ventilador antes de realizar essa verificação!
5. Pressione o botão da botoeira para acionar o ventilador.
6. Após ligar o ventilador, ajuste a abertura da válvula para obter a menor altura manométrica desejada.
7. Selecione a posição de 70 V no seletor de tensão elétrica do painel de instrumentos.
8. Ajuste a tensão elétrica fornecida ao cilindro de aquecimento até que sua temperatura atinja um valor em torno de 60° C. Para isso, regule o seletor em aproximadamente 30 V. O ajuste deve ser realizado em etapas, ou seja, deve-se aguardar alguns minutos até que a temperatura do cilindro atinja um valor de equilíbrio.

OBS: Tanto a temperatura do cilindro quanto a temperatura do ar são mostrados no mesmo visor no painel de instrumentos. Para alternar entre um valor e outro, utilize a chave seletora presente abaixo do visor de temperaturas.

Desligando o sistema:

1. Ajuste novamente a tensão elétrica fornecida ao cilindro para o valor mínimo e espere alguns minutos até que ocorra o resfriamento total do elemento.
2. Desligue a fonte de potência no painel de instrumentos e, em seguida, desligue o ventilador no botão da botoeira. Por fim, feche a válvula *dumper* tipo íris do ventilador.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

INCROPERA, F., DEWITT, D., BERGMAN, T., LAVINE, A., *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*, 6^a ed., Editora LTC, 2011.
HOLMAN, J., *Heat Transfer*, 10^a ed., McGraw-Hill, 2010.

Observação:

Este documento baseia-se no roteiro escrito em 2019 pelos PEDs Me. Leandro Alves Moya e Me. Natan Augusto Vieira Bulgarelli.

ANEXO: Condutividade térmica do ar, viscosidade cinemática do ar, fator F_n do trocador

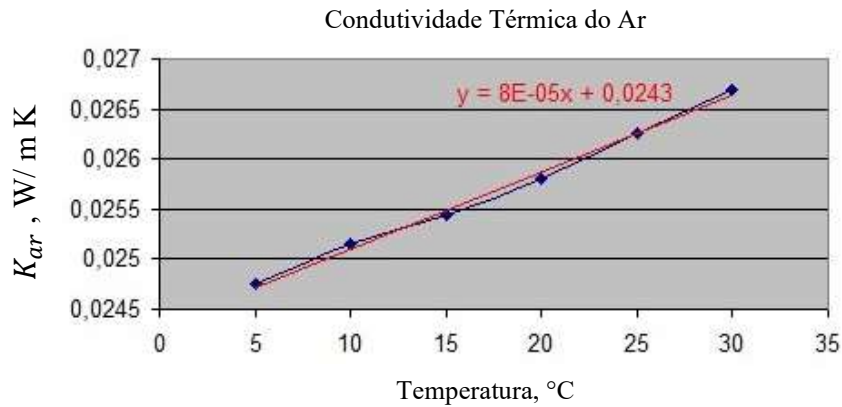


Figura A1. Curva de condutividade térmica do ar em função da temperatura.

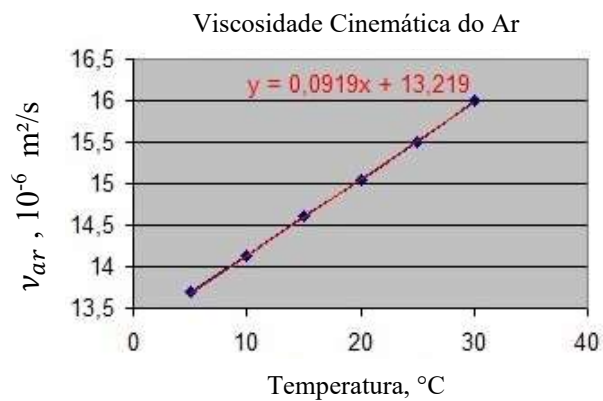


Figura A2. Curva da viscosidade cinemática do ar em função da temperatura.

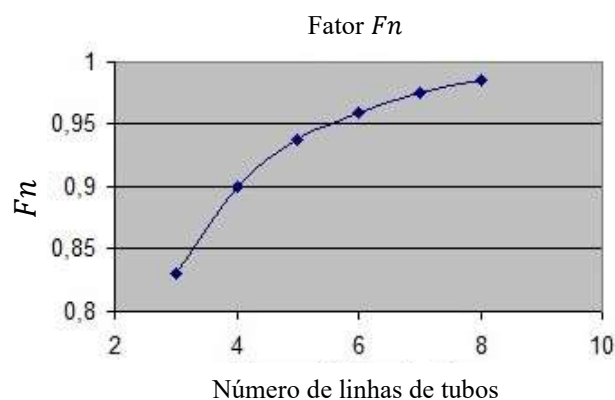


Figura A3. Fator F_n em função do número de fileiras de tubos.