

## II-461 – AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO DE UM FILTRO BIOLÓGICO PERCOLADOR COM LATERAIS ABERTAS

### **Paulo de Castro Vieira**

Engenheiro Sanitarista e Ambiental. Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pelo programa de pós-graduação SMARH/UFMG.

### **Marcos von Sperling<sup>(1)</sup>**

Engenheiro Civil. Doutor em Engenharia Ambiental pelo Imperial College, Universidade de Londres. Professor Titular do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG.

### **Raquel da Silveira Cota**

Engenheira Civil. Doutora em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pelo programa de pós-graduação SMARH/UFMG.

### **Gabriel Rodrigues Vasconcellos**

Engenheiro Ambiental. Mestrando em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pelo programa de pós-graduação SMARH/UFMG.

### **Cassiano Lino dos Santos Costa**

Bacharelado em Química. Técnico em química do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos 6627 – Escola de Engenharia, Bloco 1 - sala 4622; 31270-901 - Belo Horizonte – Brasil. Tel.: +55 31 3409-1935 (e-mail: marcos@desa.ufmg.br)

## **RESUMO**

Este trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento hidrodinâmico de um filtro biológico percolador com as laterais abertas (FBPA), por meio de testes com traçadores e ajustes aos modelos matemáticos de representação dos escoamentos reais. O comportamento hidrodinâmico do FBPA foi avaliado para três taxas de aplicação hidráulica superficial (2,25, 4,5 e 9,0 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d), utilizando os traçadores NaCl e LiCl para a determinação das distribuições dos tempos de residência (*DTR*) e, posteriormente, realizadas as verificações dos ajustes dos modelos de dispersão axial (clássico e com o parâmetro de retenção axial) e de tanques em série (clássico e com a função gama) às curvas de concentração do traçador. Os testes conduzidos com o traçador NaCl apresentaram menores tempos de resposta, melhores percentuais de recuperação e menor fenômeno de cauda do que àqueles realizados com o LiCl. Acredita-se que os efeitos de cauda, observados nas curvas de concentração dos dois traçadores, possivelmente estiveram associadas ao fenômeno de difusão (com maior atuação no traçador LiCl), e à presença de zonas mortas e à formação de caminhos preferências ao longo do meio de enchimento do filtro. Para os valores dos tempos médios de residência obtidos de aproximadamente 13 a 23 minutos, para as três taxas de aplicação hidráulica superficial (TAS) investigadas, o líquido gasta aproximadamente 3,5 a 6,0 minutos para percolar um metro do meio de enchimento do filtro. Observou-se que os resultados dos tempos médios de residência obtidos pelos modelos utilizados foram bem semelhantes e variaram em função da taxa de aplicação hidráulica (TAS), mas não linearmente. Isto possivelmente ocorreu devido à capacidade de retenção líquida do filtro, proporcionada pela capacidade de drenagem do biofilme e pelas condições de distribuição do afluente e umedecimento do meio de enchimento do filtro. Dentre os modelos de representação do escoamento testados, o modelo de dispersão axial com o parâmetro de retenção líquida foi o que apresentou as melhores aderências às curvas de traçagem às taxas hidráulicas investigadas. Os valores do número de dispersão, obtidos pelo modelo de dispersão axial com o parâmetro de retenção líquida, indicaram que o regime de escoamento do FBPA tendeu ao modelo de fluxo em pistão, mas com elevado grau de dispersão do líquido, possivelmente relacionado com a forma de distribuição do líquido no reator. Chama-se atenção para a significativa influência do sistema de distribuição no desempenho dos FBPs, na medida em que conduz ao espalhamento mais uniforme do líquido no meio de enchimento, ao melhor aproveitamento do seu volume útil e à redução dos caminhos preferenciais e zonas mortas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Filtro biológico percolador, comportamento hidrodinâmico, distribuição dos tempos de residência e modelos de representação dos escoamentos reais.

## INTRODUÇÃO

Os reatores biológicos ou utilizados em processos químicos são categorizados pelo tipo de fluxo em que o reator é alimentado e pelo padrão de mistura, função de fatores como sua geometria, tamanho e escala da unidade, assim como a quantidade de energia introduzida por unidade de volume. O reator pode ser enquadrado, em termos do fluxo, como de fluxo intermitente, com entrada e saída do líquido intermitente ou de fluxo contínuo, com entrada e saída do líquido contínuo. Com relação ao padrão de mistura, os reatores são modelados para uma condição de idealidade, como fluxo em pistão e de mistura completa e, assim, são desenvolvidos os modelos hidrodinâmicos que podem representar as condições reais em um reator. Os modelos tipicamente utilizados para representação do escoamento real em um reator são os de fluxo disperso e o de mistura completa com tanques em série (METCALF & EDDY, 2003; VON SPERLING & CHERNICHARO, 2005).

Os três fatores globais apontados por Levenspiel (2000), que compõem e determinam o tipo de escoamento real ou não ideal em reatores, são: a distribuição dos tempos de residência (*DTR*) do líquido e das partículas que escoam no reator; o estado de agregação do líquido e das partículas em escoamento (tendência de se aglomerarem e de se moverem juntas); e a antecipação e o retardo de mistura (líquido e partículas).

As técnicas experimentais usuais para estudar o tipo de escoamento e determinar a distribuição dos tempos de residência em um reator, por meio da aplicação de traçadores podem ser do tipo em pulso, em degrau, periódica e aleatória (LEVENSPIEL, 2000). A forma de alimentação do traçador mais utilizada é a do tipo em pulso, conhecida como técnica experimental de estímulo-resposta, que consiste em injetar um traçador, com concentração conhecida na entrada do reator e realizar medições de sua concentração em sua saída, para intervalos de tempo pré-determinados. Devido à sua simplicidade e aplicabilidade nos estudos hidrodinâmicos de reatores biológicos, adotou-se essa técnica para a avaliação do comportamento hidrodinâmico do FBPA. Dessa forma, os parâmetros obtidos pela *DTR* apresentados neste texto são relacionados à função do tipo pulso (estímulo-resposta).

Diversos traçadores têm sido utilizados em estudos hidrodinâmicos desenvolvidos em reatores biológicos para o tratamento de esgotos, dentre eles, traçadores fluorescentes como a rodamina WT e fluoresceína sódica (BORGES *et al.*, 2009), traçadores químicos não reativos como LiCl e o NaCl (VASEL & SCHROBILTGEN, 1991; BRITO *et al.*, 1997; PERSSON *et al.*, 1999; WIK, 1999; SÉGURET *et al.*, 2000; NOVELO *et al.*, 2008; COTA, 2011) e traçadores radioativos como o radioisótopo <sup>82</sup>Br (PAOLI, 2010; PEREIRA, 2012). Em estudos hidrodinâmicos realizados em FBPs, o traçador mais utilizado é o LiCl, sendo utilizadas faixas de concentração de 10 a 60 g LiCl/L.

Os reatores usados para o tratamento de esgotos, frequentemente, são projetados e operados para a condição de escoamento ideal, em termos de padrão de mistura do líquido, devido à menor complexidade de aplicação dos modelos clássicos de fluxo em pistão e de mistura completa. No entanto, é sabido que tais modelos não representam de fato as condições reais de escoamento, devido a fatores como a formação de zonas mortas, caminhos preferenciais (curto-circuito hidráulico) e dispersão axial ou longitudinal do líquido. Por outro lado, os modelos intermediários de padrão de mistura, como o de fluxo disperso (dispersão longitudinal ou axial) e de tanques em série, representam melhor as condições de escoamento real, identificando falhas no escoamento e o tempo real que o esgoto permanece no reator para que ocorram as transformações. Entretanto, sua modelagem é um pouco mais complexa por exigir a definição das condições de contorno.

As condições de mistura em reatores de fluxo disperso geralmente são caracterizadas pelo parâmetro denominado número de dispersão (*d*), determinado pela relação entre o coeficiente de dispersão (axial ou longitudinal), a velocidade média do fluido e o comprimento do reator. Os modelos uniparamétricos de dispersão axial, propostos por Levenspiel (2000), são os modelos de dispersão de pequena intensidade (*DPI*) e de grande intensidade (*DGI*). Sendo que o modelo *DPI* é válido para  $(D/uL) < 0,01$  e o modelo de *DGI* válido para  $0,01 < (D/uL) < 1$ . Segundo este autor, se o escoamento real se desviar bastante do pistonado (altos valores de  $D/uL$ ), possivelmente esse escoamento não obedeça à suposição desses modelos (muitas flutuações aleatórias e independentes). Nesse caso, quando  $(D/uL) > 1$ , caracterizando elevada dispersão, torna-se questionável o uso desses modelos.

