

Influência da imobilização de biomassa e do tamanho da partícula na fluidodinâmica de um reator anaeróbio de leito fluidizado

Flavio Bentes Freire^{1*}, Eduardo Cleto Pires² e José Teixeira Freire³

¹Centro de Tecnologia, Universidade Estadual de Maringá, Rod. PR 489, 1400, 87508-210, Umuarama, Paraná, Brasil.

²Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, Brasil. ³Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, São Paulo, Brasil.

*Autor para correspondência. E-mail: fla_freire@yahoo.com.br

RESUMO. O estudo da fluidodinâmica é muito comum em diversas áreas relacionadas com a engenharia química, tais como nos processos de secagem e nos reatores químicos. Entretanto, em reatores biológicos empregados no tratamento de águas residuárias, esses aspectos ainda necessitam de investigações mais aprofundadas. Deste modo, é fundamental avaliar a influência da presença do biofilme no comportamento fluidodinâmico do reator, por meio de importantes parâmetros como, por exemplo, a velocidade de mínima fluidização, a expansão, a porosidade do leito e a velocidade terminal da partícula. O objetivo deste trabalho foi realizar uma investigação da fluidodinâmica de um reator anaeróbio de leito fluidizado, tratando uma água residuária sintética preparada a partir da solução utilizada para determinação de DBO, tendo o carvão ativado como meio suporte para a imobilização de biomassa. Especificamente, no trabalho, verificou-se que a biomassa imobilizada aumentou a densidade das partículas e alterou os principais parâmetros fluidodinâmicos avaliados.

Palavras-chave: reator anaeróbio de leito fluidizado, fluidodinâmica, biomassa imobilizada em carvão ativado, mínima fluidização.

ABSTRACT. The influence of immobilized biomass and particle size on the fluid dynamics of an anaerobic fluidized bed reactor. Fluid dynamic analysis is an important branch of several chemical engineering related areas, such as drying processes and chemical reactors. However, aspects concerning fluid dynamics in wastewater treatment bioreactors still require further investigation, as they highly influence process efficiency. Therefore, it is essential to evaluate the influence of biofilm on the reactor fluid dynamic behavior, through the analysis of a few important parameters, such as minimum fluidization velocity, bed expansion and porosity, and particle terminal velocity. The main objective of the present work was to investigate the fluid dynamics of an anaerobic fluidized bed reactor, having activated carbon particles as support media for biomass immobilization. Reactor performance was tested using synthetic residual water, which was prepared using the solution employed in BOD determination. The results showed that the presence of immobilized biomass increased particle density and altered the main fluid dynamic parameters investigated.

Key words: anaerobic fluidized bed reactor, fluid dynamic, biomass immobilized on activated carbon, minimum fluidization.

Introdução

Os reatores anaeróbios de alta taxa proporcionaram grande avanço no tratamento biológico das mais diversas substâncias poluentes. Além da diminuição na perda de biomassa para o efluente, o aumento na relação entre o tempo de retenção celular (θ_c) e o tempo de detenção hidráulica (TDH) permitiu que reatores com volumes menores fossem projetados.

A eficiência global do processo, entretanto, não

está relacionada apenas com a permanência de microrganismos dentro do reator. É necessário também que se promova um bom contato entre a substância a ser tratada e a biomassa. O processo de tratamento biológico é fortemente influenciado pelo comportamento fluidodinâmico do reator. Desta maneira, estudar a fluidodinâmica torna-se uma etapa fundamental, principalmente em reatores anaeróbios de leito fluidizado (RALF), que possuem características de escoamento bem particulares.

Segundo Kato *et al.* (1999), a eficiência de um

reator biológico, seja ele aeróbio ou anaeróbio, está relacionada com a cinética das reações bioquímicas. Dois aspectos-chave são ressaltados pelos autores: a retenção de biomassa e as características hidráulicas (escoamento e mistura). No caso do RALF, a biomassa encontra-se imobilizada em um material inerte (geralmente carvão ativado ou areia), e esse conjunto está sujeito a elevadas velocidades ascensionais, causadas pela recirculação de uma parcela do líquido efluente.

Essa configuração apresenta algumas vantagens em relação às outras configurações de alta taxa: TDH menores; melhor contato entre as fases líquida e sólida; melhor controle da espessura do biofilme. O biofilme fino permite boa difusão do substrato para as camadas mais profundas, não existindo, assim, camadas inativas. Além disso, são contornados problemas geralmente encontrados em reatores de leito fixo como, por exemplo, escoamentos preferenciais, entupimentos e retenção de gás.

Nos processos de tratamento biológico em reatores de leito fluidizado, o estudo da fluidodinâmica tem, geralmente, como ponto de partida a adoção de um sistema trifásico composto pelo gás gerado, pela biomassa aderida ao meio suporte e pelo líquido a ser tratado. Briens *et al.* (1997) observaram que “a fluidificação em três fases pode ser aplicada a muitos processos biológicos e bioquímicos, utilizando como fase sólida células imobilizadas”.

Em alguns casos, porém, é possível considerar o sistema como sendo bifásico, desprezando-se a fase gasosa. Fan (1996) estudou fenômenos relacionados com a fluidização de leitos bifásicos e trifásicos. Mesmo com a produção do gás metano, a hipótese de sistema bifásico para descrever processos anaeróbios parece não introduzir grandes erros de modelagem (Diez-Blanco *et al.*, 1995).

