

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CÂMPUS CAMPO MOURÃO
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

FABIO MARTINS DAVI VILAR

CARACTERÍSTICAS HIDRODINÂMICAS DE REATOR UASB ABIÓTICO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPO MOURÃO
2014

FABIO MARTINS DAVI VILAR

CARACTERÍSTICAS HIDRODINÂMICAS DE REATOR UASB ABIÓTICO

Trabalho apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II do Curso de Engenharia Ambiental da Coordenação de Engenharia Ambiental – COEAM – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Campo Mourão, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Eudes José Arantes
Co-orientadora: Profª Dra. Karina Querne de Carvalho

CAMPO MOURÃO
2014



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Campo Mourão
Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Coordenação de Engenharia Ambiental - COEAM
Engenharia Ambiental



TERMO DE APROVAÇÃO

CARACTERÍSTICAS HIDRODINÂMICAS DE REATOR UASB ABIÓTICO

por

FABIO MARTINS DAVI VILAR

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado em 25 de fevereiro de 2014 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho APROVADO.

Prof. Dr. Eudes José Arantes
(orientador)

Profa. Dra. Karina Querne de Carvalho
(co-orientadora)

Prof. Dr. Fernando Hermes Passig

Profa. Dra. Cristiane Kreutz

"O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Ambiental".

AGRADECIMENTOS

Meus eternos agradecimentos primeiramente aos meus pais Cleber e Vanda, por todo o apoio, nas horas alegres e nas horas mais difíceis do meu curso, sem eles não conseguiria terminar mais essa etapa da minha vida. Ao meus grandes irmãos Vitor e Caio, que me alegraram e me aconselharam em muitos assuntos dentro e fora da universidade.

Aos meus demais familiares que certamente sem eles a dificuldade teria sido maior para conclusão deste curso, e desta parte da minha história.

À minha co-orientadora, Professora Dra. Karina Querne de Carvalho, por me acolher como seu orientando, me ensinar e passar toda sabedoria, e muitos conselhos tanto deste trabalho como fora dele. E é claro sua grande paciência que durante esse trabalho foi muito necessária.

Ao meu orientador Professor Dr. Eudes José Arantes pelo auxílio e apoio durante a realização deste trabalho.

A Professora Dra. Cristiane Kreutz pela ajuda no decorrer e finalização do trabalho.

Um grande agradecimento a todos meus amigos que direta ou indiretamente me ajudaram nessa longa caminhada até este trabalho, dentre eles Leonardo Silva e Dulce Aime Moreira, meus amigos de longa data.

Grande agradecimento aos amigos mais doidos Gilsin, Azoia, Bola. Por muitos momentos marcantes nesses anos juntos, cheio de risadas.

A Coordenação de Engenharia Ambiental, pelos ensinamentos adquiridos.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná – câmpus Campo Mourão, por ter cedido espaço e materiais para realização deste trabalho e por todo ensinamento.

Ao CNPq pela concessão de financiamento pelo projeto Jovem Pesquisador (processo 571600/2008-5) que possibilitou a realização deste trabalho.

“Que os vossos esforços desafiem as
impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes
coisas do homem foram conquistadas do que
parecia impossível”

Charles Chaplin (1889-1977)

RESUMO

VILAR, Fabio M. D. **Características hidrodinâmicas de reator UASB abiótico**. 2014. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2014.

O objetivo do trabalho foi avaliar o comportamento hidrodinâmico de um reator UASB abiótico em escala de bancada (1 L) através de ensaios hidrodinâmicos estímulo-resposta. Para realização dos ensaios tipo pulso foram utilizados azul de metileno, eosina Y, cloreto de lítio, verde de bromocresol e azul de bromofenol como traçadores. O reator UASB foi operado com vazão de 4 L/d (0,166 L/h), tempo de detenção hidráulica (TDH) teórico de 6 h e mantido à temperatura ambiente. Nos ensaios hidrodinâmicos foram realizadas simulações no reator UASB somente com água (RA), com injeção de ar na parte inferior do reator UASB simulando geração de gases (RAA), com esferas de gel poliacrilamida representando a biomassa de um reator anaeróbio (RAE) e com injeção de ar e esferas de gel poliacrilamida ao mesmo tempo (RAAE). Com a obtenção das leituras pelo método colorimétrico de leitura de absorbância, foram determinados o tempo de detenção hidráulico real, o número de reatores de mistura completa em série e o número de dispersão pelos modelos teóricos uniparamétricos de mistura completa e de dispersão de pequena e grande intensidade. Também foram determinadas eficiência hidráulica e as anomalias no escoamento zonas mortas e curto-circuitos hidráulicos. Foram obtidos resultados para os reatores RA, RAA, RAE e RAAE de: TDH de 6,2, 6,7, 5,9 e 5,9, respectivamente; N-CSTR em série de 4, 5, 4 e 4, respectivamente; D/uL de pequena dispersão de 0,14, 0,12, 0,17 e 0,13, respectivamente; D/uL de grande dispersão de 0,15, 0,10, 0,11 e 0,09, respectivamente; volume de zonas mortas de 19%, 5%, 10% e 2,5%, respectivamente; curto-circuitos hidráulicos de 5,6%, 2,6%, 0,44% e 2,4%, respectivamente. A análise estatística Anova e o teste de Tukey post-hoc indicaram diferença estatística na comparação dos três modelos uniparamétricos com maior significância para presença de esferas de gel poliacrilamida (PE).

Palavras-chave: Eosina Y; Zonas mortas; Efeito de cauda; Anova.

ABSTRACT

VILAR, Fabio M. D. **Hydrodynamic characteristics of an abiotic UASB reactor**. 2014. 58 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2014.

This work sought to evaluate the hydrodynamic behaviour of an abiotic UASB reactor in bench scale (1 L) through hydrodynamic stimulus-response assays. Methylene blue, eosin Y, lithium chloride, bromocresol green and bromofenol blue were used as tracers to carry out the pulse-type assays. UASB reactor UASB was operated with influent flowrate of 4 L/d (0,166 L/h), hydraulic retention time (HRT) of 6 h and kept at room temperature. Simulations of the hydrodynamic assays were done on the UASB reactor with only water (WR), injection of air in the bottom part of the reactor simulating generation of gases (RWA), spheres of polyacrylamide gel representing the biomass of an anaerobic reactor (RWS) and injection of air and spheres of polyacrylamide gel at the same time (RWAS). Hydraulic retention time, number of complete mixed reactors in series and number of dispersion of the uniparametric models of N-CSTR, low and high dispersion were determined by reading the wavelength by colorimetric methods. Hydraulic efficiency and the anomalies dead zones and short-circuiting were also determined. The results for the reactor RW, RWA, RWS and RWAS were: HRT of 6.2, 6.7, 5.9 and 5.9, respectively; N-CSTR in series of 4, 5, 4 and 4, respectively; D/uL of low dispersion of 0.14, 0.12, 0.17 and 0.13, respectively; D/uL of high dispersion of 0.15, 0.10, 0.11 and 0.09, respectively; volume of dead zones of 19%, 5%, 10% and 2.5%, respectively; short-circuiting of 5.6%, 2.6%, 0.44% and 2.4%, respectively. Statistical analyses Anova and post-hoc test of Tukey indicated statistical difference comparing the three-uniparametric models with major significance for the presence of spheres of polyacrylamide gel (PS).