O modelo de tanques em série (*TES*), em que cada reator é assumido como de mistura completa (conhecido em inglês como *continuous stirred tank reactor* - CSTR), assim como os modelos de fluxo disperso, são usados para representar condições hidráulicas intermediárias entre os modelos teóricos de mistura completa e

fluxo em pistão. No modelo TES, o número de tanques de mesmo volume ( $N$ ), representa a quantidade de tanques idealmente agitados em série, através dos quais o fluido escoar. Dessa forma, quando o volume total do reator é distribuído em apenas um tanque, o sistema se comporta como mistura completa. Por outro lado, quando o volume total é distribuído em um número infinito de tanques em série, o sistema reproduz o fluxo em pistão. O número de tanques intermediários simula o fluxo disperso, com o sistema tendendo a um tipo ou outro, dependendo do número de subdivisões adotadas (METCALF & EDDY, 2003; VON SPERLING & CHERNICHARO, 2005). O modelo matemático de representação clássico do escoamento de tanques em série ( $N$ -TES) é considerado de simples aplicação, podendo ser usado com qualquer cinética e pode ser estendido, sem muita dificuldade, para qualquer arranjo de compartimento, com ou sem reciclo, não apresentado assim dificuldades quanto às condições de contorno, como ocorrem para os modelos de dispersão (LEVENSPIEL, 2000).

O modelo clássico de fluxo em pistão é muitas vezes assumido para representar o escoamento em FBPs, mas as distribuições dos tempos de residência ( $DTRs$ ), observadas nos FBPs, sempre se desviam significativamente da curva de Gauss, representada pelo modelo de fluxo em pistão. As  $DTRs$  apresentam um comportamento assimétrico chamado de caudal, devido à presença da fase de estagnação (SÉGURET *et al.*, 2000). Neste sentido, um modelo de dispersão axial para a representação dos escoamentos em FBPs, foi proposto por Vassel & Schrobiltgen (1991). Este modelo foi desenvolvido para determinar o comportamento hidrodinâmico de um FBP piloto, com meio de enchimento limpo (sem biofilme) e com meio de enchimento (com biofilme), sendo o traçador (cloreto de lítio) aplicado em pulso.

A partir do modelo clássico de dispersão axial foram introduzidos no modelo proposto por Vassel & Schrobiltgen (1991) os parâmetros de retenção líquida ( $\beta$ ), massa do traçador injetado ( $n_0$ ), volume do reator ( $V$ ) e o número de *Peclet* ( $Pe$ ), substituindo ( $D/uL$ ). A solução analítica desse modelo é apresentada na equação 1. O ajuste aos dados obtidos pelo ensaio com o traçador, pode ser realizado por meio de processos iterativos para minimizar a função da soma dos erros ao quadrado (SSQE), por meio da ferramenta estatística como o *SOLVER* do *Excel*, para a determinação dos parâmetros  $\beta$ ,  $Pe$  e  $TS$  (tempo médio de residência).

$$C(t) = \frac{n_0}{\beta V} \times \frac{1}{2} \times \left(\frac{Pe}{\pi\theta}\right)^{1/2} \times \exp\left[\frac{-Pe(1-\theta)^2}{4\theta}\right] \quad (1)$$

onde,  $C(t)$  é a concentração do traçador, observada no instante  $t$  (mg/L);  $n_0$  é a massa de traçador, lançada no ensaio (mg);  $\beta$  é a retenção líquida no reator (adimensional);  $V$  é o volume do reator (L);  $Pe$  é o número de *Peclet*, que pode ser representado pela razão  $1/d$  (adimensional);  $\theta$  é o tempo normalizado, obtido pela razão entre o  $t/TS$  (adimensional);  $t$  é o tempo de cada intervalo observado (min); e  $TS$  é o tempo de residência (min).

Observa-se que o parâmetro  $\beta$  (retenção líquida) está relacionado ao filme líquido presente entre as fases gasosa e sólida, sendo que a fase sólida pode corresponder a duas situações: a - primeira, quando o meio de enchimento do FBP encontra-se limpo (sem a presença de biofilme), e a segunda, quando o meio de enchimento encontra-se na presença de biofilme.

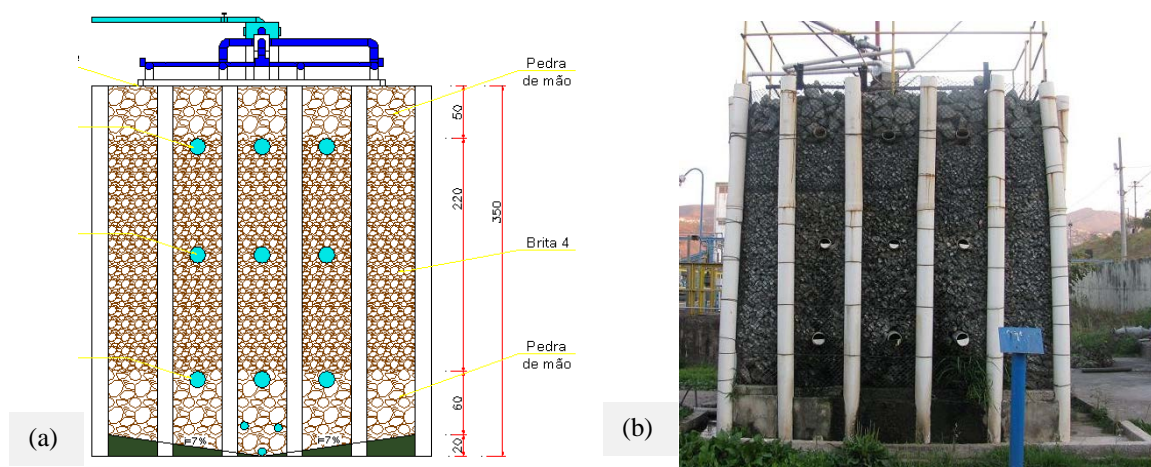
Neste sentido, este trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento hidrodinâmico de um filtro biológico percolador para diferentes taxas de aplicação hidráulica (2,25, 4,5 e 9 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d), por meio de testes com dois tipos de traçadores (NaCl e LiCl) para a determinação das distribuições dos tempos de residência ( $DTR$ ) e, ajustes aos modelos matemáticos de representação dos escoamentos (modelos de dispersão axial e de tanques em série).

## MATERIAL E MÉTODOS

### Aparato experimental

A pesquisa foi conduzida no Centro de Pesquisa e Treinamento em Saneamento da UFMG/COPASA na cidade de Belo Horizonte/MG. O aparato experimental utilizado nesta pesquisa constitui-se em uma concepção de filtro biológico percolador com laterais abertas e sem laje de fundo falso, desenvolvida no DESA-UFMG, denominado de filtro biológico percolador aberto (FBPA), aplicado ao pós-tratamento de efluente de reator UASB.

O FPBA foi operado em fluxo contínuo com efluente de um reator UASB. O líquido foi distribuído na parte superior do FBPA, onde o fluxo passa a ter uma trajetória descendente através do meio de enchimento. O meio de enchimento (meio suporte) do FBPA possui uma altura total de 3,5 m e área superficial de 10,24 m<sup>2</sup> (dimensões úteis de 7,84 m<sup>2</sup> e 21,17 m<sup>3</sup>), constituído por uma camada de 2,2 m de brita nº 4 (tamanho de 36 a 78 mm e porosidade de 50%) em seu interior e outras duas camadas de pedra de mão (tamanho >78 mm e porosidade de 60%) com 0,8 m no fundo (substituindo a laje e fundo falso) e 0,5 m no topo (para um melhor espalhamento do líquido). O sistema de alimentação do FBPA é constituído por um sistema de caixas de distribuição de vazão e calhas (60 mm) com vertedores triangulares do tipo notch. Informações mais detalhadas sobre as características do FBPA são apresentadas em Vieira e von Sperling (2012). Observa-se que é de fundamental compreensão, para os estudos hidrodinâmicos, saber que o líquido simplesmente percola em sentido descendente e, portanto, o filtro não opera submerso e o nível d'água situa-se no fundo da unidade na canaleta de drenagem. Na Figura 1 são apresentadas ilustrações do FBPA.