A quantidade de trabalhos encontrados na literatura que, de alguma forma, levam em consideração a influência da biomassa no comportamento dinâmico dos reatores de leito fluidizado é bem inferior aos estudos com partículas inertes. Assim, um aspecto importante no estudo de fundamentos dos reatores biológicos é que a utilização restrita a partículas inertes se configura em uma situação hipotética, que pode não representar com fidelidade a operação desses reatores.

Diez-Blanco *et al.* (1995) afirmam que as bactérias que realizam a digestão anaeróbia de águas residuárias, aderidas às pequenas partículas, modificam sua densidade, tamanho e forma, e, portanto, o comportamento fluidodinâmico. É fundamental, então, que sejam realizados estudos fluidodinâmicos também voltados para as

combinações híbridas, e que levem em conta a interação partícula/biomassa. Freire *et al.* (2004) afirmam que estudos mais específicos do conjunto biofilme/suporte como, por exemplo, a influência da fluidodinâmica no cisalhamento do biofilme, ainda são necessários, principalmente em materiais de alta porosidade.

Dessa maneira, no presente trabalho, um RALF, tendo carvão ativado como meio suporte para adesão de biofilme, foi alimentado com água residuária sintética. O objetivo principal foi avaliar a influência do biofilme aderido ao carvão no comportamento fluidodinâmico do reator.

Material e métodos

Reator RALF

O reator anaeróbio de leito fluidizado, em que os estudos foram realizados, é apresentado na Figura 1.

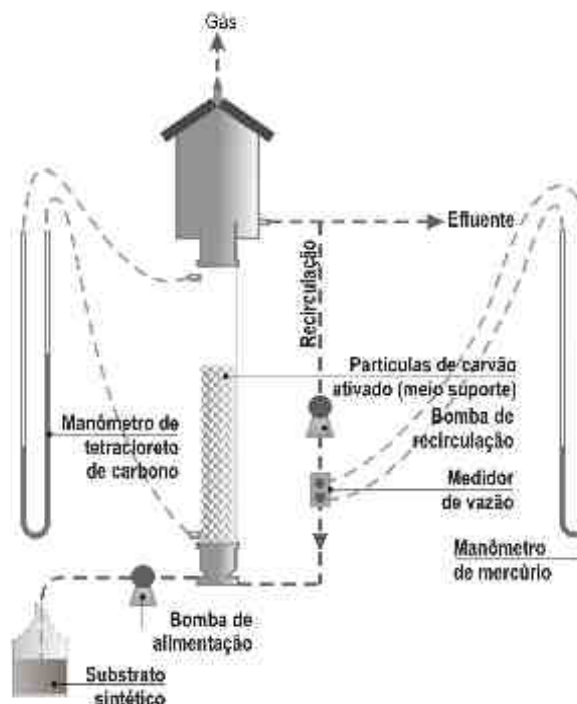


Figura 1. Reator anaeróbio de leito fluidizado e manômetros.

O reator em questão é constituído de três partes principais (entrada, corpo principal e seção de separação), conectadas por flanges e parafusos. A primeira parte, caracterizada pela entrada e distribuição do afluente, foi feita em aço inoxidável e tem uma placa perfurada responsável pela distribuição homogênea do fluido no reator. O distribuidor utilizado é uma chapa de inox, com 1,0 mm de espessura, perfurada com orifícios de 1,5 mm e com 15% de área livre.

A segunda parte, o reator propriamente dito, onde se localizam as partículas com biofilme, é composto por um tubo de acrílico de 3 mm de espessura, 500 mm de altura e 50 mm de diâmetro. Essa parte é dotada de um amostrador para coleta de partículas de carvão, localizado a 60 mm do fundo do reator.

A terceira parte do reator, construída em aço inoxidável, caracteriza-se pela saída do efluente, do gás produzido, e pela saída da parcela do efluente a ser recirculada. Como se observa na Figura 1, a parte 2 do reator avançou por 50 mm dentro da parte 3. A separação do gás era obtida por meio da “queda” do líquido até o canal de coleta do efluente. Esse princípio foi também utilizado em outros trabalhos (Briens *et al.*, 1997; Miura e Kawase, 1998; Safoniuk *et al.*, 1999) e dispensa a utilização de anteparos defletores para a separação de fases.

Material-suporte

O material-suporte, utilizado como “recheio” do RALF, foi o carvão ativado granular para filtros de piscina. Por meio de peneiramento, foram selecionadas partículas com diâmetros médios de 2,16 e 3,08 mm. O carvão ativado foi escolhido por representar um material de baixa densidade e elevada porosidade. Sua viabilidade como meio de suporte, em reatores biológicos, é comprovada por inúmeros trabalhos da literatura (Wang *et al.*, 1986; Gardner *et al.*, 1988; Pfeffer e Suidan, 1989; Tsuno *et al.*, 1996; Suidan *et al.*, 1996; Khodadoust *et al.*, 1997). Entretanto, quando a investigação aborda os aspectos fluidodinâmicos, essa mesma abundância de publicações não se verifica.

A caracterização física do carvão, realizada no Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais da UFSCar (CCDM), foi obtida por meio de análises de porosimetria de mercúrio e de adsorção e condensação de nitrogênio (BET). A Tabela 1 apresenta um quadro-resumo das propriedades obtidas.

Tabela 1. Características do material suporte.

