

ESTUDOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR ENTRE UM CILINDRO SUBMERSO E UM LEITO VIBRO-FLUIDIZADO CIRCULAR EM FUNÇÃO DO PARÂMETRO VIBRACIONAL

Celio Fernando dos Santos Camargo

Universidade Federal de São Carlos - Departamento de Engenharia Química
Rod. Washington Luiz, Km 235 – São Carlos, SP – 13565-905
camargo@celiocamargo.com

Jose Teixeira Freire

Universidade Federal de São Carlos - Departamento de Engenharia Química
Rod. Washington Luiz, Km 235 – São Carlos, SP – 13565-905
freire@power.ufscar.br

Resumo. Neste trabalho foi realizado um estudo fluidodinâmico e de transferência de calor em leitos vibro-fluidizados para acelerações médias vibracionais de até 65 m/s^2 . Para tanto foi projetado e construído um leito em acrílico de seção circular composto de um sistema de vibração que permitisse tal intensidade vibracional. Foram obtidas curvas características com o auxílio de transdutores de pressão ligados a um sistema computacional analógico/digital de aquisição de dados e os valores de queda de pressão tratados estatisticamente com o objetivo de determinar-se as curvas de desvio padrão das medidas realizadas. O comportamento do coeficiente global de transferência de calor, h , foi analisado em relação às condições vibracionais impostas ao leito e foi obtido experimentalmente a partir de um cilindro de latão imerso horizontalmente no leito. Os resultados mostraram que, na ausência de vibração as flutuações instantâneas de pressão observadas nas curvas de desvio padrão independe da altura do leito de partículas. Para os leitos vibro-fluidizados estas flutuações mostraram uma forte dependência da altura do leito e do parâmetro vibracional dentro do intervalo de variáveis estudado. Os resultados do coeficiente global de transferência de calor mostram um aumento de h com a imposição das vibrações e para maiores velocidades de ar

Palavras chave: transferência de calor, leito vibro-fluidizado, vibração, sistemas particulados

1. Introdução

A aplicação de vibrações mecânicas impostas ao leito fluidizado pode atenuar as irregularidades encontradas na fluidização convencional, tais como a formação de bolhas e canais no interior do leito. Um dos primeiros trabalhos com imposição de vibrações horizontais e verticais em leito fluidizado foi realizado por Bratu et al. (1964).

Segundo Bratu e Jinescu (1971) a imposição de vibrações em leitos fluidizados simultaneamente ao escoamento de ar aumenta o número de parâmetros dos quais depende a velocidade mínima de fluidização e também a queda de pressão resultando numa maior dificuldade de obter experimentalmente os valores destes parâmetros. Para quantificar a energia vibracional transferida para estes leitos através da amplitude (A) e frequência (f) utiliza-se o adimensional de vibração (Γ) proposto por Chlenov e Mikhailov (1972):

$$\Gamma = A \cdot (2 \cdot \pi \cdot f)^2 / g \quad (1)$$

Este adimensional pode ser interpretado fisicamente como a relação entre a aceleração média vibracional exercida sobre o sistema e a aceleração gravitacional (g).

De acordo com Strumillo e Pakowski (1980) em leitos submetidos à vibração as curvas características podem apresentar diferentes formas, pois são amplamente dependentes da razão entre as forças de vibração e as forças fluidodinâmicas que agem sobre o leito. Estas variações foram observadas por Garim (1998) e Camargo e Freire (2001).

Dependendo da intensidade, a vibração contribui na melhora da fluidez dos sólidos e no fenômeno de troca térmica. Alguns trabalhos tem sido publicados a respeito da determinação experimental do coeficiente de transferência de calor em leitos vibro-fluidizados. Eccles (1990) foi um dos poucos que estudou a transferência de calor corpo submerso-leito vibro-fluidizado. Segundo este autor, a circulação das partículas pode ser uma etapa dominante na transferência de calor em leitos de partículas. Nos leitos vibro-fluidizados tanto a vibração quanto à vazão de ar contribuem para um aumento no coeficiente de troca térmica, no sentido que aumentam as taxas de circulação das partículas, pois segundo Thomas et al. (1988) tanto a taxa de circulação dos sólidos como o tamanho dos espaços de ar aumentam quando a intensidade vibracional é aumentada, interferindo assim na transferência de calor. Ainda há a necessidade de mais trabalhos sobre a transferência de calor em leitos vibro-fluidizados visando responder a inúmeras questões ainda não devidamente pesquisadas.

Assim visando dar continuidade aos estudos sobre leitos vibro-fluidizados e levando-se em conta as vantagens que o uso da vibração propicia aos leitos fluidizados e o amplo potencial de aplicação deste tipo de leito, este trabalho tem como objetivos:

- apresentar os resultados das curvas características em leitos fluidizados e vibro-fluidizados para Γ até 6,6 analisando-os através das curvas de desvio padrão das medidas realizadas
- avaliar a influência das condições vibracionais; altura do leito e da velocidade do ar no coeficiente global de transferência de calor entre um leito vibro-fluidizado e um corpo nele submerso.