**FIGURA 1:** Detalhes do FBPA: (a) corte esquemático do filtro; e (b) fotografia do FBPA.

### Distribuição dos tempos de residência (DTR)

Para a determinação da distribuição dos tempos de residência foi adotada a função pulso (experimento de estímulo-resposta com traçador não reativo), para a condição de contorno de vaso fechado (fluido entra e sai uma única vez do reator, desconsiderando perturbações na entrada e saída do reator), escoamento estacionário (vazão não varia significativamente ao longo do tempo), sem reação e sem variação da densidade do fluido, conforme metodologia apresentada em Levenspiel (2000) e Metcalf & Eddy (2003).

Os ensaios foram realizados no FBPA em operação no pós-tratamento de efluentes de reator UASB, contando com a presença de biofilme no meio de enchimento do filtro. Observa-se que os ensaios não avaliaram a influência isolada de seus componentes como, por exemplo, o sistema de alimentação do filtro (distribuição do líquido afluente) e o sistema de drenagem de fundo, adotados no FBPA.

Inicialmente foram realizados ensaios exploratórios com os dois traçadores, cloreto de sódio (NaCl) e cloreto de lítio (LiCl), com o propósito de identificar as concentrações dos traçadores que resultassem em maiores percentuais de recuperação do traçador e melhores ajustes às funções das *DTR*. Para estes ensaios exploratórios foi utilizada a taxa hidráulica média de projeto de 4,5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d (24,5 L/min) e três concentrações para cada traçador. As concentrações de NaCl utilizadas foram de 25, 50, e 100 g/L. Para o traçador LiCl foram utilizadas as concentrações de 2, 3 e 5 g/L. Observa-se que as concentrações adotados encontraram-se dentro da faixa reportada na literatura para a realização de testes hidrodinâmicos em reatores biológicos utilizados para o tratamento de esgotos (VASEL & SCHROBILTGEN, 1991; BRITO *et al.*, 1997; PERSSON *et al.*, 1999; SÉGURET *et al.*, 2000; NOVELO *et al.*, 2008; COTA, 2011).

Logo em seguida, os testes hidrodinâmicos foram realizados para outras taxas hidráulicas (2,25 e 9,0 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d), utilizando as concentração do traçador que obtiveram os melhores ajustes às funções de distribuição dos tempos de residência (DTR).

Para cada ensaio hidrodinâmico realizado, foi preparada uma solução contendo a massa do traçador diluída em 10 litros do efluente do reator UASB. Esta solução foi injetada rapidamente (em aproximadamente 10 segundos) na caixa de distribuição central do sistema de alimentação do FBPA, simulando assim o experimento com a função pulso.

Durante os ensaios foram realizadas medições de vazão e das concentrações dos traçadores com intervalos de tempo ( $\Delta t$ ) de 3 minutos. A duração de cada ensaio foi considerada até que as concentrações dos traçadores retornassem às condições anteriores ao ensaio. Para isso foi considerado o limite de detecção do elemento traçador monitorado, no caso do LiCl, e as condições de variação naturais que ocorrem no efluente do FBPA, no caso do NaCl. Tais considerações sobre o tempo final de monitoramento do traçador são apontadas por Persson *et al.* (1999) como fundamentais para que não ocorram distorções nos dados de DTR desenvolvidos pela curva do traçador.

Foram monitoradas no efluente do FBPA as concentrações de sólidos totais dissolvidos - STD (elemento traçador utilizado para o desenvolvimento das funções da DTR). A medição do parâmetro STD foi realizada pelo método eletrométrico (AWWA/APHA/WEF, 2005), por meio de sensores de sonda multiparâmetro de campo da marca Hach (modelo HQ 40d).

Para os ensaios com o traçador LiCl foi monitorado no efluente do FBPA o elemento lítio (elemento utilizado para o desenvolvimento das funções de DTR). A medição da concentração de lítio (Li) foi realizada a partir da curva de calibração construída na faixa de 0,5 a 3,0 µg/mL, obtida por espectrometria de absorção atômica, GBC SENSAA SERIES AAS, através de medidas diretas na chama de ar-acetileno, utilizando lâmpada de cátodo oco monoelementar no comprimento de onda de 670,8 nm. Para reduzir a interferência da matriz, 100 mL da amostra homogeneizada foram tratados inicialmente com ácido nítrico concentrado e, posteriormente, com peróxido de hidrogênio até completa digestão. Logo após, a amostra digerida foi transferida para balão volumétrico de 50 mL, avolumado com água purificada, homogeneizado e encaminhado para análise instrumental.

Os resultados obtidos da avaliação numérica e gráfica da distribuição dos tempos de residência de cada ensaio para as diferentes taxas hidráulicas e traçadores foram expressos em termos de variância ( $\sigma^2$ ), tempo médio de residência do líquido ( $\bar{t}$ ), sendo apresentadas as funções (curvas) de distribuição dos tempos de residência  $E(t)$  e função acumulativa da distribuição dos tempos de residência  $F(t)$ , conforme metodologia apresentada em Levenspiel (2000) e Metcalf & Eddy (2003). As equações de cada função foram apresentadas no item 3.2.1 (Distribuição dos tempos de residência) deste texto. Observa-se ainda que, para a avaliação das curvas de DTR, foram desconsiderados os valores de fundo (*background*) dos traçadores monitorados, no caso do NaCl, o STD e no caso do LiCl, o elemento Li, entendido assim por parte da metodologia adotada.

### **Ajustes dos modelos de representação do escoamento**

Para a verificação do modelo matemático de representação dos escoamentos reais que mais se aproxima do comportamento hidrodinâmico do FBPA, quanto às curvas de DTR obtidas nos ensaios com os traçadores foram utilizados os modelos:

- de **tanques em série**  $\Rightarrow$  *modelo clássico de TES* (LEVENSPIEL, 2000) e o *modelo com a função gama TES*  $g(t)$  (KADLEC & WALLACE, 2008);
- e de **dispersão axial**  $\Rightarrow$  *modelo clássico de dispersão axial de pequena e grande intensidades* (LEVENSPIEL, 2000; METCALF & EDDY, 2003) e o *modelo de dispersão axial com o parâmetro de retenção líquida* (VASEL & SCHROBILTGEN, 1991).

Os modelos de tanques em série foram utilizados para a determinação do número de tanques em série ( $N$ ) e verificação dos ajustes das curvas de DTR dos ensaios dos traçadores. Os modelos foram ajustados por processos iterativos, por meio da ferramenta *SOLVER* do *Excel*, com o objetivo de minimizar a função das somas dos erros ao quadrado (SSQE) e maximizar o coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Para o modelo clássico

de *TES*, o parâmetro selecionado para o ajuste foi o  $N$  e para o modelo de tanques em série com a função gama - *TES*  $g(t)$  – foram selecionados os parâmetros  $N$  e  $\tau$  (tempo médio de residência).

Os modelos de dispersão axial de pequena e de grande intensidade (*DPI* e *DGI*) foram utilizados para a determinação do número de dispersão ( $d$ ), coeficiente de dispersão ( $D$ ) e número de Peclet ( $Pe$ ). No caso do modelo de *DGI*, foi utilizado o processo iterativo, por meio da ferramenta *SOLVER* do *Excel*, para determinar o número de dispersão a partir da equação do modelo. Em relação aos ajustes dos modelos às curvas de *DTR* obtidas nos ensaios dos traçadores, foi usado o modelo dispersão de pequena intensidade (*DPI*). O modelo de dispersão de grande intensidade (*DGI*) não foi usado devido à dificuldade associada à ausência de expressão analítica para a sua representação.