Propriedade	Valor	Metodologia
Diâmetro médio (mm)	2,16 e 3,08	Peneiramento
Densidade da partícula (g cm ⁻³)	0,93	Porosimetria
Área total de poros (m ² g ⁻¹)	19,32	Porosimetria
Diâmetro médio de poros (mm)	0,09	Porosimetria
Porosidade (%)	22,5	Porosimetria
Área específica (m ² g ⁻¹)	68,44	BET

Água residuária sintética

A água residuária, utilizada em todos os experimentos da pesquisa, foi preparada a partir da solução utilizada para determinação de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), proposta pelo *Standard Methods for the Examination of Water and*

Wastewater (APHA, 1998), com pequenas modificações (Del Nery, 1987), como a introdução de glicose como principal fonte de carbono, conforme apresentado na Tabela 2. Zaiat (1999) utilizou este mesmo efluente sintético para dois experimentos: avaliação de transferência de massa externa e dos parâmetros cinéticos intrínsecos; e também para testes de desempenho, em um reator anaeróbio horizontal de leito fixo.

Os valores apresentados na referida Tabela são baseados em uma concentração de glicose de 1000 mg L⁻¹, e Demanda Química de Oxigênio (DQO) também da ordem de 1000 mg L⁻¹. Para concentrações de DQO diferentes da estipulada, bastava acrescentar os reagentes na proporção desejada.

Tabela 2. Componentes da água residuária sintética.

Composto	Concentração (mg L ⁻¹)
Glicose	1000
Uréia	62,5
Sulfato de níquel	0,5
Sulfato ferroso	2,5
Cloreto férrico	0,25
Cloreto de cobalto	0,04
Oxido de selênio	0,035
Fosf. de potássio monob.	42,5
Fosf. de potássio dibásico	10,85
Fosfato de sódio dibásico	16,7
Bicarbonato de sódio	1000

Programação dos experimentos

Os ensaios fluidodinâmicos foram realizados no RALF preenchido, respectivamente, com partículas inertes de 2,16 mm e 3,08 mm de diâmetro médio, nessa ordem cronológica. Amostras dessas partículas foram coletadas para ensaios de determinação da velocidade terminal.

Em seguida houve um processo de inoculação para imobilização de biomassa nas partículas de 3,08 mm. Terminada a fase de inoculação, o reator passou pelos mesmos ensaios fluidodinâmicos e novamente amostras das partículas, desta vez com biofilme aderido, foram coletadas para ensaios de determinação da velocidade terminal. Para estabelecer uma notação adequada, as partículas com biofilme aderido serão denominadas “biopartículas”.

Mínima fluidização

Para o desenvolvimento do trabalho, o sistema foi considerado bifásico (líquido/sólido), e inicialmente foram obtidas as curvas de queda de pressão (ΔP_{FLUID}) em função da velocidade ascensional.

A fim de se obter maior reprodutibilidade, todos os ensaios fluidodinâmicos foram realizados, no mínimo, em duplicata. Para a medida da queda de pressão entre a entrada e a saída do reator, um manômetro de tetracloreto de carbono foi instalado,

como se observa na Figura 1. As vazões foram obtidas por meio de um medidor tipo orifício conectado a um manômetro de mercúrio.

Em leitos fluidizados bifásicos, a curva característica apresenta duas regiões lineares claramente distintas, cuja intersecção fornece a velocidade mínima de fluidização (Briens *et al.*, 1997).

Expansão do leito

Após a obtenção das curvas características, foram realizados os ensaios de expansão, que consistiam em medir a expansão do leito de carvão (por meio de régua graduada) correspondente a valores crescentes de vazão.

Dessa maneira, para cada altura atingida pelo carvão no leito (H_i), o volume total correspondente será definido por:

$$V_{TOTAL}^i = V_s + V_{LIQ}^i \quad (1)$$

Sendo:

V_{TOTAL}^i : volume total do leito de carvão na altura H_i (L);

V_s : volume de sólidos (L);

V_{LIQ}^i : volume do líquido na altura H_i (L).

Porosidade

Após os ensaios de expansão, foi calculada a porosidade do leito (ϵ_i), também correspondente a cada altura atingida, obedecendo à seguinte equação:

$$\epsilon_i = \frac{V_{TOTAL}^i - V_s}{V_{TOTAL}^i} \quad (2)$$

Velocidade terminal da partícula

A velocidade terminal da partícula (U_t) é determinada freqüentemente por meio de correlações que nem sempre resultam em valores confiáveis. A consideração ou não de fenômenos como o efeito da parede do duto e as forças entre as partículas podem proporcionar diferenças significativas, além do fato de muitos modelos considerarem as partículas como esferas perfeitas, o que gera simplificação no caso de partículas como o carvão ativado. Por essas razões, é preferencial que o valor de U_t seja obtido experimentalmente.

Além disso, como já foi salientado anteriormente, é possível que o biofilme aderido à partícula acarrete alterações nos parâmetros fluidodinâmicos, e, conseqüentemente, uma diferença de comportamento do reator.

Para efeito de comparação, um ensaio experimental para a determinação de U_t foi

elaborado e realizado neste trabalho, tanto para partículas inertes quanto para as biopartículas. Em virtude da forma geométrica do carvão ser muito irregular, uma grande amostragem de partículas foi utilizada, para que se garantisse uma média confiável. Desta forma, foram utilizadas 50 partículas inertes e outras 50 biopartículas, todas com diâmetro médio de 3,08 mm.

