

**II-129 – UTILIZAÇÃO DE TRAÇADORES PARA DETERMINAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO DE UM REATOR UASB****Douglas Henrique Siqueira da Silva<sup>(1)</sup>**

Tecnólogo Ambiental pela Universidade Estadual de Maringá (UEM). Especialista em Gerenciamento e Auditoria Ambiental pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), *campus* Campo Mourão.

**Caroline Graciana Morello**

Tecnóloga Ambiental pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), *campus* Campo Mourão. Mestranda em Engenharia Urbana pela Universidade Estadual de Maringá (UEM).

**Fernando Hermes Passig**

Engenheiro Sanitarista pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Mestre e Doutor em Engenharia pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Docente da Coordenação de Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *campus* Campo Mourão (UTFPR). Diretor de Pesquisa e Pós-Graduação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *campus* Campo Mourão (UTFPR).

**Flavio Bentes Freire**

Engenheiro Civil pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) - Universidade de São Paulo (USP). Mestre, Doutor e Pós-Doutor em Engenharia pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Docente do Departamento Acadêmico de Construção Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *campus* Curitiba (UTFPR).

**Karina Querne de Carvalho**

Engenheiro Civil pela Universidade Estadual de Maringá (UEM). Mestre e Doutor em Engenharia pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Docente da Coordenação de Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *campus* Campo Mourão (UTFPR). Coordenadora do curso de Especialização em Gerenciamento e Auditoria Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *campus* Campo Mourão (UTFPR).

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Rodovia BR 369, km 0,5, caixa postal 271 – Campo Mourão - PR - CEP: 87301-006 - Brasil - Tel: (44) 3518-1400 - e-mail: kaquerne@gmail.com

**RESUMO**

No presente trabalho foi realizada avaliação hidrodinâmica de um reator UASB, em escala de bancada (1 L), operado com vazão de 4 L/d (0,166 L/h) e TDH teórico de 6 h tratando água residuária sintética simulando esgoto sanitário real. Ensaios hidrodinâmicos de estímulo-resposta tipo pulso foram realizados com traçadores eosina Y e bromofenol azul, com duração de 18 h cada. Com os dados experimentais obtidos nos ensaios foi possível traçar curvas de variação da concentração do traçador ao longo do tempo, descobrir o TDH real em cada ensaio e normalizar estes dados de acordo com os modelos matemáticos uniparamétricos de pequena e grande (tanque aberto) dispersão e tanques de mistura completa em série (N-CSTR) para obtenção de curvas de DTR em função do tempo adimensional. Como resultados, foi possível observar o fenômeno de cauda longa em todas as curvas de concentração do traçador ao longo do tempo de duração dos ensaios, muito provavelmente devido à difusão do traçador em zonas mortas do reator e a adsorção do mesmo na biomassa. Os picos de concentração do traçador em todos os ensaios foram adiantados em relação ao TDH teórico, indicando a ocorrência de canais preferenciais no interior do reator. Os valores de TDH real obtidos foram maiores em relação ao TDH teórico de 20% a 43,3% para os ensaios com eosina Y e de 8,3% a 23,3% para os ensaios com bromofenol azul, indicando atraso na resposta dos traçadores e existência de zonas mortas. Os valores do número de dispersão ( $D/uL$ ) para ambos modelos de dispersão foram elevados ( $< 0,125$ ), indicando grande dispersão do fluido e grau de mistura elevado no interior do reator. Com o ajuste uniparamétrico foi possível obter 3 reatores de mistura completa em série (N-CSTR) em todos os ensaios realizados. Na aplicação dos modelos matemáticos teóricos, o modelo de tanques de mistura completa em série (N-CSTR) foi o modelo que melhor apresentou ajuste dos dados das curvas DTR com os valores experimentais em todos os ensaios realizados (média de correlação de 0,495 para os ensaios com eosina Y e 0,942 para os ensaios com bromofenol azul). Dentre os modelos de dispersão, o modelo de pequena intensidade obteve melhor ajuste. Na comparação entre os traçadores utilizados, constatou-se que o bromofenol azul apresentou melhor ajuste aos dados experimentais nos três modelos matemáticos utilizados. Na avaliação hidrodinâmica do reator UASB, foi constatado que o mesmo apresentou comportamento hidrodinâmico semelhante à de um reator de mistura completa com 3 reatores de mistura completa (N-CSTR) em série.

