

## II-095 – AVALIAÇÃO HIDRODINÂMICA DE UM REATOR UASB TRATANDO ESGOTOS SANITÁRIOS

**José Eduardo Munhoz Martins<sup>(1)</sup>**

Graduando em Engenharia Ambiental pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), *campus* Campo Mourão.

**Cristiane Kreutz**

Tecnóloga Ambiental pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), *campus* Medianeira. Mestre em Engenharia Agrícola na Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE). Doutoranda em Engenharia Agrícola na Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE). Docente da Coordenação de Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *campus* Campo Mourão (UTFPR).

**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).

**Eudes José Arantes**

Engenheiro Civil pela Escola de Engenharia São Carlos. 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).

**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: edu.munhhoz@hotmail.com

### RESUMO

Um reator UASB em escala piloto (160 l) foi usado com o objetivo de estudar seu comportamento hidrodinâmico quando submetido a vazão afluyente constante. Os ensaios foram realizados com os traçadores eosina Y, azul de bromofenol e verde de bromocresol, para condições operacionais: vazão média afluyente de 16 L.h<sup>-1</sup> e tempo de detenção hidráulica de 10 h. Foi possível observar que o TDH teórico de 10 h foi superior aqueles observados com os traçadores eosina Y de aproximadamente de 3 h, azul de bromofenol de 2 h e o verde de bromocresol de 2h, provavelmente devido a biomassa não estar adaptada ao esgoto sanitário e ao curto periodo de tempo da partida do reator que não alcançou seu estado de equilíbrio dinâmico aparente. A variação da concentração dos traçadores no efluente foi ajustada pelos modelos teóricos de dispersão de fluxo e de reatores em série. O reator UASB apresentou comportamento similar ao de reator de mistura completa.

**PALAVRAS-CHAVE:** Ensaios Hidrodinâmicos, Tempo de Detenção Hidráulica, Traçador, Fenômeno de cauda.

### INTRODUÇÃO

A tecnologia anaeróbia aplicada ao tratamento de esgotos sanitários encontra-se bem consolidada e resulta em vantagens como: grande economia de área, baixo custo de implantação, a construção, operação e manutenção são simples, reduzido consumo de energia, entre outros (SPERLING, 1996). Entretanto, esses sistemas apresentam capacidade limitada de remoção de matéria orgânica e pequena, se alguma, de remoção de nutrientes e patógenos, em geral demandando pós-tratamento, seja para o lançamento em corpos receptores, seja para o reúso (CAMPO, 1999; CHERNICHARO, 2001).

O conhecimento dos mecanismos hidrodinâmicos dos reatores anaeróbios é importante para melhoria na detecção de problemas operacionais (LEVENSPIEL, 2000), pode ser influenciado pela velocidade das reações biológicas, por meio de alterações na taxa de transferência de massa e a distribuição das reações ao longo do reator. Como consequência da distribuição da biomassa e do encadeamento das reações bioquímicas, diferentes regiões do reator apresentam composições diferentes, em função do tipo de escoamento imposto (CARVALHO, 2008).

O uso de traçadores no entendimento da hidrodinâmica apresenta-se como opção na determinação de curvas no processo, distribuição de tempos de residência (DTR) e de parâmetros hidrodinâmicos (BORGES et al., 2009), algumas características foram observados nas respostas dos traçadores, azul de bromofenol, eosina Y, mordante violeta, rodamina WT e verde de bromocresol, foi atribuído à difusão do traçador nos poros do recheio do reator. O teste forneceu resultado mais preciso, podendo-se afirmar que o RAHLF comporta-se como reator de escoamento predominantemente tubular. A importância do estudo da hidrodinâmica no fluxo do reator UASB é para verificar o tempo real de detenção hidráulico, detectar problemas associados à falha de projeto e operação do mesmo (DE NARDI et al., 1999).

Dentro desse contexto, o objetivo desse trabalho é avaliar o comportamento hidrodinâmico de um reator UASB em escala piloto tratando os esgotos sanitários da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Campo Mourão, por meio ensaios de estímulo-resposta tipo pulso com traçadores eosina Y, bromofenol azul e bromocresol verde.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios de estímulo-resposta tipo pulso foram realizados em um reator anaeróbio de manta de lodo (UASB) em escala piloto confeccionado em PVC com 1,86 m de altura, 300 mm de diâmetro e volume total de 160 L. O reator UASB foi operado para estudar o comportamento hidrodinâmico submetido à vazão constante.

