

TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM LEITO FIXO COM ESCOAMENTO BIFÁSICO ASCENDENTE DE UM GÁS E DE UM LÍQUIDO: INFLUÊNCIA DOS REGIMES DE ESCOAMENTO E DO DIÂMETRO DE PARTÍCULA NOS PARÂMETROS TÉRMICOS**Marcos Flávio Pinto Moreira**

Doutorando (Bolsista FAPESP) do Programa de Pós Graduação em Engenharia Química - UFSCar

pmfmo@iris.ufscar.br**José Teixeira Freire**

Professor Titular do Departamento de Engenharia Química -UFSCar , Rodovia Washington Luiz km 235, CEP 13.565-905

freire@power.ufscar.br

Resumo. *Reatores em leito fixo são muito utilizados nas indústrias químicas, petroquímicas e de alimentos entre outras. O controle de temperatura é fundamental na maioria dessas operações a fim de evitar pontos com temperaturas desfavoráveis causando a formação de produtos indesejados, a desativação do catalisador ou a danificação do produto, por exemplo. Com a finalidade de se obter esse controle torna-se necessário um estudo sobre a transferência de calor neste tipo de leito. O leito fixo com escoamento bifásico ascendente apresenta condições interessantes de serem identificadas, como onde os parâmetros térmicos são relativamente baixos até condições onde a temperatura não varia com a coordenada radial. A fim de se estudar a transferência de calor em leito fixo com escoamento bifásico ascendente se faz um estudo fluidodinâmico sobre os regimes de escoamento e a saturação de líquido e se verificam as influências das vazões de gás e de líquido, dos regimes de escoamento, da saturação de líquido, do diâmetro da partícula e da altura da seção térmica nos parâmetros térmicos k_r (condutividade térmica efetiva radial) e h_p (coeficiente de troca térmica na parede).*

Palavras chave: *transferência de calor, regimes, escoamento bifásico ascendente*

1. Introdução

A configuração de leito fixo é largamente utilizada nas indústrias, principalmente nas de petróleo e de alimentos. Nessa operação é de fundamental importância o controle da temperatura para que o produto desejado não seja danificado ou que produtos indesejados não sejam formados, além de se evitar a desativação de catalisadores por exemplo. A fim de evitar esses inconvenientes torna-se necessário um estudo sobre a transferência de calor nesse tipo de configuração. Um caso mais específico dentro da configuração de leito fixo, o escoamento bifásico ascendente surge com condições interessantes de serem estudadas, como nas quais onde os parâmetros térmicos são relativamente baixos até condições onde o perfil de temperatura radial torna-se plano. O escoamento bifásico ascendente apresenta uma peculiaridade muito importante que é a maneira como as duas fases (líquida e gasosa) interagem enquanto percolam o leito. Essa interação é chamada de regime de escoamento e tem sido estudada pelos pesquisadores (Turpin e Huntington, 1967; Gianetto e Specchia, 1992; Colli-Serrano e Midoux, 2000), pois influencia diretamente na transferência de calor. Verifica-se que os regimes de escoamento se modificam de acordo com as vazões de líquido e de gás utilizadas formando assim um mapa de regimes. Existe ainda uma falta de concordância entre os mapas encontrados por diversos pesquisadores. Além dos regimes de escoamento a saturação de líquido, que é a quantidade relativa de líquido existente no leito, é outra característica importante de ser identificada a fim de se entender melhor a transferência de calor e no escoamento ascendente essa variável, assim como os regimes de escoamento, tem recebido pouca atenção pelos pesquisadores (Turpin e Huntington, 1967; Achwal e Stepanek, 1976; Lamine et al., 1992; Iliuta et al., 1996) em comparação aos estudos no escoamento descendente. A saturação de líquido também é influenciada pelas vazões de gás e de líquido. Outras influências estudadas na transferência de calor são as próprias vazões de líquido e de gás e o diâmetro das partículas (Lamine et al., 1992; Colli-Serrano e Midoux, 2000).

A forma mais comumente empregada para se estudar a transferência de calor em leito fixo é a de se calcular os parâmetros térmicos advindos de uma formulação pseudo-homogênea que tem por base a consideração de equilíbrio térmico local. A equação base do estudo é a seguinte:

$$[GCp_g + LCp_l] \frac{\partial T}{\partial z} = k_r \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] \quad (1)$$

onde G e L são as vazões mássicas superficiais do gás e do líquido respectivamente, C_{p_g} e C_{p_l} são os calores específicos do gás e do líquido respectivamente, T é a temperatura em um ponto do leito, r e z são as coordenadas radial e axial respectivamente e k_r é a condutividade térmica efetiva radial.

Como condições em $r=R$ (raio do leito), $r=0$ e $z=0$ para se completar a formulação tem-se, respectivamente, que:

$$-k_r \frac{\partial T}{\partial r} = h_p (T_{r=R} - T_p) \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \text{ (condição de simetria)} \quad (3)$$

$$T = T_o \quad (4)$$

onde h_p é o coeficiente de troca térmica na parede do leito, T_p é a temperatura da parede do leito e T_o é a temperatura na entrada da seção térmica do leito.

Como solução dessa formulação tem-se segundo Coberly e Marshall (1951) que:

$$\frac{T - T_p}{T_o - T_p} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{Bi_{ef} \cdot J_o(a_n \frac{r}{R}) \exp[\frac{-k_r a_n^2 z}{R^2 (GC_{p_g} + LC_{p_l})}]}{(Bi_{ef}^2 + a_n^2) J_o(a_n)} \quad (5)$$

onde os valores de a_n são dados por:

$$Bi_{ef} \cdot J_o(a_n) - a_n J_1(a_n) = 0, \text{ sendo} \quad (6)$$

$$Bi_{ef} = h_p R / k_r \quad (7)$$

e J_o e J_1 as funções de Bessel de primeira espécie e ordens zero e um respectivamente.

Apesar de alguns estudos sobre a transferência de calor em leito fixo com escoamento bifásico ascendente verifica-se ainda, analisando a literatura, a necessidade de informações sobre o comportamento dos perfis de temperatura na entrada e na saída do leito, bem como dos parâmetros térmicos, a condutividade térmica (k_r) e o coeficiente de troca térmica na parede (h_p). O objetivo deste trabalho é analisar a influência dos regimes de escoamento, da saturação de líquido, das vazões de gás e de líquido, do comprimento da seção térmica e do tamanho das partículas nos perfis de temperatura e nos parâmetros térmicos obtidos na transferência de calor em leito fixo com escoamento bifásico ascendente.