**PALAVRAS-CHAVE:** avaliação hidrodinâmica, reator UASB, eosina Y, bromofenol azul, modelos matemáticos uniparamétricos.

## **INTRODUÇÃO**

O reator UASB representa avanço na aplicação da tecnologia anaeróbia para o tratamento direto de águas residuárias, sejam de natureza simples ou complexa, de baixa ou de alta concentração, solúveis ou com material particulado, podendo acomodar altas cargas orgânicas volumétricas, com tempo de detenção hidráulica curto, da ordem de algumas horas dependendo das condições operacionais e das características dos esgotos.

O projeto dessas unidades de tratamento é bastante simples, pois não demanda qualquer equipamento sofisticado ou de meios suportes para retenção da biomassa.

Este reator possui vantagens em relação aos reatores aeróbios convencionais. Entre essas vantagens, o UASB é um sistema que demanda pequena área para utilização, além de possuir custo menor na sua implantação e operação, obtendo satisfatória eficiência na remoção de matéria orgânica e pouca produção de lodo, com o lodo já saindo estabilizado do sistema (SPERLING, 1996).

Porém, o UASB também possui algumas desvantagens, principalmente ao se considerar que a qualidade de seus efluentes não se enquadram nos padrões de lançamento estabelecidos pela legislação ambiental, com a necessidade de pós-tratamento.

Com a expansão da utilização do reator UASB, um melhor conhecimento acerca do comportamento hidrodinâmico destes reatores tornou-se necessário, devido que a grande maioria dos trabalhos realizados abordam somente o reator sob o ponto de vista da eficiência na remoção de parâmetros (matéria orgânica, sólidos, alcalinidade, nitrogênio, fósforo entre outros), com pouco conhecimento acerca das características hidrodinâmicas destes reatores (PIRES & RIBEIRO, 1992).

A realização do estudo hidrodinâmico de um reator contribui para o aumento da eficiência do mesmo, pois possibilita a detecção de zonas mortas, caminhos preferenciais, recirculação interna e outras anomalias do escoamento no interior do reator. Estas anomalias podem prejudicar a eficiência do reator no tratamento de águas residuárias devido à diminuição do volume útil e do tempo de detenção hidráulica do reator (CARVALHO et al. 2008; PASSIG & BLUNDI, 1996; SALGADO, 2008).

O estudo hidrodinâmico de um reator também possibilita verificar o grau de mistura no interior do reator, além de determinar o tempo de detenção hidráulico real (TDH real) e estabelecer o regime de fluxo (fluxo pistonado ou fluxo mistura completa) predominante no reator.

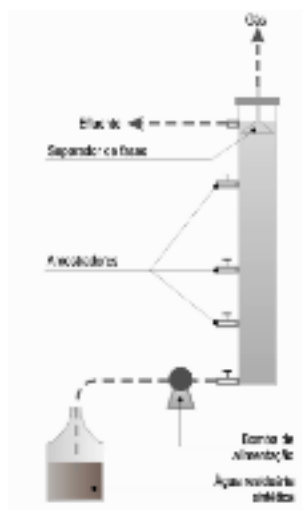
Estudos hidrodinâmicos podem ser realizados através de testes de estímulo e resposta de tipo pulso com traçadores. Esses testes permitem obter informações sobre a distribuição de tempo de residência (DTR) do fluido, ferramenta utilizada na avaliação do escoamento em reatores (DE NARDI et al., 1997).