2. Equipamento Experimental

O leito vibro-fluidizado utilizado neste trabalho tem uma célula de medida com secção circular, de 0,12 m de diâmetro por 0,5 m de altura e foi construída em acrílico para um acompanhamento visual da camada fluidizada. Esta célula é fixada sobre um distribuidor também de secção circular que consiste de uma placa de 2×10^{-3} m de espessura e uma porcentagem de área aberta de 30% com diâmetro dos furos de aproximadamente 1×10^{-3} m. Uma tela com diâmetro inferior ao das partículas constituintes do leito está localizado logo acima desta placa, objetivando uma melhor distribuição do ar.

O conjunto é fixado em um eixo retificado que desliza verticalmente sobre buchas de esferas e é acoplado a uma haste ligada a um mecanismo excêntrico que converte o movimento rotacional transmitido por correias e polias de um motor para movimento senoidal vertical do leito. O mecanismo excêntrico permite o ajuste da amplitude desejada. Acoplado ao motor um variador de velocidade permite o ajuste da frequência rotacional, a qual era medida por um tacômetro ótico. A aceleração, a velocidade e o deslocamento a qual o sistema reage a vibração imposta foram monitoradas por um acelerômetro piezoelétrico. O ar que alimentava o sistema era proveniente de um soprador de 7,5 cv.

A regulagem da vazão de ar fornecido ao sistema era efetuada por uma válvula “by pass”, e monitorada através da leitura da diferença de pressão de medidor de vazão tipo placa de orifício, previamente calibrado. O ar atmosférico proveniente do soprador era dividido e injetado em contra-corrente na base do leito, abaixo da placa distribuidora que serve de sustentação ao leito. As medidas de pressão na célula e na placa foram obtidas por meio de transdutores de pressão. A tomada de pressão localizada abaixo da placa distribuidora ligada ao sistema de aquisição de dados permitia acompanhar a variação da pressão continuamente através do microcomputador.

Para compor o leito foram utilizadas partículas esféricas de vidro com diâmetro médio de $1100 \mu\text{m}$ e massa específicas de $2,6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$. Nos experimentos variou-se a altura do leito estático em: 7×10^{-2} ; 9×10^{-2} e 11×10^{-2} m, respectivamente.

Durante todos os experimentos de transferência de calor, o cilindro de teste foi localizado no centro geométrico do leito de partículas. Um suporte externo, fixado independente do sistema, era o responsável pela condição estática e fixação geométrica do cilindro dentro do leito. As temperaturas do leito e ambiente foram monitoradas por termopares tipo J (ferro-constantan), e as temperaturas do cilindro por termopares tipo K (cromel-alumel). Todos os termopares utilizados eram ligados a uma placa de condicionamento de sinais e ao microcomputador equipado com uma placa de aquisição de dados analógico digital.

2.1 Cilindro de testes

A Figura 1 apresenta o cilindro de testes utilizado neste trabalho. O latão foi o material escolhido para a confecção do cilindro, por sua boa condutividade térmica ($111 \text{ W/m}^\circ\text{C}$). O cilindro possui $2,5 \times 10^{-2}$ m de diâmetro e 5×10^{-2} m de comprimento e é equipado internamente com uma resistência elétrica de $3,3 \Omega$ que é conectada a um amperímetro com precisão de 0,001 ampère.

Uma peça de teflon, com o mesmo diâmetro do cilindro e com $1,5 \times 10^{-2}$ m de comprimento, foi utilizada em cada uma das extremidades do aquecedor servindo de conexões as duas hastes de fenolite que sustentam o cilindro. Por sua baixa condutividade térmica ($0,24 \text{ W/m}^\circ\text{C}$), o teflon minimiza a troca térmica nas faces laterais do cilindro e também permite quantificar esta perda térmica já que verificou-se, através de testes preliminares, um comportamento de aleta no que se refere ao perfil de temperatura. Este perfil foi obtido através da leitura das temperaturas por meio de quatro termopares.

No cilindro de latão, os fios dos quatro termopares tipo K tinham diâmetro de 0,1 mm. Foram instalados radialmente no cilindro da seguinte forma: um na parte inferior, um na parte superior e um em cada uma das laterais do cilindro, portanto a 90° um do outro, e todos no centro axial do mesmo. A Figura 1b mostra a disposição destes termopares dentro do cilindro.

Cada termopar, com seus fios encapados e isolados termicamente, são embutidos na haste de fenolite e entram no cilindro através de um orifício. A cabeça do termopar é fixada com cerâmica térmica faceando a superfície do cilindro. A pequena quantidade de cerâmica de alta condutividade térmica que fixa a cabeça do termopar assegura um rápido equilíbrio térmico com a superfície do cilindro, cuja resistência térmica é desprezível.

Quatro termopares tipo J com diâmetro de 0,1 mm foram instalados ao longo dos 15 mm de comprimento da peça de teflon com o objetivo de obter o perfil de temperatura. Fez-se quatro sulcos na superfície cilíndrica de uma das peças de teflon. As junções dos termopares foram colocadas sob pressão nestes sulcos certificando-se do bom contato térmico e fixação. A Figura 2 mostra as distâncias entre os termopares no teflon.