Keywords: Eosin Y; Dead zones; Tailing phenomena; Anova.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema da digestão anaeróbia.....	19
Figura 2 – Interior de um reator UASB.....	21
Figura 3 – Reator UASB em escala de bancada com volume de 1L.....	26
Figura 4 – Esferas de gel de poliacrilamida.....	27
Figura 5 - Gráficos da concentração de traçador (mg/L) pelo tempo com água. (a) Azul de metileno; (b) Eosina Y; (c) Cloreto de lítio; (d) Azul de bromofenol; (e) verde de bromocresol.....	32
Figura 6 - Gráficos da concentração de traçador (mg/L) pelo tempo om presença de esferas de gel de poliacrilamida. (a) Azul de metileno; (b) Eosina Y; (c) Cloreto de lítio; (d) Azul de bromofenol; (e) verde de bromocresol.....	33
Figura 7 - Gráficos da concentração de traçador (mg/L) pelo tempo com aeração. (a) Azul de metileno; (b) Eosina Y; (c) Cloreto de lítio; (d) Azul de bromofenol; (e) verde de bromocresol.....	35
Figura 8 - Gráficos da concentração de traçador (mg/L) pelo tempocom esferas de gel de poliacrilamida e aeração. (a) Azul de metileno; (b) Eosina Y; (c) Cloreto de lítio; (d) Azul de bromofenol; (e) verde de bromocresol.....	36
Figura 9 - Médias das curvas de DTR obtidas experimentalmente com os traçadores ao longo do tempo para os ensaios de estímulo-resposta apenas com água: a) Ensaios 1, 2 e 3 com azul de metileno; b) Ensaios 1, 2 e 3 com eosina Y; c) Ensaios 1, 2 e 3 com cloreto de lítio; d) Ensaios 1, 2 e 3 com azul de bromofenol; e) Ensaios 1, 2 e 3 com verde de bromocresol; Legenda: -◆- Dados Experimentais; -■- N-CSTR em série; -▲- Pequena Dispersão; -●- Grande Dispersão.....	42
Figura 10 - Médias das curvas de DTR obtidas experimentalmente com os traçadores ao longo do tempo para os ensaios de estímulo-resposta com presença de esferas de gel poliacrilamida: a) Ensaios 1, 2 e 3 com azul de metileno; b) Ensaios 1, 2 e 3 com eosina Y; c) Ensaios 1, 2 e 3 com cloreto de lítio; d) Ensaios 1, 2 e 3 com azul de bromofenol; e) Ensaios 1, 2 e 3 com verde de	

bromocresol; Legenda: -◆- Dados Experimentais; -■- N-CSTR em série; -▲- Pequena Dispersão; -●- Grande Dispersão.....44

Figura 11 - Médias das curvas de DTR obtidas experimentalmente com os traçadores ao longo do tempo para os ensaios de estímulo-resposta com aeração: a) Ensaios 1, 2 e 3 com azul de metileno; b) Ensaios 1, 2 e 3 com eosina Y; c) Ensaios 1, 2 e 3 com cloreto de lítio; d) Ensaios 1, 2 e 3 com azul de bromofenol; e) Ensaios 1, 2 e 3 com verde de bromocresol; Legenda: -◆- Dados Experimentais; -■- N-CSTR em série; -▲- Pequena Dispersão; -●- Grande Dispersão.....45

Figura 12 - Médias das curvas de DTR obtidas experimentalmente com os traçadores ao longo do tempo para os ensaios de estímulo-resposta com esferas de gel de poliacrilamida e aeração: a) Ensaios 1, 2 e 3 com azul de metileno; b) Ensaios 1, 2 e 3 com eosina Y; c) Ensaios 1, 2 e 3 com cloreto de lítio; d) Ensaios 1, 2 e 3 com azul de bromofenol; e) Ensaios 1, 2 e 3 com verde de bromocresol; Legenda: -◆- Dados Experimentais; -■- N-CSTR em série; -▲- Pequena Dispersão; -●- Grande Dispersão.....46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características dos ensaios de estímulo-resposta utilizados no reator UASB.....	28
Tabela 2 - Modelos teóricos uniparamétricos de dispersão, pequena intensidade (PD), grande intensidade (GD) e tanques em séries (N-CSTR).....	29
Tabela 3 - Parâmetros obtidos com o ajuste dos dados experimentais aos modelos teóricos uniparamétricos segundo Levenspiel (2000).....	38
Tabela 4 - Médias dos dados analisados para a zona morta dos traçadores em ensaios sem esferas de gel poliacrilamida.....	47
Tabela 5 - Médias dos dados analisados para a zona morta dos traçadores em ensaios com esferas de gel policrilamida.....	48
Tabela 6 - Médias da eficiência hidráulica dos traçadores em ensaios com aeração....	48
Tabela 7 - Médias da eficiência hidráulica dos traçadores em ensaios com esferas de gel policrilamida e aeração.....	48
Tabela 8 - Ocorrência de curto-circuitos (Ψ) para cada ensaio.....	50
Tabela 9 - Eficiência hidráulica encontrada para cada ensaio no reator UASB ($\lambda \geq 0,75$: boa eficiência hidráulica; $0,75 \leq \lambda < 0,5$: eficiência hidráulica satisfatória; $\lambda \leq 0,5$: eficiência hidráulica pobre).....	51
Tabela 10 - Dados da análise estatística ANOVA fator duplo com repetição e precisão de 95%.....	52
Tabela 11 - Dados estatísticos do Teste de <i>Tukey</i>	53

LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

C - Concentração do Traçador;
CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental;
DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio;
DQO - Demanda Química de Oxigênio;
DTR - Distribuição do Tempo de Residência;
D/ μ L - Número de Dispersão do Reator;
 E_{θ} - Curva de Distribuição do Tempo de Detenção Hidráulica;
GD - Grande Dispersão;
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística;
L - Litros;
N - Número de Reatores em Série;
N-CSTR - Tanques de Mistura em Série;
PD - Pequena Dispersão;
RA – Reator com água;
RAA – Reator com água e ar;
RAE – Reator com água e esferas de gel;
RAAE – Reator com água, ar e esferas de gel;
RAHLF - Reator Anaeróbio Horizontal de Leito Fixo;
 R^2 - Coeficiente de correlação
SANEPAR - Companhia de Saneamento do Paraná;
SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento Básico;
SST - Sólidos Suspensos Totais;
TDH - Tempo de Detenção Hidráulica;
UASB - *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*;
USP - Universidade de São Paulo;
 V_u - Volume Útil do Reator;
 V_d - Volume de Zonas Mortas;
 Q_r - Vazão real do reator;

Θ - Tempo Adimensional;
 σ^2_{θ} - Variância;
 Ψ - Curtos-circuitos;
 σ_m - Variância Média;
 λ - Comprimento de Onda.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
2 OBJETIVOS.....	16
2.1 OBJETIVO GERAL	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
3.1 DIGESTÃO ANAERÓBIA.....	17
3.1.1 Hidrólise	17
3.1.2 Acidogênese.....	17
3.1.3 Acetogênese	18
3.1.4 Metanogênese.....	18
3.2 REATORES UASB.....	19
3.3 COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO DE REATORES UASB.....	22
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	25
4.1 REATOR UASB.....	25
4.2 ENSAIOS HIDRODINÂMICOS.....	27
4.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA	31
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
5.1 COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO	32
5.2 VOLUME DE ZONAS MORTAS.....	47
5.3 PRESENÇA DE CURTO-CIRCUITO	49
5.4 EFICIÊNCIA HIDRAULICA.....	50
5.3 ANALISE ESTATISTICA.....	51
6 CONCLUSÕES	54
REFERÊNCIAS.....	56

1 INTRODUÇÃO

Efluentes lançados em corpos hídricos sem tratamento prévio podem alterar significativamente o meio aquático e terrestre. Segundo dados reportados pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento Básico (SNIS), no ano de 2010, a população brasileira possuía cerca de 46% de coleta de esgotos e apenas 38% dos esgotos gerados eram tratados.

No tratamento dos esgotos sanitários gerados geralmente são utilizados tratamentos de nível preliminar, primário, secundário e terciário, nos quais são implantados processos biológicos aeróbios e/ou anaeróbios.

Na digestão anaeróbia são observadas as etapas subsequentes: hidrólise na qual a matéria orgânica é transformada em compostos como aminoácidos, açúcares e ácidos graxos; acidogênese na qual os açúcares e aminoácidos produzidos na etapa anterior são absorvidos pelos organismos acidogênicos e fermentados intracelularmente a ácidos graxos de cadeias mais curtas, como ácido propiônico e butílico; acetogênese na qual ocorre conversão dos produtos da acidogênese em compostos que formam os substratos para formação de metano; metanogênese na qual as arqueias metanogênicas executam a decomposição dos produtos da acetogênese, convertendo-os em metano como principal produto (O'ROURKE, 1968; VAN HAANDEL E LETTINGA, 1994; PAULINO, 2011).