As partículas foram colocadas individualmente, a partir do repouso, em uma coluna contendo água, com altura de 1000 mm e diâmetro de 50 mm, graduada de 200 em 200 mm (Figura 2).

Determinou-se, por meio de um cronômetro, o tempo necessário para cada partícula percorrer os últimos 400 mm, e, por fim, obteve-se a velocidade terminal por meio da razão entre o espaço percorrido (400 mm) e o tempo gasto.

O ensaio com partículas inertes foi realizado em uma única etapa. Os ensaios com biopartículas foram realizados em quatro etapas, defasadas de sete dias, para a verificação da ocorrência de mudanças significativas nas características do biofilme (na espessura, por exemplo) a ponto de serem notadas experimentalmente.

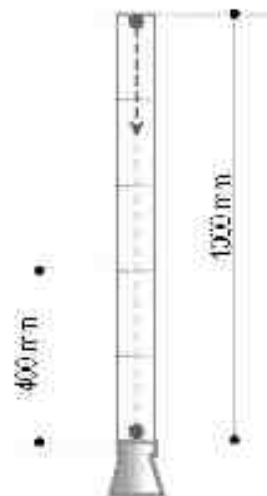


Figura 2. Desenho esquemático do ensaio de coluna para determinação da velocidade terminal da partícula.

As biopartículas foram retiradas do RALF (que estava em condições típicas de funcionamento) por meio de um amostrador e levadas até a coluna. Em cada etapa, foram coletadas dez partículas, com exceção da última, com 20 partículas.

Equação de Richardson e Zaki

A etapa seguinte foi a obtenção do parâmetro n da equação de Richardson e Zaki (Massarani, 2002), que descreve o efeito da presença da fase particulada na fluidodinâmica de suspensões:

$$U/U_{\infty} = \epsilon^n \quad (3)$$

Sendo:

U: velocidade ascensional (cm s^{-1});

U_{∞} : velocidade terminal da partícula isolada (cm s^{-1});

n: parâmetro da equação de Richardson e Zaki.

Segundo Massarani (2002), para uma relação entre diâmetro de partícula (d_p) e diâmetro de tubo próxima a 0,05, o valor de U_t torna-se uma adequada aproximação da velocidade terminal da partículas isolada (U_{∞}).

Dessa maneira, adotando-se para U_{∞} os valores obtidos para U_t no ensaio em coluna, e substituindo na Equação 3 os valores de velocidade ascensional (U) e porosidade (ϵ) que foram obtidos nos ensaios anteriores, chega-se, finalmente, ao valor do parâmetro n da equação de Richardson e Zaki.

Imobilização de biomassa

Para a imobilização de biomassa, o reator, inicialmente preenchido com partículas inertes de carvão, foi alimentado (em circuito fechado) por uma suspensão à base de água residuária sintética e lodo granular (macerado em liquidificador), proveniente de reator UASB, tratando resíduo de abatedouro de aves.

A suspensão foi elaborada numa proporção tal que resultasse numa concentração de sólidos totais voláteis de aproximadamente 200 mg L^{-1} . Esse princípio de imobilização de biomassa já se mostrou eficiente para sistemas em diferentes escalas, pois promove simultaneamente a adesão de biomassa nos suportes e a adaptação dos microrganismos ao substrato (Silva *et al.*, 2006).

Para isso, a suspensão foi bombeada para dentro do reator, em baixa vazão de alimentação (cerca de 1 L h^{-1}). Esta solução era renovada a cada dois dias.

Após a fase de imobilização de biomassa, com duração de 28 dias, o reator ficou por cerca de sete dias trabalhando como um filtro biológico, ou seja, como um reator de leito fixo, sendo alimentado apenas com a água residuária sintética, sem a introdução de lodo macerado. Essa fase foi programada para servir como transição entre as condições de circuito fechado e de leito fluidizado, para melhor adaptação da biomassa, conforme sugerido em Freire *et al.* (2004).

O reator foi, então, submetido às condições operacionais típicas de um reator anaeróbio de leito fluidizado. A água residuária sintética foi transportada para o reator por meio de bomba dosadora, e parte do efluente foi recirculada através de uma bomba centrífuga, para garantir as condições de fluidização do leito. A fluidização permitiu o arraste do excesso de biomassa, restando apenas a

parcela que interessava, ou seja, aquela que estava aderida firmemente ao carvão ativado.

Análise de microscopia

Amostras de partículas inertes e de biopartículas foram coletadas e preparadas, segundo metodologia sugerida por Araújo *et al.* (1998), para análise de microscopia eletrônica de varredura, feitas em microscópio Zeiss DSM-960.

Resultados e discussão

Análise de microscopia

As Figuras 3 e 4 ilustram, respectivamente, as análises de microscopia eletrônica de varredura realizadas nas amostras de partículas inertes e biopartículas.

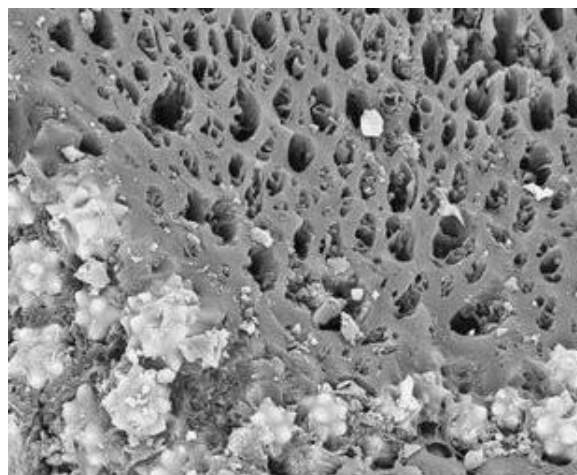


Figura 3. Microscopia eletrônica de varredura das partículas inertes de carvão, retiradas do RALF.

