

# Avaliação experimental do coeficiente global de transferência de calor em leito fixo percolado com água

Gylles Ricardo Ströher, Valdir Neto, Carmen Lúcia Rocha Pietrobon, Nehemias Curvelo Pereira e Luiz Mario de Matos Jorge\*

Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Av. Colombo, 5790, 87020-900, Maringá, Paraná, Brasil. Autor para correspondência. e-mail: lmmj@deq.uem.br

**RESUMO.** Foram efetuados diversos ensaios em um trocador de calor de leito fixo recheado com esferas de aço, percolado por água líquida e aquecido através da parede, medindo-se os perfis de temperatura na parede e no centro do leito em diversas condições experimentais:  $3\text{ mm} \leq d_p \leq 6,3\text{ mm}$ ,  $50\text{ L/h} < \text{vazão} < 190\text{ L/h}$ . A partir destes ensaios, foi possível estimar o coeficiente global de transferência de calor ( $U$ ), ajustando-se um modelo pseudo-homogêneo, unidimensional aos dados experimentais de temperatura. Os resultados revelam que tanto a técnica de ajuste como o modelo utilizado são adequados. A análise conjunta do valores de  $U$  estimados indicam que este parâmetro térmico varia linearmente com a vazão, mas não sofre influência significativa do diâmetro de partícula na faixa de condições experimentais exploradas. Dessa forma, obteve-se a seguinte correlação linear:  $U = 232645 \dot{m} + 1182,2$  ( $R^2 = 0,99$ ). Adicionalmente, pôde-se constatar que as temperaturas próximas à parede são muito mais sensíveis a alterações da vazão do que as temperaturas na região central do leito.

**Palavras-chave:** coeficiente global de transferência de calor, leito fixo.

**ABSTRACT.** **Experimental evaluation of the global heat transfer coefficient in a fixed bed, percolated by water.** Many experiments were performed in a fixed bed heat exchanger, packed with stainless steel spheres, percolated by water and heated through the wall. Wall and center temperatures were measured for several experimental conditions:  $3\text{ mm} < d_p < 6.3\text{ mm}$ ,  $50\text{ L/h} < \text{water flow rate} < 190\text{ L/h}$ . The global heat transfer coefficient ( $U$ ) was evaluated fitting an unidimensional pseudo-homogeneous model to the fixed bed measured temperatures. Results show that both the techniques of adjustment and the model used are adequate. The analysis of the global heat transfer coefficient indicates that this parameter varies linearly with water flow rate, but does not influence significantly the diameter at the range of experimental conditions explored.  $U$  as a function of water flow rate ( $\dot{m}$ ) could be represented by the following linear equation:  $U = 232645 \dot{m} + 1182,2$  ( $R^2 = 0,99$ ). Additionally, it was observed that the temperatures near the wall are more influenced by the water flow rate than those at the center of the fixed bed.

**Key words:** global heat transfer coefficient, fixed bed.

## Introdução

A transferência de calor em leito fixo está presente em diversos equipamentos de interesse industrial, dentre os quais podem-se destacar: reatores químicos e bioquímicos, evaporadores e regeneradores de calor dentre outros. O conhecimento da distribuição de temperatura no interior de leitos fixos com escoamento monofásico de líquidos é importante em várias aplicações industriais, especialmente para reatores bioquímicos. Nesse tipo de reator, a seletividade e a velocidade da reação, assim como a atividade e a estabilidade dos biocatalizadores estão intimamente ligadas à

temperatura local (Ashey *et al.*, 1999; Faquir e Attarahih, 2002).

Tanto o projeto como a simulação e a análise de equipamentos de leito fixo não-isotérmicos, com escoamento de líquidos, dependem do conhecimento das propriedades térmicas efetivas, as quais podem ser determinadas experimentalmente.

Apesar de a transferência de calor em leito fixo com escoamento de gases ter sido extensivamente estudada nas últimas décadas, poucos trabalhos específicos para escoamento monofásico de líquidos são disponíveis na literatura (Lamine *et al.*, 1992).

Dentre os trabalhos que abordam o estudo de transferência de calor em leito fixo percolado por

líquidos destacam-se os trabalhos de Lamine *et al.* (1992) e Ferreira *et al.* (2002).

