ISSN 0101-5001
Rev. Ensino Eng., São Paulo
4(1): 78-81, 1.º sem. 1985

CORRELAÇÃO EXPERIMENTAL DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO NATURAL ENTRE SÓLIDOS E UM FLUIDO

Carlos Alberto de Melo*

MELO, C.A. Correlação experimental de transferência de calor por convencção natural entre sólidos e um fluido. *Rev. Ensino Eng.*, São Paulo, *4*(1): 78-81, 1.º sem. 1985.

Foi construído um circuito para determinar uma correlação experimental de transferência de calor entre sólidos e um fluido. Utilizou-se a técnica da condução de calor em sólidos no estado transitório para determinar os coeficientes de transferência de calor entre sólidos e o fluido. Estes coeficientes foram ajustados aos parâmetros adimensionais de convecção natural usando a técnica de regressão linear.

Transferência de calor. Convecção natural.

MELO, C.A. An experimental correlation of heat transfer by free convection between solids and a fluid. *Rev. Ensino Eng.*, São Paulo, *4*(1): 78-81, 1.º sem. 1985.

A loop was built to determine an experimental correlation of heat transfer between solids and a fluid. The unsteady state heat conduction technique was utilized. The heat transfers coeficients between solids and a fluid were determined and adjusted to dimensionless parameters of free convection by using linear regression.

Heat transfers. Free convection.

1 INTRODUÇÃO

Foi construído um circuito que mantém um banho de fluido a temperatura controlada, para determinar uma correlação experimental de transferência de calor por convecção natural entre sólidos e um fluido. A técnica experimental usada está relacionada com a condução de calor em sólidos no estado transitório. O tempo necessário para que um determinado ponto do interior de um sólido, imerso em um fluido a temperatura controlada, atinja uma outra temperatura, depende da geometria e do material do sólido. Foram utilizados sólidos de geometrias e materiais diferentes; para a determinação do coeficiente médio de transferência de calor entre o banho e o sólido. Isto permitiu a determinação dos parâmetros adimensionais de convecção natural, os quais foram ajustados a uma das equações propostas na bibliografia existente.

2 CIRCUITO EXPERIMENTAL

A Figura 1 mostra os componentes básicos do circuito. Sua operação é iniciada ligando-se a bomba que promove a circulação do fluido. Atua-se no controlador, selecionando a temperatura do banho (T_∞). Ligam-se as chaves das resistências elétricas. A temperatura inicial do centro de massa do sólido (T_o) é verificada, antes de mergulhá-lo no banho. Finalmente, o aquecimento do centro de massa do sólido é acompanhado a cada instante ou registrado diretamente.

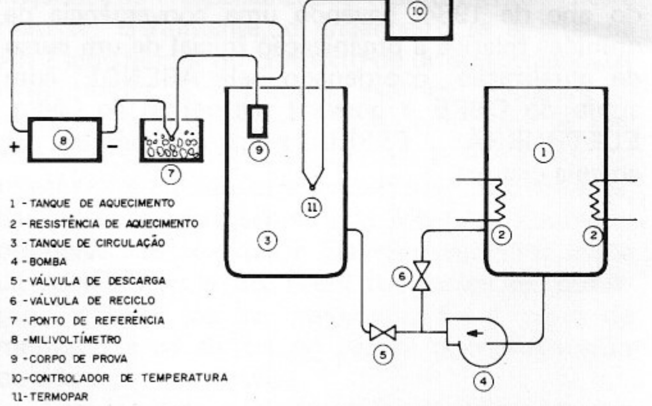

Figura 1 · Esquema do Circuito

* DEM - Universidade Federal de Uberlândia, MG.

3 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA E ANÁLISE DOS RESULTADOS

3.1 Placas Planas e Infinitas

— Equação Geral da Condução de Calor Unidimensional:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \qquad (3.1.1)$$

$\alpha = \dfrac{K}{\rho C}$, onde:

C — Calor específico do material
K — Condutibilidade térmica do material
T — Temperatura
t - Tempo
X — Distância linear em relação ao plano diametral da placa
α — Difusibilidade térmica do material
ρ — Densidade.

