

## II-069 - ESTUDO PARA A DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES HIDRÁULICAS DE PARTIDA DE UM REATOR DE LEITO FLUIDIZADO

### **Ricardo Gonçalves de Moraes<sup>(1)</sup>**

Engenheiro Químico pela Universidade Federal do Paraná. Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental pela Universidade Federal do Paraná.

### **Sérgio Michelotto Braga**

Engenheiro Elétrico Industrial, com ênfase em Eletrônica e Telecomunicações, pela Universidade Tecnológica do Paraná. Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental pela Universidade Federal do Paraná. Doutor em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental pela Universidade Federal do Paraná. Professor Adjunto da Universidade federal do Paraná, lotado no Departamento de Hidráulica e Saneamento.

### **Maria Cristina Borba Braga**

Engenheira Química pela Universidade Federal do Paraná. Mestre em Bioquímica pela Universidade Federal do Paraná. Doutora em Environmental Technology pelo Imperial College of Science, Technology and Medicine da Universidade de Londres. Professora Associada na Universidade Federal do Paraná, lotada no Departamento de Hidráulica e Saneamento.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Rua Doutor Ovande do Amaral, 612 – Jardim das Américas - Curitiba - PR - CEP: 81520060 - Brasil - Tel: (41) 99915-3887 - e-mail: morathemora@gmail.com

### **RESUMO**

Visando o tratamento de lixiviado de aterro sanitário, nesta pesquisa foi desenvolvido um estudo para a determinação das condições de partida de um reator de leito fluidizado. Primeiramente, foi construído e calibrado um medidor de vazão Venturi e, também, construído um distribuidor de fluxo, instalado na base cônica do reator de leito fluidizado. Simultaneamente, foram determinadas as características do material suporte, sendo que, para este estudo, foi adotada a areia, em três granulometrias diferentes, com diâmetros médios geométricos de 357  $\mu\text{m}$ , 505  $\mu\text{m}$  e 714  $\mu\text{m}$ . As características hidráulicas determinadas foram: a velocidade mínima de fluidização prática para a areia, e comparado o resultado com a velocidade mínima de fluidização teórica, fornecida pela equação de Ergun; a velocidade mínima de fluidização do leito para diferentes vazões aplicadas, para cada uma das granulometrias e quantidades de areia. Além disso, foram estudadas as condições de fluidização em função da utilização de esferas de vidro e de anéis de Rashig como coadjuvantes à distribuição de fluxo. Um segundo distribuidor de fluxo foi projetado e instalado na base cilíndrica do reator para melhorar a distribuição e diminuir a formação de canais preferenciais. Após esta modificação, uma nova avaliação da fluidização do leito foi realizada, para a areia de diâmetro médio geométrico de 357  $\mu\text{m}$ . Por fim, foi observado que, após todos os testes hidráulicos, o reator de leito fluidizado estudado pode ser utilizado para o tratamento de lixiviado de aterro sanitário, com as diferentes granulometrias avaliadas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Leito fluidizado, Velocidade mínima, Fluidização, Tubo Venturi, Partida de reator.

### **INTRODUÇÃO**

O reator de leito fluidizado é amplamente utilizado na indústria, em processos de troca de calor, secagem, mistura, reações químicas e bioquímicas. No saneamento, teve os primeiros registros na literatura científica na década de 1980 (Switzenbaum e Jewell, 1980; Shieh, Sutoon e Kos, 1981).

Para uma partida rápida e operação eficiente, é necessário determinar algumas condições hidráulicas como, por exemplo, velocidade mínima de fluidização e velocidade de arraste do material suporte, assim como as faixas de fluidização do leito e a formação de caminhos preferencias.

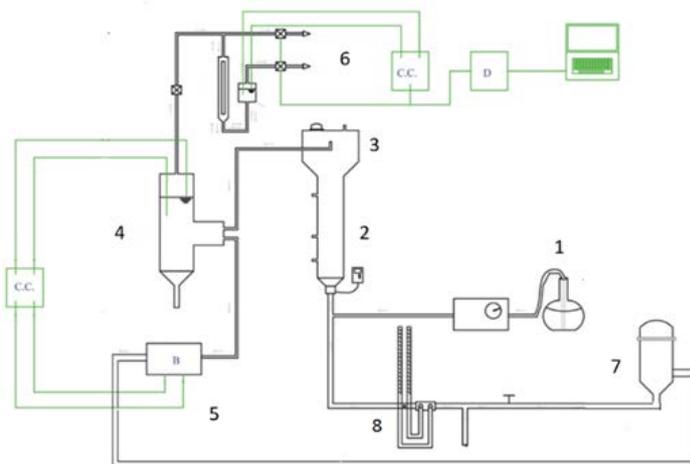
Dessa maneira, o objetivo desta pesquisa foi determinar os parâmetros necessários para a partida de um reator de leito fluidizado, visando à aplicação para o tratamento anaeróbio de lixiviado de aterro sanitário. Salientando que a biomassa se desenvolve sobre a superfície do suporte sólido, o que aumenta a eficiência do tratamento, pois a movimentação constante das partículas associada à área de superfície específica de material