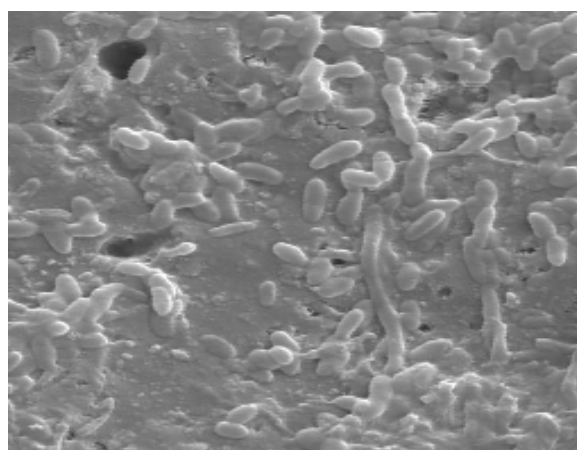


Figura 4. Microscopia eletrônica de varredura das biopartículas de carvão, retiradas do RALF.

A microscopia da partícula de carvão ativado sem biomassa (Figura 3) mostra grande quantidade de poros, o que confirma o valor elevado de porosidade

obtido nos ensaios de caracterização física. Essas particularidades deram indícios de que ocorreria um eficiente processo de imobilização de biomassa.

A microscopia das biopartículas (Figura 4) mostra claramente microrganismos com formato semelhante a bastonetes, provavelmente bacilos, aderidos ao carvão ativado (partes escuras), comprovando o sucesso do processo de imobilização de biomassa.

Mínima fluidização

As curvas características e as velocidades de mínima fluidização, obtidas para as três situações analisadas, são apresetadas, respectivamente, nas Figuras 5, 6 e 7.

Analisando as Figuras 5, 6 e 7, nota-se claramente a presença das duas regiões que descrevem o comportamento de leitos bifásicos descrito por Briens *et al.* (1997), e que são muito importantes para o estabelecimento de critérios de projeto, pois o ponto de intersecção entre elas define a mudança do regime de escoamento, ou seja, de leito fixo para leito fluidizado.

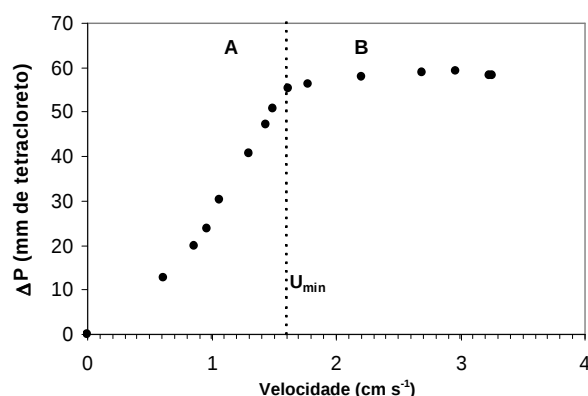


Figura 5. Velocidade de mínima fluidização para o RALF preenchido com partículas inertes ($d_p = 2,16$ mm)

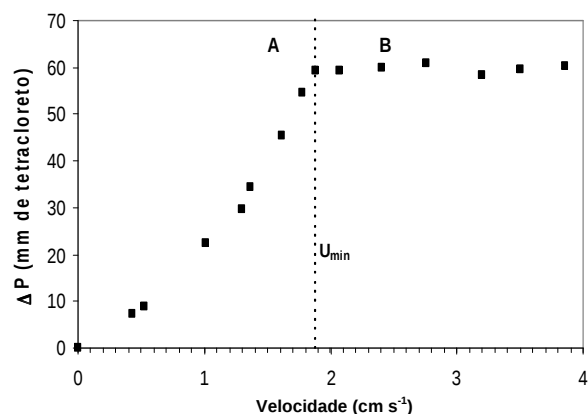


Figura 6. Velocidade de mínima fluidização para o RALF preenchido com partículas inertes ($d_p = 3,08$ mm)

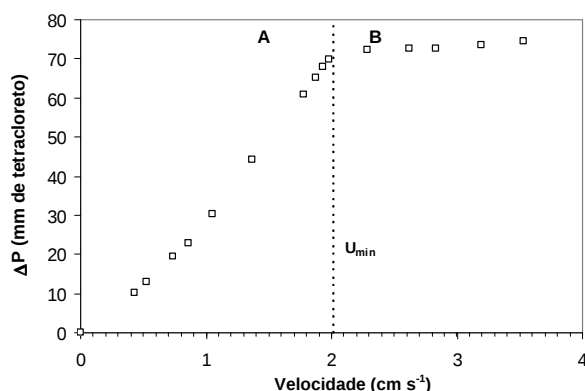


Figura 7. Velocidade de mínima fluidização para o RALF preenchido com biopartículas ($d_p = 3,08$ mm).

Para facilitar a discussão dos resultados, a região anterior a U_{min} será denominada de região A, e a região posterior a U_{min} será denominada região B.