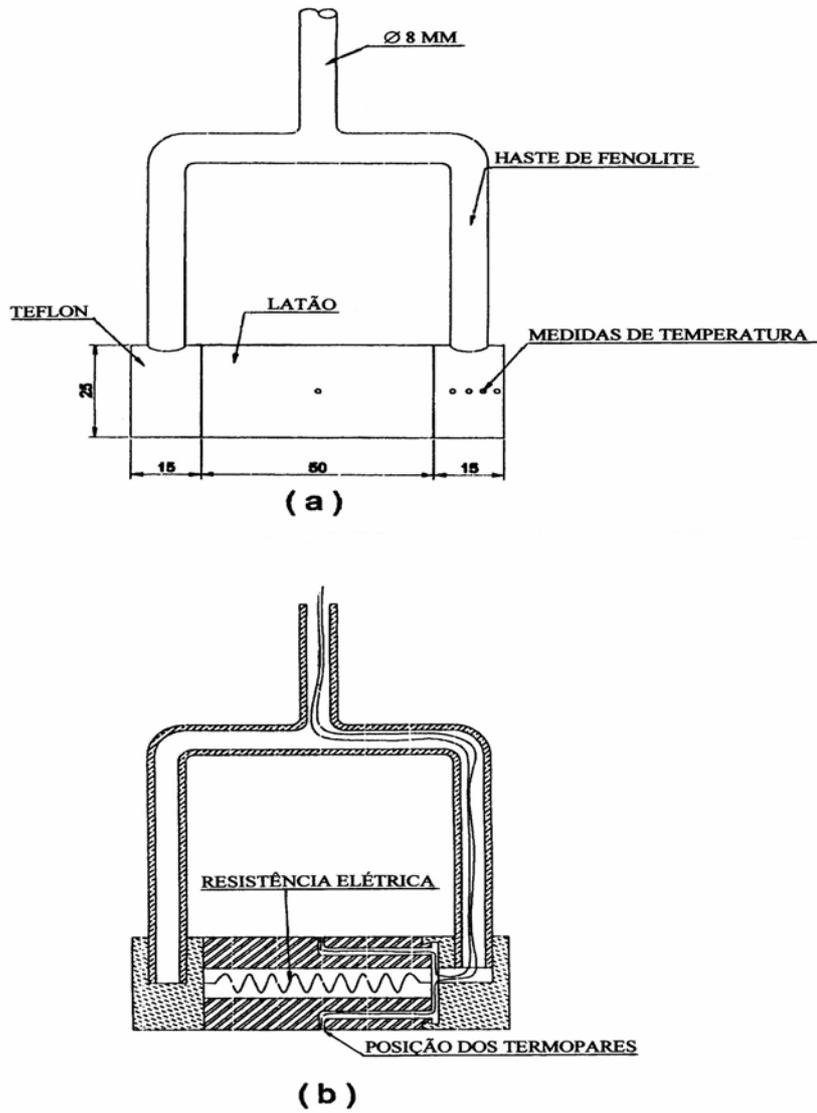


Figura 1. Cilindro de Testes (medidas em mm)
 (a) Vista do cilindro b) Corte do cilindro

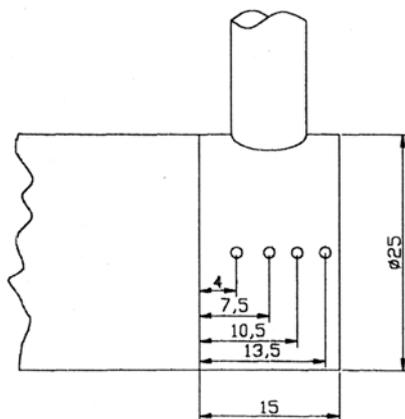


Figura 2. Distancias (em mm) entre os pontos de medidas de temperaturas na peça de teflon

3.1. Cálculo do Coeficiente global de transferência de calor

A equação utilizada para o cálculo do coeficiente foi:

$$h = \frac{R \cdot I^2 - 2Q_t}{A_c \cdot (T_c - T_L)} \quad (2)$$

Onde:

- h - Coeficiente global de transferência de calor [W/m²°C]
- I - Corrente elétrica fornecida ao cilindro de testes [A]
- A_c - Área de troca térmica do cilindro de testes [m²]
- T_c - Temperatura do cilindro de testes [°C]
- T_L - Temperatura do leito [°C]
- Q_t - Calor transferido por cada peça de teflon [W]

Vale ressaltar que nesta equação estão implícitas as hipóteses de regime permanente e condições isotérmicas do leito.