Lamine *et al.* (1992) analisaram o comportamento de diferentes correlações para a condutividade térmica efetiva em leito fixo, comparando-as com os seus resultados obtidos em um leito de esferas de vidro, e demonstraram que as correlações obtidas com escoamento de líquidos, quando usadas para gases, são adequadas. Entretanto, as correlações obtidas com o escoamento de gases não apresentaram previsões satisfatórias para líquidos.

Ferreira *et al.* (2002) estudou a transferência de calor em leito fixo percolado por água, recheado com partículas poliméricas, e demonstrou que os parâmetros térmicos podem ser estimados através de medidas experimentais de temperatura, a partir de sensores localizados axial e radialmente em um leito. Seus resultados revelam que a condutividade efetiva axial pode ser desprezada nesse tipo de sistema.

Segundo Dixon e VanDongeren (1998), a transferência de calor em leito fixo pode ser descrita por um modelo pseudo-homogêneo unidimensional, usando-se um coeficiente global de transferência de calor radial, baseado na diferença entre a temperatura do leito e a temperatura de parede.

Nesse contexto, este trabalho explora a dependência do coeficiente global de transferência de calor em relação à vazão e ao diâmetro de partícula. Os valores de  $U$  foram obtidos a partir do ajuste de um modelo pseudo-homogêneo, unidimensional sem dispersão axial às medidas de temperatura obtidas em um leito de esferas de aço, percolado por água e aquecido pela parede.

## Material e métodos

### Aparato experimental

O módulo utilizado para o estudo pode ser dividido em duas partes principais: trocador de calor e sistema de aquisição de dados, como mostrado na Figura 1.

#### Trocador de calor

O trocador de calor é composto por um tubo de cobre recheado com esferas de aço de 3,4 mm ou 6,3 mm, aquecido por resistências elétricas. O tubo de cobre tem diâmetro interno de 3,98 cm, diâmetro externo de 6,99 cm, 1 metro de comprimento.

O calor fornecido pelo sistema de aquecimento provém de 3 resistências do tipo coleira de 6000W/220V cada, fixadas na parede externa do tubo e conectadas a um controlador de temperatura a fim de manter a temperatura ao longo da parede constante. Por sua vez, a ação de controle era definida a partir de um termopar fixado no meio da parede

externa do trocador de calor e conectado ao controlador.

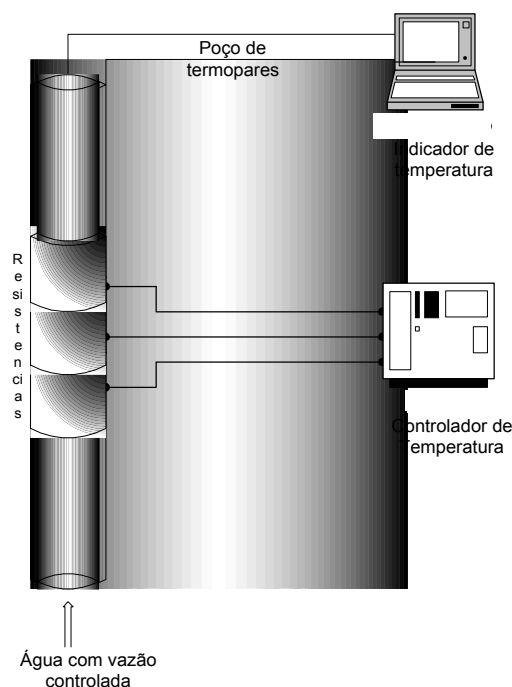


Figura 1. Esquema do equipamento utilizado.

### Sistema de aquisição de dados

Para o mapeamento da temperatura na parede e no centro do leito, fez-se uso de um indicador de temperatura associado a uma chave seletora, conectada a todos os termopares posicionados em dois poços: um ao longo da parede e outro no eixo central do tubo, sendo que cada poço contém 12 termopares tipo K igualmente espaçados, de 5 cm em 5 cm.

### Procedimento experimental

Os ensaios seguiram o seguinte roteiro:

- carrega-se o trocador de calor com esferas de aço de 3 mm, 4 mm ou 6,3 mm;
- fixa-se a vazão de água na faixa de  $1,26 \times 10^{-2}$  a  $5,37 \times 10^{-2}$  kg/s;
- aciona-se as três resistências, localizadas entre 40 cm e 70 cm a partir do topo do leito, fixando-se a temperatura de referência no controlador em  $150^{\circ}\text{C}$ ;
- após o sistema atingir a condição de regime permanente, o que leva em torno de 1 a 2 horas, anotam-se as temperaturas do centro e da parede.