2. Materiais e métodos

As partículas utilizadas para o estudo da influência do tamanho da partícula na transferência de calor são esferas de vidro de 1,9; 3,1 e 4,4 mm de diâmetro. Os fluidos utilizados são a água e o ar. A unidade, de acordo com a Fig. (1), é composta pelo leito fixo que possui uma seção de entrada de acrílico com 50 cm de comprimento e 5 cm de diâmetro interno que serve para o estabelecimento do escoamento assim como para a identificação dos regimes de escoamento, a seção térmica de aço inox com comprimentos de 10 e 20 cm e diâmetro interno de 5 cm onde há a transferência de calor devido a uma camisa de aquecimento e o topo do leito com 35 cm de comprimento e com 20 cm de diâmetro que serve para a separação dos fluidos. Os termopares são colocados na entrada e na saída da seção térmica e os sinais das medidas são levados a um aquisitor de medidas de temperaturas (ver Fig. (1)). O aquisitor de temperaturas, por meio de uma interface RS-232, transmite os valores digitais de temperatura a um computador que armazena esses dados que são obtidos de 4 em 4 segundos. Os sensores de temperatura são do tipo anelar (Giudici e Nascimento, 1994), o que permite filtrar a oscilação angular de temperatura. São realizadas as medidas de temperatura em 7 posições radiais (0, 0,16.R, 0,34.R, 0,48.R, 0,64.R, 0,78.R e 0,94.R) na entrada e na saída da seção térmica. A linha de água consiste de uma caixa d'água, ligada a uma bomba a qual transporta a água para a base do leito passando antes por uma placa de orifício, para a determinação da vazão de água. A linha de ar consiste de um compressor, de um filtro, de uma válvula reguladora de pressão com manômetro e de um rotâmetro para a medida da vazão de ar. Os fluidos entram no leito a 25°C estando a parede a 45°C. Realiza-se o empacotamento das partículas com a utilização do escoamento de ar e de água para que o recheio se assente melhor. A homogeneidade é verificada pela comparação da queda de pressão no escoamento monofásico de água entre dois trechos do leito.

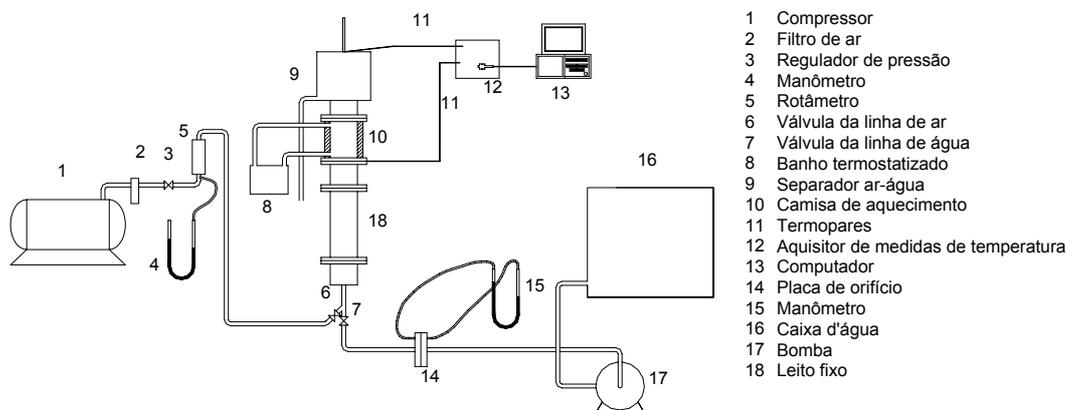


Figura 1. Esquema da unidade para o estudo fluidodinâmico e térmico.

As medidas de saturação de líquido são obtidas pelo método de drenagem (Rao et al., 1983), obstruindo-se a entrada e a saída do leito e depois drenando e medindo-se a massa de água. A massa de água residual que permanece aderida à superfície das partículas é obtida pela diferença entre a massa das partículas úmidas e a massa dessas partículas após uma secagem de 7h em uma estufa a 105°C.

Quanto aos regimes de escoamento, eles são padronizados visualmente mantendo-se constantes a vazão de água e a vazão de ar por no mínimo 2 minutos. As vazões de água estudadas são as de 2, 9 e 20 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ e as vazões de ar são as de 0,03, 0,06, 0,1, 0,2 e 0,5 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. Utilizam-se os comprimentos da seção térmica de 10 e 20 cm. As medidas de temperatura são registradas constantemente até que se atinja o regime permanente que é o regime onde se estuda a transferência de calor neste trabalho.

3. Resultados e discussões

3.1 Estudo da fluidodinâmica no escoamento bifásico ascendente

De uma forma geral o mapa de regimes varia muito pouco com o diâmetro das partículas nas condições estudadas. A Fig. (2) apresenta o mapa de regimes para as esferas de 4,4 mm.

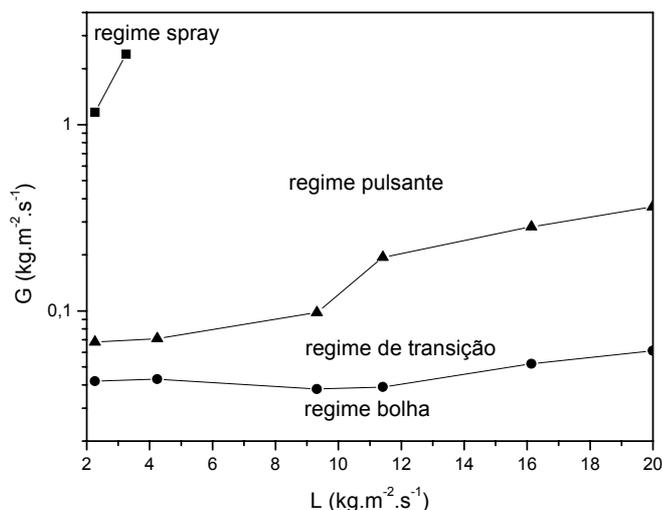


Figura 2. Regimes de escoamento para as esferas de 4,4 mm.