O reator foi inoculado com aproximadamente 55 L de lodo anaeróbio floculento proveniente de um reator anaeróbio de manta de lodo e fluxo ascendente que trata esgoto sanitário do município de Campo Mourão – Paraná. A escolha do lodo é justificada por apresentar diversidade microbiana verificada pela presença de cocos, bacilos, vibrios e filamentos.

Determinações das concentrações de sólidos totais, sólidos totais voláteis e de sólidos totais fixos no lodo resultaram em aproximadamente 27 g.L<sup>-1</sup>, 18 g.L<sup>-1</sup> e 9 g.L<sup>-1</sup>, respectivamente.

O reator foi alimentado continuamente com esgoto sanitário com concentração de matéria orgânica variando de 116 mg.L<sup>-1</sup> a 852 mg.L<sup>-1</sup> em termos de DQO e mantido a temperatura ambiente. A caracterização do esgoto sanitário foi realizada por determinações dos parâmetros de controle: temperatura, pH, alcalinidade à bicarbonato, ácidos voláteis, DQO (bruta e filtrada) e sólidos totais (fixos e voláteis) (Tabela 1).

**Tabela 1 - Caracterização dos esgotos sanitários.**

PARÂMETROS	ESGOTO BRUTO				
	N	X	DP	Min	Máx
T (°C)	35	25,6	2,6	21,3	29,9
pH	35	7,9	1,9	1,1	12,3
Alcalinidade à bicarbonato (mgCaCO <sub>3</sub> /L)	35	98	158,8	7	912
Ácidos Voláteis (mgHac/L)	35	53	31,1	14	148
DQO bruta (mg/L)	70	363	180,1	116	852
DQO filtrada (mg/L)	70	274	167,9	56	773
Sólidos Totais (mg/L)	38	624	222,1	160	1000
Sólidos Totais Fixos (mg/L)	38	252	130,3	58	660
Sólidos Totais Voláteis (mg/L)	38	372	164,6	90	800

N: número de amostras; X: média; DP: desvio padrão; Mín: valor mínimo; Máx: valor máximo.

A operação do reator teve início, após o período de partida em regime de batelada por 24 h. Após esse período, o reator foi operado com vazão afluyente constante e igual a  $16 \text{ L.h}^{-1}$  e tempo de detenção hidráulica (TDH) de 10 h durante 210 dias. O alcance do estado de equilíbrio dinâmico aparente foi verificado por meio de determinação dos mesmos parâmetros de caracterização do esgoto sanitário.

Todas as determinações foram realizadas em amostras do afluyente (substrato) e do efluente para avaliar o comportamento do reator UASB durante o período de operação do reator, de acordo com procedimentos descritos no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (Eaton et al., 2005).

As análises de alcalinidade à bicarbonato e de ácidos voláteis foram realizadas em amostras do substrato e do efluente segundo metodologia descrita por Ripley et al. (1986) e por Dillalo e Albertson (1961), respectivamente.

Os ensaios de estímulo-resposta tipo pulso foram realizados com traçadores eosina Y, azul de bromofenol, e verde de bromocresol, após o reator UASB ter alcançado o estado de equilíbrio dinâmico aparente. Esses traçadores foram escolhidos em razão de suas características que permitem fácil detecção, elevada recuperação das massas injetadas, estabilidade e segurança no manuseio.

O método colorimétrico de leitura de absorbância foi aplicado para determinação da concentração de eosina Y e azul de bromofenol nas amostras do efluente do reator. As leituras dos comprimentos de ondas foram realizadas em espectrofotômetro Hach uv-vis, modelo DR/5000 com comprimento de onda ( $\lambda$ ) de 516 nm para a eosina Y, 590 nm para o azul de bromofenol e de 616 nm para o verde bromocresol.

As condições operacionais do reator, as concentrações e as massas moleculares dos traçadores são apresentadas na Tabela 2. Medidas foram tomadas para garantir que a injeção dos traçadores fosse o mais similar possível de um pulso ideal. O volume de injeção dos traçadores foi de aproximadamente 20 mL em cada ensaio e o tempo de injeção foi de aproximadamente 50 s.