Diferente da observação de Briens *et al.* (1997), entretanto, a região A não é linear, assemelhando-se mais a uma parábola. Observou-se visualmente durante a experimentação que, nessa faixa de velocidades ascensionais, as partículas permanecem em constante reorientação. Essa reorientação das partículas é um fenômeno individual, e embora não provoque no leito qualquer movimento de expansão, é capaz de alterar suas condições de permeabilidade. Essa região seria uma reta apenas se a permeabilidade do leito permanecesse constante. Aproximando-se a região A a uma reta, obtém-se boa estimativa para a permeabilidade média do leito.

As velocidades de mínima fluidização obtidas para as partículas inertes (diâmetros de 2,16 e 3,08 mm) e biopartículas (diâmetro de 3,08 mm) foram, respectivamente, 1,6; 1,9 e 2,0 cm s^{-1} . A região B, para as três situações, confirma uma das mais respeitadas definições sobre fluidização, em que a mistura assume propriedades macroscópicas de um fluido homogêneo. Nesse caso, a queda de pressão hidrostática no leito pode ser diretamente determinada por meio da densidade média da mistura multiplicada pela aceleração da gravidade (g). Em outras palavras, isto quer dizer que, a partir da velocidade de mínima fluidização, o valor de queda de pressão praticamente não se altera.

Como esperado, a velocidade de mínima fluidização para a partícula de 2,16 mm foi menor do que para as outras opções analisadas. Uma diminuição de cerca de 30% no diâmetro médio das partículas inertes, ou seja, de 3,08 mm para 2,16 mm, resultou em um valor de U_{min} 19% menor.

Para as partículas de 3,08 mm, a presença de biomassa imobilizada aumentou em 5% o valor de U_{min} . Embora essa diferença não seja significativa, já

que usualmente os reatores RALF são projetados para operar com velocidades ascensionais superiores a $U_{\min}$ (geralmente para expansões do leito maiores que 30%), isso mostra que, nesse caso específico, a imobilização de biomassa tornou o conjunto (partículas + biofilme) mais denso, o que também pode ser verificado, analisando-se as pressões de trabalho. Partículas mais pesadas proporcionam diferenças de pressão mais acentuadas. De fato, no leito preenchido com biopartículas, as pressões foram, no mínimo, 10 mm de tetracloreto maiores do que no leito preenchido com partículas inertes, para velocidades ascensionais superiores a $U_{\min}$.

O aumento da densidade da partícula, ocasionado pela presença de biomassa, já era especulado desde as análises de microscopia, já que foi observada uma grande quantidade de microrganismos preenchendo os vazios da partícula, e essa observação confirmou-se posteriormente em todos os outros parâmetros analisados, tais como a porosidade e a expansão do leito (Figura 8).

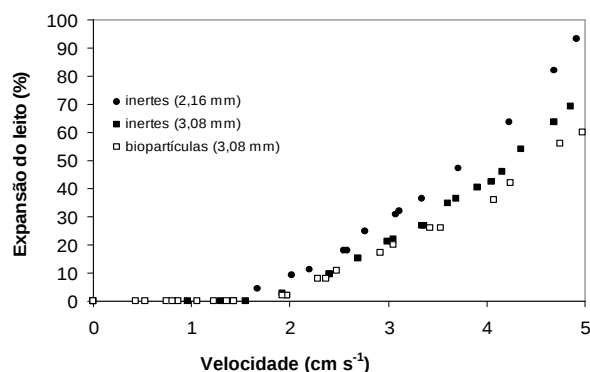


Figura 8. Expansão do leito do RALF, empregando partículas inertes ($d_p = 2,16$ mm e $3,08$ mm) e biopartículas ($d_p = 3,08$ mm).

Optou-se por não apresentar o gráfico com a porosidade, pois seu comportamento é similar aos resultados obtidos para expansão do leito. No que diz respeito à expansão, o leito com biopartículas apresentou expansões menores do que o leito com partículas inertes (para um mesmo d_p), e essa diferença se fez mais acentuada quando foram aplicadas velocidades mais elevadas.

Esses resultados diferem consideravelmente dos obtidos por Diez-Blanco *et al.* (1995), uma das poucas referências encontradas na literatura que fizeram investigações similares. Os autores utilizaram a sepiolita como meio suporte do reator anaeróbio de leito fluidizado. A sepiolita (silicato básico hidratado de magnésio) é uma pedra cerâmica porosa, de coloração branca, cinza-clara ou amarelo-clara, extremamente leve, absorvente e compacta,

encontrada especialmente na Ásia. No trabalho, os autores verificaram que o leito preenchido com o conjunto biopartículas teve uma expansão maior do que quando o leito estava preenchido apenas com a partícula inerte, para uma mesma velocidade ascensional.

Os autores creditam tal comportamento à diminuição da densidade do conjunto, causada pela adesão de biomassa (em termos de sólidos voláteis), porém não apresentam outras investigações experimentais que confirmem essa colocação, como a velocidade de mínima fluidização, por exemplo. É conveniente salientar, entretanto, que os resultados obtidos pelos pesquisadores não são conflitantes com os obtidos aqui nesta pesquisa, já que, em Diez-Blanco *et al.* (1995), os pesquisadores utilizaram um material-suporte com características totalmente diferentes do carvão ativado. Desta maneira, a possibilidade de comparações fica restrita.