suporte permite maior tempo de contato entre a água residuária e o material biológico, ou biomassa, que forma a biopartícula.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Concepção do sistema

Para o desenvolvimento da pesquisa, o sistema reator de leito fluidizado/decantador/medidor de vazão foi modificado de Braga (1989) e Weber (2006). A conformação geométrica do reator foi a mesma adotado por Weber (2006), enquanto o decantador secundário e o medidor de vazão foram concebidos e construídos no Laboratório de Monitoramento Eletrônico – LME, do departamento de Hidráulica e Saneamento, da UFPR, especificamente para esta pesquisa. A representação esquemática do sistema de tratamento de lixiviado é apresentada na Figura 1.



**Figura 1 - Representação esquemática do sistema de tratamento de lixiviado**

Fonte: modificado de Weber (2006)

Legenda: 1- reservatório de alimentação do lixiviado bruto, 2- reator de leito fluidizado, 3- decantador primário, 4- decantador secundário, 5- sistema de recirculação, 6- sistema de medição de gás, 7- tanque pulmão, 8 - venturi.

O reator de leito fluidizado (RLF) foi construído em acrílico; com volume total aproximado de 17 L e volume útil de 6L; em conformação cilíndrica; com um decantador acoplado no topo, conforme Figura 1. O RBL foi concebido para operar em fluxo ascendente, sendo que o suporte sólido adotado para o desenvolvimento da pesquisa foi a com areia de construção civil, que apresenta área de superfície específica igual a 444 m<sup>2</sup>/g, e peso específico igual a 2690 kg/m<sup>3</sup>.

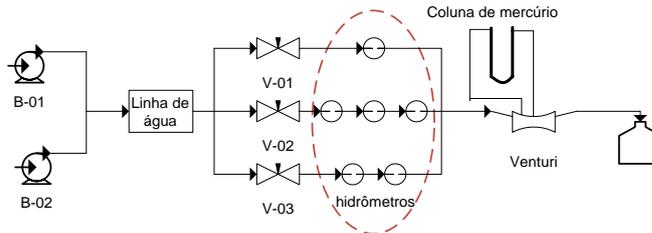
O decantador primário, acoplado no topo do corpo do reator, tem altura de 15 cm e diâmetro de 27 cm. Sua base é cônica com inclinação de 45°; o diâmetro superior é de 27 cm e a altura de 7,25 cm. O volume total, aproximado, é de 10,9 L, com volume útil de 7,3 L.

Para garantir a distribuição do fluxo influente ao reator e, assim, proporcionar uniformidade da fluidização, dois distribuidores de fluxo, compostos por placas perfuradas, foram concebidos e construídos em acrílico. Um deles acoplado na parte cônica inferior do RLF e, o outro, instalado na região cilíndrica do reator. Este distribuidor consiste de duas placas perfuradas, espaçadas entre si por 2,5 cm e altura total de 4,5 cm. Para a retenção do fluxo, em caso de retorno devido à interrupção do fornecimento de energia ao sistema, uma esfera de vidro com diâmetro de 1,2 cm foi instalada no interior do primeiro distribuidor de fluxo do RLF. Também foram avaliadas as performances do reator com dois materiais para distribuição de fluxo: esferas de vidro, com diâmetro de 1,5 cm e massa específica de 2,12 g/cm<sup>3</sup>; e anéis de Rashig cilíndricos, com altura de 1,5 cm e diâmetro de 1 cm.

### Medidor de vazão (tubo Venturi)

Para a medição da vazão, um tubo Venturi foi projetado e construído em acrílico. A calibração foi realizada por meio de sensores de alta precisão, e os valores correspondentes a variação de vazão lidos em uma coluna

de mercúrio. A variação da vazão foi realizada pela alteração da potência de duas bombas, ou por um sistema de hidrômetros. Na Figura 2 é apresentado o sistema para a calibração do Venturi.