Tanto os tipos de regimes e os limites entre os regimes quanto as tendências das interfaces entre os regimes mostram comportamentos idênticos para todos os tamanhos de partículas estudadas. Apenas a partícula de 1,9 mm apresenta uma característica diferente de escoamento na entrada do leito em relação às demais partículas, pois não ocupa na parte de entrada do leito toda a área transversal disponível para o escoamento. Lamine et al. (1996) também identificam esse comportamento para esferas de 1 e 2 mm e chamam essa característica de regime separado. Apesar de se constatar essa característica no escoamento dos fluidos com o leito constituído por esferas de 1,9 mm, cabe salientar que isso ocorre apenas na entrada do leito e que todos os regimes, bolha, transição, pulsante e spray podem ser identificados inclusive na região de entrada apesar da restrição do escoamento e que por isso neste trabalho essa característica não recebe a denominação de regime. O regime bolha apresenta duas regiões quanto ao tamanho das bolhas, na primeira, em vazões de água abaixo de $9 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, as bolhas apresentam-se maiores e em menor quantidade em quanto que na segunda, em vazões maiores de $9 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, as bolhas apresentam-se menores e em grande quantidade. Quanto aos regimes de transição e pulsante, ambos são uma forma pulsante do escoamento de água e de ar, a diferença está no fato de que no regime pulsante os pulsos podem ser bem identificados. Colli Serrano e Midoux (2000) verificam o mesmo mapa de regimes na região de baixa interação onde trabalham com esferas de vidro. Esses autores não relatam o regime spray, pois não trabalham com vazões de ar acima de $0,1 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$.

Em relação às medidas de saturação, a Fig. (3) apresenta o comportamento da saturação total em função da vazão de ar parametrizada na vazão de água e no tamanho da partícula.

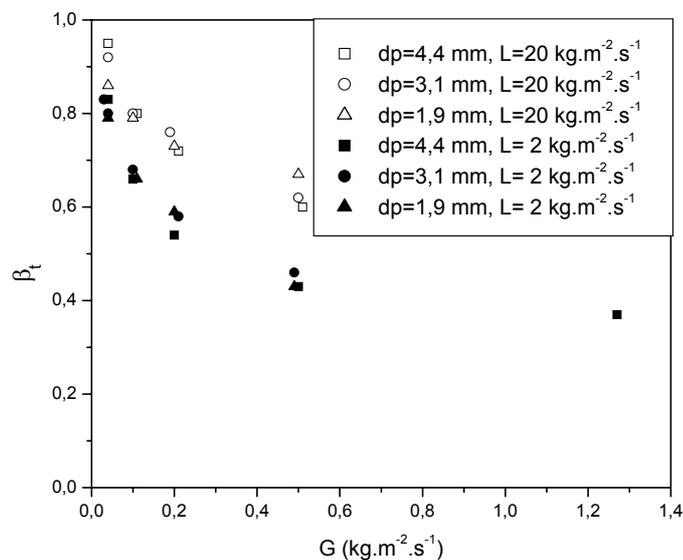


Figura 3. β_t em função da vazão de ar parametrizada no diâmetro de partícula e na vazão de água.

Verifica-se que a saturação total no escoamento ascendente é influenciada pelas vazões dos fluidos, pois o aumento da vazão de água acarreta em uma maior retenção de água no leito enquanto que o aumento da vazão de ar ocasiona uma diminuição da saturação total, pois há uma diminuição na retenção de água devido ao maior volume ocupado pelo ar com o aumento de sua vazão conforme se verifica na Fig. (3).

A variação da saturação com a vazão de ar na vazão de água de $20 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ é maior em baixas vazões de ar, próximo ao escoamento monofásico de água, do que em altas vazões de ar onde a interação entre os fluidos é pequena e esse comportamento da saturação em função da vazão de ar ocorre também para as baixas vazões de água.

Quanto à influência do tamanho da partícula sobre a saturação dinâmica no escoamento ascendente, não se constata nenhuma modificação da saturação total na faixa de diâmetro de esfera utilizada de acordo como apresenta a Fig. (3).

Já Lamine et al. (1992) verificam um aumento da saturação com o diâmetro da partícula trabalhando com esferas de vidro de 4 e 1 mm. Esses autores não apresentam resultados experimentais a respeito da saturação de líquido para esferas de diâmetros entre 4 e 1 mm.

3.2 Perfis de temperatura na entrada e na saída da seção térmica

Verifica-se de uma forma geral que o perfil de temperatura na entrada da seção térmica do leito é relativamente plano na maioria das condições estudadas. Apenas na posição radial $r=0,94.R$, a medida mais próxima à parede, há um aumento na temperatura que pode chegar a 2 graus centígrados em relação às outras posições radiais (que apresentam mesmas medidas).

Essa variação da medida próxima à parede em relação às medidas de temperatura mais centrais do leito diminui com o aumento da vazão de água, com o aumento do volume da partícula, com o aumento da seção térmica e com a diminuição da vazão de ar.

Quanto aos perfis de temperatura na saída da seção térmica, constata-se a existência de 3 tipos de perfil: o plano, o intermediário e o parabólico. A Fig. (4) apresenta os 3 perfis encontrados.

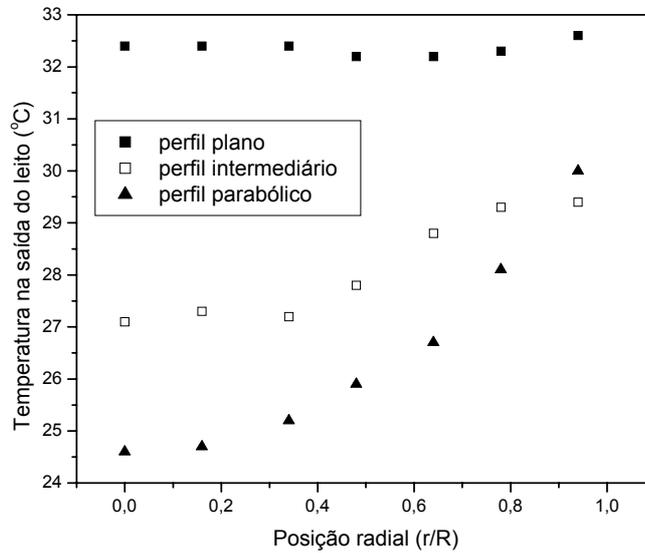


Figura 4. Temperatura na saída da seção térmica em função da posição radial (■ - esferas de 4,4 mm/ $L = 9 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ / $G = 0,1 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$; □ - esferas de 4,4 mm/ $L = 20 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ / $G = 0,5 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$; ▲ - esferas de 1,9 mm/ $L = 20 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ / $G = 0,05 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)

Os perfis do tipo plano são encontrados em diversas condições que são apresentadas na Tab. (1) tanto para a seção térmica com comprimento de 10 cm quanto para a de 20 cm e nestas condições a condutividade térmica efetiva tende ao infinito.

Tabela 1. Condições de aparecimento de perfil de temperatura plano na saída da seção térmica.