A tecnologia anaeróbia encontra-se bem consolidada, representando 15% do tipo de tratamento utilizado no Brasil, segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2000). O reator anaeróbio de manta de lodo e fluxo ascendente (UASB, *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) é muito utilizado devido as vantagens de economia de área, baixo custo de implantação, simplicidade de construção, operação e manutenção, redução no consumo de energia, dentre outras, quando comparado a processos aeróbios convencionais.

O reator UASB é composto de um leito de lodo (*sludge bed*), uma zona de sedimentação (*sludge blanket*) e o separador trifásico (gás-sólido-líquido) que é uma característica significativa do reator, pois forma uma zona de sedimentação para os

sólidos suspensos (LETTINGA et al,1984; NARNOLI E MERHROTA, 1997).

As análises do comportamento hidrodinâmico de reatores UASB podem ser realizadas utilizando-se traçadores para obter a distribuição do tempo de residência do fluido determinado através de ensaios de estímulo-resposta tipo pulso ou degrau. No ensaio de estímulo-resposta tipo pulso, a injeção do traçador é rápida e de uma só vez para seguir o fluxo do reator, em um pequeno espaço de tempo. O ensaio de estímulo-resposta tipo degrau é feito com a introdução de corrente de solução do traçador na alimentação (LEVENSPIEL, 2000; SOUZA, 2012).

A partir das curvas obtidas pelos testes de estímulo-resposta da distribuição de tempo de residência (DTR), obtém-se: o tempo de permanência das moléculas individuais do fluido que escoam no reator ou tempo médio de detenção hidráulica; o modelo matemático que melhor descreve o comportamento hidrodinâmico do reator; as conversões esperadas no reator para um dado sistema reacional com modelo cinético conhecido; problemas associados com o projeto; falhas operacionais; além de permitir a identificação de anomalias de escoamento nos reatores.

Dentro deste contexto, o objetivo geral deste trabalho de conclusão de curso é avaliar o regime hidrodinâmico em um reator UASB abiótico em escala de bancada (1 L) operado em diferentes condições operacionais.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o regime hidrodinâmico de um reator UASB abiótico em escala de bancada submetido a diferentes condições operacionais.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar ensaios hidrodinâmicos de estímulo-resposta tipo pulso com azul de metileno, eosina Y, cloreto de lítio, verde de bromocresol e azul de bromofenol no reator abiótico (contendo apenas água);
- Realizar ensaios hidrodinâmicos de estímulo-resposta tipo pulso com estes traçadores no reator abiótico (contendo água) e simulação da geração de biogás por compressor de ar;
- Realizar ensaios hidrodinâmicos de estímulo-resposta tipo pulso com estes traçadores no reator abiótico (contendo água) e simulação da presença de biomassa por esferas de gel poliacrilamida;
- Realizar ensaios hidrodinâmicos de estímulo-resposta tipo pulso com estes traçadores no reator abiótico (contendo água), simulação da geração de biogás e da presença de biomassa;
- Determinar as anomalias hidrodinâmicas – presença de zonas mortas e de curto-circuitos hidráulicos e a eficiência hidráulica e;
- Realizar análises estatísticas Anova com fator duplo com repetição e teste de Tukey post-hoc dos dados experimentais obtidos da hidrodinâmica e das características hidráulicas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 DIGESTÃO ANAERÓBIA

Segundo van Haandel e Lettinga (1994), o tratamento anaeróbio de esgotos é um processo de digestão que realiza a transformação da matéria orgânica biodegradável, com a ausência de oxidante externo, no qual há produção dos gases metano e dióxido de carbono, e dos sub-produtos como amônia, sulfetos e fosfatos na solução aquosa. O processo é desenvolvido por uma sequência de ações realizada por uma variedade de microrganismos, sendo dividido em 4 fases: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese.

3.1.1 Hidrólise

Na hidrólise o material orgânico particulado é convertido em compostos dissolvidos de menor peso molecular. No processo há interferência das exo-enzimas que são secretadas pelas bactérias fermentativas. As proteínas são degradadas através das (poli)peptidas para formação de aminoácidos. Carboidratos transformam-se em açúcares solúveis e lipídios que são convertidos em ácidos graxos de cadeia longa e glicerina (O'ROURKE, 1968).

3.1.2 Acidogênese

Os açúcares e aminoácidos produzidos na etapa de hidrólise são absorvidos pelos organismos acidogênicos e fermentados intracelularmente a ácidos graxos de cadeias mais curtas, como ácido propiônico e butírico. As vias bioquímicas pelos quais o substrato é fermentado e a natureza do produto dependerão do tipo de substrato e da pressão parcial de hidrogênio.

3.1.3 Acetogênese

Na acetogênese ocorre a conversão dos produtos da acidogênese em compostos que formam os substratos para formação de metano. Segundo Van Haandel e Lettinga (1994) aproximadamente 70% da DQO (Demanda Química de Oxigênio) originalmente presente converte-se em ácido acético, fazendo com que o restante da doação de elétrons seja concentrado no hidrogênio formado. Pode haver dependendo do estado de oxidação do material orgânico e ser digerido, a formação de ácido acético pode ser acompanhada pelo surgimento de dióxido de carbono e hidrogênio.

3.1.4 Metanogênese

Segundo Gujer e Zehnder (1983), a metanogênese é o passo que limita a velocidade do processo de digestão como um todo, embora a hidrólise pode tornar-se limitante em temperaturas abaixo de 20 °C.

As arqueias metanogênicas executam a etapa final do processo de decomposição anaeróbia dos efluentes. O metano é o principal produto resultante da digestão anaeróbia. As reações bioquímicas desse grupo de microrganismo bactérias contribuem para redução da pressão parcial de hidrogênio, viabilizando as etapas anteriores do processo de degradação anaeróbia.

O esquema simplificado do processo de digestão anaeróbia é apresentado na Figura 1.

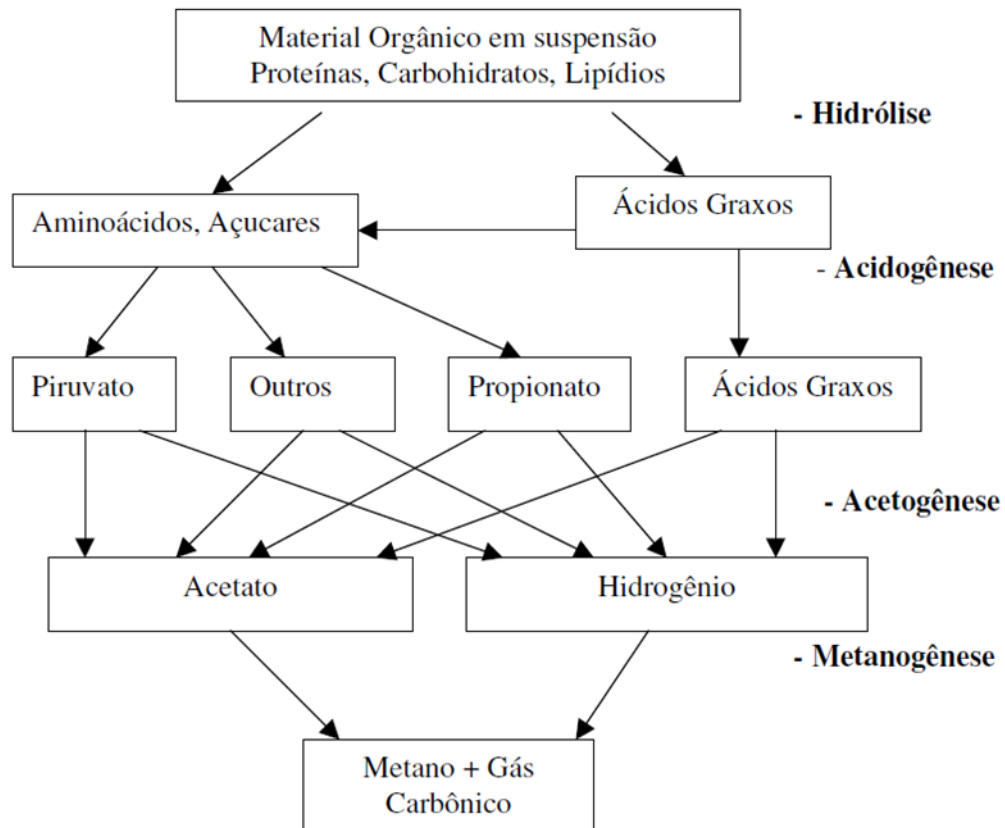


Figura 1 - Esquema da digestão anaeróbia
 Fonte: Brito (2006) adaptado de Foresti (1999)

3.2 REATORES UASB

Os reatores UASB apresentam em sua configuração um leito de lodo onde está concentrada a maior parte da biomassa ativa, sobreposto pela manta de lodo com biomassa menos densa. Na parte superior do reator é afixado um separador trifásico (gás-sólido-líquido) que tem a finalidade de dividir a zona de digestão (parte inferior), onde se encontra a manta de lodo responsável pela digestão anaeróbia da zona de sedimentação (parte superior) (VAN HAANDEL E LETTINGA, 1994).