O tempo total de duração dos ensaios foi determinado de tal forma que as amostras fossem coletadas pelo menos durante três vezes o TDH teórico, com intervalos não superiores a uma hora. As amostras coletadas foram centrifugadas por cerca de 4 minutos para evitar a interferência da presença de sólidos na leitura das absorbâncias pelo método colorimétrico.

**Tabela 2. Características dos ensaios de estímulo-resposta utilizados no reator UASB.**

Ensaio	TDH	Vazão Aplicada	Massa de traçador aplicada	Massa molecular do traçador	Concentração do traçador
		(L/h)	(mg)	(g/g-mol)	(mg/20mL)
1	10	16	450	691,88	22,50
	10	16	453	691,88	22,65
2	10	16	733	669,99	36,65
	10	16	710	669,99	35,50
3	10	16	702	698,05	35,10
	10	16	701	698,05	35,05

O ajuste das curvas experimentais de distribuição do TDH em função do tempo adimensional foi realizado com base nos modelos teóricos uniparamétricos de dispersão de pequena (PD) e de grande intensidade (GD) e de tanques em série (N-CSTR) de acordo com Levenspiel (2000).

Os modelos de dispersão representam o reator avaliado por um reator de fluxo pistonado no qual ocorre dispersão axial do escoamento. Nesses modelos, o escoamento do fluido ocorre de forma ordenada através do

reator, ou seja, não há mistura ou difusão ao longo do caminho de escoamento. O modelo de tanques em série simula o comportamento do reator avaliado por N (número) reatores de mistura completa (ideais) em série. A mistura completa indica que o conteúdo está agitado e uniforme em todo o reator, ou seja, a corrente de saída (efluente) tem a mesma composição que o fluido no interior do reator.

Essas características podem ser verificadas pelos parâmetros D (ou D/uL) para os modelos de pequena e grande dispersão ou pelo número (N) de reatores de mistura completa em série para o modelo N-CSTR. A estimativa desses parâmetros foi realizada pela variância dos dados de resposta apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3 – Definição das variáveis usadas para obtenção da curva de distribuição do tempo de residência hidráulica ( $E_\theta$ ) em função adimensional ( $\theta$ ).**