**Figura 2 - Sistema de calibração do Venturi**

### Material suporte

Em função do peso específico e, também, da facilidade e custo de aquisição, a areia foi adotada como material suporte para o crescimento da biomassa no reator de leito fluidizado. Para a determinação da granulometria desejada, a areia foi separada em peneira eletromecânica (VIATEST, VSM200).

Para o cálculo do diâmetro médio geométrico foi adotada a Equação 1 (Boening e Pfeffer, 1984, citado por Braga 1989).

$$d_g = \sqrt{d_1 d_2} \quad \text{Equação 1}$$

Em que:

$d_g$  é o diâmetro médio geométrico,  $d_1$  e  $d_2$  são os diâmetros de abertura superior e inferior, respectivamente.

A porosidade da areia foi determinada a partir do conhecimento da massa específica e das dimensões do leito de uma coluna teste. A coluna foi preenchida até certa altura com massa conhecida de areia, e, em função do valor conhecido de massa específica, foi possível obter o volume ocupado pela areia. Na sequência, o volume total (volume da areia e volume de “vazio”) foi calculado. Para o cálculo da porosidade, foi utilizada a Equação 2.

$$\varepsilon = \frac{V_T - V_A}{V_T} = \frac{V_V}{V_T} \quad \text{Equação 2}$$

Em que:

$V_T$ ,  $V_A$ , e  $V_V$  são, respectivamente, o volume total, o volume da areia e o volume de “vazios”.

Na Tabela 1 são apresentadas as características físicas da areia, para os três diferentes diâmetros geométricos.

<b>Tabela 1 - Características físicas da areia para as granulometrias de 357, 505 e 714 <math>\mu\text{m}</math></b>			
<b>Diâmetro geométrico (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Malha inferior e superior</b>	<b>Massa específica (<math>\text{kg}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>Porosidade</b>
357	300 -425	2690	0,50
505	425-600		0,49
714	600-850		0,48

### Velocidade mínima de fluidização

A velocidade mínima de fluidização teórica foi calculada a partir de equação de Ergun (Equação 3).

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2 \mu_f}{\Phi_p^2 \varepsilon^3 d_p^2} u_{mf} + 1.75 \frac{(1-\varepsilon) \rho_f}{\Phi_p \varepsilon^3 d_p} u_{mf}^2 \quad \text{Equação 3}$$

Em que:

$u_{mf}$  é a velocidade mínima de fluidização (m/s);  $d_p$  é o diâmetro da partícula suporte (m);  $\mu_f$  é a viscosidade dinâmica do fluido (kg/m.s);  $\varepsilon$  é a porosidade do leito;  $g$  é a aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>) e  $\phi_p$  é a esfericidade do material suporte, adotado como 0.7 para a areia.

Os parâmetros para o cálculo da velocidade mínima de fluidização são apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2 - Parâmetros para o cálculo da velocidade mínima de fluidização**

Propriedades da areia			
$d_p$ ( $\mu\text{m}$ )	357	505	714
$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	2690		
Esfericidade	0,7		
Propriedades da água			
$\rho_L$ (kg/m <sup>3</sup> )	997		
$\mu$ (Pa.s)	0,000890		
Propriedades do leito			
$\varepsilon$	0,5	0,49	0,48
$D_o$ (cm)	12,5		

Para a determinação da velocidade de fluidização prática, foi observado o momento do início da expansão do leito, e determinada a vazão correspondente para esse ponto.

#### Testes hidráulicos do reator de leito fluidizado

Os testes hidráulicos, em um total de 10, foram realizados com a variação de quatro parâmetros, a saber: granulometria e quantidade de areia; tipo e quantidade de material utilizado como distribuidor de fluxo. Foram avaliadas a fluidização e a formação de caminhos preferenciais. Na Tabela 3 são apresentadas as variáveis de cada teste hidráulico, atentando que somente no ensaio 10 se utilizou o segundo distribuidor no reator.