O modelo de dispersão axial, com a função de retenção líquida, proposto por Vassel & Schrobiltgen (1991), foi ajustado quanto aos parâmetros  $d$  (número de dispersão) e  $\beta$  (retenção líquida no filtro) para os dados das curvas de traçagem, por meio de processos iterativos utilizando a ferramenta *SOLVER* do *Excel*, para minimizar a função das somas dos erros ao quadrado (SSQE) e maximizar o coeficiente de determinação ( $R^2$ ). A análise de regressão entre os dados observados e simulados foi feita conforme metodologia para calibração de modelos, apresentada por von Sperling (2007).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Distribuição dos tempos de residência

Os ensaios com os traçadores foram conduzidos com o tempo total variando de 1:30 a 2:00 h após o pulso do traçador, com amostragens a cada 3 minutos do efluente do FBPA. Como comentado, para a avaliação das curvas de *DTR*, foram considerados o limite de detecção e variação natural do elemento traço monitorado, sendo que a primeira está relacionada ao traçador LiCl (limite de detecção de 0,5 mg Li/L), e a segunda, no caso do traçador NaCl, às concentrações de STD (parâmetro utilizado para o monitoramento do traçador NaCl). Observou-se que as concentrações de STD no efluente do FBPA apresentaram variação natural média de 30 mg/L, durante um período mínimo de 1 hora, conforme averiguação em monitoramento de 24 horas feito no efluente do filtro. Dessa forma, foi considerado para a determinação do ponto final da  $C_{pulso}$  do NaCl, quando as concentrações de STD, examinadas no efluente, foram iguais ou inferiores a 30 mg STD/L.

Com o propósito de avaliar as concentrações dos traçadores, que apresentassem melhor percentual de massa recuperada e melhores ajustes a *DTR*, foram testadas três concentrações para cada traçador, utilizando a taxa hidráulica de 4,5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d. Neste sentido, os resultados dos principais parâmetros da  $C_{pulso}$  e das funções de *DTRs* obtidos para as diferentes concentrações do traçador LiCl e NaCl, conduzidas com a taxa de 4,5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d, são apresentados na Tabela 1.

**TABELA 1 – Resultados dos principais parâmetros da curva  $C_{pulso}$  e das funções das *DTRs* para diferentes concentrações LiCl e NaCl obtidos com a taxa hidráulica de 4,5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d.**

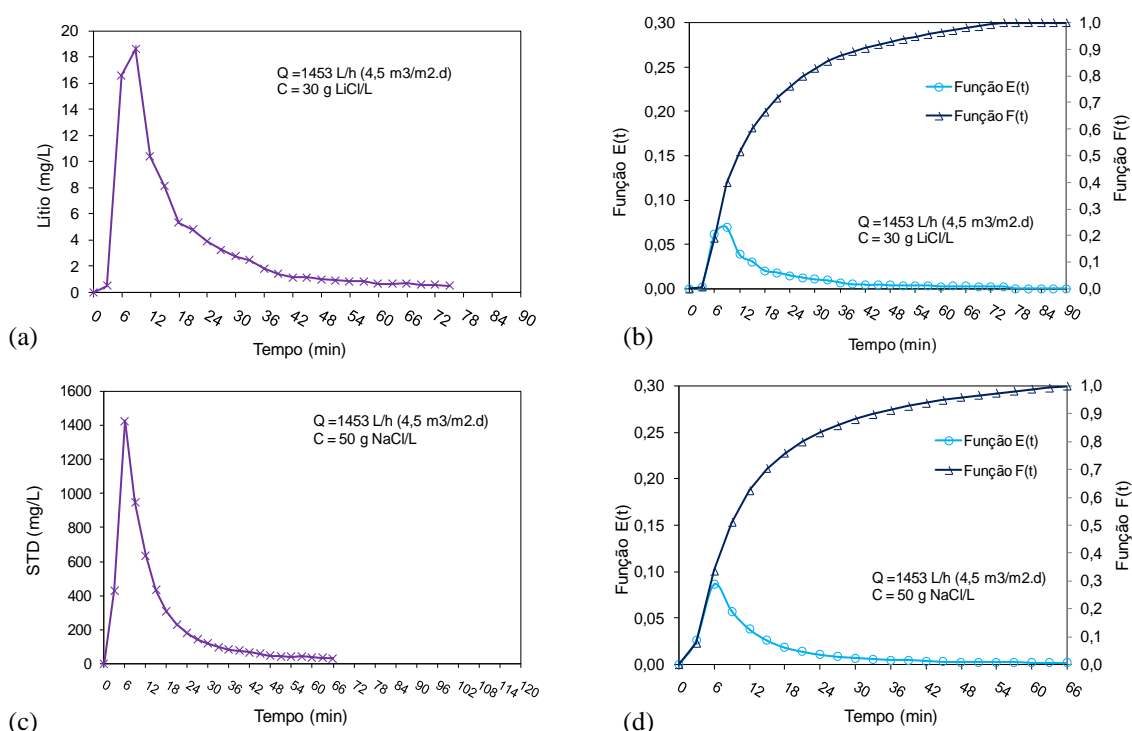
Traçador / Ensaio	$C$ (g/L)	$Rec.$ (%)	$t_i$ (min)	$t_{10}$ (min)	$t_p$ (min)	$t_{90}$ (min)	$t_{máx}$ (min)	$t_{total}$ (min)	$\bar{t}$ (min)	$\sigma^2$ (min <sup>2</sup> )
LiCl – 1	2	19	3	8	9	75	84	90	16,8	177
<b>LiCl – 2</b>	<b>3</b>	<b>23</b>	<b>3</b>	<b>7</b>	<b>9</b>	<b>67</b>	<b>75</b>	<b>90</b>	<b>19,2</b>	<b>243</b>
LiCl – 3	5	20	3	8	9	36	60	90	21,6	324
NaCl – 1	25	74	3	4	6	35	39	120	12,4	65
<b>NaCl – 2</b>	<b>50</b>	<b>88</b>	<b>3</b>	<b>7</b>	<b>6</b>	<b>60</b>	<b>66</b>	<b>120</b>	<b>15,4</b>	<b>168</b>
NaCl – 3	100	79	3	9	6	78	87	120	16,1	270

$C$ : concentração do traçador injetado.  $Rec.$ : percentual da massa recuperada do traçador.  $t_i$ : tempo de resposta do traçador.  $t_p$ : tempo em que o pico do traçador é observado.  $t_{10}$ : tempo que 10% do traçador passa pelo reator.  $t_{90}$ : tempo que 90% do traçador passa pelo reator.  $t_{máx}$ : tempo máximo que o traçador foi observado.  $t_{total}$ : tempo total do ensaio.  $\bar{t}$ : tempo médio de residência do líquido.  $\sigma^2$ : variância ou espalhamento da curva de concentração do traçador.

Os valores dos parâmetros hidráulicos  $t_i$ ,  $t_p$ , e  $t_{10}$  obtidos nas curvas  $C_{pulso}$  do traçador NaCl foram bastante semelhantes para as concentrações de NaCl, com exceção do  $t_{90}$ , cujos valores variaram em razão das concentrações (tempo maior para as maiores concentrações). O mesmo comportamento foi observado nas curvas  $C_{pulso}$  do traçador LiCl. Com relação aos dois traçadores, os ensaios com o LiCl apresentaram tempos de resposta posteriores aos apresentados com o NaCl, quando são avaliados os parâmetros hidráulicos  $t_p$ ,  $t_{10}$  e  $t_{90}$ . Nesse sentido, acredita-se que as variações dos tempos médios de residência entre os dois traçadores possam estar relacionadas ao atraso da resposta do LiCl, observado pelo  $t_p$  e  $t_{máx}$ . No caso da variância, certamente foram influenciadas diretamente pelas diferentes concentrações dos traçadores.

Constatou-se que os percentuais de recuperação do traçador NaCl foram bem superiores aos do LiCl. Tal fato pode estar relacionado ao limite de detecção obtido para o elemento Li (0,5 mg LiCl/L) e, também, com uma aceitável adsorção deste elemento no biofilme do FBPA que, possivelmente, influenciou nos parâmetros da  $C_{pulso}$  e das funções de DTR. Os baixos percentuais de recuperação obtidos para o traçador LiCl contrariam outros estudos, como o apresentado por Séguret *et al.* (2000), que obteve cerca de 81,5 a 98% de recuperação do traçador LiCl em testes realizados com FBPs de escala plena com meio suporte de pedra britada. Os mesmos autores apontaram uma possível fonte de erro para a determinação do tempo máximo (final) de observação do traçador, visto que o percentual de recuperação do lítio é baixo no final da curva  $C_{pulso}$ . A respeito de uma possível adsorção do LiCl, Wik (2003) comentou que, apesar da possibilidade de ocorrer, o autor não encontrou nenhuma evidência de adsorção desse traçador para a determinação dos DTR em um FBP, quando aplicado em pulso.