### Determinação do coeficiente global de transferência de calor

Utilizou-se um modelo pseudo- homogêneo, unidimensional sem dispersão axial obtido a partir de um balanço diferencial de energia no leito, conforme Equação 1:

$$\frac{\dot{m}C_p}{\pi D} \frac{dT_z}{dz} = U(T_w - \bar{T}_z) \quad (1)$$

Aproximando os perfis de temperatura ao longo da parede por polinômios de primeiro grau:  $T_w = aZ + b$ , substituindo-o na Equação 1 e utilizando a condição de contorno:  $Z = 0 \Leftrightarrow \bar{T}_z = \bar{T}_0$ , tem-se a solução analítica na forma da Equação 2, conforme apresentado por Jorge *et al.* (1999).

$$\bar{T}_z = \left( \bar{T}_0 - b + \frac{a}{P} \right) e^{\frac{az}{P}} + az + b - \frac{a}{P} \quad (2)$$

$$\text{em que } P = \frac{\pi d_i U}{\dot{m} C_p}$$

Esse modelo contém um único parâmetro ajustável: o coeficiente global de transferência de calor (U), que foi estimado a partir do ajuste do modelo às medidas experimentais de temperatura pelo método dos mínimos quadrados.

A função objetivo ( $\phi$ ) foi definida segundo a Equação 3.

$$\phi = \sum (\bar{T}_{\text{mod.}} - \bar{T}_{\text{exp.}})^2 \quad (3)$$

Como  $\phi$  é uma função apenas de U, pode-se avaliar o valor mínimo dessa função derivando-a em relação a U e igualando-a a zero. Dessa forma, igualando-se a Equação 4 a zero, obtém-se uma função não-linear de apenas uma variável: U, a qual foi resolvida utilizando a rotina fzero do MATLAB.

$$\frac{d\phi}{dU} = \frac{d_i \pi}{\dot{m} C_p} \sum_{i=1}^n \left\{ 2[(\bar{T}_0 + (a/P) - b)e^{-Pz} + b + az - a/P - \bar{T}_i^{\text{exp.}}][(\bar{T}_0 + (aP) - b)(-ze^{-Pz}) + a/P^2 - (a/P^2)e^{-Pz}] \right\} \quad (4)$$

## Resultados e discussão

As Figuras 2 e 3 representam os perfis de temperatura ao longo da parede e do centro do leito,

respectivamente, enquanto na Figura 4 apresentam-se os perfis de temperatura média do leito  $(T_c + T_w)/2$ .

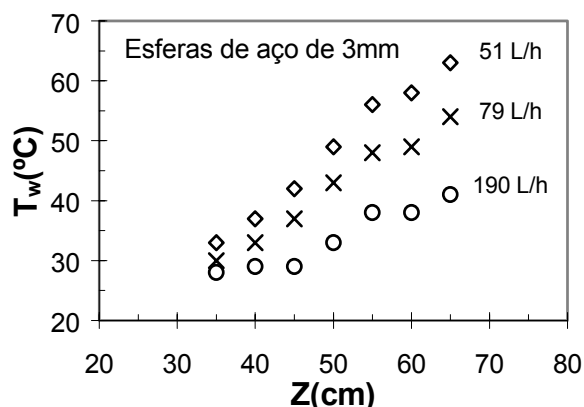


Figura 2. Influência da vazão sobre os perfis de temperatura na parede do leito.

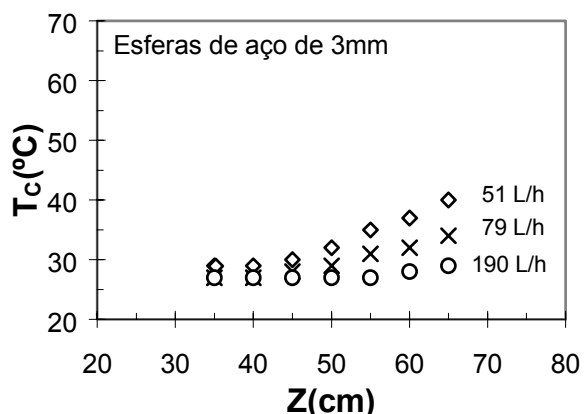


Figura 3. Influência da vazão sobre os perfis de temperatura no centro do leito.