Partículas	L ($\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)	G ($\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)
Esferas de 4,4 mm	9	de 0,03 a 0,1
	2	de 0,03 a 0,2
Esferas de 3,1 mm	9	de 0,03 a 0,1
	2	de 0,03 a 0,2

Constata-se que o aparecimento de perfis planos é maior para partículas maiores quando se comparam as esferas de vidro de 4,4 mm com as de 1,9 mm que não apresentaram perfil plano. Não há diferença entre as esferas de 4,4 mm e 3,1 mm com relação ao aparecimento dos perfis planos de temperatura em mesmas vazões de ar e de água. Esses resultados parecem estar de acordo com a afirmação de Lamine et al. (1992) que verificam que o perfil torna-se plano para baixas vazões de água e partículas grandes, tendo utilizado partículas esféricas de vidro de 4 e 1 mm.

3.3 Estudo da transferência de calor em escoamento bifásico ascendente através dos parâmetros térmicos

As outras regiões estudadas que não apresentam o perfil de temperatura plano na saída da seção térmica possibilitam o cálculo dos parâmetros térmicos, minimizando-se o somatório do quadrado das diferenças entre os valores experimentais da temperatura e os valores de temperatura calculados pela Eq. (5), utilizando-se o método de otimização de Marquardt (Marquardt, 1963) na busca dos parâmetros térmicos. Os valores de a_n na Eq. (6) são encontrados pelo método da bipartição do intervalo de busca. A variância explicada (r^2), que é de certa maneira o quanto melhor é o ajuste, é significativamente maior nos casos em que o perfil aproxima-se do perfil parabólico, ou seja, quando o experimento pode ser bem representado pela formulação pseudo-homogênea.

Em muitos casos de perfil intermediário o regime permanente mostra-se variante, ou seja, não pode ser definido por um único perfil de temperatura, pois existem oscilações nas medidas de temperatura que influenciam muito os

parâmetros térmicos. Isso ocorre principalmente nas condições de perfis intermediários próximos aos perfis planos de temperatura.

3.3.1 Influência do diâmetro de partícula

A Fig. (5) apresenta a influência do diâmetro de partícula no coeficiente de troca térmica na parede.

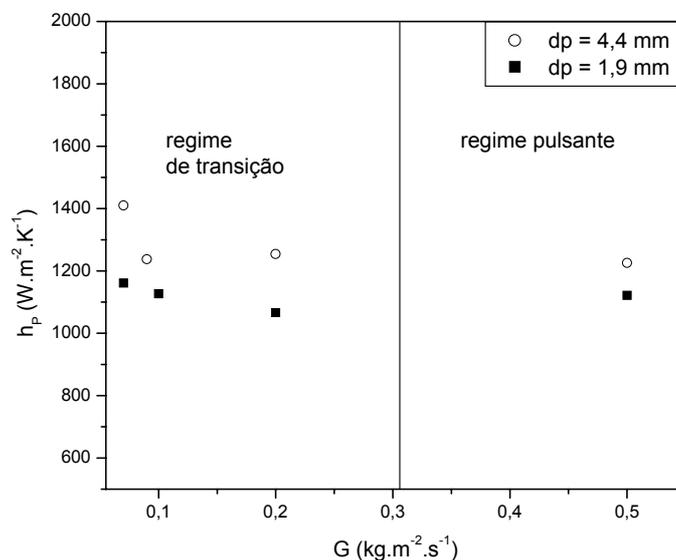


Figura 5. h_p em função da vazão de ar parametrizada no diâmetro de partícula e nos regimes de escoamento.

Esse comportamento (conforme apresenta-se na Fig. (5)) é verificado para as duas alturas de seção térmica utilizadas, 10 e 20 cm, e para uma vazão de água de $20 kg.m^{-2}.s^{-1}$. Nas vazões de água menores não é possível fazer a comparação da influência de dp no coeficiente de troca térmica na parede devido ao aparecimento de perfil plano de temperatura para as esferas de 4,4 e 3,1 mm. As esferas de 4,4 mm apresentam valores de h_p significativamente maiores do que os valores de h_p para as esferas de 1,9 mm nos regimes de transição e pulsante. No regime bolha a comparação torna-se sem efeito, pois é uma condição de perfil intermediário com oscilação para as partículas maiores principalmente, ou seja, são obtidos vários valores de h_p , pois o regime permanente não é bem comportado. Verifica-se que h_p varia pouco com a vazão de ar em toda faixa de vazão de ar estudada, também constata-se que não há influência do regime de escoamento sobre os valores de h_p .

Em relação à k_r , a Fig. (6) apresenta o comportamento de k_r em função dos diâmetros de partícula na vazão de água de $20 kg.m^{-2}.s^{-1}$. A influência do diâmetro sobre a condutividade térmica efetiva radial é clara em toda a faixa de vazão de ar utilizada, nas alturas de seção térmica utilizadas. As esferas de 4,4 mm apresentam condutividades térmicas efetivas maiores que as das esferas de 1,9 mm. Novamente essa comparação é realizada na vazão de água de $20 kg.m^{-2}.s^{-1}$ onde não há o surgimento de perfis planos de temperatura. Constata-se que independente do regime no escoamento bifásico ascendente ou até do número de fases utilizadas (água ou ar e água) a condutividade para as esferas de 4,4 mm é maior. Isso talvez se deva ao fato do tamanho dos poros para as esferas de 4,4 mm ser maior do que para as esferas de 1,9 mm permitindo ao(s) fluido(s) se movimentarem mais facilmente no sentido radial diminuindo-se as resistências térmicas (fluido-partículas) à transferência de calor radial.

Quanto ao comportamento de k_r em função da vazão de ar, para as esferas de 1,9 mm há um aumento deste parâmetro com o aumento da vazão de ar, ocorrendo uma estabilização no valor da condutividade para vazões de ar maiores que $0,2 kg.m^{-2}.s^{-1}$. Os regimes de escoamento parecem não afetar a condutividade térmica, apenas a vazão de ar. Dois fatos devem ser levados em consideração para lembrar a diferença que se ocasiona em se passar a trabalhar com esferas de 1,9 mm; o primeiro é o surgimento de um comportamento diferenciado de escoamento dos fluidos na entrada do leito para essas partículas quando comparado com partículas maiores, chamado por Lamine et al. (1992) de escoamento separado e o segundo, que também é causa do primeiro, é a diminuição do tamanho dos poros disponíveis para o escoamento dos fluidos. A condutividade térmica acima da vazão de ar de $0,2 kg.m^{-2}.s^{-1}$ que ocorre na região central do regime de transição não sofre grande influência nem mesmo da vazão de ar.