Verificou-se assimetria à direita nas curvas  $C_{pulso}$  e  $E(t)$  em todos os ensaios realizados com os dois traçadores, sendo que a cauda se reduziu à medida que as taxas hidráulicas aumentaram. Ao comparar os dois traçadores, o LiCl apresentou fenômeno de cauda mais acentuado do que o NaCl. Na Figura 2 são apresentadas as curvas  $C_{pulso}$  e as funções de distribuição dos tempos de residência  $E(t)$  e distribuição acumulada dos tempos de residência  $F(t)$  dos testes com os traçadores LiCl e NaCl que obtiveram a melhor resposta quanto ao percentual recuperado do traçador, para a taxa hidráulica de 4,5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d.



**FIGURA 2:** Curvas  $C_{pulso}$  e as funções de DTRs para os traçadores LiCl (a e b) e NaCl (c e d), obtidas com a taxa de aplicação hidráulica de 4,5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d.

Levenspiel (2000) alerta que o fenômeno de cauda pode estar relacionado à adsorção do traçador nos constituintes internos do reator e à presença de zonas mortas e curtos-circuitos hidráulicos. Séguret *et al.*

(2000) verificaram que em reatores de tratamento de esgotos com biomassa aderida (biofilme), o traçador é transportado para dentro do biofilme por difusão e o biofilme libera lentamente o traçador para a zona de escoamento (fase líquida), aumentando significativamente a cauda da curva  $E(t)$ .

Acredita-se que o prolongamento da cauda das curvas de traçagem e sua influência nos tempos médios de residência possam estar associados ao fenômeno de difusão reportado na literatura (mais pronunciado quando usado o traçador LiCl) e à presença de zonas mortas e à formação de caminhos preferências do líquido ao longo do meio de enchimento, associados possivelmente ao desempenho do sistema de distribuição do FBPA.

Devido aos baixos valores dos percentuais recuperados do LiCl, optou-se em realizar os ensaios para outras taxas hidráulicas (2,25 e 9,0  $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ ), com o traçador NaCl para a concentração de 50 g NaCl/L, que obteve os melhores resultados em termos de percentuais de recuperação e ajuste às funções de  $DTR$ . Neste sentido, na Tabela 2 são apresentados os resultados dos principais parâmetros da  $C_{pulso}$  e das funções dos  $DTR$  obtidas com o traçador NaCl, para as três taxas hidráulica de aplicação superficial.

**TABELA 2 – Resultados dos principais parâmetros da curva  $C_{pulso}$  do NaCl e de suas funções de  $DTR$  para as três taxas hidráulicas investigadas.**

TAS ( $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ )	Rec. (%)	$t_i$ (min)	$t_{10}$ (min)	$t_p$ (min)	$t_{90}$ (min)	$t_{\text{máx}}$ (min)	$t_{\text{total}}$ (min)	$\bar{t}$ (min)	$\sigma^2$ ( $\text{min}^2$ )
2,25	85	3	11	9	100	111	120	22,7	460
4,5	88	3	7	6	60	66	120	15,4	168
9,0	88	3	5	6	40	45	120	12,8	85

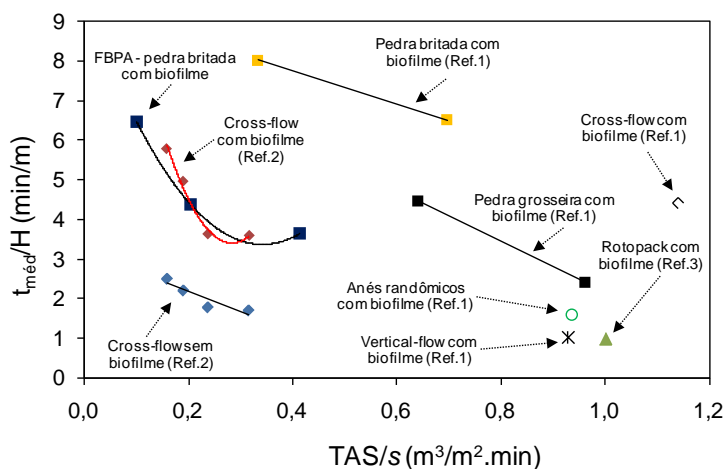
Q: vazão afluente aplicada no FBPA. Rec.: percentual da massa recuperada do traçador.  $t_i$ : tempo de resposta do traçador.  $t_p$ : tempo em que o pico do traçador é observado.  $t_{10}$ : tempo que 10% do traçador passa pelo reator.  $t_{90}$ : tempo que 90% do traçador passa pelo reator.  $t_{\text{máx}}$ : tempo máximo que o traçador foi observado.  $t_{\text{total}}$ : tempo total do ensaio.  $\bar{t}$ : tempo médio de residência do líquido.  $\sigma^2$ : variância ou espalhamento da curva de concentração do traçador.

Em relação aos percentuais de recuperação do traçador NaCl, entre as três taxas hidráulicas investigadas, foi observada uma pequena variação ou quase nenhuma, mesmo tendo ocorrido ampla variação do tempo máximo ( $t_{\text{máx}}$ ) analisado. Dessa forma, acredita-se que o traçador NaCl pode proporcionar resultados satisfatórios para a determinação das  $DTRs$  em FBPA.

Os tempos de respostas obtidos pelos parâmetros da  $C_{pulso}$  e das funções de  $DTR$  ( $\bar{t}$  e  $\sigma^2$ ) apresentaram um comportamento esperado: quanto maior a taxa hidráulica aplicada, menor foi o tempo de resposta do traçador e menor a variância da curva de  $DTR$ . O fato que chama atenção foi que, apesar do tempo médio de residência ( $\bar{t}$ ) ter apresentado também uma relação inversa com a taxa hidráulica, essa relação não foi linear, corroborando a teoria da capacidade de retenção líquida do FBPA, representada pela soma do volume do filme líquido (entre as interfaces gás e biofilme) e o volume drenado para o biofilme.

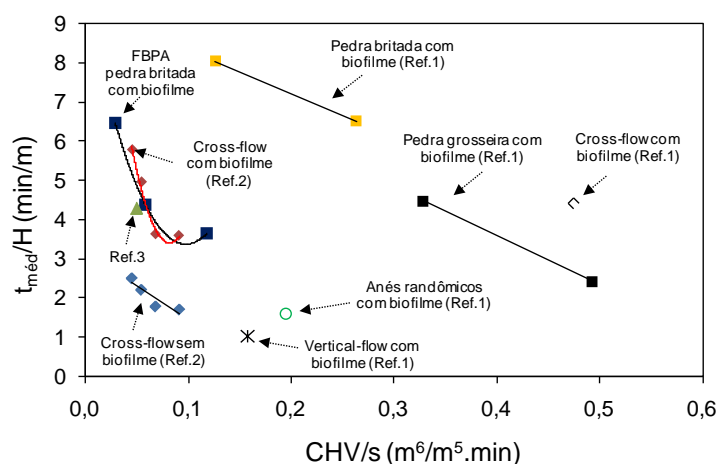
Ressalta-se que os valores dos tempos médios de residência obtidos no FBPA, aproximadamente de 13 a 23 min para as TAS (2,25, 4,5 e 9,0  $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ ), foram bem inferiores aos tempos médios de residência observados na grande maioria de reatores biológicos utilizados no tratamento de esgotos, que geralmente variam de algumas horas a dias. Este fato reforça algumas das vantagens dos reatores de biofilme aderido como: a sua operação pode ocorrer com tempos médios de residência do líquido inferiores ao tempo de retenção celular, reduzindo o volume necessário para o reator e tornando-os sistemas compactos; e a velocidade de remoção de substrato pode ser superior à de sistemas com crescimento disperso.