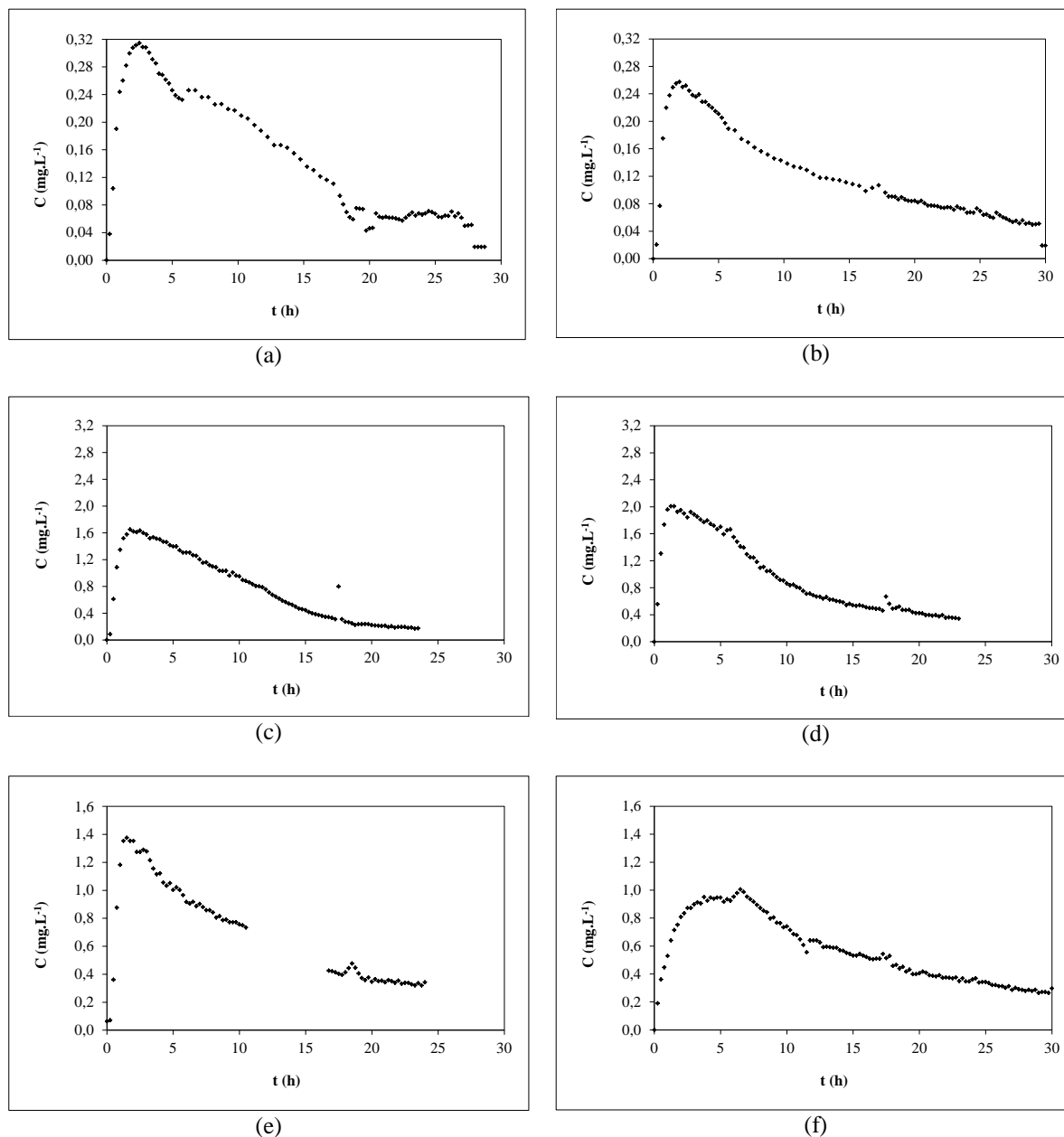
Modelo	Parâmetro	equação
Dispersão de pequena intensidade	$\sigma^2_\theta = 2\left(\frac{D}{u.L}\right)$	$E_\theta = \frac{1}{2\sqrt{\pi(D/u.L)}} \exp\left[-\frac{(1-\theta)^2}{4(D/u.L)}\right]$
Dispersão de grande intensidade (tanque aberto)	$\sigma^2_{\theta,ta} = 2\left(\frac{D}{u.L}\right) + 8\left(\frac{D}{u.L}\right)^2$	$E_{\theta,ta} = \frac{1}{2\sqrt{\pi(D/u.L)}} \exp\left[-\frac{(1-\theta)^2}{4\theta(D/u.L)}\right]$
Tanques de mistura completa em série	$N = \frac{1}{\sigma^2_\theta} = \frac{\bar{\theta}^2_h}{\sigma^2}$	$E_\theta = \frac{N(N.\theta)^{N-1}}{(N-1)!} e^{-N.\theta}$

Fonte: adaptado de Levenspiel (2000).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com resultados experimentais dos ensaios de estímulo-resposta foi possível traçar as curvas de variação da concentração de eosina Y, azul de bromofenol e verde de bromocresol nas amostras do efluente do reator UASB ao longo do tempo.

As curvas de variação da concentração de eosina Y, azul de bromofenol e verde de bromocresol no efluente do reator pelo tempo são apresentadas na Figura 1.



**Figura 1.** Curva da variação da concentração do traçador eosina Y, azul de bromofenol e verde de bromocresol nas amostras do efluente do reator UASB ao longo do tempo de duração dos ensaios de estímulo-resposta: a), b) ensaios 1 e 2 com eosina Y; c), d) ensaios 3 e 4 com azul de bromofenol; e), f) ensaios 5 e 6 com verde de bromocresol.

Nos ensaios hidrodinâmicos de estímulo-resposta realizados com vazão afluente constante de  $16 \text{ L.h}^{-1}$  foi possível observar lento decaimento na concentração dos traçadores ao longo do tempo, que pode indicar o fenômeno de cauda longa nos ensaios. Isso pode ter ocorrido devido a fenômenos de difusão em zonas mortas do reator, adsorção dos traçadores na biomassa do reator ou curto circuito hidráulico (Levenspiel, 2000) e TDH de aproximadamente 3 h para a eosina Y, 2 h para o azul de bromofenol e 2 h para o verde de bromocresol (Figura 1).