As informações obtidas pela distribuição de tempo de residência (DTR) do fluido são aplicadas em modelos matemáticos para representar escoamentos em reatores reais, bem como, para fazer o aumento de escala e diagnosticar um escoamento deficiente. Existem diferentes tipos de modelos, que dependem de quão próximo o escoamento esteja do escoamento pistonado, do escoamento com mistura completa (perfeita) ou de algum outro escoamento dentre estes dois modos (LEVENSPIEL, 2000).

Dentro desse contexto, o objetivo do trabalho é a avaliação do comportamento hidrodinâmico de um reator UASB em escala de bancada (1 L) tratando esgoto sanitário por ensaios hidrodinâmicos de estímulo-resposta tipo pulso com os traçadores eosina Y e bromofenol azul.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização do trabalho foi utilizado um reator anaeróbio de manta de lodo e fluxo ascendente (UASB) em escala de bancada confeccionado em acrílico com volume de 1,0 L, 55 cm de altura e 4,8 cm de diâmetro interno. Do mesmo material foi construído o separador trifásico com 3 cm de altura e 3,7 cm de diâmetro (Figura 1).



**Figura 1. Aparato Experimental**

O processo de inoculação do reator foi realizado com lodo anaeróbio granular proveniente de um reator anaeróbio de lodo fluidizado (RALF) da Estação de Tratamento de Esgotos do município de Umuarama, estado do Paraná, administrada pela Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR).

A quantidade de lodo adicionada ao reator foi de aproximadamente 600 mL, sendo que não houve qualquer tipo de adaptação prévia ao efluente sintético. O lodo foi despejado no interior do reator pela parte superior.

A alimentação do reator era feita com efluente sintético simulando esgoto sanitário real para concentração de matéria orgânica em termos de Demanda Química de Oxigênio (DQO) de 500 mg/L, com 1000 mg/L de glicose, 62,5 mg/L de uréia, 0,5 mg/L de sulfato de níquel, 2,5 mg/L de sulfato ferroso, 0,25 mg/L de cloreto férrico, 23,5 mg/L de cloreto de cálcio, 0,04 mg/L de cloreto de cobalto, 0,035 mg/L de óxido de selênio, 42,5 mg/L de fosfato de potássio monobásico, 10,85 mg/L de fosfato de potássio dibásico, 16,7 mg/L de fosfato de sódio dibásico e 1000 mg/L de bicarbonato de sódio de acordo com Del Nery (1987).

O reator UASB foi operado com vazão de 4 L/d (0,166 L/h) e Tempo de Detenção Hidráulico (TDH) de 6 h durante o período de duração dos ensaios hidrodinâmicos e mantido a temperatura ambiente. A alimentação do reator foi feita por bomba dosadora solenóide da marca Prominent, modelo Comb 1201.

O desempenho do reator foi monitorado por determinações dos parâmetros pH, DQO (Demanda Química de Oxigênio), Ácidos Voláteis, Alcalinidade Total e a bicarbonato de acordo com metodologias descritas por Eaton et al. (2005). Essas determinações foram realizadas por Conceição (2010) que avaliou a eficiência do reator UASB no tratamento de efluente têxtil sintético em período anterior a realização deste trabalho.

No trabalho de Conceição (2010) o reator foi alimentado com efluente sintético têxtil com DQO de aproximadamente 461 mg/L, vazão inicial de 2,5 L/dia e Tempo de Detenção Hidráulico (TDH) de aproximadamente 9,6 h. Após o alcance do estado de equilíbrio dinâmico aparente, o reator foi operado com vazão de 4,5 L/d e TDH de 5,3 h. O período de operação do reator UASB foi de 240 d.

Um resumo dos resultados obtidos com as determinações físico-químicas realizadas por Conceição (2010) nas amostras do afluente e do efluente do reator UASB durante o período de operação é apresentado na Tabela 1.

**Tabela 2 – Valores dos parâmetros monitorados no reator UASB por Conceição (2010).**

Parâmetros	Afluente	Efluente
pH	7,6	8,0
Alcalinidade (mgCaCO <sub>3</sub> /L)	225	307
Ácidos voláteis (mgHAc/L)	109,73	38,67
DQO (mg/L)	461,24	88,41

Os ensaios hidrodinâmicos de estímulo-resposta tipo pulso foram realizados com eosina Y e bromofenol azul devido a fácil detecção, possibilidade de recuperação da massa injetada, estabilidade e segurança no manuseio desses traçadores.