Quanto às esferas de 4,4 mm o comportamento é um pouco diferenciado, pois há um grande aumento da condutividade com o aumento da vazão de ar em valores baixos de G e depois segue-se uma queda de k_r com o aumento da vazão de ar. A condutividade térmica apresenta variações para a vazão de ar de $0,04 kg.m^{-2}.s^{-1}$ devido a um perfil instável no regime permanente, mas nessa análise essa variação de k_r não chega a ser considerável, pois nesse ponto a condutividade é muito maior que a condutividade em outras vazões de ar.

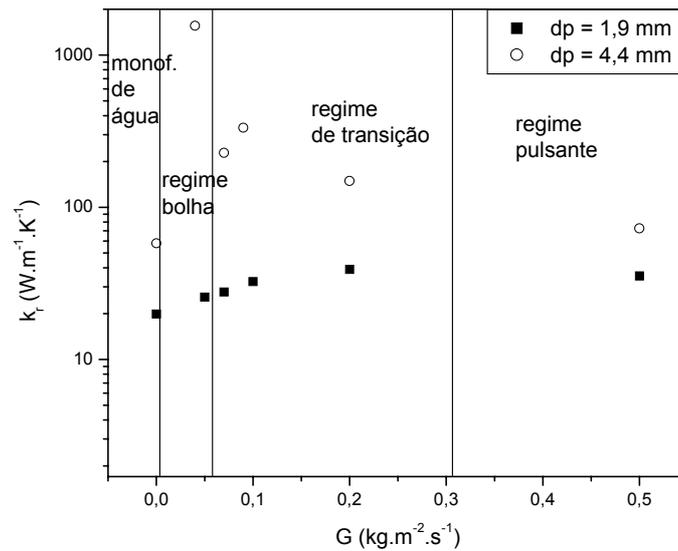


Figura 6. k_r em função da vazão de ar parametrizada nos diâmetros de partícula e nos regimes de escoamento.

Em relação à influência dos regimes de escoamento, verifica-se para as esferas de 4,4 mm que é no regime bolha que ocorre o valor máximo da condutividade térmica. Lamine et al. (1992) também verificam o mesmo comportamento neste regime. Segundo eles isso seria explicado devido a uma melhor mistura radial promovida pelo o aumento da velocidade intersticial de líquido causado pela diminuição da saturação de líquido com o aumento da vazão de ar. Realmente verifica-se, conforme a Fig.(3), que a saturação diminui com o aumento da vazão de ar. Apesar de o mesmo ocorrer com a saturação de líquido em função da vazão de ar nos regimes de transição e pulsante não se verifica um aumento de k_r nesses regimes em função de um aumento da vazão de ar, pois a partir do regime bolha o aumento contínuo da velocidade intersticial de líquido com o aumento da vazão de ar torna-se menos importante sobre k_r do que a quantidade de ar dentro do leito. O aumento da quantidade de ar dentro do leito em função do aumento da vazão de ar a partir do regime bolha provoca uma diminuição de k_r devido à contribuição da baixa condutividade que é característica inerente do ar. A diminuição de k_r deve-se também ao fato de que os regimes de transição e pulsante não favorecem tanto a mistura radial dos fluidos como o regime bolha.

Em relação ao comportamento da razão resistência à condução efetiva por resistência à convecção, chamada de número de Biot efetivo (Bi_{ef}), a Fig. (7) mostra Bi_{ef} em função das vazões de ar parametrizado nos diâmetros de partícula e nos regimes de escoamento para a vazão de água de $20 kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$.

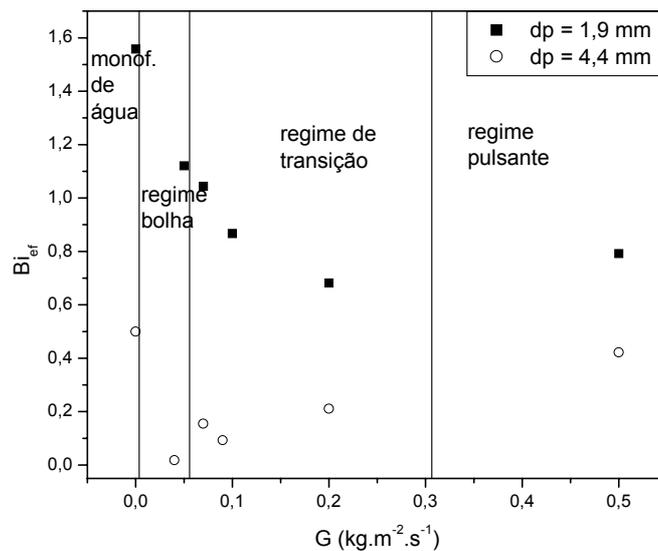


Figura 7. Bi_{ef} em função da vazão de ar parametrizada nos diâmetros de partícula e nos regimes de escoamento.

O número de Biot efetivo é maior para as partículas menores, conforme se verifica na Fig. (7). Para as esferas de 1,9 mm Bi_{ef} apresenta um comportamento de queda à medida que a vazão de ar aumenta até a vazão de ar de $0,2 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. A partir daí pode-se dizer que é muito pequena a variação de Bi_{ef} , havendo um leve aumento do número de Biot efetivo quando se passa à vazão de ar de $0,5 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. Em relação aos regimes de escoamento, o ponto de mínimo no comportamento de Bi_{ef} em função da vazão de ar ocorre na região central do regime de transição, ou seja, é nesse ponto em que a resistência à condução térmica relativa à resistência à transferência de calor através da parede torna-se menor para as partículas de 1,9 mm. A maior resistência relativa à condução em escoamento bifásico é encontrada no regime bolha, só sendo superada pela resistência apresentada no escoamento monofásico de água, o que é de se esperar visto que o escoamento monofásico de água não apresenta a mistura radial tão bem feita como no escoamento bifásico.

