

TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONDUÇÃO EM BARRAS DE SEÇÃO CIRCULAR UNIFORME E CONVECÇÃO NATURAL

1- OBJETIVO

Determinação do perfil de temperatura ao longo de barras de seção circular uniforme de diversos diâmetros e materiais diferentes, bem como a determinação do coeficiente convectivo natural médio de transferência de calor entre as barras e o ar ambiente.

2 - INTRODUÇÃO

A abordagem clássica da literatura para a descrição do comportamento de uma barra circular submetida a uma brusca variação de temperatura em seus extremos consiste em considerar o fluxo de calor como sendo unidimensional (ou seja, admite-se a temperatura da barra como sendo uniforme ao longo de cada seção da mesma), desprezando-se a variação das propriedades físicas dos materiais (k, C_p, ρ) com a temperatura. Desta forma, em regime transiente, podemos escrever:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{h_x P}{C_p \cdot \rho \cdot A} \cdot (T - T_\infty) \quad (1)$$

As condições de contorno adotadas na resolução da equação (1) são: no tempo, considera-se $T = T_\infty$ para $t = 0$; na posição, para $x = 0$ toma-se $T = T_0$. A segunda condição de contorno para a posição (ou seja, para a extremidade oposta da barra) pode ser assumida de três formas distintas:

1º) $T = T_\infty$, para $x \Rightarrow \infty$ (barra semi-infinita), que será chamada condição de contorno de primeiro tipo.

2º) $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$, para $x = L$ (barra com extremidade isolada); chamada condição de contorno de segundo tipo.

3º) $-K \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{x=L} = h(T - T_\infty)$ em $x=L$...(igualando o calor transmitido por convecção pela extremidade com o calor transmitido por condução na barra em $x = L$), chamada condição de contorno de terceiro tipo.

A solução diferencial da equação (1) toma formas diferentes conforme a condição de contorno escolhida. Neste trabalho, limitaremos o estudo às condições de contorno de primeiro tipo e segundo tipo, uma vez que a eventual melhora na descrição do perfil de temperatura não justifica as complicações matemáticas acrescentadas pela adoção da condição de contorno de terceiro tipo, desde que a relação A/L seja pequena (que é o caso das barras utilizadas).

Dentre as soluções da equação (1) apresentadas na literatura, temos:

1) Para a condição de contorno do primeiro tipo a solução é:

$$(T - T_\infty) / (T_0 - T_\infty) = \frac{1}{2} \{ e^{-x \sqrt{\beta/\alpha}} \cdot \text{erfc}[(x/2 \sqrt{\alpha t}) - \sqrt{\beta} \cdot t] + e^{x \sqrt{\beta/\alpha}} \cdot \text{erfc}[(x/2 \sqrt{\alpha t}) + \sqrt{\beta} \cdot t] \} \quad (2)$$

Nesta equação, assim como nas equações apresentadas a seguir, admitiu-se um coeficiente de transferência de calor (barra-ar) médio (h) constante, ou seja, $h_x = h =$ constante. O parâmetro (β) relaciona-se com h pela equação:

$$\beta = m^2 \cdot \alpha \quad (3)$$

Onde, para barras circulares:

$$m^2 = h \cdot P / k \cdot A = 4 h / k \cdot D \quad (4)$$

2) A expressão do perfil de temperatura para o regime permanente pode ser obtida levando a equação (2) ao limite ($t \rightarrow \infty$), ou então integrando-se a equação (1) com $\partial T / \partial t = 0$. Desta forma obtém-se para a condição de contorno do primeiro tipo:

$$(T - T_\infty) / (T_0 - T_\infty) = e^{-mx} \quad (5)$$

e para a condição de contorno do segundo tipo:

$$(T - T_\infty) / (T_0 - T_\infty) = \cos h [m.(L-x)] / \cos h (m.L) \quad (6)$$

3- EQUIPAMENTOS E MATERIAIS

Serão utilizadas quatro barras distintas:

- uma Barra de **aço inox de 1"** de diâmetro nominal (Barra **A**);
- uma Barra de **aço inox de 1/2"** de diâmetro nominal (Barra **B**);
- uma Barra de **alumínio de 1/2"** de diâmetro nominal (Barra **C**) e
- uma Barra de **cobre de 1/2"** de diâmetro nominal (Barra **D**).