O esgoto é encaminhado pela parte inferior do reator, atravessa a zona de digestão contendo o leito e manta de lodo nos quais há mistura do material orgânico com o lodo. Nestas zonas, os sólidos orgânicos são quebrados, degradados e digeridos. O biogás gerado por essa transformação tem sentido ascendente e é

coletado no separador de fases (Figura 1).

O separador de fases tem a finalidade de diminuir a velocidade do escoamento fazendo com que partículas, oriundas dos flocos de lodo, possam sedimentar sobre a superfície inclinada do separador. Daí a necessidade da zona de sedimentação para que haja retenção do lodo, permitindo a formação de massa na zona de digestão, enquanto se descarrega efluente substancialmente livre de sólidos sedimentáveis segundo Van Haandel e Lettinga (1994).

Segundo Jordão e Pessoa (1995), o reator UASB é composto por três seguimentos:

- Câmara de digestão: parte inferior, onde se localiza o leito de lodo e ocorre o processo de digestão anaeróbia, havendo estratificação do lodo em camadas, de acordo com sua concentração durante a operação do sistema;
- Separador de fases: dispositivo que fisicamente caracteriza uma zona de decantação e uma câmara de coleta de gases, separando a fase sólida da câmara de digestão da parte líquida e gasosa;
- Zona de transição: entre a câmara de digestão e a zona de sedimentação superior;
- Zona de sedimentação: o esgoto que penetra pela parte superior alcança os vertedores de superfície com velocidade ascensional adequada para sedimentação dos sólidos e flocos, que retornam pela abertura das paredes para a zona de transição e de digestão. A parte líquida é recolhida com característica de efluente clarificado e;
- Zona de acumulação de gás: o gás produzido na fase de digestão é retido em zonas superiores de acumulação, onde é coletado e eventualmente aproveitado.

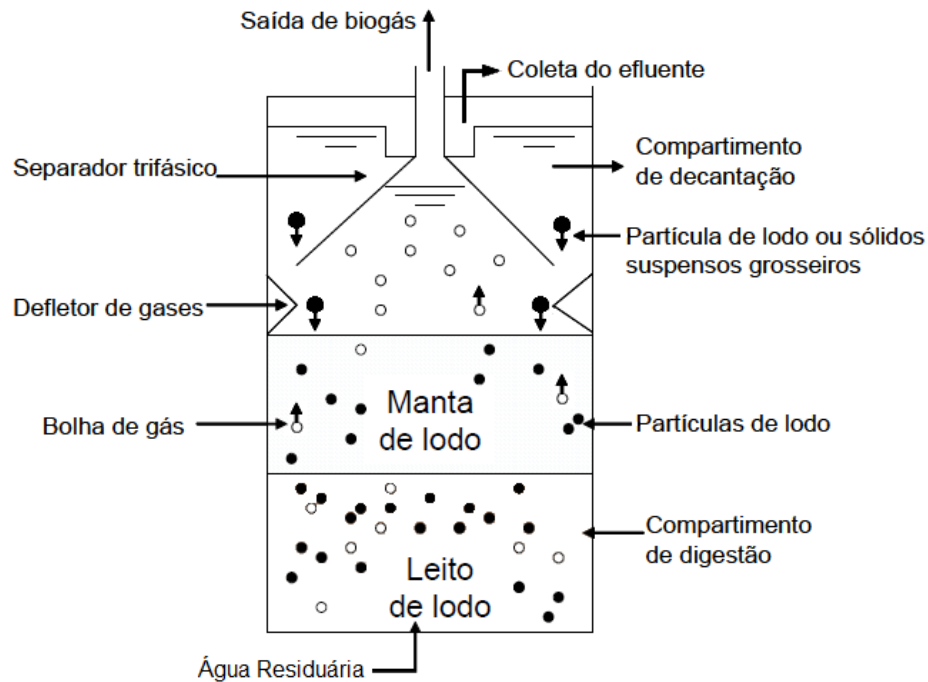


Figura 2 - Interior de um reator UASB.
Fonte: adaptado de Chernicharo (2007)

A vantagem de utilizar um reator UASB está relacionada à eficiência de remoção de DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) de 100 mg/L. Além disso, esse reator apresenta alta capacidade de retenção de biomassa em seu interior, o que permite trabalhar com maiores tempos de retenção dos microrganismos, menores tempos de detenção hidráulica (4 a 12 h) menor necessidade de adição de nutrientes, menor produção de lodo, elevada estabilidade em situações de variações das características da água residuária (SPERLING, 1996; FORESTI et al., 2002; PAULINO, 2011) quando comparados a processos de lodos ativados convencionais.

Dentre as desvantagens do reator UASB é possível citar menor eficiência na remoção de patógenos e nutrientes), geração de maus odores, longo intervalo de tempo necessário para partida (sem inóculo), necessidade de pós-tratamento para atender a legislação vigente, comparado aos processos de lodos ativados convencionais (FORESTI, 2002; SEGHEZZO, 2004).

De acordo como Dixo et al. (1995); Van Haandel e Catunda (1995) há aumento da eficiência do reator UASB quando combinado com lagoas de estabilização ou com sistema de lodos ativados.

Ao observar as vantagens e desvantagens, o reator UASB tem demonstrado ser uma ótima opção para tratamento de águas residuárias. Lettinga et al. (1983) obtiveram remoção de 65 a 90% de DBO com TDH de 12 h em reator UASB de 120 L, inoculado com lodo anaeróbio granular em temperatura variável na faixa de 8 °C a 20 °C e tempo de detenção hidráulica (TDH) de 8 a 24 h, tratando esgotos sanitários.

Van Haandel e Lettinga (1994) notaram eficiência de remoção de demanda química de oxigênio (DQO) de 74% e de sólidos suspensos totais (SST) de 75% em um reator UASB de 120 m³ tratando esgotos sanitários da cidade de Kampur, na Índia.

Para ter eficiência muito boa no tratamento de águas residuárias além dos reatores UASB, o pós-tratamento do efluente é fundamental para que eles se enquadrem na legislação ambiental vigente e possam ser descartados em corpos de água (GONÇALVES et al., 1997).

Coletti et al. (1997) obtiveram remoção de DBO em torno de 95% e de DQO em torno de 88% em um sistema composto por reator anaeróbio (UASB) seguido de lodos ativados tratando esgotos sanitários.

3.3 COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO DE REATORES UASB

Devido ao aumento dos estudos e da utilização do reator UASB, o melhor conhecimento acerca do comportamento hidrodinâmico destes reatores tornou-se necessário, pois a grande maioria dos trabalhos abordam a eficiência na remoção de parâmetros (matéria orgânica, sólidos, alcalinidade, nitrogênio, fósforo, dentre outros), com pouco conhecimento acerca das características hidrodinâmicas destes reatores (PIRES & RIBEIRO, 1992).

O comportamento hidrodinâmico de reatores *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB) pode estar relacionado a vários fatores como o tipo de efluente, velocidade

ascensional, altura do leito e da manta de lodo e taxa de produção de biogás (PEÑA, 2006).