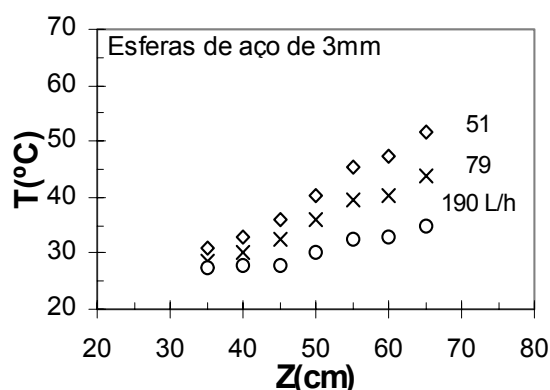


Figura 4. Influência da vazão sobre os perfis de temperatura média do leito.

A análise dos resultados experimentais das Figuras 2 e 3 revela que o efeito da variação na vazão de água é mais pronunciado nos perfis de temperatura da parede do leito do que no centro

deste. Além do que, o perfil de temperaturas da parede apresenta um comportamento aproximadamente linear.

Conforme pode ser observado na Figura 5,  $U$  varia linearmente com a vazão de água que percola o leito, sendo que o diâmetro de esfera não tem influência significativa sobre este parâmetro, sugerindo que o efeito da condutividade térmica, na fase sólida, exerce uma influência secundária sobre o coeficiente global de transferência de calor, nesta faixa de diâmetros de esferas explorada. Todos os valores de  $U$  puderam ser correlacionados adequadamente por um única reta:  $U = 232645 \dot{m} + 1182,2$ ,  $R^2 = 0,99$ .

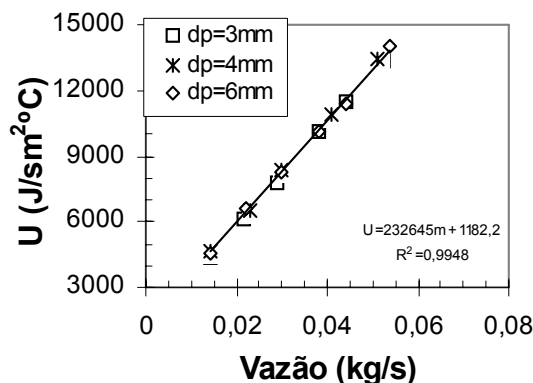


Figura 5. Correlação obtida para  $U$  em função da vazão de água que percola o leito.

Nas Figuras 6 e 7 são apresentados os resultados das simulações do modelo em duas condições de vazão de água: 51 e 160 L/h. Em ambas as simulações, o perfil de temperaturas ao longo da parede puderam ser representados por equações lineares, conduzindo a previsões realistas da temperatura média do leito. Esses resultados indicam que tanto a técnica utilizada no ajuste como o modelo utilizado foram adequados.

Uma avaliação global da qualidade do ajuste pode ser efetuada a partir da análise da Figura 8, na qual pode-se constatar que a maioria das previsões do modelo apresentaram desvios da ordem de 3% em relação aos dados experimentais.

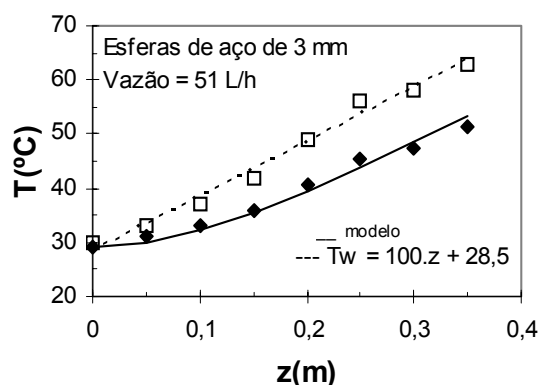


Figura 6. Modelo ajustado e dados experimentais.

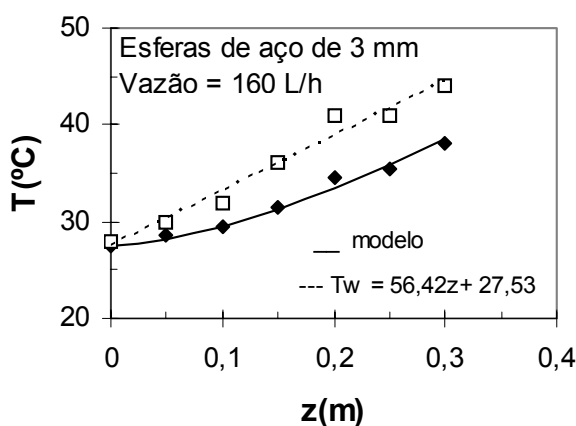


Figura 7. Modelo ajustado e dados experimentais.