Cada barra tem comprimento total de 1 metro, sendo que uma das suas extremidades encontra-se dentro de um Banho termostático contendo água. A outra extremidade de cada barra é isolada termicamente, uma vez que se desejam apenas as condições de contorno do primeiro e segundo tipos. Os termopares, para as medidas de (T), são de cobre-constantan e estão dispostos nas Barras da seguinte maneira:

Barras	Posição dos termopares ao longo das barras, a partir da parede da Fonte quente									
	Nº 1	Nº 2	Nº 3	Nº 4	Nº 5	Nº 6	Nº 7	Nº 8	Nº 9	Nº 10
A	3 cm	6 cm	12 cm	18 cm	26 cm	34 cm	49 cm	64 cm	79 cm	91 cm
B,C e D	2 cm	5 cm	11 cm	17 cm	25 cm	32 cm	48 cm	63 cm	77 cm	90 cm

4 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.

4.1- Ligar o Milivoltímetro, lembrando de colocar água e gelo picado (1:1) no ponto frio dos termopares (garrafa térmica = temperatura de referência = 0°C).

4.2- Fazer a leitura de todos os termopares das barras a fim de anotar possíveis desvios de leitura entre eles e definir a Temperatura média do ambiente (T_∞).

4.3 - Encher o recipiente do banho termostático com água até o nível indicado e regular a Temperatura do banho termostático (fonte quente = T_0) para a temperatura desejada;

Obs.: Como sugestão, realizar o experimento em duas temperaturas distintas da fonte quente: T_0 , aproximadamente, 50 C e depois 90 C.

4.4 - Esperar atingir o regime permanente de transferência de calor e então começar a registrar as temperaturas em cada posição (x) de cada barra inclusive a da fonte quente (T_0).

Obs.: Evitar deslocamentos de ar nas proximidades das barras a fim de obtermos o coeficiente convectivo natural.

5 - CÁLCULOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 - Traçar gráficos do perfil de temperatura ao longo das quatro barras para as duas situações de (T_0) realizadas, numa mesma figura, e analise.

5.2 - Trace gráficos de $(T - T_\infty) / (T_0 - T_\infty)$ versus (x) visando a obtenção do (h) médio para cada situação de T_0 e analise.

5.3 - Compare o valor obtido para (h) médio com o valor encontrado na literatura e comente sobre possíveis desvios e erros cometidos.

Obs. Utilize a solução para a condição de contorno do primeiro tipo apresentada na equação (5).

6 - SIMBOLOGIA

- A = área de seção transversal das barras;
- Cp = calor específico; D = diâmetro das barras;
- h_x = coeficiente local de transferência de calor;
- k = condutividade térmica dos materiais das barras;
- L = comprimento total das barras;
- T = temperatura local;
- m = parâmetro ajustável;
- P = perímetro de seção transversal da barras;
- T_0 = temperatura em $x=0$;
- T_∞ = temperatura ambiente;
- t = tempo;
- x = coordenada de posição;
- α = difusividade térmica;
- β = parâmetro ajustável;
- ρ = massa específica dos materiais das barras.

7 - BIBLIOGRAFIA

1-**ARPACI, V.S.** - Conduction Heat Transfer - Addison/Wesley Publishing Company, 1996.

2-**CROSBY, E.J.** - Experimentos sobre Fenômenos de Transporte en las Operaciones Unitárias de la Industria Química, Editorial Hispano Americano S.A., 1968

3-**HOLMAN, J.P.** - Transferência de Calor. McGraw-Hill, 1993

4-**KREITH, F.** - Princípios de Transmissão de Calor. Editora Edgar-Blucher Ltda., 1977.

5-**WELTY, J.R.** et all, - Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer. 3ed. John Wiley and Sons.

6-**CARSLAW, S.** and **JAEGER, J.C.** - Conduction of Heat in Solids. Oxford University Press, 1959.