De acordo com METCALF & EDDY (2003), os principais processos biológicos empregados no tratamento de esgotos são: aeróbios, anóxicos, anaeróbios e a combinação dos anteriores. Em cada processo, há diferença quanto ao crescimento biológico: suspenso ou aderido, quanto ao fluxo: contínuo ou intermitente e quanto à hidráulica: mistura completa, fluxo de pistão ou fluxo arbitrário.

Os ensaios hidrodinâmicos podem ser realizados através da entrada tipo pulso ou tipo degrau. A entrada tipo pulso uma certa quantidade de traçador é injetado de modo rápido de uma só vez na corrente de alimentação do reator, em um tempo curto. Tal concentração do traçador no efluente, é medida ao longo do tempo, para obter a curva de concentração pelo tempo (De SOUZA, 2012).

Na entrada do tipo degrau o traçador é introduzido na corrente do efluente, e mantido durante todo o ensaio. Tendo assim a geração de uma curva que será sempre crescente, até o momento em que se atinja a concentração de traçador aplicado (De SOUZA, 2012).

Nos experimentos realizados com traçadores são utilizados do tipo estímulo-resposta é adicionada uma quantidade conhecida de traçador no líquido afluente e mede-se a concentração do traçador no efluente em intervalos de tempo regular. Assim é possível obter a concentração do traçador efluente em função do tempo transcorrido desde o início do ensaio como resposta. O principal método para análise dos resultados provenientes dos ensaios estímulo-resposta é o estudo da distribuição do tempo de residência (DTR) (METCALF E EDDY, 2003).

A partir das curvas obtidas pelos testes de estímulo-resposta da distribuição de tempo de residência (DTR), obtém-se o tempo de permanência das moléculas individuais do fluido que escoam no reator ou tempo médio de detenção hidráulica; o modelo matemático que melhor descreve o comportamento hidrodinâmico do reator; as conversões esperadas no reator para um dado sistema reacional com modelo cinético conhecido; problemas associados com o projeto; falhas operacionais; além de permitir a identificação de anomalias de escoamento nos reatores.

Morgan-Sagastume et al. (1997) concluíram que a posição do coletor de gás

tem importante influência sobre o comportamento hidráulico: quando esta barreira física está localizada mais próxima ao manto de lodo, diminuía a fração de zonas mortas, já que era introduzida uma zona de equalização de fluxo de vazão em estudos realizados com traçadores em reator UASB, utilizando o verde de bromocresol. Os autores notaram que esta modificação aumentou a eficiência do decantador.

NARDI et al. (1999) observaram que as características do traçador têm influência decisiva nas curvas DTR, sendo o dextrano azul mais preciso na indicação do escoamento predominantemente tubular em um Reator Anaeróbio Horizontal de Leito Fixo (RAHLF) em testes de estímulo-resposta quando comparado aos azul de bromofenol, eosina Y, mordante violeta, rodamina WT e verde de bromocresol.

4 MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia a desenvolvida e aplicada no desenvolvimento do Trabalho de Conclusão de Curso, realizando assim os objetivos propostos. Os ensaios hidrodinâmicos e análises dos dados foram realizados no Laboratório de Sanamento C104 da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, câmpus Campo Mourão, Paraná.

4.1 REATOR UASB

Para a realização dos ensaios foi utilizado um reator UASB em escala de bancada com volume de 1 L, confeccionado em *plexiglass* (acrílico), com dimensões de 0,55 m de altura e 0,048 m de diâmetro interno. Na camada superior encontra-se o separador trifásico construído do mesmo material, com 0,03 m de altura e 0,037 m de diâmetro (Figura 3).

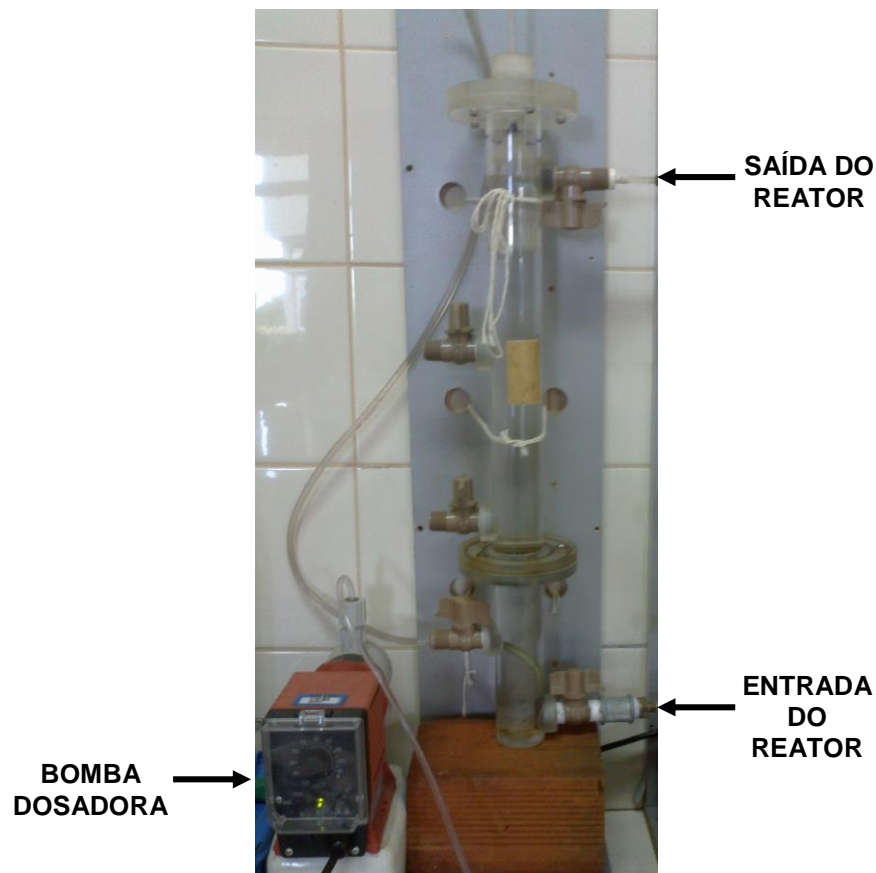


Figura 3 - Reator UASB em escala de bancada com volume de 1L.

O reator UASB foi alimentado com água potável por uma bomba dosadora solenóide da marca Prominent, modelo Conb 1201, conectada por mangueira a um galão de armazenamento de 30 L de água. O reator foi operado com vazão de 4 L/d (0,166 L/h) e tempo de detenção hidráulica (TDH) teórico de 6 h e mantido à temperatura ambiente.

Com o objetivo de realizar os ensaios hidrodinâmicos de estímulo-resposta tipo pulso em quatro etapas distintas, foi utilizado um compressor de ar comprimido, modelo S-500 A, para a geração de bolhas de ar e simulação de produção gasosa no reator.

Em outra etapa foram utilizadas esferas de gel poliacrilamida (Figura 4) para simular a presença de biomassa no interior do reator, preenchendo aproximadamente 33% do volume total do reator.



Figura 4 – Esferas de gel de poliacrilamida.

4.2 ENSAIOS HIDRODINÂMICOS

Para obtenção dos dados sobre comportamento hidrodinâmico do reator foram realizados três ensaios de estímulo-resposta tipo pulso por traçador para cada condição diferente de operação, ou seja, abiótica, com injeção de ar, com esferas de gel poliacrilamida e com injeção de ar e esferas de gel poliacrilamida. O traçador injetado era composto por 0,025 g do traçador dissolvido em 10 mL de água destilada.

Na Tabela 1 é apresentado um resumo dos ensaios realizados com os traçadores, massas, comprimento de onda.

Tabela 1 - Características dos ensaios de estímulo-resposta utilizados no reator UASB

Traçador	Massa molecular do traçador (g/g-mol)	Concentração dos traçadores (g/mL)	Comprimento de onda (nm)
Azul de Metileno	319,85	0,025	293
Eosina Y	691,88	0,025	540
Cloreto de lítio	42,39	0,025	-
Azul de bromofenol	669,99	0,025	310
Verde de bromocresol	698,05	0,025	616

Cada traçador foi injetado na entrada do reator, com a ajuda de uma seringa de 10 mL em tempo aproximado de 5 s para simular um pulso ideal.