A variação da  $DTR$ , e consequentemente, do tempo médio de residência, é apontada na literatura, em decorrência, principalmente, da taxa hidráulica, presença e quantidade de biofilme e do meio de enchimento utilizado no FBPA. Nesse sentido, os resultados obtidos na investigação das três taxas hidráulicas do FBPA foram comparados a outros resultados apresentados na literatura mediante a relação  $\bar{t}/H$  em função da CHV e da TAS, conforme apresentado nas Figuras 3 e 4.  $\bar{t}$  é o  $t_{\text{méd}}$  (min),  $H$  é a altura do filtro (m), CHV é a carga hidráulica volumétrica ( $\text{m}^3/\text{m}^3.\text{min}$ ) e TAS é a taxa de aplicação superficial ( $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{min}$ ) e  $s$  é a área superficial específica do meio de enchimento ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ ).



Ref.1: Séguret *et al.* (2000); Ref.2: Vasel & Schrobiltgen (1991); Ref.3: Almeida *et al.* (2011).

**FIGURA 3: Comparação dos valores de  $\bar{t}/H$  versus a TAS/s no FBPA com outros FBPs utilizando diferentes tipos de enchimento e presença de biofilme.**



Ref.1: Séguret *et al.* (2000); Ref.2: Vasel & Schrobiltgen (1991); Ref.3: Almeida *et al.* (2011).

**FIGURA 4: Comparação dos valores de  $\bar{t}/H$  versus a CHV/s no FBPA com outros FBPs utilizando diferentes tipos de enchimento e presença de biofilme.**

Pôde ser observado pelas Figuras 3 e 4, que, de modo geral, para as semelhantes taxas hidráulicas aplicadas (CHV e TAS) nos FBPs, os meios de enchimento de pedra (britada e grosseira) e com a presença de biofilme apresentaram tempo de retenção maior do que o nos FBPs com outros meios de enchimento e presença de biofilme, com exceção do FBP com *Cross-flow*, apresentado por Séguret *et al.* (2000). Verificou-se que os resultados dos tempos de residência obtidos no FBPA foram inferiores aos resultados apresentados nos outros FBPs com meios de enchimento semelhantes (pedra britada e grosseira). Todavia, quando comparados com as taxas hidráulicas (CHV e TAS) mais próximas, os resultados do FBPA foram próximos aos resultados obtidos por Vasel & Schrobiltgen (1991), no FBP com meio de enchimento plástico (*Cross-flow*) com biofilme, e bem superiores aos resultados deste FBP sem biofilme. Observou-se, ainda, que para os valores dos tempos de residência obtidos no FBPA de aproximadamente 13 a 23 minutos, para as TAS investigadas (2,25, 4,5 e 9,0  $m^3/m^2d$ ), o líquido (esgoto) gasta entre 3,5 e 6,0 minutos para percolar um metro.

## Ajustes dos modelos de escoamentos reais

### Modelos de tanques em série

Os ajustes dos modelos de representação dos escoamentos às curvas de *DTRs* são apresentados, a seguir, para as três taxas hidráulicas investigadas com traçador NaCl. Optou-se em não apresentar os ajustes dos modelos às curvas de *DTR* com o traçador LiCl, devido ao baixo percentual de recuperação obtido nos testes realizados, conforme discutido anteriormente. Dessa forma, na sequência, serão apresentados e avaliados os ajustes dos modelos de tanques em série (clássico e com a função de distribuição gama) e de dispersão axial (clássico e com o parâmetro de retenção líquida), assim como os parâmetros hidrodinâmicos obtidos por estes.

Os valores de *N* e dos tempos médio de residência, estimados pelos modelos de tanques em série, *N-TES* e *TES g(t)*, assim como os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) dos ajustes destes modelos às curvas de *DTR* para as taxas hidráulicas investigadas, são apresentados na Tabela 3.

**TABELA 3 – Parâmetros obtidos pelos ajustes dos modelos de tanques em série clássico (*N-TES*) e da função gama *TES g(t)* para as taxas hidráulicas investigadas no FBPA.**

TAS (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .d)	Q (L/h)	Modelo <i>N-TES</i>			Modelo <i>TES g(t)</i>		
		$\bar{t}$ (min)	Número de TES ( <i>N</i> )	Coeficiente de determinação ( $R^2$ )	$\tau$ (min)	Número de TES ( <i>N</i> )	Coeficiente de determinação ( $R^2$ )
2,25	719	22,7	1,12	0,712	18,5	1,59	0,784
4,5	1453	15,4	1,33	0,716	13,0	1,77	0,810
9,0	2940	12,8	1,95	0,986	11,5	1,83	0,991

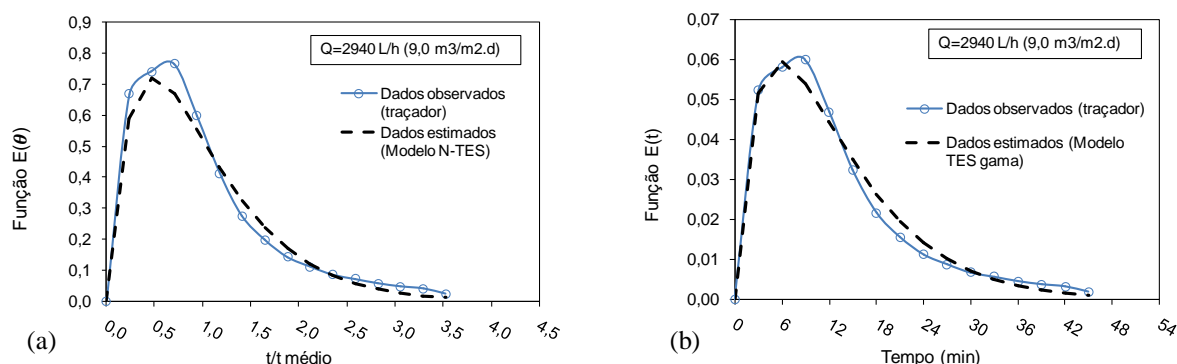
$\bar{t}$ : tempo médio de residência obtido pela *DTR*.  $\tau$  tempo médio de residência estimado pelo modelo *TES g(t)*.

Foi observado que o tempo de residência médio, calculado pelo modelo de tanques em série com a função de distribuição gama *TES g(t)*, apresentou uma variação, em razão da taxa hidráulica aplicada, sendo que o tempo de residência médio reduziu com a elevação da taxa hidráulica. A redução não ocorreu, no entanto, na mesma proporção daquela observada pela função de *DTR*, provavelmente, devido à capacidade de retenção líquida do FBPA. Observou-se também que o tempo de residência médio, estimado pelo modelo *TES g(t)*, foi ligeiramente inferior àqueles obtidos e calculados pela análise de *DTR*.

Os baixos valores de *N*, estimados em ambos os modelos, indicaram que o escoamento do FBPA tende ao modelo de mistura completa, contrariando a teoria de escoamento ideal de fluxo em pistão para FBPs. A tendência de mistura completa pôde ser observada também no caso do modelo clássico de *TES*, por meio de análise gráfica da conformação entre as curvas estimadas com as curvas típicas de representação da distribuição dos tempos de residência normalizada ( $E_{\theta}$ ), apresentadas em Levenspiel (2000).

Em estudo realizado por Wik (2003), os melhores valores estimados para *N*, por meio dos modelos de tanques em série clássico e com o de biodifusão (*CSBR*), foram de 3 e 10, respectivamente. Os três tanques em série implicaram um escoamento que está bem distante de escoamento ideal de fluxo pistão para FBPs, considerado por este autor. Este comentou ainda que a *DTR*, em reatores de biofilme, apresenta frequentemente uma pronunciada cauda, o que faz com que os modelos convencionais de representação do escoamento, como no caso do modelo de *N-TES*, sejam inadequados para descrever a dinâmica do reator. A razão para a cauda é devido à retenção do traçador no biofilme, que pode estar associada à difusão de substâncias para dentro e para fora do biofilme e à adsorção de substâncias para dentro do biofilme.