Nesta equação a única variável desconhecida é Q_t, que pode ser obtida aplicando-se um balanço de energia num elemento dx na peça cilíndrica de teflon e utilizando-se as condições de contorno para uma aleta infinita, cujo procedimento completo é descrito por Camargo (1998), obtendo-se:

$$Q_t = K_t \cdot A_t \cdot m \cdot (T_{x=0} - T_L) \cdot ((1+e^{-2mL})^{-1} - (1+e^{2mL})^{-1}) \quad (3)$$

Onde:

- K_t - Condutividade térmica do teflon [W/m°C]
- A_t - Área transversal da peça de teflon [m²]
- m - Parâmetro da solução, aplicando-se um balanço de energia na peça cilíndrica de teflon [-]
- T_{x=0} - Temperatura do cilindro de testes [°C]
- T_L - Temperatura do leito [°C]
- L - Comprimento da peça cilíndrica de teflon [m]

4. Resultados

Para o estudo de transferência de calor em leitos fluidizados submetidos à vibração faz-se necessário o conhecimento do comportamento fluidodinâmico que rege este tipo de leito. Para isto foram obtidas curvas características e de desvio padrão do leito vibro-fluidizado nas mesmas condições experimentais utilizadas na obtenção dos valores do coeficiente de transferência de calor. Com base nos gráficos obtidos, percebe-se a influência das diversas condições vibracionais impostas ao leito de partículas. Estas curvas são semelhantes às encontradas na literatura e nota-se que são influenciadas também pela altura do leito. Na Figura 4, para a altura de 11 x 10⁻² m percebe-se a existência de um patamar.

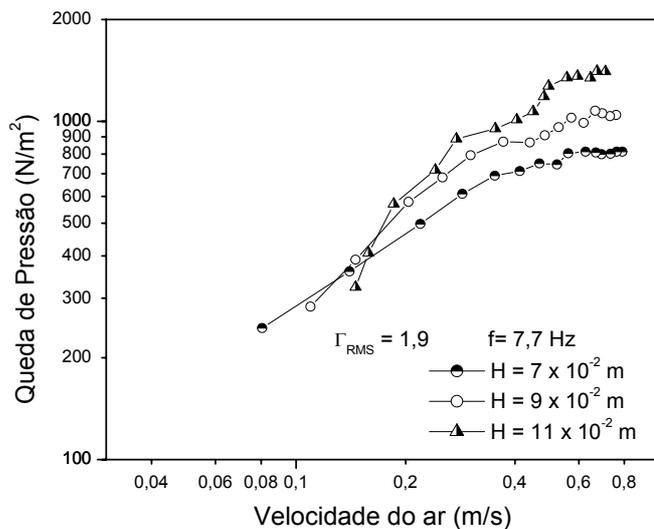


Figura 4. Curvas Características, A=10⁻² m

Este comportamento foi observado sob algumas condições vibracionais, e pode estar relacionado com o movimento das partículas antes do início da fluidização. Para esta altura, na velocidade de 0,3 m/s observa-se uma diminuição na taxa de crescimento da queda de pressão, tornando-a quase constante em função da velocidade do ar, isto representa o início do movimento das partículas. Na mesma curva observa-se que, a partir da velocidade de 0,5 m/s, a queda de pressão permanece constante, esta velocidade representa o início da fluidização. Verificou-se que para valores menores de altura do leito, a contribuição da vibração neste comportamento das curvas características é menor.

Pode-se dizer que para um valor constante do parâmetro vibracional, uma vazão de ar maior suporta um maior número de sólidos, os quais tornam-se menos influenciados pelas vibrações, isto reduz a contribuição da vibração na sustentação da camada mais leve e explica a pouca influência da vibração para altura de 7×10^{-2} m. Nesta altura de leito a força exercida pelo fluido sobre a camada no ponto onde a velocidade é a 0,58 m/s, é igual ao peso da mesma, de tal forma que a força vibracional não mais contribui na sustentação da camada e as vibrações a partir deste ponto apenas favorecem uma melhor qualidade da fluidização.

Uma vez que, de acordo com o procedimento experimental, cada valor de queda de pressão representa a média de 200 pontos amostrados com um transdutor de pressão, foi possível calcular a variação destes valores em torno da média, obtendo-se curvas de desvio padrão relacionadas com as da Figura 4, as quais estão representadas na Figura 5.

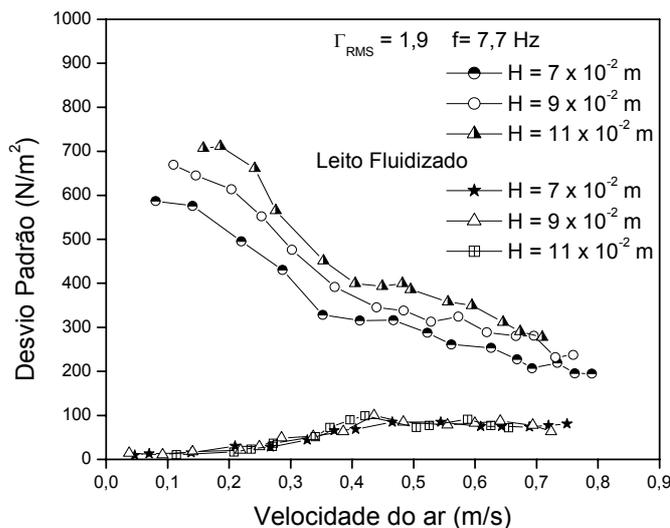


Figura 5. Curvas de Desvio Padrão para leito fluidizado e vibro-fluidizado, $A=10^{-2}$ m