— Condições de contorno:

No instante $t \leqslant 0$, $T = T_o$ para $-L \leqslant x \leqslant +L$

Na posição $x = +L$, $-K \dfrac{\partial T}{\partial x} = \bar{h}\,(T - T_\infty)$ para $t > 0$

Na posição $x = -L$, $K \dfrac{\partial T}{\partial x} = \bar{h}\,(T - T_\infty$ para $t > 0$

$\bar{h}$ — coeficiente médio de transferência de calor por convecção natural
L — metade da espessura da placa
T_o — temperatura inicial
T_∞ — temperatura do banho (fluido).

— Solução da equação (3.1.1), conforme referência [1]:

$$\frac{T - T_\infty}{T_o - T_\infty} =$$

$$= 2\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\exp[-\beta_n^2\,(\alpha t/L^2)](L\bar{h}/K)\sec(\beta_n)\cos[\beta_n(x/L)]}{(L\bar{h}/K)\ (L\bar{h}/K+1) + \beta_n^2} \qquad (3.1.2)$$

β_n = raízes positivas de (3.1.3)

$$\beta \tan(\beta) = (L\bar{h}/K) \qquad (3.1.3)$$

$\Psi = \dfrac{T - T_\infty}{T_o - T_\infty}$ — Temperatura adimensional

$Fo = \alpha t/L^2$ — Número de Fourier
$Bi = L\bar{h}/K$ — Número de Biot
x/L — Posição adimensional

À medida que $\alpha t/L^2$ cresce, a série converge ainda mais rapidamente até que, para $\alpha t/L^2 = 0{,}6$, somente o primeiro terno é importante [3]. Na maioria dos experimentos $\alpha t/L^2 > 0{,}6$. Assim, tem-se em x = o:

$$1n\Psi = -\beta_n^2\ Fo + 1n\ a,\ a = cte \qquad (3.1.4)$$

O valor de β_n^2 é encontrado, ajustando os valores medidos Ψ e Fo à equação (3.1.4), por regressão linear, conforme a Figura 2. O valor de $\bar{h}$ é determinado pela equação (3.1.3).

3.2 Esferas

— Condução em Coordenaaa Esférica

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r}\frac{\partial T}{\partial r}\right] \qquad (3.2.1)$$

r — Distância radial em relação ao centro da esfera.

Condições de Contorno:

No instante $t \leqslant 0$, $T = T_o$ para $0 \leqslant r \leqslant R$

Na posição $r = 0$, $\dfrac{\partial T}{\partial t} = o$ para qualquer instante

Na posição $r = R$, $-K \dfrac{\partial T}{\partial r} = \bar{h}\,(T - T_\alpha)$ para $t > 0$

$\bar{h}$ — coeficiente médio de transferência de calor por convecção natural

R — Raio da esfera.

Solução da equação (3.2.1), conforme referência [1]:

$$\frac{T - T_\infty}{T_o - T_\infty} =$$

$$=2\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\exp[-\beta_n^2\ (\alpha t/R^2)]\ [(\mathrm{sen}(\beta_n) - \beta_n\cos(\beta_n r/R)]}{\beta_n - \mathrm{sen}\,\beta_n\cos\beta_n}$$

β_n - Raízes positivas e netagivas de (3.2.3)

$$\beta\cot(\beta) + (R\bar{h}/K) - 1 \qquad (3.2.3)$$

Considerando somente o primeiro termo da série, tem-se:

$$p/r = 0:\ 1n\,\Psi = -\beta_n^2\ (\alpha t/R^2) + 1n\,b,\ b = cte$$

$$1n\,\Psi = \beta_n^2\ Fo + 1n\,b \qquad (3.2.4)$$

O valor de β_n é encontrado, ajustando os valores medidos Ψ e Fo à equação (3.2.4), por regressão linear, conforme a Figura 3. O valor de $\bar{h}$ é determinado pela equação (3.2.3).