Com o aumento da partícula o comportamento se altera, como pode-se verificar no comportamento de Bi_{ef} em função da vazão de ar para as esferas de 4,4 mm na Fig. (7). Há uma diminuição de Bi_{ef} para baixos valores de G e depois segue-se um aumento. Em relação aos regimes de escoamento, é no regime bolha que ocorre o ponto de mínimo, ou seja, é no regime bolha onde a resistência relativa à condução é menor para as partículas de 4,4 mm. Nos regimes de transição e pulsante ocorre o aumento de Bi_{ef} com a vazão de ar devido ao mesmo fator analisado a respeito da variação de k_r , ou seja, a dificuldade da mistura radial devido à passagem mais alternada de ar e água à medida que se aumenta a vazão de ar nos regimes de transição e pulsante e o fato de haver uma grande quantidade de ar dentro do leito provocando um aumento da dificuldade de se transferir calor radialmente devido às características isolantes do ar. Nota-se que mesmo com o aumento de Bi_{ef} com o aumento da vazão de ar, é no escoamento monofásico de água onde está o maior valor de Bi_{ef} na faixa de vazão de ar estudada, isso porque mesmo com a grande diminuição da movimentação radial no escoamento pulsante, essa movimentação radial ainda existe a ponto de reduzir significativamente a resistência relativa à condução quando comparada à resistência apresentada no caso do escoamento monofásico de água onde não existe o ar para ajudar o líquido a se distribuir radialmente.

3.3.2 Influência da altura da seção térmica

Trabalhando-se com alturas de 10 e 20 cm para a seção térmica verificam-se comportamentos parecidos dos parâmetros térmicos em função da vazão de ar.

A Fig. (8) apresenta a comparação de h_p para as esferas de 1,9 mm na vazão de água de $20 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ nas alturas de 10 cm e 20 cm para a seção térmica.

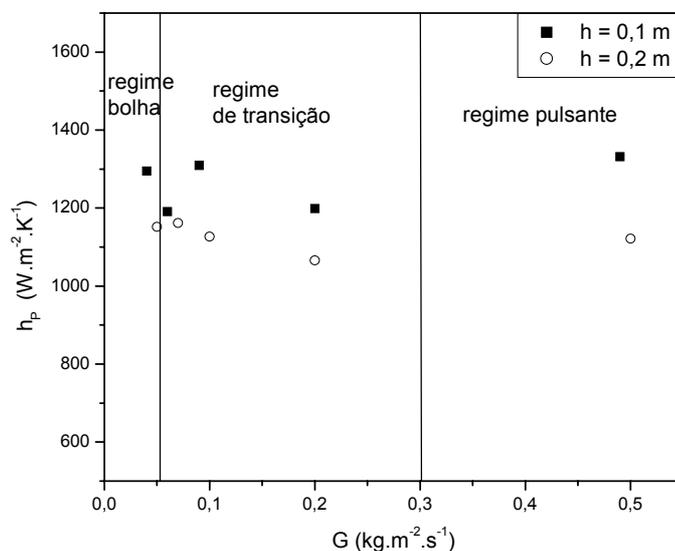


Figura 8. h_p em função da vazão de ar parametrizado nos regimes de escoamento e na altura do leito.

Verifica-se que de uma maneira geral para a altura de 10 cm h_p mostra-se mais elevado do que para a altura de 20 cm apesar de em ambas alturas de seção térmica se ter o mesmo comportamento em função da vazão de ar. Este comportamento de h_p com a altura se estende para todas as partículas estudadas.

Da mesma forma verifica-se o comportamento da condutividade efetiva em função da altura para a condutividade térmica efetiva radial, k_r .

A Fig. (9) apresenta a comparação de k_r para as esferas de 1,9 mm na vazão de água de $20 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ nas alturas de 10 cm e 20 cm para a seção térmica.

Novamente, esse outro parâmetro térmico da modelagem pseudo-homogênea apresenta a tendência de queda com o aumento da altura. Na verdade, em relação à condutividade térmica efetiva, este comportamento é de se esperar, pois o perfil de temperatura na saída da seção térmica tende a se desenvolver mais, ou seja, tende a se afastar mais do perfil de

entrada (que pode ser considerado plano) com o aumento da altura como se verifica nos perfis experimentais obtidos, causando assim uma diminuição no valor da condutividade térmica efetiva.

Apesar dos valores mais elevados da condutividade radial na altura de 10 cm, o comportamento da condutividade em função da altura em ambas as alturas mostra-se os mesmo como pode se verificar na Fig. (9).

Também para as outras partículas estudadas, ocorre o mesmo comportamento de k_r em função da altura utilizada de seção térmica.

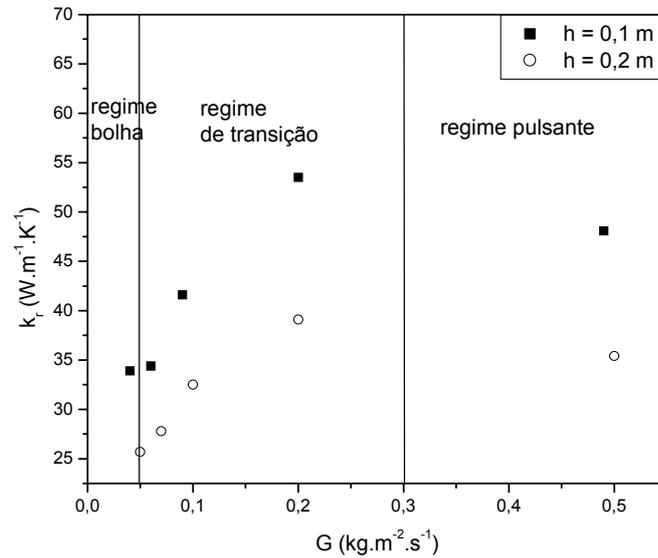


Figura 9. k_r em função da vazão de ar parametrizado nos regimes de escoamento e na altura do leito.

3.3.3 Influência da vazão de água

Quanto à influência da vazão de água sobre o coeficiente de troca térmica na parede verifica-se para todas as partículas estudadas, conforme se mostra na Fig. (10) para as esferas de 1,9 mm, que há um aumento de h_p com a vazão de água.

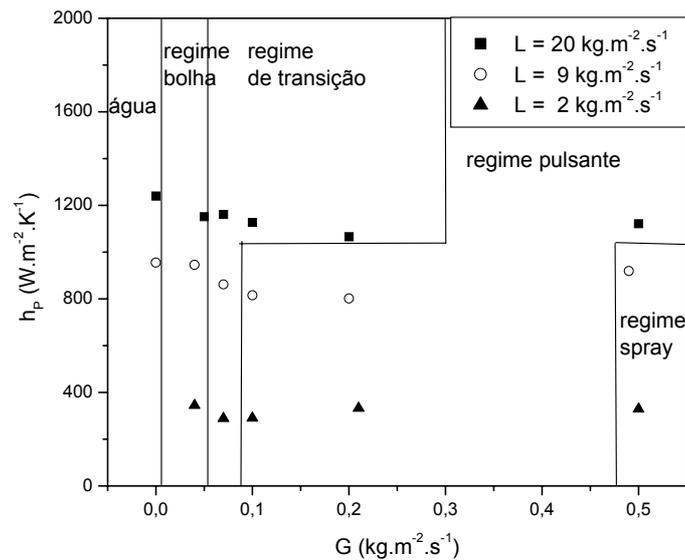


Figura 10. h_p em função da vazão de ar parametrizado nos regimes de escoamento e na vazão de água.