Nesta curva também estão representados os valores de desvio padrão para o leito fluidizado nas alturas do leito estudadas, onde percebe-se que para estes leitos, as flutuações nos valores de queda de pressão independem da altura do leito. Os valores máximos dessas flutuações ocorrem na região fluidizada e o valor não excede 10% da queda de pressão no ponto correspondente. Porém com a presença de vibrações isto não ocorre, o que não é possível de ser verificado apenas pelas curvas características. Através da Figura 5 pode-se verificar uma tendência de queda no desvio padrão com o aumento da velocidade de ar, isto pode ser explicado pelo fato de que, para baixos valores de velocidade do ar, a força vibracional exerce uma influência maior nas características fluidodinâmicas do leito do que a força causada pelo escoamento de ar. As vibrações verticais provocam uma maior oscilação de pressão no leito, que é continuamente atenuada pelo aumento da força exercida pelo escoamento de ar que de certa forma, tende a sustentar de maneira cada vez mais intensa o leito de partículas. Este comportamento também foi observado quando a análise é feita para valores diferentes de Γ numa altura fixa, como pode ser verificado na Figura 6.

Percebe-se que não há uma diferença considerável nos valores de desvio padrão encontrados nesta condição experimental, principalmente entre os valores de 4,4 e 6,6 do parâmetro vibracional. Uma importante constatação é que a frequência vibracional menor, no caso 7,7 hertz, resultou em maiores valores para o desvio padrão, porém até a velocidade de 0,5 m/s, isto porque frequências maiores provocam uma maior expansão do leito deixando-o menos suscetível a oscilação no valor da queda de pressão. Após a velocidade de 0,5 m/s não houve uma diferença considerável entre as curvas, tendo todas aproximadamente o mesmo comportamento. Este resultado reforça a explicação de que o aumento da velocidade do ar atenua o efeito da vibração, e neste gráfico, verifica-se que esta atenuação independe da intensidade vibracional, ou seja, independente do valor de Γ , acima de um certo valor da velocidade do ar observa-se a mesma tendência para o desvio padrão no leito.

Pode-se dizer que todo este comportamento parece estar relacionado com as mudanças que ocorrem no movimento das partículas, na formação de bolhas, na porosidade e na permeabilidade do leito, e todas estas variáveis em conjunto provocam uma mudança na resistência do leito ao escoamento de ar, que por sua vez interfere nos fenômenos de troca térmica.

Para a obtenção dos dados de transferência de calor foram escolhidos valores de velocidades que situassem nas três regiões distintas da curva característica de leito fluidizado, região de leito fixo, região de mínima fluidização e região de queda de pressão constante. Procurou-se selecionar valores nas quais era possível a fluidização de no mínimo, três alturas de leito, para uma análise de comportamento do coeficiente com a velocidade, tendo como parâmetro a altura do leito.

Na faixa de Γ estudados, os resultados mostraram um comportamento semelhante do coeficiente de troca térmica com o aumento do parâmetro vibracional. Observou-se nos resultados que h teve um aumento significativo com Γ , apresentando um pico (valor máximo) na maioria dos resultados. O que diferencia uma condição experimental da outra é a região do parâmetro vibracional na qual acontece esta tendência para o coeficiente. Pode-se notar no entanto, que as maiores diferenças obtidas entre os valores dos coeficientes para leito fluidizado e os valores máximos dos coeficientes com a vibração são observados para as velocidades de ar menores. Este comportamento ocorreu para todas as alturas de leito estudadas.

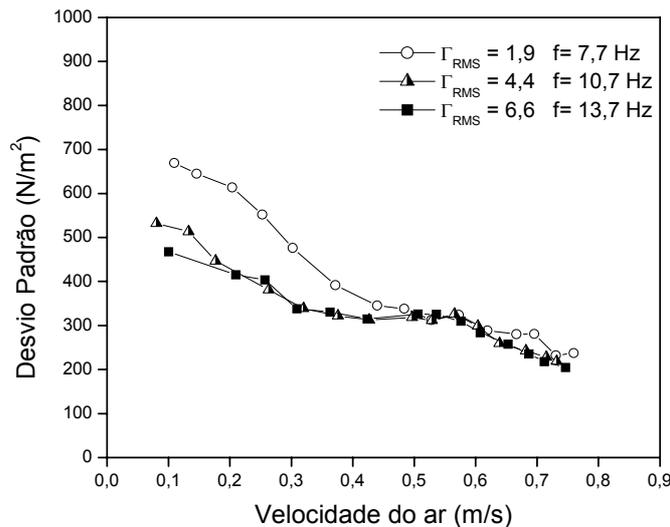


Figura 6. Curvas de Desvio Padrão para leito vibro-fluidizado, $A=10^{-2}$ m e $H=9 \times 10^{-2}$ m

A Figura 7 mostra o comportamento do coeficiente em função do adimensional de vibração, tendo como parâmetro as três velocidades superficiais do ar. Estão incluídos na figura os valores de h obtidos no leito fluidizado, o qual corresponde à condição de parâmetro vibracional igual a 0. Entre os resultados encontrados na literatura os de Malhotra e Mujumdar (1985) foram os que mais se aproximaram dos obtidos neste trabalho. Estes pesquisadores utilizaram um cilindro horizontal imerso num leito vibro-fluidizado retangular composto de partículas de vidro de $670 \mu\text{m}$ e $U/U_{mf} = 0,4$.