Os traçadores foram injetados com seringa plástica de 10 mL na entrada do reator com duração aproximada de 6 segundos. A duração dos ensaios foi de 18 h, ou seja, 3 vezes o TDH do reator. A coleta das amostras do efluente do reator foi feita em intervalos de 30 min após a injeção do traçador. Foram realizados 3 ensaios por traçador utilizado, totalizando 6 ensaios.

O comprimento de onda ( $\lambda$ ) lido no espectrofotômetro Hach uv-vis, modelo DR/5000, possibilitou a determinação da concentração do traçador nas amostras coletadas do efluente do reator. Com esta concentração foi possível traçar curvas de sua variação pelo tempo, determinar o tempo de residência médio dos elementos do fluido no reator (TDH real) em cada ensaio e comparar o TDH real dos ensaios com o TDH teórico (Tabela 2).

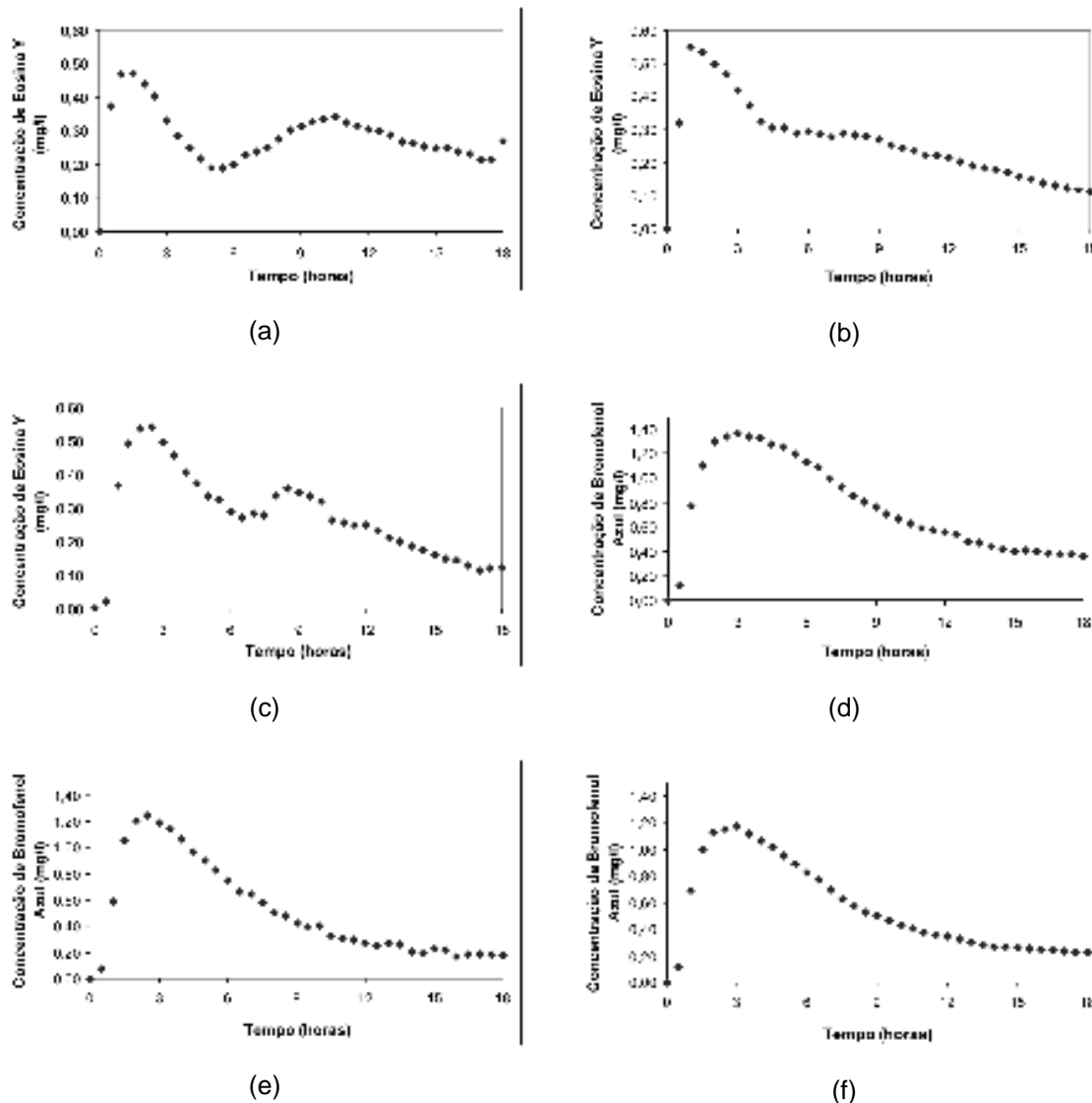
A partir dos resultados destas variáveis foi determinado o tempo de residência médio dos elementos do fluido no reator (TDH real) e a variância ( $\sigma^2_\theta$ ) em cada ensaio. A variância foi aplicada para obter o número de dispersão (D/uL) para os modelos de dispersão e o número de reatores de mistura completa (N) para o modelo de tanques de mistura completa em série.