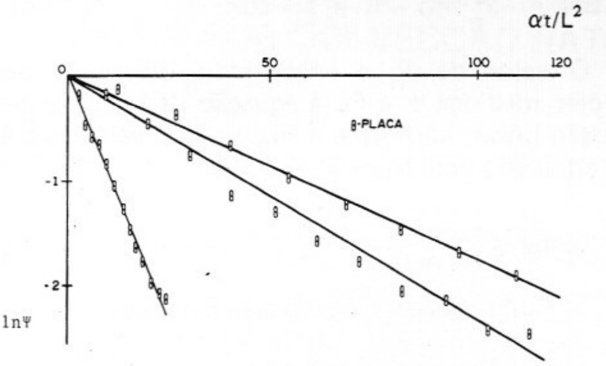

Figura 2 - Ajuste dos dados experimentais à equação (3.1.4)

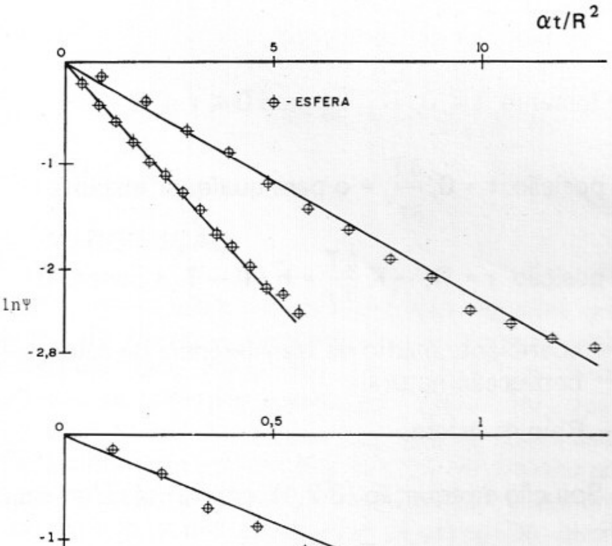

Figura 3 - Ajuste dos dados experimentais à equação (3.2.4)

3.3 Cilindro Infinitamente Longo

— Condução Unidimensional em coordenada cilíndrica.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \qquad (3.3.1)$$

r — Distância radial em relação ao eixo do cilindro.

R — Raio do cilindro

— Solução da equação (3.3.1), conforme referência [1]:

$$\frac{T - T_\infty}{T_o - T_\infty} =$$

$$= 2\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\exp\left[-\beta_n^2 \,(\alpha t/R^2)\right] (R\bar{h}/K)\, J_o\left[\beta_n\,(r/R)\right]}{\left[\beta_n^2 + (R\bar{h}/K)^2\right] J_o(\beta_n)} \qquad (3.3.2)$$

β_n - Raízes positivas e negativas de (3.3.3)

$$\beta J_1\,(\beta) = (R\bar{h}/K)\, J_o\,(\beta) \qquad (3.3.3)$$

$J_n\,(\beta)$ - Função de Bessel de primeira espécie de ordem n

Considerando somente o primeiro termo da série, tem-se para r=0:

$$1n\Psi = -\beta_n^2\,(\alpha t/R^2) + 1n\, c$$

$$1n\Psi = \beta_n^2\, Fo + 1n\, c,\ c = cte \qquad (3.3.4)$$

O valor de β_n é encontrado, ajustando os valores medidos Ψ e Fo à equação (3.3.4), por regressão linear, conforme a Figura 4. O valor de $\bar{h}$ é determinado pela equação (3.3.3).

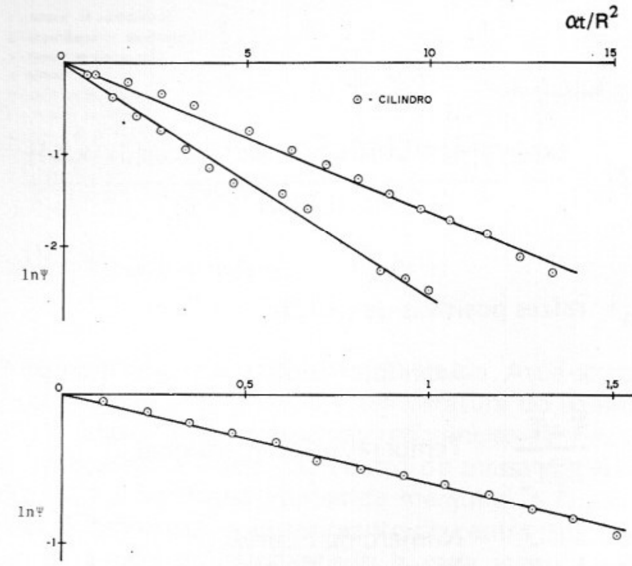

Figura 4 - Ajuste dos dados experimentais à equação (3.3.4)