Verifica-se que para as velocidades de 0,20 m/s e 0,30 m/s encontrou-se uma acentuada elevação no valor de h no parâmetro vibracional de 1,4, porém na curva para a velocidade de 0,45 m/s o valor máximo de h se encontra em Γ igual 1,8. Pode-se afirmar que, nesta condição experimental, maior circulação de partículas ocorre para valores maiores de Γ à medida que a velocidade do ar aumenta. Na mesma figura, para a velocidade de 0,45 m/s percebe-se que o acréscimo em h é menor quando comparado com as outras duas velocidades, isto mostra que maiores velocidades de ar provocam uma dependência menor do coeficiente com a vibração. Este comportamento de atenuação do efeito da vibração em h com o aumento da velocidade do ar no leito é resultado do que foi verificado nas curvas de desvio padrão, ou seja, verificou-se na Figura 6 que com o aumento da velocidade do ar, o leito “sente” cada vez menos a vibração e que acima de 0,5 m/s o leito não distingue o valor da intensidade vibracional a qual está submetido.

Generalizando, pode-se dizer que todo este comportamento parece estar relacionado ao fato de que na ausência de vibração a velocidade do ar é responsável pelo movimento das partículas, ou seja, maiores velocidades do ar resultam em melhor circulação e, conseqüentemente, no aumento do coeficiente térmico, como pode ser verificado na Figura 7, para as três velocidades em Γ igual 0. Com a imposição da vibração, esta começa inicialmente agindo como um complemento à velocidade do ar melhorando ainda mais a circulação destas partículas, atingindo um pico, passando em seguida a compactar levemente o leito fazendo com que a taxa de circulação das partículas diminua sensivelmente refletindo no coeficiente de transferência de calor que tende a permanecer aproximadamente constante. Esta tendência também foi verificada para diferentes alturas de leito como pode ser observado na Figura 8 para altura de leito de 11×10^{-2} m.

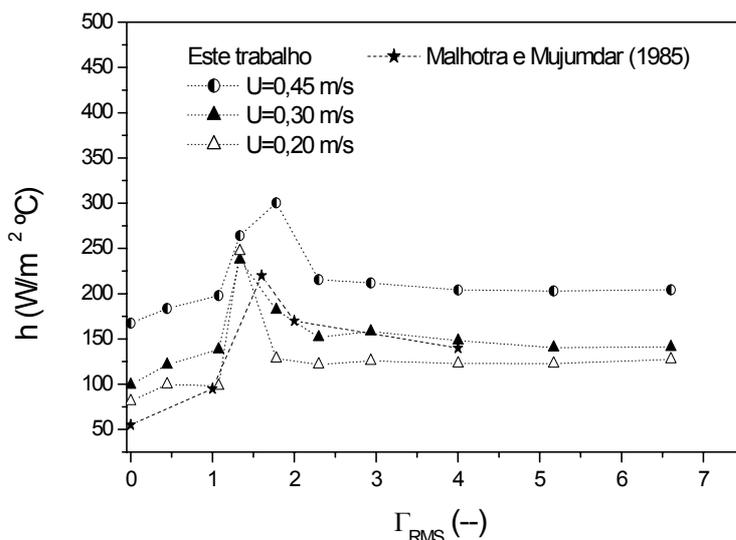


Figura 7. Influencia da intensidade vibracional no coeficiente de transferência de calor, $H = 9 \times 10^{-2}$ m

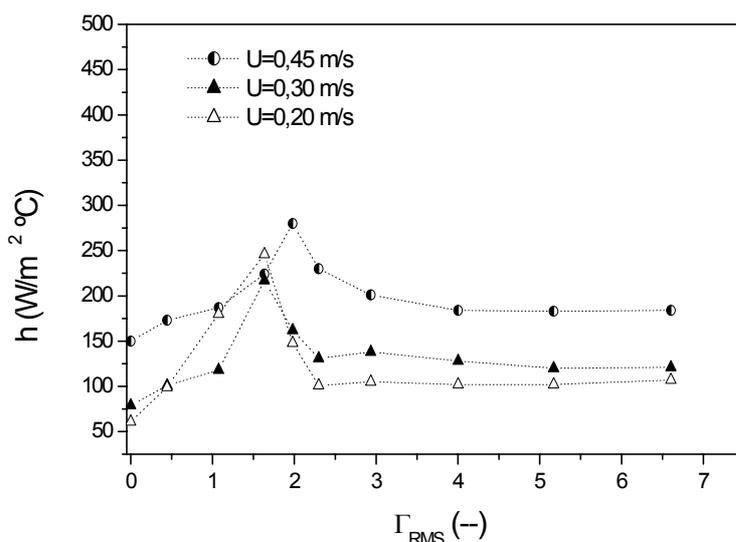


Figura 8. Influencia da intensidade vibracional no coeficiente de transferência de calor, $H = 11 \times 10^{-2}$ m