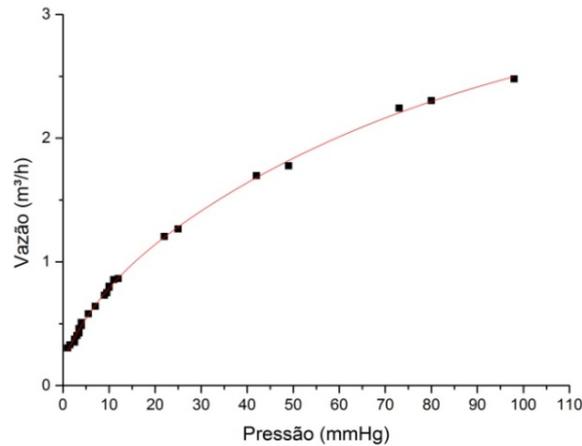
**Tabela 3 - Variáveis para a realização dos testes hidráulicos no reator de leito fluidizado**

Variáveis	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10*
Granulometria ( $\mu\text{m}$ )	357				505			714		357
Altura do leito (cm)	10,6	10,4	5	10,8	10,3	10,6	5	5	5	9,7
$V_{\text{suporte}}/V_{\text{reator}}$ (%)	21,6	21,2	10,2	22	21	21,6	10,2	10,2	10,2	19,8
Altura distribuição (cm)	6	6	6	-	6	6	6	6	3	6,5
Tipo de distribuição	EV	AR	EV	-	EV	AR	EV	EV	EV	EV

Legenda: EV – Esfera de vidro; AR – Anéis de Rashig; \* No ensaio 10, foi acoplado um segundo distribuidor, na parte cilíndrica do reator.

## RESULTADOS OBTIDOS

Na Figura 3 é apresentada a curva de calibração do Venturi, que relaciona a vazão observada nos sensores de alta precisão com a diferença de altura na coluna de mercúrio.



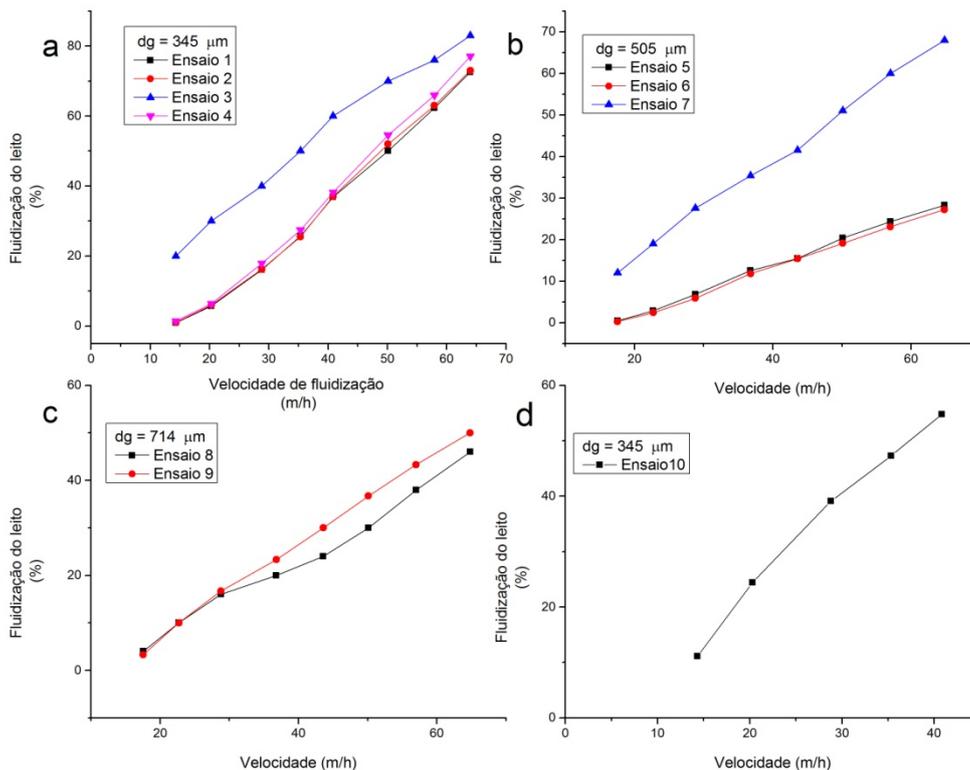
**Figura 3 - Curva de calibração do medidor de vazão Venturi**

A linha de tendência resultante mostrou ser do tipo potência (de ordem 0,5), o que indica que o conjunto de dados de vazão aumenta em uma taxa específica com o aumento da diferença de pressão. O valor de  $R^2$  resultante foi de 0,99 de adequação, o que indica boa correspondência entre os valores lidos e calculados pela correlação, conforme apresentado na Equação 4.

$$Q = 0,2491(\Delta P)^{0,5042}$$

Equação 4

As porcentagens de fluidização de leito, em função da velocidade aplicada, para os 10 ensaios realizados, são apresentadas na Figura 4



**Figura 4 - Fluidização do leito em função da velocidade aplicada**

Na Tabela 4 são apresentados os valores das velocidades mínima de fluidização teórica e prática, para as 3 granulometrias avaliadas. O valor da velocidade máxima de fluidização foi de 55 m/h, aproximadamente; determinado a partir do ponto de arraste das partículas, para as menores partículas de areia.