O aprisionamento de moléculas de gás, no interior da biopartícula, provavelmente, contribui para a diminuição da densidade, mas quanto a esse fenômeno, os autores não fazem qualquer referência.

A Figura 9 apresenta um gráfico com os valores obtidos para a velocidade terminal (U_t) de cada partícula. Cada ponto se refere à velocidade terminal de uma partícula, totalizando 50 partículas inertes e 50 biopartículas. Como se observa, foi apropriada a decisão de se coletar um número elevado de partículas para se obter uma média confiável.

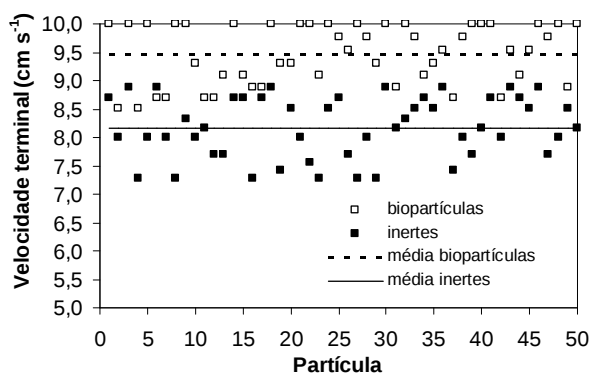


Figura 9. Velocidades terminais e respectivas médias obtidas para as partículas inertes e biopartículas ($d_p = 3,08$ mm).

Apesar da grande diversidade de valores, causada principalmente pela irregularidade geométrica das partículas, é possível identificar uma tendência de comportamento. Existe claramente uma “nuvem” superior de pontos, representando as biopartículas, e outra inferior, representando as partículas inertes. Os valores médios encontrados para a velocidade terminal das partículas inertes e das biopartículas

foram 8,2 e 9,5 cm s⁻¹, respectivamente, e o desvio-padrão foi de 0,5 cm s⁻¹ para os dois casos.

Para comprovar a grande irregularidade geométrica das partículas de carvão ativado, mesmo após o processo de peneiramento, foi utilizado o software Image Pro_Plus, que, dentre outras aplicações, é capaz de registrar imagens a partir de uma câmera de vídeo. A Figura 10 apresenta um registro de imagem feito por este software. A imagem mostra partículas com biofilme que foram utilizadas no ensaio de determinação da velocidade terminal (U_t).



Figura 10. Imagem registrada das partículas utilizadas no ensaio para determinação da velocidade terminal (U_t).

Analisando a figura, é possível identificar uma grande variedade de formas geométricas, sendo que todas são bem diferentes do formato esférico, e muito diferentes umas das outras. É compreensível que ensaios, como o da determinação da velocidade terminal, que leva em consideração cada partícula individualmente, sejam mais suscetíveis a desvios do que ensaios que analisam as propriedades “globais” do leito, ou seja, considerando-o um “conjunto homogêneo”, tais como os ensaios de expansão e de velocidade de mínima fluidização.

Os resultados mostram, ainda, que os ensaios para determinação de U_t nas biopartículas também poderiam ser realizados em uma única etapa, já que não se verificou diferença significativa entre os grupos analisados. As diferenças, como já foram observadas, aconteceram de partícula para partícula, e não têm relação com a espessura do biofilme. Isso mostra que a fluidização do leito realmente provoca um controle da espessura do biofilme formado.

Os valores encontrados para a velocidade terminal foram então colocados na equação de Richardson e Zaki e, finalmente, os valores do coeficiente n foram obtidos: 2,71, para as partículas inertes e 2,81, para as biopartículas.

A Equação 3, aplicada para as situações do

trabalho, ficou da seguinte maneira para o leito com partículas inertes:

$$U = 8,2 \cdot \varepsilon^{2,71} \quad (4)$$

Da mesma maneira, para o leito com biopartículas:

$$U = 9,5 \cdot \varepsilon^{2,81} \quad (5)$$

Conclusão

No que se refere exclusivamente às partículas inertes, a diminuição de cerca de 30% no diâmetro da partícula (de 3,08 para 2,16 mm) provocou um aumento de quase 50% na expansão do leito, e uma diminuição de cerca de 16% na velocidade de mínima fluidização (de 1,9 para 1,6).

Para as partículas com 3,08 mm de diâmetro, o aumento da densidade da partícula causado pela imobilização de biomassa foi um fator preponderante, e verificado em todas as investigações experimentais. O que era uma “suspeita” nas análises de microscopia eletrônica de varredura se confirmou posteriormente nos ensaios de mínima fluidização, expansão do leito (no RALF) e de velocidade terminal (na coluna).

As biopartículas proporcionaram um pequeno aumento na velocidade de mínima fluidização (de 1,9 para 2,0 cm s⁻¹) e um aumento significativo na velocidade terminal (de 8,2 para 9,5 cm s⁻¹), ao serem comparadas com as partículas inertes.

Essas biopartículas pouco alteraram a expansão do leito para baixas velocidades ascensionais. Diferenças mais significativas foram observadas apenas para velocidades ascensionais elevadas.

O desvio considerável, encontrado nos valores de velocidade terminal, deve-se principalmente à irregularidade geométrica da partícula. Foi possível, porém, identificar tendências de comportamento tanto para as partículas inertes, como para as biopartículas. A elevada amostragem de partículas foi benéfica para a obtenção de uma média mais acurada da velocidade terminal da partícula.