Segundo THOMAS et al. (1988), o comportamento do coeficiente de transferência de calor em um leito submetido à vibração depende de vários parâmetros experimentais, como: geometria do aquecedor (cilindro, esfera ou placa), posição do aquecedor dentro do leito (vertical ou horizontal), distância do aquecedor em relação à placa distribuidora, parâmetro vibracional, geometria do leito, tamanho e forma das partículas e velocidade do ar. Afirma que a curva de h em função de Γ é modelada pela taxa de circulação das partículas, e que esta circulação é o resultado do efeito conjunto de todos os parâmetros experimentais. Isto pode justificar porque o máximo para o coeficiente de troca térmica ocorre em valores diferentes do parâmetro vibracional quando varia-se pelo menos um dos parâmetros experimentais.

A Figura 9 mostra os resultados obtidos tomando-se como parâmetro a altura do leito.

Vale ressaltar que quando variava-se a altura do leito a distância entre o eixo do cilindro e placa distribuidora era exatamente a metade da altura do leito, ou seja, o cilindro encontrava-se no meio da camada de sólidos. Isto parece ser um dos principais motivos das diferenças dos valores do coeficiente de transferência de calor obtidos nos experimentos para alturas de leito diferentes.

Como pode ser verificado para a velocidade de 0,45 m/s (Figura 9), o comportamento do coeficiente foi um pouco maior para alturas de leito menores. A explicação para isto parece estar relacionada com a transferência de calor convectiva cilindro-ar. Isto porque para maiores valores de alturas de leito o cilindro localizava-se um pouco mais longe

da placa distribuidora e isto fez com que esta componente convectiva fosse menor quando comparada com o cilindro em posições mais próximas à placa distribuidora. Verifica-se que para todas as alturas de leito as curvas tiveram a mesma tendência, ou seja, iniciam com um valor mínimo que corresponde ao leito fluidizado, apresentaram um máximo para o coeficiente, que neste caso foi para valores de Γ entre 1,5 e 2 aproximadamente, e depois verifica-se uma queda e acima de Γ igual a 3,5 ficam praticamente constante.

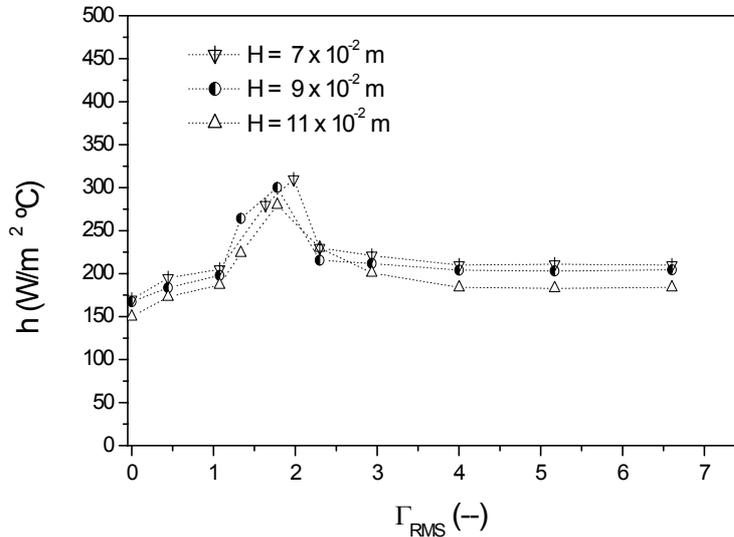


Figura 9. Influencia da intensidade vibracional no coeficiente de transferência de calor, $U=0,45 \text{ m/s}$

Todas estas variações fluidodinâmicas provocadas por mudanças em algumas das variáveis que regem o sistema, fizeram com que valores maiores do coeficiente fossem obtidos para os experimentos localizados próximos a região de queda de pressão constante do que para os localizados na região de leito fixo. Esta análise mostra que as variações em h estão amplamente relacionadas com as condições fluidodinâmicas do leito, que por sua vez é uma função decrescente da intensidade vibracional com o aumento da velocidade do ar, como foi detectado nas curvas de desvio padrão.

Através de uma análise mais global pode-se afirmar que, embora tenham ocorrido variações no coeficiente de troca térmica, somente o monitoramento da queda de pressão no leito e o levantamento da curvas de desvio padrão não são suficiente para a explicação completa destas variações. Para uma elucidação completa do fenômeno faz-se necessário um estudo mais detalhado das condições fluidodinâmicas do leito, tais como: tamanho e numero de bolhas, taxa de circulação, distribuição das partículas na superfície do cilindro imerso no leito, porosidade e efeitos de ressonância caso este esteja presente.