Outros estudos também observaram o efeito de cauda longa (Jimenez et al., 1988; De Nardi et al., 1997; De Nardi et al., 1999; Lima, 2001; Passig, 2005; Carvalho et al., 2008; Silva, 2010).

Os resultados obtidos com o ajuste das curvas de distribuição do tempo de residência pelos modelos matemáticos teóricos, de acordo com Levenspiel (2000), são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros obtidos com o ajuste dos dados experimentais para reator UASB.

Traçador	Ensaio	TDH	N-CSTR em série	Pequena dispersão (PD)	Grande dispersão (GD)
Eosina Y	1	2	4	0,127	0,158
	2	2,5	5	0,111	0,159
Azul de Bromofenol	3	1,5	3	0,160	0,150
	4	1,75	4	0,115	0,164
Verde de Bromocresol	5	1,5	5	0,099	0,148
	6	1,0	4	0,127	0,170

Observa-se nos ensaios que o TDH real obtido por meio da curva DTR resultou em 2 h e 2,5 h para os ensaios 1 e 2 com eosina Y, 1,5 h e 1,75 h para os ensaios 3 e 4 com azul de bromofenol e 1,5 h e 1h para os ensaios 5 e 6 com verde de bromocresol. Os valores de TDH e do parâmetro N não apresentaram diferenças significativas, o que indicou grau de mistura semelhante para os ensaios realizados.

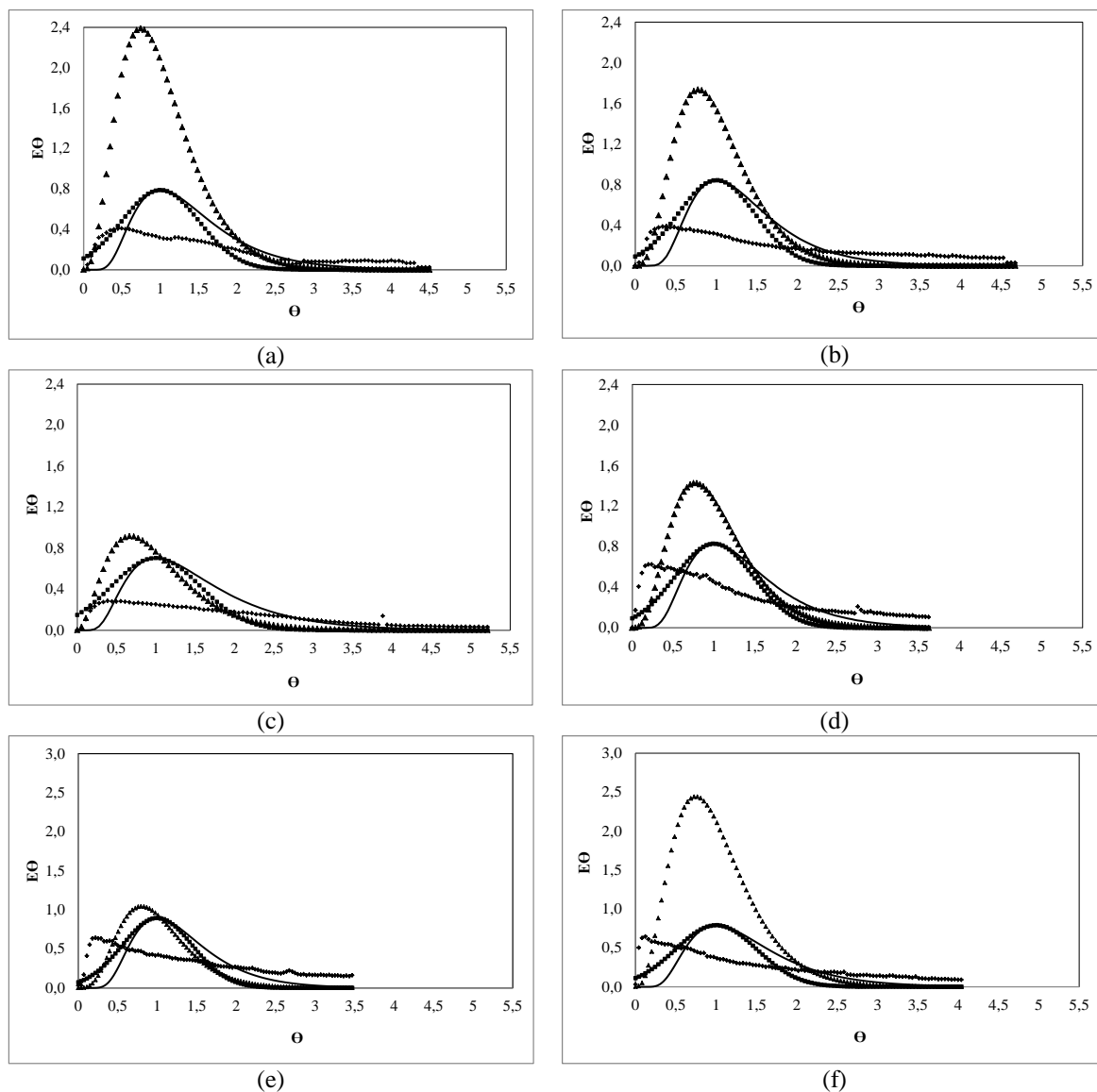
Com base na Tabela 4, foi possível observar que o modelo teórico de N-CSTR em série indicou resultados iguais a 4, 5, 3, 4, 5 e 4 reatores nos ensaios 1, 2, 3, 4, 5 e 4 e o modelo de pequena dispersão valores resultou iguais a 0,127; 0,111; 0,160; 0,115; 0,099 e 0,127, respectivamente.