Os ensaios foram realizados com duração de três vezes o TDH teórico, com duração total de 18 h, sendo a coleta de amostras realizadas em intervalos de 30 min.

As amostras coletadas foram submetidas a leitura pelo método colorimétrico de leitura de absorvância em espectrofotômetro HACH UV-VIS, modelo DR/5000, com comprimento de onda pré-definido para determinação da concentração do traçador em cada amostra. Com os dados de absorvância obtidos usou-se o *software* Excel para obter a curva de concentração de cada traçador, utilizando a equação previamente obtida de correlação entre absorvância e a concentração do traçador.

Esses dados foram normalizados de acordo com Levenspiel (2000), resultando em curvas de distribuição do tempo de residência hidráulica ($E\theta$) em função do tempo adimensional (θ) e calculada a variância (σ^2_{θ}) para cada ensaio.

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

Tabela 2 - Modelos teóricos uniparâmetros de dispersão, pequena intensidade (PD), grande intensidade (GD) e tanques em séries (N-CSTR)

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).

A curva de distribuição do tempo de residência hidráulica para modelo de dispersão de grande intensidade é expressa pela Equação (1).

$$E_{\theta,ta} = 1/2\sqrt{\pi(D/u.L)} \exp[-(1-\theta)^2/4\theta(D/u.L)] \quad (1)$$

No modelo de tanques de mistura completa em série, o número de tanques em série é calculado através da Equação (2) e o ajuste da curva de distribuição do tempo de residência hidráulica para o modelo tanques de mistura completa em série é expresso pela Equação (3).

$$N = 1/\sigma^2_{\theta} = \bar{\theta}^2_h/\sigma^2 \quad (2)$$

$$E_{\theta} = N(N.\theta)^{N-1}/(N-1)! e^{-N.\theta} \quad (3)$$

Para determinação do volume de zonas mortas do reator UASB foram utilizadas as Equações (4), (5) e (6).

$$\beta = TDH_t - TDH_r \quad (4)$$

$$Q_r = V_u / TDH_r \quad (5)$$

$$V_d = Q_r \times \beta \quad (6)$$

Em que: β representa a diferença entre o TDH real e o TDH teórico (h), V_u é o volume útil do reator (L), Q_r é a vazão real do reator (L/h) e V_d é o volume de zonas mortas (L).

Com a presença de curtos-circuitos observada através dos dados coletados em que o tempo do primeiro aparecimento do traçador no efluente do reator e o TDH teórico de acordo com metodologia adaptada de Sarathai et al. (2010), usou-se para se obter essa relação a Equação (7).

$$\Psi = \frac{\tau k}{\tau r} \quad (7)$$

Em que: (Ψ) é a presença de curto-circuito, τk é o valor do pico da curva de concentração (h) e τr equivale ao TDH real (h).

Para obtenção da eficiência hidráulica (λ) foi utilizada a Equação 8 que contempla o volume efetivo e a condição de tanques em série.

$$\lambda = e^{(1-1/N)} \quad (8)$$

Em que: e é o volume efetivo (m^3) e N representa o número de tanques em série.

4.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise realizada para o teste estatístico foi a de variância (ANOVA) fator duplo com repetição e precisão de 95% e o teste post-hoc de *Tukey*. O teste foi aplicado aos dados experimentais para confirmação ou não sobre a hipótese da influência do efeito da esfera de gel de poliacrilamida no comportamento hidrodinâmico dos traçadores no reator UASB.

Com a ajuda do *software* de tratamento estatístico SISVAR 5.3 foi possível a realização dos testes. As análises de ANOVA tem por objetivo realizar a comparação entre os grupos de dados, sendo eles os modelos N-CSTR, GD e PD com nível de significância de 5%. O teste *Tukey* tem como objetivo realizar comparação entre cada grupo distinto, sendo assim, em cada traçador utilizado.

O comportamento hidrodinâmico foi considerado como variável dependente e a causa, o volume do reator e os modelos uniparamétricos (NCSTR, PD e GP) como variáveis independentes.

Na realização da análise estatística ANOVA foram levantada uma hipótese, em que H_0 representa a hipótese nula e μ a média nas Equações 12 e 13.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 \quad (12)$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \quad (13)$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO

Através dos ensaios hidrodinâmicos de estímulo – resposta obteve-se resultados onde foi possível traçar as curvas de variação da concentração de azul de metileno, eosina Y, cloreto de lítio, azul de bromofenol e verde de bromocresol nas amostras do efluente do reator ao longo do tempo (Figura 5).

Com base na Figura 5, foi possível observar resultados não satisfatórios para os ensaios realizados somente com água o azul de metileno devido à presença de diversos picos ao longo da curva. Isso provavelmente ocorreu devido à maior densidade deste traçador em relação à densidade da água, resultando em maior concentração do traçador na entrada do reator.

Nos traçadores eosina Y, cloreto de lítio, azul de bromofenol e verde de bromocresol, os resultados encontrados foram com menores incidências de picos e houve lento decaimento da concentração do traçador na saída do reator, conhecido como “fenômeno de cauda”. Este fenômeno também foi constatado por Carvalho et al. (2008) utilizando o traçador eosina Y.

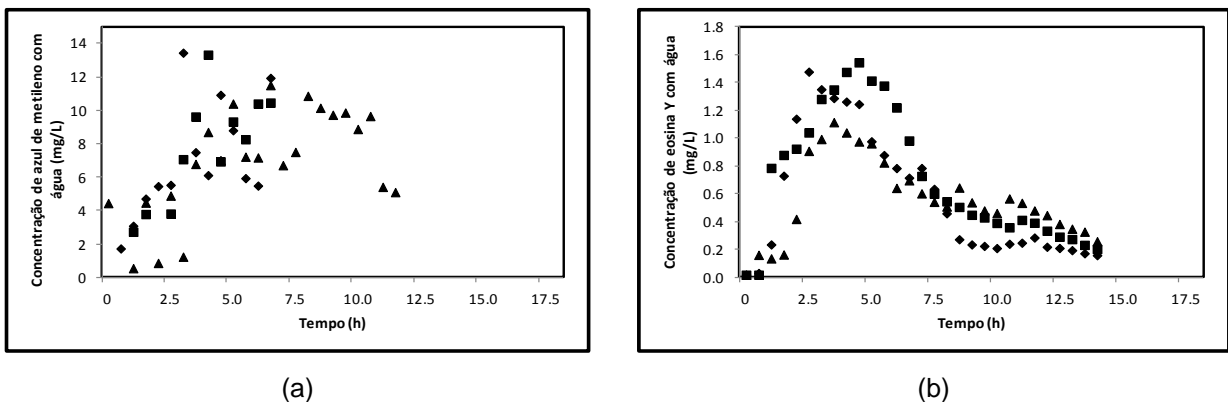
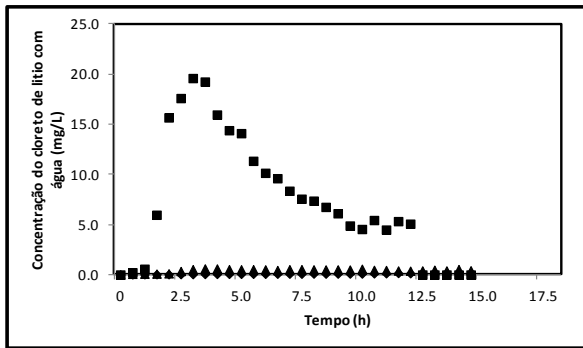
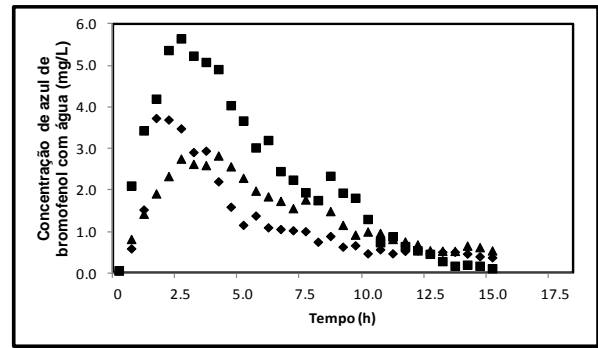


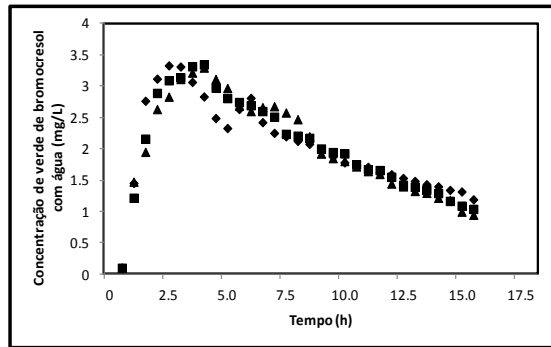
Figura 5 – Gráficos da concentração de traçador (mg/L) pelo tempo no reator com água. (a) Azul de metileno; (b) Eosina Y; (c) Cloreto de lítio; (d) Azul de bromofenol; (e) verde de bromocresol.