Observaram-se bons ajustes às curvas de ambos os modelos de *TES*, sendo que o modelo de *TES* apresentou os melhores ajustes e os melhores coeficientes de determinação ( $R^2$ ) seguiram uma relação direta com o aumento da taxa hidráulica aplicada ao filtro. Consequentemente, para taxa hidráulica de 9,0 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d, os valores obtidos dos  $R^2$ , para ambos os modelos, apresentaram boa aderência aos dados das *DTRs*, mesmo que esses modelos não considerem o fenômeno de difusão e que o escoamento tendeu ao de mistura completa. Na Figura 5 são apresentadas as curvas dos modelos de tanques em série clássico (Figura 5 a) e com a função de distribuição gama *TES g(t)* (Figura 5 b) ajustadas aos dados de *DTR*, obtidas nos testes com a taxa hidráulicos de 9,0 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d.



**FIGURA 5:** Curvas da função  $E(t)$  dos modelos de TES ajustadas aos dados obtidos pela DTR para o teste com a taxa de  $9,0 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ : (a) modelo TES  $g(t)$ ; e (b) normalizada do modelo clássico de TES.

#### Modelos de dispersão axial

Os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) dos ajustes do modelo de DPI (dispersão de pequena intensidade) às curvas de DTR obtidas com as taxas hidráulicas investigadas são apresentados na Tabela 4, conjuntamente com os dados dos parâmetros hidrodinâmicos estimados por este modelo e pelo modelo de DGI (dispersão de grande intensidade).

**TABELA 4 – Parâmetros hidrodinâmicos obtidos pelos modelos de DPI e DGI e valores dos ajustes do modelo de DPI para as taxas hidráulicas investigadas no FBPA.**

TAS	Q	Modelo DGI			Modelo DPI			
		d	D	Pe	D	D	Pe	$R^2$
( $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ )	(L/h)	(-)	( $\text{cm}^2/\text{s}$ )	(-)	(-)	( $\text{cm}^2/\text{s}$ )	(-)	
2,25	719	<b>2,927</b>	504	0,34	<b>0,448</b>	154	2,23	<b>0,394</b>
4,5	1453	<b>1,094</b>	255	0,91	<b>0,377</b>	176	2,65	<b>0,413</b>
9,0	2940	<b>0,408</b>	109	2,48	<b>0,256</b>	136	3,9	<b>0,784</b>

$d$ : número de dispersão.  $D$ : coeficiente de dispersão.  $Pe$ : número de Peclet.  $R^2$ : coeficiente de determinação de ajuste do modelo aos dados da curva do traçador.

Observou-se que os valores do número de dispersão ( $D/uL$ ) obtidos podem ser enquadrados como de grande dispersão ( $d > 0,25$ ), conforme classificação que foi proposta em Metcalf & Eddy (2003). Nesse sentido, conforme as curvas típicas de representação da distribuição dos tempos de residência normalizada ( $E_\theta$ ) do modelo DGI, apresentadas em Levenspiel (2000), o valor máximo do número de dispersão estimado ( $d = 2,927$ ), que foi para a menor taxa hidráulica aplicada, pode ser considerado bem próximo ao valor de  $d = 3$ , que se aproxima do escoamento de mistura completa.

No entanto, os ajustes do modelo de DPI apresentaram valores estimados do número de dispersão ( $d$ ) superiores ao valor do número de dispersão ( $d < 0,01$ ), proposto em Levenspiel (2000). No caso do modelo de DGI (dispersão de grande intensidade), os valores do número de dispersão estimados para as taxas de 2,25 e  $4,5 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$  foram superiores ao valor de 1,0, que de acordo com a concepção de Levenspiel (2000) seria o valor máximo para a utilização deste modelo. Dessa forma, os resultados obtidos para os números de dispersão apresentaram assim inconformidade para a utilização de ambos os modelos de dispersão axial (DPI e DGI), para o ajuste das DTR obtidas pelas taxas de aplicação hidráulica investigadas.

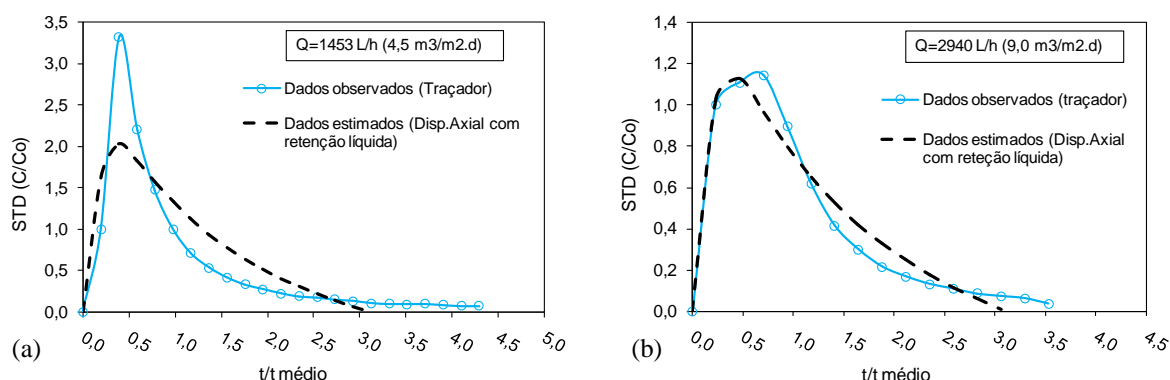
Na Tabela 5 são apresentados os valores dos coeficientes de determinação dos ajustes do modelo de dispersão axial com o parâmetro de retenção líquida, para as curvas de DTR das taxas hidráulicas investigadas, assim como os dados dos parâmetros hidráulicos estimados por esse modelo.

**TABELA 5 – Valores dos ajustes do modelo de dispersão axial com parâmetro de retenção líquida para as taxas hidráulicas investigadas no FBPA.**

TAS (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .d)	Q (L/h)	Dispersão axial com parâmetro de retenção líquida					
		TS (min)	$\beta$ (%)	D (-)	D (cm <sup>2</sup> /s)	Pe (-)	R <sup>2</sup>
2,2	719	<b>16,12</b>	<b>0,69</b>	<b>0,90</b>	156	1,11	<b>0,838</b>
4,5	1453	<b>14,25</b>	<b>0,92</b>	<b>1,11</b>	258	0,90	<b>0,813</b>
9,0	2940	<b>13,72</b>	<b>1,12</b>	<b>1,29</b>	342	0,78	<b>0,976</b>

TS: tempo de residência médio.  $\beta$ : parâmetro de retenção líquida. d: número de dispersão. D: coeficiente de dispersão. Pe: número de Peclet. R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação de ajuste do modelo aos dados da curva do traçador.

De modo geral, o modelo de dispersão axial, com o parâmetro de retenção líquida, foi o que apresentou as melhores aderências às curvas de traçagem, para as três taxas hidráulicas investigadas no FBPA. Os valores dos coeficientes de determinação dos ajustes do modelo de dispersão axial, com parâmetro de retenção líquida, apresentaram-se bastante semelhantes para as duas menores taxas hidráulicas aplicadas e com um ajuste razoável às curvas de DTR. Observou-se que o modelo obteve o melhor ajuste para a maior taxa hidráulica aplicada (Figura 6 b) e com um elevado valor de R<sup>2</sup> (0,976), para todos os modelos utilizados neste trabalho.



**FIGURA 6: Curvas normalizadas do modelo de dispersão axial com a função de retenção líquida ajustadas aos dados obtidos pela DTR para as taxas de 4,5 e 9,0 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d no FBPA.**

A respeito dos parâmetros hidráulicos estimados pelo modelo de dispersão axial com o parâmetro de retenção líquida, o número de dispersão apresentou uma relação inversa ao da taxa hidráulica aplicada, como também foi observado no estudo apresentado por Vassel & Schrobiltgen (1991). Assim, quanto maior a taxa hidráulica aplicada, maior o valor do número de dispersão. Tal comportamento foi oposto ao observado para os modelos de dispersão de DPI e DGI. Observa-se que, mesmo que os valores do número de dispersão estimados pelo modelo de dispersão axial com o parâmetro de retenção líquida possam indicar um elevado grau de dispersão, eles estiveram bem abaixo de valores aproximados de 3 que podem ser considerados como aproximando às condições de mistura completa.