Carvalho et al. (2008) avaliaram a hidrodinâmica de um reator uasb (160 L), utilizando o traçador eosina Y, onde obteve valores de 4 e 5 reatores de mistura completa em série operando com vazão afluente constante.

De Nardi et. al (1997) obteve valor 3 reator de mistura completa em série no ensaio realizado com traçador eosina Y em um reator anaeróbio horizontal de leito fixo (RAHLF) em escala de bancada.

Passig (2005) obteve valores aproximados de 2 e 4 reatores de mistura completa em série nos ensaios realizados com traçador eosina Y em um reator UASB (18,8 m<sup>3</sup>), com imposição de velocidade ascensional de recirculação no reator.

As curvas de Distribuição do Tempo de Residência (DTR) obtidas com ajuste dos dados experimentais dos ensaios realizados no reator UASB com eosina Y, azul de bromofenol e verde de bromocresol pelos modelos teóricos uniparamétricos segundo LEVENSPIEL (2000) são apresentadas nas Figura 2.



**Figura 2.** Curvas de DTR obtidas experimentalmente com o uso de eosina Y e azul de bromofenol ao longo do tempo de amostras do efluente para os ensaios de estímulo-resposta: vazão constante – a) ensaio 1 de eosina Y; b) ensaio 2 de eosina Y; c) ensaio 3 de azul de bromofenol; d) ensaio 4 de azul de bromofenol; e) ensaio 5 de verde de bromocresol; f) ensaio 6 de verde de bromocresol. -◇- Dados experimentais; -Δ- pequena dispersão; -Δ- N-CSTR em série; — grande dispersão.

Os resultados de coeficientes de correlação obtidos para os modelos matemáticos teóricos são apresentados na Tabela 5.



**Tabela 5. Coeficiente de correlação obtidos com o ajuste dos dados experimentais aos modelos teóricos.**

Traçador	Ensaio	N-CSTR em série	Pequena dispersão (PD)	Grande dispersão (GD)
Eosina Y	1	0,900	0,875	0,740
	2	0,856	0,808	0,651
Azul de Bromofenol	3	0,887	0,857	0,815
	4	0,756	0,740	0,440
Verde de Bromocresol	5	0,657	0,637	0,406
	6	0,680	0,634	0,371

Através da análise das curvas DTR e dos coeficientes de correlação, pôde-se observar que o modelo uniparamétrico de tanques de mistura completa em série (N-CSTR) apresentou melhor ajuste dos dados experimentais em todos os ensaios realizados com vazão afluente constante.

Dentre os modelos uniparamétricos de dispersão, o modelo de pequena intensidade melhor se ajustou aos dados experimentais em todos os ensaios realizados, apesar de inicialmente os ensaios não respeitarem suas premissas ( $D/uL < 0,01$  e dispersão idêntica dentro e fora do volume de controle). Entretanto, isto não significa que o ajuste tenha sido satisfatório, porque, mesmo neste modelo, foi grande a dispersão em relação aos valores experimentais.