O ajuste das curvas de distribuição do tempo de residência hidráulica ( $E_\theta$ ) em função do tempo adimensional ( $\theta$ ) foi feito utilizando os modelos de pequena dispersão, grande dispersão (tanque aberto) e tanques de mistura completa em série (N-CSTR) segundo metodologia proposta por Levenspiel (2000).

O número de dispersão (D/uL), determinado nos modelos de pequena dispersão e grande dispersão (tanque aberto) e o parâmetro N (N-CSTR em série) foram aplicados nas equações descritas na Tabela 3 para obtenção das curvas DTR ( $E_\theta$ ) em função do tempo adimensional ( $\theta$ ).

## RESULTADOS

As curvas de variação da concentração de eosina Y e de bromofenol azul no efluente do reator pelo tempo são apresentadas na Figura 2.



**Figura 2.** Curva da variação da concentração dos traçadores nas amostras do efluente do reator UASB ao longo dos ensaios de estímulo-resposta: a), b), c) eosina Y; d), e), f) bromofenol azul.

Pela Figura 2 é possível observar o fenômeno de cauda nos ensaios, devido ao lento decaimento da concentração dos traçadores nas amostras do efluente do reator. Este fenômeno ocorreu muito provavelmente devido a difusão dos traçadores em zonas mortas e pela adsorção dos traçadores na biomassa do reator.

Nos ensaios de estímulo-resposta 1 e 3 foram observados dois picos de concentração da eosina Y que podem indicar recirculação do traçador no interior do reator (Figura 2 a e Figura 2 c).

Os picos de concentração máxima de eosina Y foram adiantados em relação ao TDH teórico, sendo de 1,5 h para o ensaio 1, 1 h para o ensaio 2 e 2,5 h para o ensaio 3 (Figura 2a, Figura 2b e Figura 2c), indicando ocorrência de canais preferenciais e conseqüente formação de zonas mortas no interior do reator.

O mesmo comportamento foi verificado com o bromofenol azul, sendo de 3 h para o ensaio 4, 2,5 h para o ensaio 5 e 3 h para o ensaio 6 (Figura 2d, Figura 2e e Figura 2f).

Os tempos de residência médio dos elementos do fluido no reator UASB (TDH real) obtidos nos ensaios de estímulo-resposta são apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2. Valores de TDH real obtidos nos ensaios de estímulo-resposta com eosina Y e bromofenol azul**

Traçador	Ensaio	TDH teórico (h)	TDH real (h)
Eosina Y	1	6,0	8,6
Eosina Y	2	6,0	7,2
Eosina Y	3	6,0	7,6
Bromofenol Azul	4	6,0	7,4
Bromofenol Azul	5	6,0	6,5
Bromofenol Azul	6	6,0	6,8

É possível notar na Tabela 2 que os valores de TDH real obtidos pelas curvas de Distribuição do Tempo de Residência (DTR) nos ensaios de estímulo-resposta são maiores em relação ao TDH teórico, provavelmente devido à existência de zonas mortas hidrodinâmicas no interior do reator UASB.