Os valores estimados do parâmetro de retenção líquida ( $\beta$ ) demonstraram uma relação direta e quase linear à elevação das taxas hidráulicas aplicadas, ou seja, quanto maior a taxa hidráulica aplicada, maior a retenção líquida no filtro, como foi observado também em outros estudos (VASEL & SCHROBILTGEN, 1991; SÉGURET *et al.*, 2000). Acredita-se que a capacidade de retenção líquida no FBPA pode estar associada à capacidade de drenagem do biofilme constituído no meio de enchimento e às condições de distribuição do afluente e umedecimento do meio de enchimento do FBP. Neste sentido, o sistema de distribuição tem uma importante função no bom desempenho dos FBPs, conduzindo ao espalhamento mais uniforme do líquido no meio de enchimento, ao melhor aproveitamento do seu volume útil e reduzindo os caminhos preferenciais e as zonas mortas.

Em relação ao tempo de residência médio ( $TS$ ), estimado pelo modelo de dispersão axial com o parâmetro de retenção líquida, foi observado que o  $TS$  apresentou uma redução com o aumento das taxas hidráulicas aplicadas. Todavia, essa redução foi proporcionalmente inferior àquelas observadas pela função de  $DTR$  e pelo modelo de  $TES\ g(t)$ . Por conseguinte, o tempo de residência  $TS$ , calculado a partir do modelo hidrodinâmico de dispersão axial com o parâmetro de retenção líquida, foi inferior aos outros tempos de residência, calculados a partir da função de  $DTR$  e do modelo de  $TES\ g(t)$ , com exceção do obtido com a maior taxa hidráulica aplicada no FBPA ( $9,0\ m^3/m^2.d$ ). Foi observado também que em todos os três modelos utilizados para determinar o tempo médio de residência, este variou em função da taxa hidráulica aplicada, mas não com uma relação linear, provavelmente devido à capacidade de retenção líquida do filtro.

## CONCLUSÕES

As principais conclusões extraídas sobre estudo do comportamento hidrodinâmico do FBPA, avaliado para as taxas hidráulicas de aplicação superficial de 2,25, 4,5, e  $9,0\ m^3/m^2.d$  e altura do filtro de 3,5 m, foram:

- quando comparado os dois traçadores utilizados, os ensaios conduzidos com o NaCl apresentaram menores tempos de resposta para  $t_p$  e  $t_{90}$ , melhores percentuais de recuperação e menor fenômeno de cauda do que àqueles realizados com o LiCl. Acredita-se que o limite de detecção obtido para o elemento Li e, também, uma possível adsorção deste elemento no biofilme do FBPA, possam ter influenciado nos resultados. Quanto ao efeito de cauda, observado nas curvas de concentração dos dois traçadores, acredita-se que possam estar associadas ao fenômeno de difusão (maior atuação no traçador LiCl), à presença de zonas mortas e à formação de caminhos preferências ao longo do meio de enchimento, promovidos pelo desempenho do sistema de distribuição do FBPA. Dessa forma, acredita-se que o traçador NaCl pode proporcionar resultados mais satisfatórios para a determinação das DTRs em FBPA quando comparado ao LiCl.
- a respeito dos tempos médios de residência observados no FBPA, os resultados obtidos pelos três modelos utilizados foram bem semelhantes, e em todos modelos, o tempo médio de residência variou em função da taxa hidráulica aplicada, mas não linearmente. Acredita-se que esse fato esteja relacionado com a capacidade de retenção líquida do filtro, proporcionada pela capacidade de drenagem do biofilme e pelas condições de distribuição do afluente e umedecimento do meio de enchimento do filtro. Neste sentido, chama-se a atenção para o sistema de distribuição, que mostra-se um importante agente no desempenho dos FBPs, conduzindo a um espalhamento mais uniforme do líquido no meio de enchimento e reduzindo os caminhos preferenciais e as zonas mortas.
- os valores dos parâmetros hidrodinâmicos, como o número de dispersão, obtidos pelo modelo de dispersão axial com o parâmetro de retenção líquida, indicaram que o regime de escoamento do FBPA tendeu ao modelo de fluxo em pistão, mas com elevado grau de dispersão do líquido. Acredita-se que esse fato possa estar relacionado também com a forma de distribuição do líquido no reator. Outro ponto a ser destacado no estudo, foi que, de modo geral, o modelo de dispersão axial com o parâmetro de retenção líquida apresentou as melhores aderências às curvas de traçagem para as três taxas hidráulicas investigadas no FBPA. Acredita-se que esse fato esteja relacionado com uma maior adequação deste modelo, quanto às características e funcionamento do reator em questão.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALMEIDA, P.G.S.; MARCUS, A.K.; RITTMANN; B.E.; CHERNICHARO; C.A.L. Performance of plastic- and sponge-based trickling filters treating effluents from an UASB reactor. In: Proc. X DAAL – LATIN AMERICAN WORKSHOP AND SYMPOSIUM ON ANAEROBIC DIGESTION. Ouro Preto, 2011.
2. APHA; AWWA; WEF. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 21. Ed. Washington/D.C, American Public Health Association, 2005. 1368 p.
3. BORGES, A.C.; MATOS, A.T.; CALIJURI, M.C.; OLIVEIRA, G.H.H.; ROLDÃO, J.S.F. Uso de traçadores para avaliação da hidrodinâmica de sistemas alagados construídos operando sob clima tropical. *Engenharia Agrícola*, v. 29, p. 301-310, 2009.
4. BRITO, A.G.; MELO, L.F. A simplified analysis of reaction and mass transfer in UASB and EGSB reactors. *Environmental Technology*. v. 18, p.35-44, 1997.

5. COTA, R.S. *Hidrodinâmica e desempenho de filtros verticais plantados e não plantado com alimentação em pulso, empregados no tratamento de esgoto sanitário bruto*. Tese (Doutorado em Saneamento Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.
6. KADLEC, H. R.; WALLACE, S. *Treatment wetlands*. 2. ed., Boca Raton, Florida: CRC Press, 2008. 1016 p.
7. LEVENSPIEL, O. *Engenharia das Reações Químicas*. São Paulo: Edgard Blugher, 2000. 563p.
8. METCALF & EDDY. *Wastewater engineering: treatment, and reuse*. New York: Metcalf & Eddy, Inc., 4 th. ed., 2003. 1819p.
9. NOVELO, R.I.M.; CABALLERO, M.C.P.; VALLEJOS, G.G. Evaluation of integral parameters in the residence time distribution in models of artificial wetlands with horizontal subsurface flow. In: *Proc XXXI CONGRESO INTERAMERICANO, AIDIS*, Santiago/Chile, 2008.
10. PAOLI, A.C.. *Análise de desempenho e comportamento de wetlands horizontais de fluxo subsuperficial baseado em modelos hidráulicos e cinéticos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.
11. PEREIRA, J.O. *Desenvolvimento de reator UASB com duplo estágio de coleta de biogás (DECB), aplicado ao tratamento de esgoto sanitário, objetivando o controle da espuma e a granulação do lodo*. Tese (Doutorado em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
12. PERSSON, J.; SOMES, N. L. G.; WONG, T. H. F. Hydraulics efficiency of constructed wetlands and ponds. *Water Science and Technology*, v. 40, n. 3, p. 291-300, 1999.
13. SÉGURET, F.; RACAULT, Y.; SARDINI, M. Hydrodynamic behaviour of full scale trickling filters. *Wat. Res.* v. 34, n. 5, p. 1551-1558, 2000.
14. VASEL, J.L.; SCHROBILTGEN, P. Oxygen Transfer in trickling filters. *Water Research*. v. 25. n.1. 53-60 p. 1991.
15. VIEIRA, P.C.; VON SPERLING, M. Open trickling filter: an innovative, cheap and simple form of post-treatment of sanitary effluents from anaerobic reactors in small communities. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, IWA. v. 2, p. 59-67, 2012.
16. VON SPERLING, M.; CHERNICHARO, C.A.L. *Biological wastewater treatment in warm climate regions*. Two volumes. IWA Publishing, London. 2005. 1496 p.
17. VON SPERLING, M. *Estudo e modelagem da qualidade da água em rios*. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais / Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v. 7, 2007. 588 p.
18. WIK, T. Trickling filters and biofilm reactor modeling. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 2: 193-212. 2003.