As curvas DTR obtidas com o modelo de tanques de mistura completa em série (N-CSTR) nos dois ensaios utilizando o traçador eosina Y apresentaram o melhor ajuste (média de correlação de 0,878) em relação a todas as outras curvas obtidas em todos os ensaios realizados.

Na comparação entre as curvas DTR obtidas nos ensaios entre os traçadores utilizados, para o modelos de dispersão, as curvas obtidas com o traçador eosina Y apresentaram melhores valores de correlação entre os dados experimentais e os dados teóricos (média de 0,842 para o modelo de pequena intensidade e 0,696 para o modelo de grande intensidade) em relação aos valores de correlação obtidos com os traçadores azul de bromofenol e verde de bromocresol (média de 0,799; 0,636 para o modelo de pequena intensidade e de 0,628; 0,389 para o modelo de grande intensidade – tanque aberto), respectivamente.

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 de ajuste dos dados experimentais pelo modelo de tanques de mistura completa em série (N-CSTR) em relação aos demais modelos, pode-se afirmar que o regime de fluxo predominante no reator UASB é o regime em fluxo de mistura completa.

Carvalho et. al (2008) avaliaram o comportamento hidrodinâmico de reator UABS com o traçador eosina Y, constataram que o reator demonstrou comportamento próximo de mistura completa para os ensaios realizados com vazão afluente constante. Quando submetido a variações senoidais cíclicas de vazão afluente, o reator teve comportamento próximo a de um reator de fluxo pistonado.

Silva (2010) avaliou a hidrodinâmica de reator UASB com dois tipos de traçadores a eosina Y e o azul de bromofenol, constatou que o reator apresentou comportamento hidrodinâmico com tendência ao fluxo em mistura completa para os ensaios com vazão afluente constante.

De Nardi et. al (1997) na avaliação hidrodinâmica de reator UASB (1,9 L) em escala de bancada, caracterizaram o comportamento hidrodinâmico do reator próximo de mistura completa para os ensaios com azul de bromofenol, verde de bromocresol, dextrana azul, rodamina (WT) e mordante violeta.

Lourenço e Campos (2009) avaliaram o comportamento hidrodinâmico de um reator UASB (12,1 l) tratando água residuária de suinocultura. Os autores constataram que o reator apresentou comportamento hidrodinâmico



de fluxo disperso de grande intensidade. Para a realização dos ensaios hidrodinâmico foi utilizado Cloreto de Lítio (LiCl) como traçador.

Calheiros et al (2009) na avaliação hidrodinâmica de um reator UASB tratando esgotos domésticos do município de Itajubá (MG), caracterizaram o comportamento hidrodinâmico do reator próximo ao tipo de mistura completa para os ensaios com Cloreto de sódio (NaCl) como traçador.

Passig (2005) na avaliação hidrodinâmica de um reator UASB (18,8 m<sup>3</sup>) com o traçador eosina Y, constatou que o reator apresentou comportamento hidrodinâmico com tendência ao fluxo em mistura completa. Portanto, com a análise dos resultados obtidos por estes autores, pode-se constatar que a caracterização do regime de fluxo predominante no reator UASB aproximou-se aos resultados obtidos pelos mesmos.

## CONCLUSÕES

Na avaliação hidrodinâmica constatou que o reator UASB apresentou comportamento próximo ao reator de mistura completa, comparado à aproximadamente 4 e 5; 3 e 4; 5 e 4; reatores N-CSTR em série, para os ensaios com eosina Y, azul de bromofenol e verde de bromocresol, respectivamente com vazão afluente constante.

Ao comparar o tempo de detenção hidráulica teórico com o determinado pelas curvas de DTR obtidas experimentalmente, verificou-se um adiantamento do traçador em todos os ensaios com eosina Y, azul de bromofenol e verde de bromocresol, o que poderia indicar existência de zonas mortas hidrodinâmicas no interior do reator. O fenômeno de cauda observado nas curvas obtidas é resultante da difusão dos traçadores nessas zonas mortas e de sua lenta liberação.