(c)



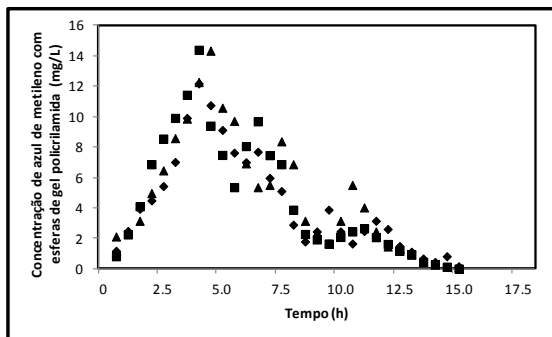
(d)



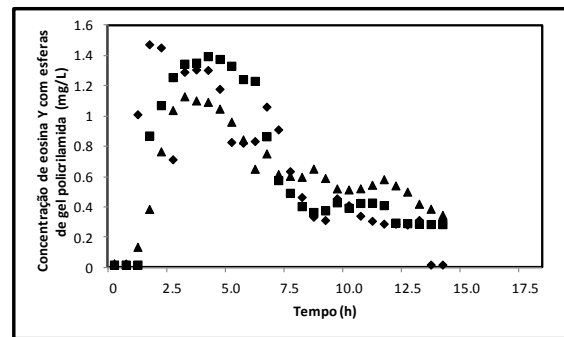
(e)

Figura 5 – Gráficos da concentração de traçador (mg/L) pelo tempo no reator com água. (a) Azul de metileno; (b) Eosina Y; (c) Cloreto de lítio; (d) Azul de bromofenol; (e) verde de bromocresol.

Na Figura 6 são apresentados os resultados obtidos para as variações dos traçadores de azul de metileno, eosina Y, cloreto de lítio, azul de bromofenol e verde de bromocresol nas amostras do efluente do reator com esferas de gel de poliácridamida ao longo do tempo.



(a)



(b)

Figura 6 – Gráficos da concentração de traçador (mg/L) pelo tempo no reator com presença de esferas de gel de poliácridamida. (a) Azul de metileno; (b) Eosina Y; (c) Cloreto de lítio; (d) Azul de bromofenol; (e) verde de bromocresol.

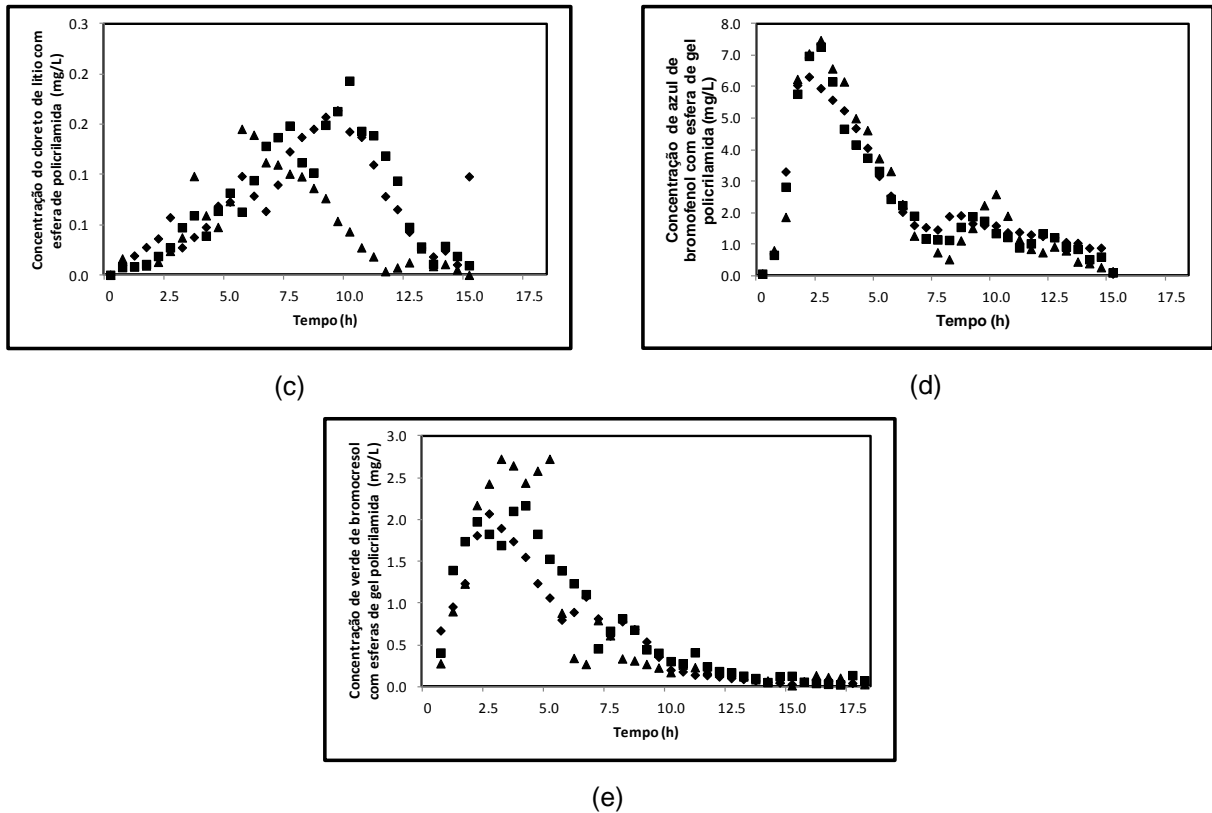


Figura 6 – Gráficos da concentração de traçador (mg/L) pelo tempo no reator com presença de esferas de gel de poliácridamida. (a) Azul de metileno; (b) Eosina Y; (c) Cloreto de lítio; (d) Azul de bromofenol; (e) verde de bromocresol.

É possível observar na Figura 6 que nas etapas com esferas de gel de poliácridamida foram obtidos melhores resultados nas etapas com eosina Y, azul de bromofenol e verde de bromocresol. Os melhores resultados se ajustaram havendo poucos picos e com decaimento melhor da concentração, que pode ter ocorrido devido às características específicas de cada traçador e a diferente sedimentação das esferas de gel de poliácridamida em condição de operação.

Com o azul de metileno foi notada presença de mais de um pico de concentração, indicando ocorrência de recirculação do traçador no interior do reator ou curtos-circuitos hidráulicos, o mesmo ocorrido com o cloreto de lítio.

Na Figura 7 são apresentados os resultados obtidos para as variações dos traçadores de azul de metileno, eosina Y, cloreto de lítio, azul de bromofenol e verde de bromocresol nas amostras do efluente do reator com aeração ao longo do tempo.