Correlações que consideram as partículas esféricas para a estimativa da velocidade terminal da partícula introduziriam um grande erro no equacionamento, já que todas partículas diferem da forma esférica, como foi possível comprovar por meio do registro de imagens.

Os valores do coeficiente n da equação de Richardson e Zaki para partículas inertes e biopartículas foram, respectivamente, 2,71 e 2,81. Os valores de n foram obtidos exclusivamente de investigações experimentais, o que dá mais

credibilidade à equação encontrada, pelo menos especificamente para este trabalho.

Conclui-se, finalmente, que, na análise fluidodinâmica, são obtidas informações importantes do comportamento operacional dos reatores, e sempre que possível, ela deveria preceder a fase biológica das pesquisas, quase como um pré-requisito, pois esse estudo combinado é fundamental para o bom desempenho do processo, uma vez que não fornece apenas informações qualitativas, que podem ser até intuitivas, mas também uma análise quantitativa do comportamento.

O que se observa, porém, é que na área de tratamento biológico de efluentes, em muitos casos, os parâmetros operacionais dos reatores não são determinados, e a falta de um conhecimento prévio do comportamento dinâmico do reator pode acarretar um funcionamento inadequado. Além disso, os aspectos relacionados ao escoamento também são importantes para o desenvolvimento, a otimização e o controle operacional dos reatores.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fapesp, pelo financiamento da pesquisa.

Referências

- APHA-American Public Health Association. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 17th ed. New York: APHA, 1998.
- ARAÚJO, J.C. *et al.* Methanogenic biofilm: structure and microbial population activity in an anaerobic fluidized bed reactor treating synthetic wastewater. *Biofilm J.*, Valparaíso, v. 3, n. 1, p. bf98003, 1998.
- BRIENS, L.A. *et al.* Minimum liquid fluidization velocity in gas-liquid-solid fluidized beds. *AIChE J.*, New York, v. 43, p. 1180-1189, 1997.
- DEL NERY, V. *Utilização de lodo anaeróbio imobilizado em gel no estudo de partida de reatores de fluxo ascendente com manta de lodo*. 1987. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento)–Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1987.
- DIEZ-BLANCO, V. *et al.* Effects of biofilm growth, gas and liquid velocities on the expansion of an anaerobic fluidized bed reactor (AFBR). *Water Res.*, Oslo, v. 29, n. 7, p. 1649-1654, 1995.
- FAN, L.S. Summary paper on fluidization and transport phenomena. *Powder Technology*, Amsterdam, v. 88, p. 245-253, 1996.
- FREIRE, F.B. *et al.* Avaliação de material suporte para biomassa em reatores de leito fluidizado: aderência e hidrodinâmica. *Rev. Universidade Rural. Série Ciências Exatas e da Terra*, Rio de Janeiro, v. 23, p. 34-43, 2004.
- GARDNER, D.A. *et al.* Role of GAC activity and particle size during the fluidized-bed anaerobic treatment of refinery sour water stripper bottoms. *J. Water Pollut. Control Fed.*, Washington, D.C., v. 60, p. 505-513, 1988.
- KATO, M.T. *et al.* Configurações de reatores anaeróbios. In: CAMPOS, J.R. (Ed.). *Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo*. Rio de Janeiro: ABES, 1999. cap. 3, p. 53-99.
- KHODADOUST, A.P. *et al.* Anaerobic treatment of PCP in fluidized-bed GAC bioreactors. *Water Res.*, Oslo, v. 31, p. 1776-1786, 1997.
- MASSARANI, G. *Fluidodinâmica em sistemas particulados*. Rio de Janeiro: E-Papers Serviços Editoriais, 2002.
- MIURA, H.; KAWASE, Y. Minimum liquid fluidization velocity in two- and three-phase fluidized beds with non-Newtonian fluids. *Powder Technology*, Amsterdam, v. 97, p. 124-128, 1998.
- PFEFFER, J.T.; SUIDAN, M.T. Continuous processing of toxic organics in a fluidized-bed GAC reactor employing carbon replacement. *Biotech. Bioeng.*, Berkeley, v. 33, p. 139-148, 1989.
- SAFONIUK, M. *et al.* Use of dimensional similitude for scale-up of hydrodynamics in three-phase fluidized beds. *Chem. Eng. Sci.*, Amsterdam, v. 54, p. 4961-4966, 1999.
- SILVA, A.J. *et al.* Evaluation of support materials for the immobilization of sulfate-reducing bacteria and methanogenic archaea. *Anaerobe*, Amsterdam, v. 12, p. 93-98, 2006.
- SUIDAN, M.T. *et al.* Anaerobic dechlorination using a fluidized-bed GAC reactor. *Water Res.*, Oslo, v. 30, p. 160-170, 1996.
- TSUNO, H. *et al.* Anaerobic degradation of pentachlorophenol (PCP) in biological expanded-bed reactor. *Water Sci. Tech.*, London, v. 34, p. 335-344, 1996.
- WANG, Y. *et al.* Anaerobic treatment of phenol by an expanded bed reactor. *J. Water Pollut. Control Fed.*, Washington, D.C., v. 58, p. 227-233, 1986.
- ZAIAT, M. *Desenvolvimento de reator anaeróbio horizontal de leito fixo (RAHLF) para tratamento de águas residuárias*. 1999. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento)–Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

Received on May 15, 2007.

Accepted on October 19, 2007.