**Tabela 4 - Velocidades mínimas de fluidização teórica e prática**

Velocidade mínima	357 $\mu\text{m}$	505 $\mu\text{m}$	714 $\mu\text{m}$
Teórica (m/h)	7,03	12,52	22,1
Prática (m/h)	10,09	14,31	26,5

## ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para os 10 ensaios realizados foi observada a formação de caminhos preferenciais, sendo o menor número observado no ensaio 10, em que uma camada de esferas de vidro foi adicionada sobre o segundo distribuidor de fluxo instalado. Nesse ensaio também foram observadas expansões de leito maiores associadas a menores velocidades de fluidização aplicadas, o que sugere que a instalação do segundo distribuidor na parte cilíndrica do reator favorece a fluidização, com menor formação de caminhos preferenciais. Os ensaios 3, 7, 8 e 9, para todas as vazões aplicadas, não apresentaram características de fluidização, e sim de expansão do leito. Nos demais ensaios foi observada fluidização para primeiras vazões avaliadas e, também, quando as vazões foram aumentadas.

Observou-se que os ensaios que apresentaram as características mais adequadas de fluidização foram aqueles relacionados às expansões de leito superiores a 20%, para as areias de 375  $\mu\text{m}$  e 505  $\mu\text{m}$ . Bull, Sterritt e Lester (1984) utilizaram expansões de leito superiores a 20% em reatores de leito fluidizado no tratamento de águas residuárias, o que sugere que as expansões ideais observadas nesta pesquisa poderão ser utilizadas no futuro tratamento anaeróbio no reator de leito fluidizado.

Em relação à velocidade mínima de fluidização, os resultados obtidos para a velocidade teórica e prática não foram necessariamente próximas. A diferença observada entre os valores pode ser função, principalmente, da esfericidade adotada para a areia e da granulometria média do material do leito.

Deve ser salientado que o Venturi, projetado e construído, atendeu as necessidades da pesquisa, como pode ser observado pelas vazões aplicadas, tanto na determinação da velocidade mínima quanto nos níveis de expansão do leito. Entretanto, para velocidades mais baixas, a pequena diferença de altura na coluna de mercúrio, na ordem de milímetros, pode causar imprecisão na leitura. Com isso, em caso de necessidade da precisão em velocidades mais baixas, sugere-se uma nova calibração do Venturi com um fluido que apresente massa específica menor do que a do mercúrio.

## CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos, observou-se a importância da determinação das condições hidráulicas iniciais de um reator de leito fluidizado, para sua potencial aplicação na degradação anaeróbia de uma água residuária. Observou-se que, como a determinação de vários parâmetros hidráulicos são dependentes da medição da vazão, é necessário um equipamento calibrado e apto para a medição da faixa de vazão aplicada, o que foi verificado com a utilização e calibração do tubo Venturi.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BRAGA, M. C. B. Estudo da eficiência dos processos bioquímicos em um reator anaeróbio de leito fluidizado automatizado. Dissertação de mestrado. Departamento de Bioquímica. Universidade Federal do Paraná. 1989.
2. BULL, M A.; STERRITT, R. M.; LESTER, J. N. An evaluation of single-and separated-phase anaerobic industrial wastewater treatment in fluidized bed reactors. *Biotechnology and bioengineering*, v. 26, n. 9, p. 1054-1065, 1984.
3. SHIEH, W. K.; SUTTON, P. M.; KOS, P. Predicting reactor biomass concentration in a fluidized-bed system. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, p. 1574-1584, 1981.

4. SWITZENBAUM, M. S.; JEWELL, W. J. Anaerobic attached-film expanded-bed reactor treatment. *Journal (WaterPollutionControlFederation)*, p. 1953-1965, 1980.
5. WEBER, M. I. Avaliação da eficiência de um reator anaeróbio de leito fluidizado para o tratamento de resíduos líquidos para a indústria de refrigerantes. Dissertação de mestrado. UFPR. 2006.