Os valores de TDH real obtidos nos ensaios com eosina Y e bromofenol azul resultaram em valores superiores ao valor de TDH teórico de 6 h de 20% a 43,3% e de 8,3% a 23,3%, respectivamente, demonstrando que o TDH obtido nos ensaios com bromofenol azul aproximaram-se mais em relação ao TDH teórico, provavelmente devido à menor difusão deste traçador na biomassa do reator em relação à eosina Y.

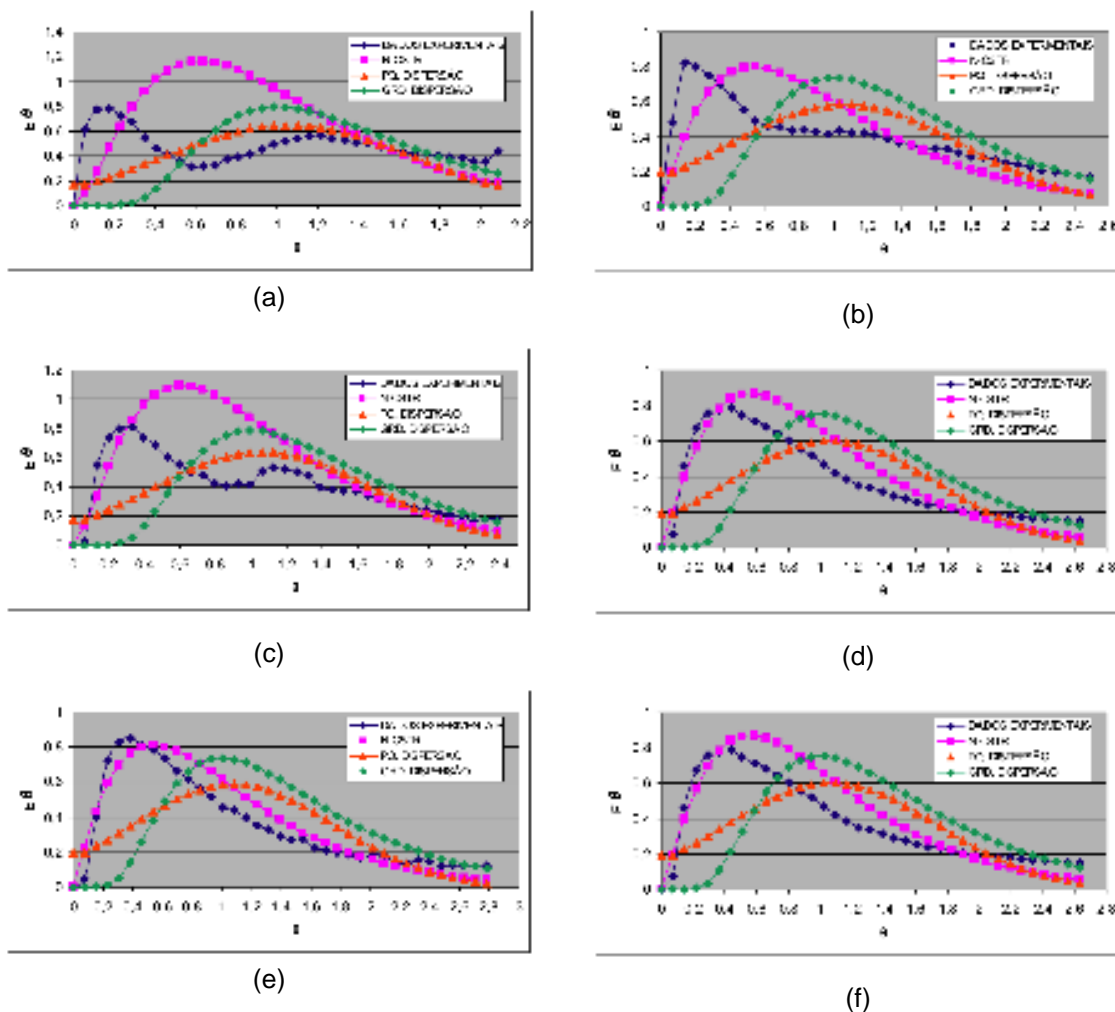
Os valores obtidos dos parâmetros D/uL (número de dispersão) e N-CSTR em série ajustados aos modelos matemáticos teóricos são apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3. Parâmetros obtidos com o ajuste dos dados experimentais aos modelos teóricos uniparamétricos segundo Levenspiel (2000)**