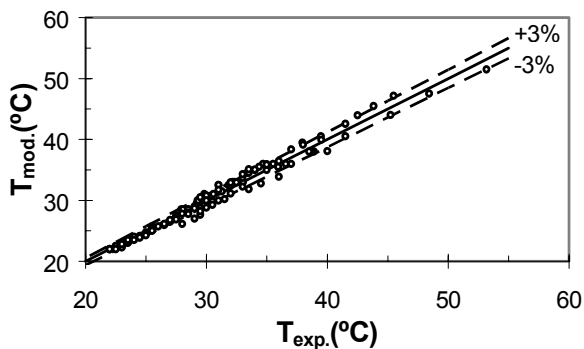


Figura 8. Comparação global das previsões do modelo frente aos dados experimentais de temperatura.

## Conclusão

O modelo proposto para a avaliação experimental do coeficiente global de transferência de calor descreveu adequadamente a temperatura média ao longo do leito, admitindo um comportamento linear do perfil de temperatura de parede, sendo que as previsões do modelo ajustado apresentam um desvio em torno de 3%.

O diâmetro das esferas que compõe o leito não apresenta influência significativa sobre U na faixa das condições experimentais exploradas.

O coeficiente global de transferência de calor varia linearmente com vazão de água que percola o leito segundo a equação:  $U = 232645 \dot{m} + 1182,2$  para  $3\text{mm} \leq dp \leq 6,3\text{mm}$ .

O efeito da alteração na vazão de água é mais pronunciado nos perfis de temperaturas da parede do que no centro do leito.

#### Nomenclatura

|                  |                                  |                                                     |
|------------------|----------------------------------|-----------------------------------------------------|
| $\bar{T}_z$      | temperatura média do leito       | °C                                                  |
| $T_w$            | temperatura da parede            | °C                                                  |
| $T_c$            | temperatura do centro            | °C                                                  |
| $T_{\text{exp}}$ | temperatura experimental         | °C                                                  |
| $T_{\text{mod}}$ | Temperatura prevista pelo modelo | °C                                                  |
| $\phi$           | função resíduo quadrático        | °C <sup>2</sup>                                     |
| $d_t$            | diâmetro do tubo                 | m                                                   |
| $d_p$            | diâmetro de partícula            | m                                                   |
| $Z$              | posição axial                    | m                                                   |
| $\dot{m}$        | Vazão de água                    | kg/s                                                |
| $C_p$            | capacidade calorífica            | J kg <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> |

U      coeficiente global de transferência de calor      deJ m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>

#### Referências

- ASHLEY, V. *et al.* Evaluating strategies for overcoming overheating problems during solid-state fermentation in packaged-bed bioreactors. *Biochem. Eng. J.*, Amsterdam, v.3, p.141-150, 1999.
- DIXON, A. G.; VAN DONGEREN, J. H. The influence of the tube and particle diameters at constant ratio on heat transfer in packed beds. *Chem. Eng. Process.*, Lausanne, v.37, p.23-32, 1998.
- FAQUIR, N. M.; ATTARAKIH, M. M. Optimal temperature policy for immobilized enzyme packed bed reactor performing reversible Michaelis-Menten kinetics using disjoint policy. *Biotechnol. Bioeng.*, New York, v.283, p. 368-374, 2002.
- FERREIRA, L. M. *et al.* An analytical and experimental study of heat transfer in fixed bed. *Int. J. Heat Mass Transfer*, Oxford, v.45, p. 951-961, 2002.
- JORGE, L. M. *et al.* Evaluation of heat transfer in a catalytic fixed bed reactor at high temperatures. *Braz. J. Chem. Eng.*, São Paulo, v. 16, n. 4, p. 407-420, 1999.
- LAMINE, A. S. *et al.* Hydrodynamics and heat transfer in packed beds with concurrent up flow. *Chem. Eng. Sci.*, New York, v. 47, p.3493-3500, 1992.

Received on November 21, 2003.

Accepted on January 21, 2004.