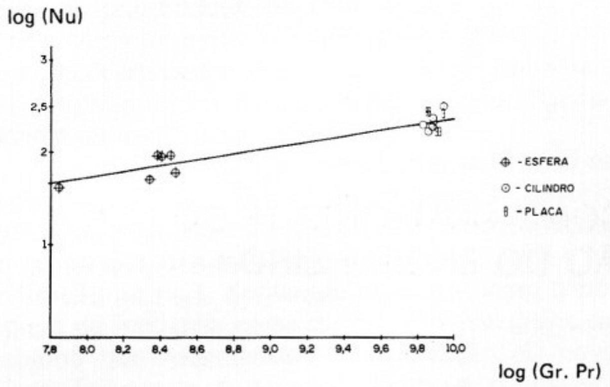

Figura 5 - Ajuste dos dados experimentais à equação (3.4.2)

3.4 Correlação para Convecção Natural

Verificou-se que os dados experimentais, tanto no regime laminar quanto no turbulento, para muitas configurações geométricas, podem ser correlacionadas pela fórmula:

$$\bar{N}u = c\,(Gr.\,Pr)^n \qquad (3.4.1)$$

obtida das referências [2] e [4]

$\bar{N}u$ – Número de Nusselt médio para o escoamento
Gr – Número de Grashof
Pr – Número de Prandtl do fluido

$$\bar{N}u = \frac{\bar{h}L_c}{K_f}\ , \quad Gr = \frac{g\beta_f\,(T_s - T_\infty)\,L^3}{\nu_f^2}$$

L_c – Dimensão característica
β_f – Coeficiente de expansão térmica do fluido
T_s – Temperatura da superfície externa do sólido
ν_f – Viscosidade cinemática do fluido
K_f – Condutibilidade térmica do fluido

Mikheyev [4] indicou que se use as propriedades do fluido β_f, ν_f e k_f na temperatura média da película, dada por:

$$\bar{T} = \frac{T_s + T_\infty}{2}$$

Indicou que se use para L_c os valores:
L_c – Diâmetro, para esferas
L_c – Altura, para cilindros e placas verticais

De (3.4.1) tem-se:

$$\log \bar{N}u = \log c + n \log (Gr.\,Pr) \qquad (3.4.2)$$

Os coeficientes c e n foram determinados ajustando os valores experimentais $\bar{N}u$ e (Gr. Pr) à equação (3.4.2) por regressão linear, conforme a Figura 5.

Para a faixa de (Gr. Pr.) de $6{,}3 \times 10^7$ à $1{,}0$ c 10^{10}, encontrou-se c = 0,1315 e n = 0,33.
Para a mesma faixa, Mikheyev propôs

c = 0,135 e n = 0,33.

4 CONCLUSÕES

Para a faixa explorada de número de (Gr. Pr) os valores encontrados estão em boa concordância com a equação proposta por Mikheyev.

Poderia-se explorar valores de (Gr. Pr) compreendidos entre $3{,}2 \times 10^8$ à 5×10^9, como mostra a Figura 3.4. Neste caso, porém, seria necessário alterar as dimensões dos corpos de prova, ou alterar a temperatura do banho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] CROSBY, E.J. "Experimental in Transport Phenomena", John Wiely and Sons, Inc., New York.
[2] KREITH, F. "Princípios da Transmissão de Calor" 3a. edição Americana. Editora Edgard Blücher. São Paulo, 1977.
[3] KERN, D.Q. "Processos de Transmissão de Calor", Editora Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1980.
[4] MIKHEYEV, M. "Fundamentals of Heat Transfer", Peace Publishers, Moscou.