Traçador	Ensaio	N-CSTR em série	D/uL (Pequena Dispersão)	D/uL (Grande Dispersão)
Eosina Y	1	3	0,189	0,125
Eosina Y	2	3	0,232	0,146
Eosina Y	3	3	0,194	0,128
Bromofenol Azul	4	3	0,195	0,128
Bromofenol Azul	5	3	0,230	0,145
Bromofenol Azul	6	3	0,219	0,140

Pela Tabela 3 é possível verificar que o ajuste uniparamétrico indicou 3 reatores de mistura completa em série (N-CSTR) em todos os ensaios realizados. Além disso, foi possível notar elevados valores do número de dispersão (D/uL) dos modelos de dispersão de pequena e grande intensidade o que pode indicar grande dispersão longitudinal do fluido e grau de mistura elevado no interior do reator UASB.

As curvas de DTR obtidas com o ajuste dos dados experimentais dos ensaios realizados no reator UASB com eosina Y e bromofenol azul são apresentadas na Figura 3.



**Figura 3.** Curvas de DTR obtidas com o ajuste dos dados experimentais dos ensaios pelos modelos matemáticos uniparamétricos: eosina Y - a), b), c); bromofenol azul - d), e), f).

Os coeficientes de correlação obtidos com o ajuste das curvas DTR dos modelos teóricos e os dados experimentais são demonstrados na Tabela 4.

**Tabela 4.** Coeficientes de correlação obtidos com o ajuste dos dados experimentais aos modelos teóricos

Traçador	Ensaio	Coeficiente de correlação (r)		
		N-CSTR em série	D/uL (Pequena Dispersão)	D/uL (Grande Dispersão)
Eosina Y	1	0,000	0,000	0,000
Eosina Y	2	0,731	0,322	0,000
Eosina Y	3	0,755	0,444	0,084
Bromofenol Azul	4	0,933	0,525	0,224
Bromofenol Azul	5	0,949	0,546	0,237
Bromofenol Azul	6	0,946	0,523	0,203

Pela Tabela 4 é possível observar que o modelo uniparamétrico N-CSTR em série apresentou melhor ajuste dos dados experimentais com média de 0,743 para os ensaios com eosina Y e de 0,943 para os ensaios com bromofenol azul.

O modelo de dispersão de pequena intensidade melhor se ajustou aos dados experimentais em todos os ensaios realizados. Porém, o ajuste feito pelos modelos de dispersão não foi satisfatório com valores de correlação inferiores a 0,531. As curvas obtidas com bromofenol azul apresentaram melhores valores de correlação entre os dados experimentais e os teóricos com 0,531 para o modelo de pequena intensidade e 0,221 para o modelo



de grande intensidade em relação aos valores de correlação obtidos com o traçador eosina Y com média de 0,383 para o modelo de pequena intensidade e 0,084 para o modelo de grande intensidade com tanque aberto.

O ajuste das curvas de DTR do modelo de grande dispersão (tanque aberto) nos três ensaios com eosina Y ficou comprometido, pois não foi verificado qualquer grau de correlação com os valores experimentais nos ensaios 1 e 2 e grau de correlação mínimo no ensaio 3 (0,084).