Na comparação entre os traçadores utilizados, pôde-se constatar que a eosina Y apresentou melhor ajuste das curvas DTR com os valores experimentais, em relação aos traçadores azul de bromofenol e verde de bromocresol. Esse fato pode ser explicado devido à menor difusão da eosina Y no interior do reator em relação ao traçador azul de bromofenol e verde de bromocresol.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BORGES, A. C.; MATOS, A. T.; CALIJURI, M. C.; OLIVEIRA, Gabriel H.; ROLDÃO, J. S. F. **Uso de Traçadores para Avaliação da Hidrodinâmica de Sistemas Alagados Construídos Operando sob Condições Climáticas Tropicais**. Engenharia Agrícola. Jaboticabal, v. 29, n. 2, p.301-310, abr.jun. 2009. Disponível em: <HTTP://www.scielo.br/pdf.eagri.v29n2.13.pdf>. Acesso em: 24 jan. 2010.
2. CALHEIROS, H. C.; PERICO, A. C. S.; NUNES, C. F. **Estudo experimental de aspectos hidrodinâmicos e da partida de um reator anaeróbio seqüencial tratando esgotos domésticos**. Ambiente e água – An Interdisciplinary Journal of Applied Science, Taubaté, v. 4, n. 3, p. 144-156, 2009.
3. CAMPOS, J. R. **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. 1º ed. Rio de Janeiro, v. 13, n. 2, p. 226-235. Abr./jun. 2008.
4. CARVALHO, K. Q. et al. **Avaliação hidrodinâmica de reator UASB submetido à variação cíclica de vazão**. Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, v. 13, n. 2, p. 226-235. Abr./jun. 2008.
5. CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, 1997.
6. DE NARDI, I. R.; ZAIAT, M.; FORESTI, E. **Resposta do reator anaeróbio horizontal de leito fixo (RAHLF) nos ensaios hidrodinâmicos com diferentes traçadores**. IN: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA AMBIENTAL, 19., 1997, Foz do Iguaçu, PR. **Anais do 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Foz do Iguaçu: ABES, 1997.
7. DE NARDI, IR; ZAIAT, M; FORESTI, E. (1999). **Influence of the tracer characteristics on hydrodynamic models of packed-bed bioreactors**. Bioprocess Engineering, v. 21, n.5, p. 469-476, nov.1999.
7. DILLALO, R.; ALBERTSON, O.E. **Volatile acids by direct titration**. Journal of Water Pollution Control Federation, New York, v. 33, n. 4, p. 356-365, apr. 1961.

8. EATON, A.D.; CLESCERI, L. S.; RICE, E.W.; GREENBERG, A. E. (Ed.). **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21<sup>th</sup> ed. Washington: American Public Health Association; American Water Works Association; Water Pollution Control Federation, 2005.
9. JIMÉNEZ, B; NOYOLA, A; CAPDEVILLE, B. (1988). **Selected dyes for residence time distribution in bioreactors**. Biotechnology Techniques, v.2, n.2, p. 77-82.
10. LEVENSPIEL, O. **Engenharia das Reações Químicas**. 3 ed. São Paulo. Ed. Edgard Blücher Ltda, 563 p, 2000.
11. LIMA, CAA (2001). **Tratamento de esgoto sanitário em reator horizontal de leito fixo (RAHLF) - Escala Piloto**. São Carlos, 165p. Tese (doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
12. LOURENÇO, A. M. P.; CAMPOS, C. M. M. **Hydrodynamic behavior of a lab-scale upflow anaerobic sludge blanket reactor (UASB) operated with na adopted hydraulic retention time (HRT) of 12 hours**. *Ciência e agrotecnologia* – UFLA, Lavras, v. 33, n. 4, p. 1139-1144, jul./ago. 2009.
13. PASSIG, F. H. **Reator anaeróbio híbrido para tratamento de esgoto sanitário**. 2005. 150 f. Tese (Doutorado em hidráulica e saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.
14. RIPLEY, L.E.; BOYLE, W.C.; CONVERSE, J.C. Improved alkalimetric monitoring for anaerobic digestion of high-strength wastes. *Journal Water Pollution Control Federation*, New York, v. 58, n. 5, p. 406-411, 1986.
15. SILVA, D. H. S. **Utilização de traçadores para determinação do comportamento hidrodinâmico de um reator UASB tratando água residuária sintética**. (2010). 61p. Monografia de Especialização – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Campus* Campo Mourão, 2010.
16. SPERLING, M. V. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**, 2º ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – Universidade Federal de Minas Gerais, 1996.