Isso ocorre devido às maiores velocidades de água junto à parede o que faz com que haja uma perturbação maior da camada limite ocasionando uma diminuição dessa resistência. O comportamento de h_p em função da vazão de ar para

todas as vazões de água é parecido, constata-se que o coeficiente de troca térmica parte de valores mais elevados no escoamento monofásico de água, havendo logo após uma diminuição de h_p com o aumento da vazão de ar atingindo um ponto de valor mínimo, logo após o qual os valores de h_p aumentam com o aumento da vazão de ar para as vazões de água mais elevadas. De certa forma os valores mínimos de h_p ocorrem nos regimes de transição e pulsante em torno da vazão de $0,2 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$.

Em relação à influência da vazão de água na condutividade térmica efetiva, a Fig. (11) apresenta esta influência para as esferas de 1,9 mm. Para as partículas maiores só se pode avaliar a influência da vazão de água na condutividade térmica nas condições estudadas de forma qualitativa através do perfil de temperatura na saída seção térmica. De acordo com o que é apresentado anteriormente sobre a ocorrência dos perfis planos de temperatura para as esferas de 3,1 e 4,4 mm se verifica que o aumento da vazão de água nas alturas de 10 e 20 cm torna o perfil mais parabólico, ou seja, o aumento da vazão de água implica em uma diminuição da condutividade térmica para as partículas maiores no escoamento bifásico.

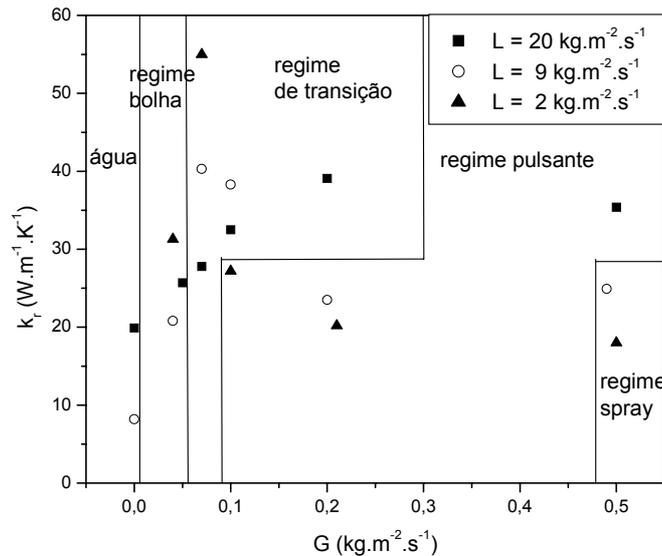


Figura 11. k_t em função da vazão de ar parametrizado nos regimes de escoamento e na vazão de água.

Quanto às partículas menores, no caso as esferas de 1,9 mm, é possível se realizar a comparação de k_t em função da vazão de ar para as vazões de água estudadas, pois com essa partícula não houve a ocorrência de perfil plano de temperatura nas condições estudadas possibilitando-se a obtenção de um valor único e finito para a condutividade térmica efetiva. Verifica-se através da Fig. (11) que existe uma modificação do comportamento de k_t em função da vazão de ar quando se compara a vazão de água de $20 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ com as vazões de água de 2 e $9 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. Para baixas vazões de água as esferas de 1,9 mm tendem a se comportar como as partículas maiores, tem-se baixos valores de condutividade no escoamento monofásico de água que aumentam rapidamente com o aumento da vazão de ar para baixas vazões de ar atingindo um ponto de máximo e logo após se iniciando uma queda de k_t com o aumento da vazão de ar. Cabe salientar, de acordo com o que se verifica na Fig. (11) que o ponto de máximo ocorre no regime de transição, entre as vazões de ar de 0,05 e 0,1 $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, tanto para a vazão de água de $2 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ quanto para a vazão de água de $9 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$.

Em relação à variação da condutividade com a variação da vazão de água para uma determinada vazão de ar pode-se dividir o comportamento em três regiões de vazão de ar, a primeira é no escoamento monofásico de água, a segunda é a região de vazão de ar de 0,05 a 0,1 $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ e a terceira e última é a região de vazão de ar acima de 0,1 $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. O comportamento da condutividade em função da vazão de água na primeira e na terceira região são idênticos, ou seja, o aumento da vazão de água causa um aumento da condutividade. Na segunda região ocorre o inverso, nessa região a condutividade aumenta e muito com a diminuição da vazão de água. Para as partículas maiores essas regiões também se fazem presentes, a diferença está no fato de que a segunda região sofre um alargamento em função de uma grande diminuição da terceira região.

Quanto à influência da vazão de água sobre Bi_{ef} se verifica que para as partículas maiores o aumento da vazão de água provoca um aumento de Bi_{ef} em toda a faixa de vazão de ar estudada, a não ser no caso do escoamento monofásico de água onde ocorre o inverso. Quanto às esferas de 1,9 mm, conforme pode-se visualizar na Fig. (12), a variação de Bi_{ef} com a vazão de água para vazões de ar abaixo ou igual a $0,1 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ segue a mesma tendência da variação de Bi_{ef} com a vazão de água para as partículas maiores, ou seja, o aumento da vazão de água ocasiona um aumento do número de Biot efetivo no escoamento bifásico e um comportamento inverso a esse no caso do escoamento monofásico de água. Para as vazões de 0,2 e 0,5 $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ verificam-se comportamentos similares entre si, mas diferentes dos comportamentos apresentados para vazões de ar menores. Isso já era de se esperar devido à mudança de comportamento

da condutividade térmica com o aumento da vazão de água. Desconsiderando então a vazão de água de $20 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, pode-se notar que o comportamento de Bi_{cf} em função da vazão de água para as esferas de 1,9 mm torna-se o mesmo comportamento já descrito para as partículas maiores.