5. Conclusões

Os estudos realizados no leito vibro-fluidizado descrito neste trabalho, permitiram, dentro da faixa dos parâmetros estudados, obter as seguintes conclusões:

- as curvas características são semelhantes às encontradas na literatura para valores de variáveis estudadas;
- o comportamento das curvas características obtidas está relacionado não só com o adimensional de vibração como também com a altura do leito;
- através das curvas de desvio padrão pode ser obter uma boa representação das mudanças fluidodinâmicas que ocorrem no leito;
- na ausência de vibração, a queda de pressão representada pelas curvas de desvio padrão é independente da altura do leito de partículas;
- maiores alturas de leito resultaram em maiores valores para o desvio padrão;
- baixas velocidades de ar e menores frequências resultaram em maiores valores de desvio padrão;
- para altos valores de velocidade do ar o comportamento da flutuação de pressão independe do valor do parâmetro vibracional;
- através das curvas de desvio padrão, pode-se determinar as condições nas quais a vibração imposta é predominante em relação a força exercida pelo escoamento de ar através do leito de partículas.
- em leitos vibro-fluidizados para um parâmetro vibracional constante, maiores velocidades de ar resultam em maiores coeficientes de transferência de calor;
- baixas velocidades de ar provocam uma maior dependência do coeficiente de troca térmica com o parâmetro vibracional. Para velocidades de ar maiores, o aumento de h é menos significativo.

- por fim, na faixa do parâmetro vibracional estudado o acréscimo de h foi comparável com os encontrados na literatura para condições experimentais semelhantes.

6. Agradecimentos

O desenvolvimento deste trabalho contou com o apoio do PRONEX e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, através de uma bolsa de doutorado.

6. Referências

- Bratu, E. & Jinescu, G. I., 1971, “Effect of vertical vibration on the pressure drop in a fluidized layer”, British Chemical Engineering, 16 (18), pp. 691-695
- Bratu, E. ; Jinescu, G. & Ruckenstein, E., 1964, “Strat Fluidizat vibrat”, Communication to fluidization congress, Warsaw, september, 1964
- Camargo, C. F. S., 1998, “Determinação do coeficiente global de transferência de calor de um cilindro submerso em um leito vibro-fluidizado”. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, SP.
- Camargo, C. F. S. e Freire, J. T. , 2001, “Fluidodinâmica de um leito vibro-fluidizado: análise das curvas de desvio características utilizando curvas de desvio padrão” Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, São João Del Rey, out. 2001
- Chlenov, V. A. & Mikhailov, N. V., 1972,, “Vibro Kipyaschiy sloy (vibrofluidized bed)”. Nauka, Moscow.
- Eccles, E. R. A., 1990, “Flow and heat transfer phenomena in aerated vibrated beds” Ph.D. Dissertation, McGill University, Montreal, 1990, 202 p.,
- Garim M. M. , 1998, “Estudos dos coeficientes de transferência de massa de um corpo submerso em leitos fluidizados e vibro-fluidizados”. Tese de Doutorado. Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, SP.
- Strumillo, C. & Pakowski, Z., 1980, “Drying of granular products in vibrofluidized beds”, Drying’80: development in drying. vol 1, Ed. A. S. Mujumdar, Hemisphere Publishing Corp., New York, pp. 211-226.
- Thomas, B. et al., 1988, “Vibrated beds: new tools for heat transfer” Chem. Eng. Prog., EUA, p. 65-75

STUDY OF HEAT TRANSFER BETWEEN A HORIZONTAL CYLINDER AND A CIRCULAR VIBROFLUIDIZED BED AS A FUNCTION OF VIBRATION PARAMETER

Celio Fernando dos Santos Camargo

Universidade Federal de São Carlos - Departamento de Engenharia Química
Rod. Washington Luiz, Km 235 – São Carlos, SP – 13565-905
camargo@celiocamargo.com

Jose Teixeira Freire

Universidade Federal de São Carlos - Departamento de Engenharia Química
Rod. Washington Luiz, Km 235 – São Carlos, SP – 13565-905
freire@power.ufscar.br

Abstract. *Aerodynamic and heat transfer mechanisms are studied in a vibrofluidized bed for vibration accelerations up to 65 m/s². The pressure drop was obtained with an acquisition data system and a statistical analysis was employed to obtain the standard deviation curves. A brass horizontal cylinder immersed in the bed was used to obtain the global heat transfer coefficient, which was analyzed as a function of vibration parameter. Results show that, in a fluidized bed the pressure oscillations do not change with bed height. In the range of parameters investigated, the oscillations in a vibrofluidized bed depend on the bed height and on the vibration parameter. The heat transfer results show that, the global heat transfer coefficient increases with the imposition of the vibration and with the air velocity.*

Keywords. *Heat transfer, vibrofluidized bed, vibration, particulate systems*