Devido à elevada dispersão longitudinal encontrada no parâmetro  $D/uL$  nos modelos de dispersão de pequena e grande intensidade, ao valor do parâmetro  $N$  encontrado e ao melhor ajuste dos dados experimentais pelo modelo de tanques de mistura completa em série (N-CSTR) em relação aos demais modelos, pode-se observar que o regime de fluxo predominante no reator UASB é o regime em fluxo de mistura completa.

Dentre os traçadores utilizados, o bromofenol azul apresentou melhor ajuste das curvas de DTR com os valores experimentais, provavelmente devido à menor difusão deste traçador no interior do reator em relação a eosina Y.

## CONCLUSÕES

Foi possível concluir que os ensaios hidrodinâmicos de estímulo-resposta tipo pulso realizados com eosina Y e bromofenol azul apresentaram resultados satisfatórios para a avaliação do comportamento hidrodinâmico do reator UASB.

Na aplicação dos modelos matemáticos teóricos, o modelo de tanques de mistura completa em série (N-CSTR) apresentou melhor ajuste dos dados das curvas de DTR com os valores experimentais nos ensaios realizados com eosina Y (correlação média de 0,743) e bromofenol azul (correlação média de 0,942).

Na caracterização do regime de escoamento do reator, foi observado que o regime de fluxo predominante no reator é o regime de escoamento de mistura completa com 3 reatores em série.

Logo, na comparação entre os traçadores utilizados, pôde-se constatar que o bromofenol azul apresentou melhor ajuste das curvas de DTR dos dados experimentais nos três modelos matemáticos teóricos (correlação média de 0,531 para o modelo de dispersão de pequena intensidade, de 0,221 para o modelo de dispersão de grande intensidade – tanque aberto e 0,942 para o modelo de tanques em série).

Por fim, concluiu-se que mais ensaios de estímulo-resposta devem ser realizados com outros traçadores, como por exemplo, bromocresol verde e cloreto de lítio, para obtenção de mais resultados que representem o comportamento hidrodinâmico destes reatores nessas condições operacionais.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *campus* Campo Mourão, pela infraestrutura disponibilizada para o desenvolvimento do trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CARVALHO, K.Q.; SALGADO, M.T.; PASSIG, F.H.; PIRES, E.C. **Avaliação hidrodinâmica de reator UASB submetido à variação cíclica de vazão**. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 13, p. 226-235, abr/jun. 2008.
2. DE NARDI, I.R.; ZAIAT, M.; FORESTI, E. **Influence of the tracer characteristics on hydrodynamic models of packed-bed bioreactors**. Bioprocess Engineering, v. 21, p. 469-76, Nov. 1999.
3. DEL NERY, Valéria. **Utilização de lodo anaeróbio imobilizado em gel no estudo de partida de reatores de fluxo ascendente com manta de lodo**. 1987. 187 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1987.



4. EATON, A. D.; CLESCERI, L. S.; RICE, E. W.; GREENBERG, A. E. (ed.). **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21 ed. Washington: American Public Health Association; American Water Works Association; Water Pollution Control Federation, 2005.
5. LEVENSPIEL, Octave. **Engenharia das reações químicas**. 3º ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2000.
6. PASSIG, F.H.; BLUNDI, C.E. **Filtro Anaeróbio de Fluxo Ascendente : uma nova concepção**. In: 19 Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental - ABES, 1997, Foz do Iguaçu - PR.
7. PIRES, E. C.; RIBEIRO, A. P. (1992). **Avaliação preliminar do comportamento hidrodinâmico de reatores anaeróbios de escoamento ascendente e manta de lodo**. Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos.
8. SALGADO, M.T. (2008). **Modelo matemático para avaliação hidrodinâmica em reatores tubulares operando em regime não-permanente**. São Carlos. 153p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
9. SPERLING, V. M. **Introdução a Qualidade das águas e ao Tratamento de Esgotos**. 2º edição. Volume 1. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Belo Horizonte, 1996.