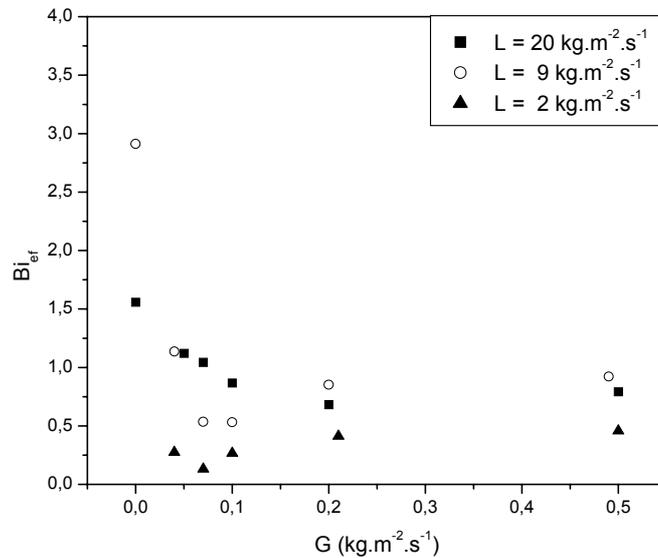


Figura 12. Bi_{cf} em função da vazão de ar parametrizado na vazão de água.

4. Conclusões

A partir do trabalho que se realiza verifica-se que os regimes encontrados no escoamento bifásico são os regimes spray, bolha, transição e pulsante. As interfaces entre os regimes e suas tendências pouco se alteram em função do diâmetro da partícula.

Quanto às medidas de saturação, a saturação total não é influenciada pelo diâmetro de partícula nas condições estudadas, mas apenas pelas vazões de ar e de água. O aumento da vazão de água ou a diminuição da vazão de ar acarretam no aumento da saturação total.

Em relação aos perfis de temperatura na saída da seção térmica, constata-se a existência de perfis parabólicos, intermediários e planos. Os perfis planos ocorrem nas alturas de seção térmica de 10 e 20 cm nas vazões de água de 2 e 9 $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ para as esferas de 3,1 e 4,4 mm. O aparecimento dos perfis planos se dá com o aumento do diâmetro da partícula, com a diminuição da vazão de água e com a aproximação ao regime bolha. Quanto aos perfis de temperatura na entrada da seção térmica pode-se dizer de uma forma geral que, no escoamento bifásico ascendente, nas condições estudadas, são relativamente planos.

O estudo da transferência de calor através dos parâmetros térmicos é possível apenas nas regiões onde o perfil de temperatura na saída da seção térmica não é plano e onde o perfil na saída não apresenta situações de oscilação que é o caso das partículas maiores na vazão de água de $20 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ em baixas vazões de ar.

Os parâmetros térmicos h_p e k_r são influenciados pela vazão de ar, principalmente k_r , pela vazão de água, pelo diâmetro e pela altura da seção térmica.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESP, ao CNPq e ao PRONEX pelo auxílio financeiro.

6. Referências

- Achwal, S. K. and Stepanek, J. B., 1976, "Hold-up Profiles in Packed Beds", Chemical Engineering Journal, Vol.12, pp. 69-75.
- Coberly, C. A. and Marshall MJr, W. R., 1951, "Temperature Gradients in Gas Streams Flowing Through Fixed Granular Beds", Chem. Eng. Progr., Vol. 47, No. 3, pp. 141-150.
- Colli Serrano, M. T. and Midoux, N., 2000, "Hydrodynamics and Heat Transfer in Packed Bed With Cocurrent Upflow for Coalescing and Non-Coalescing Liquids", Chemical Engineering Science, Vol.55, pp. 4149-4157.
- Gianetto, A. and Specchia, V., 1992, "Trickle Bed Reactors: State of Art and Perspectives" Chemical Engineering Science, Vol.47, No. 13-14, pp. 3197-3213.

- Giudici, R. and Nascimento, C. A. O., 1994, "Analysis of Ring Shaped Sensor for Use in Packed Bed Heat Transfer Studies", Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol.75, pp. 43-49.
- Iliuta, I.; Thyriou, F. C.; Muntean, O., 1996, "Hydrodynamic Characteristics of Two-phase Flow Through Fixed Beds: Air/newtonian and Non-newtonian Liquids", Chemical Engineering Science, Vol.51, No. 22, pp. 4987-4995.
- Lamine, A. S., Colli Serrano, M. T. and Wild, G., 1992, "Hydrodynamics and Heat Transfer in Packed Bed With Cocurrent Upflow", Chemical Engineering Science, Vol.47, No. 13-14, pp. 3493-3500.
- Marquardt, D. W., 1963, "An Algorithm for Least Squares Estimation of Nonlinear Parameters", SIAM – J. Appl. Math., Vol.11, pp. 431-441.
- Rao, V. G.; Ananth, M. S.; Varma, Y. B. G., 1983, "Hydrodynamics of Two-phase Concurrent Downflow Through Packed Beds", A.I.Ch.E. Journal, Vol.29, pp. 467-483.
- Turpin, J. L. and Huntington, R. L., 1967, "Prediction of Pressure Drop for Two-phase, Two-component Concurrent Flow in Packed Beds", A.I.Ch.E. Journal, Vol.13, pp. 1196-1202.

HEAT TRANSFER IN PACKED BED WITH COCURRENT UPFLOW OF GAS AND LIQUID: INFLUENCE OF FLOW REGIMES AND DIAMETER OF PARTICLES ON THE THERMAL PARAMETERS

Marcos Flávio Pinto Moreira

Federal University of São Carlos, Rodovia Washington Luiz km 235, POB 13.565-905, São Carlos, SP-Brazil
pmfmo@iris.ufscar.br

José Teixeira Freire

Federal University of São Carlos, Rodovia Washington Luiz km 235, POB 13.565-905, São Carlos, SP-Brazil
freire@power.ufscar.br

Abstract. *Packed bed reactors are very utilized in chemical and food industries. The control of temperature is very important in this operations in order to avoid "hot and cold points" that may cause the formation of undesired products, the deactivation of catalyst or danification of products for instance. In order to obtain the control of temperature becomes necessary the study about the heat transfer in packed bed. In this kind of configuration, the cocurrent upflow of gas and liquid presents interesting conditions to be identified, where, for example, the thermal parameters are relatively small or where measured radial temperature profiles are flat. To study heat transfer in packed bed with cocurrent upflow of gas and liquid the authors investigate initially the influence of gas and liquid flow rates and diameter of particles in the flow regimes and the liquid saturation and then the authors investigate the influence of gas and liquid flow rates, flow regimes, liquid saturation, diameter of particles and bed length on the radial effective thermal conductivity (k_r) and wall heat transfer (h_p) obtained by fitting the parameters of a two-dimensional pseudo-homogeneous model to the measured temperature profiles.*

Keywords. *heat transfer, flow regimes, two-phase upflow*