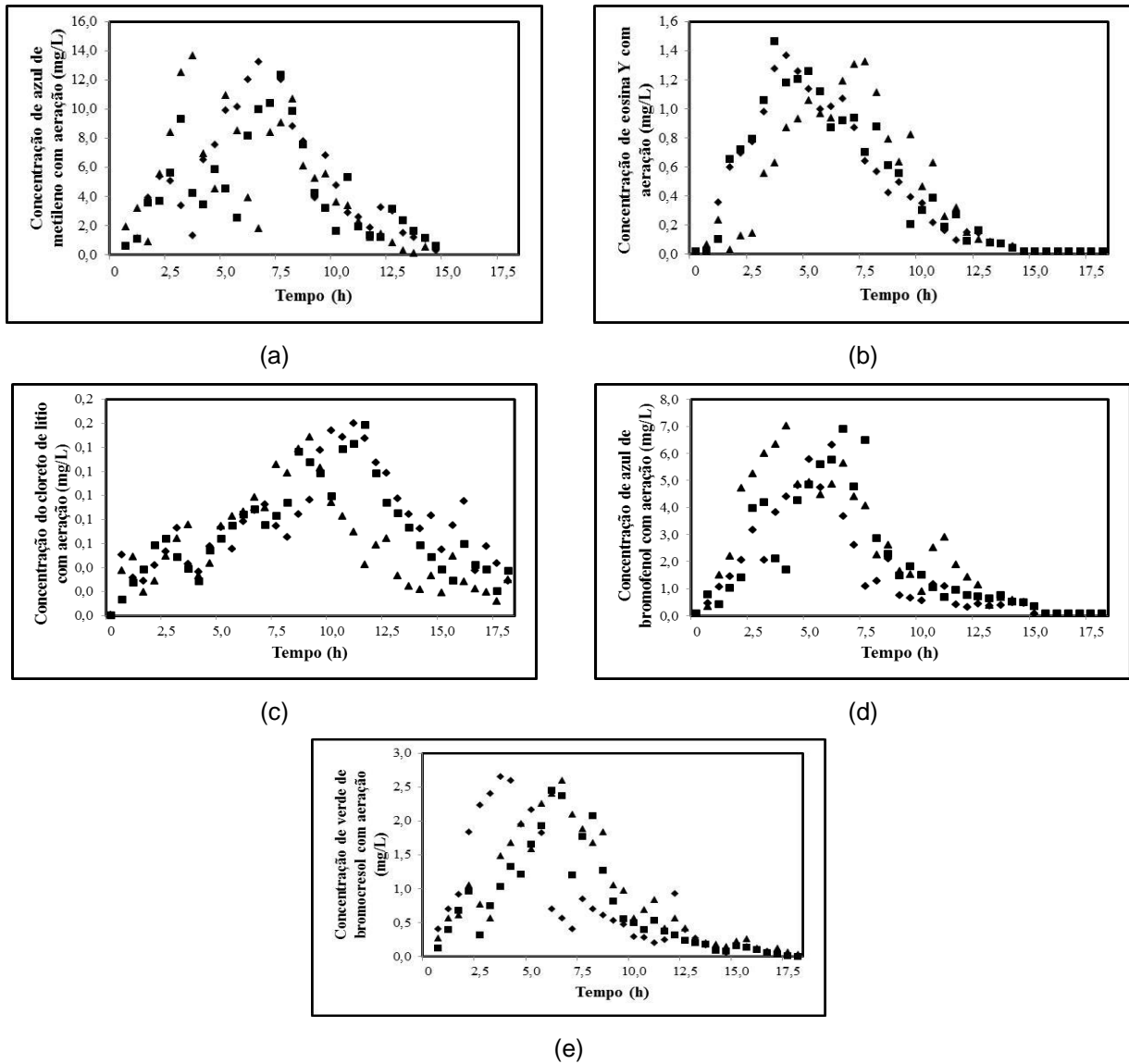


Figura 7 – Gráficos da concentração de traçador (mg/L) pelo tempo no reator com aeração. (a) Azul de metileno; (b) Eosina Y; (c) Cloreto de lítio; (d) Azul de bromofenol; (e) verde de bromocresol.

Na Figura 7 é possível notar que nas etapas com injeção de ar, os resultados melhor se ajustaram com o traçador eosina Y. Nas Figuras foi observado lento decaimento do traçador no efluente do reator, ou seja, o efeito de cauda longa. Houve variação nos resultados com vários picos no interior do reator, causado pela recirculação (Figura 7a, c).

Na Figura 8 são apresentados os resultados obtidos para as variações dos

traçadores de azul de metileno, eosina Y, cloreto de lítio, azul de bromofenol e verde de bromocresol nas amostras do efluente do reator com esferas de gel de poliacrilamida e aeração ao longo do tempo.

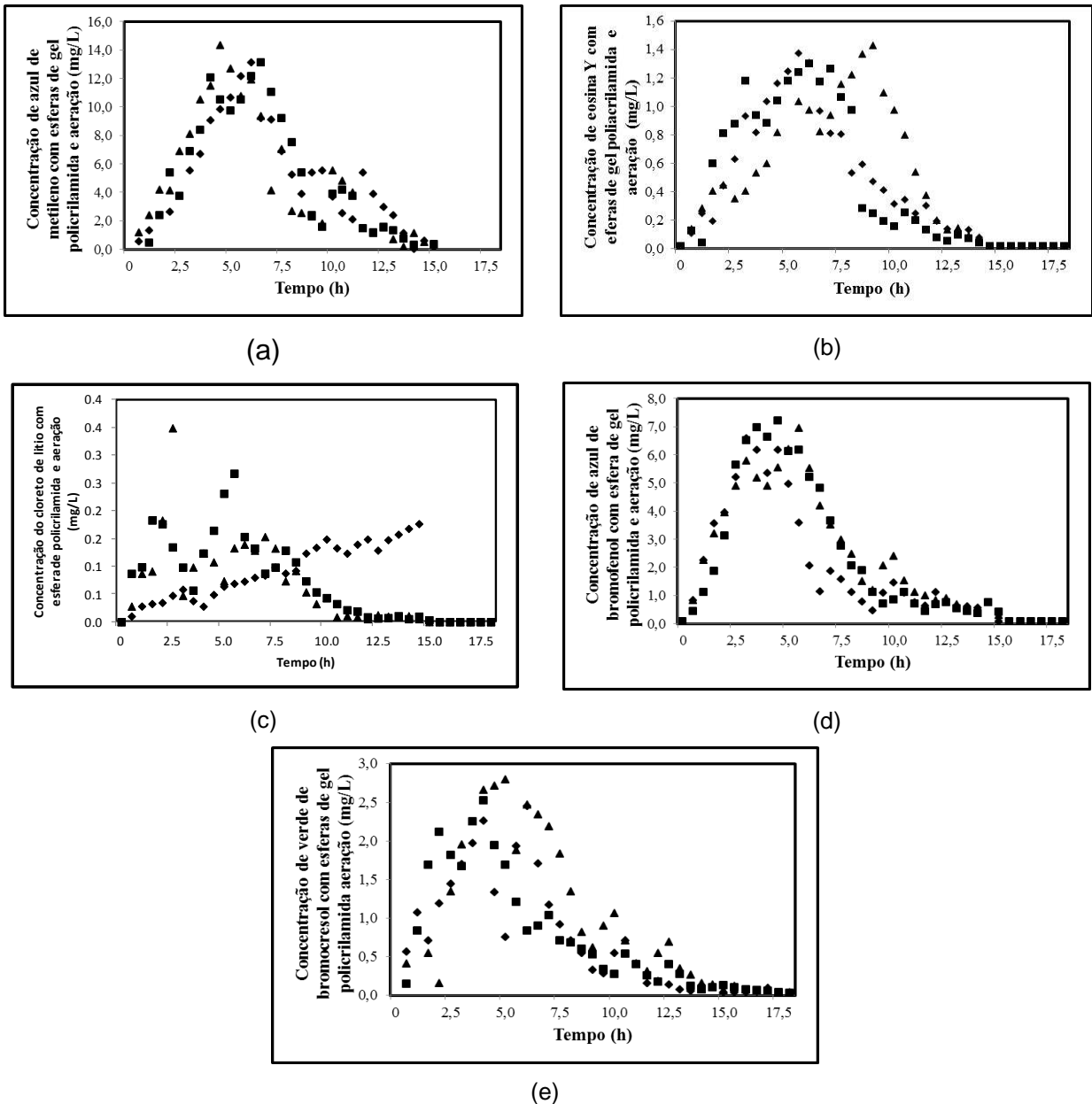


Figura 8 – Gráficos da concentração de traçador (mg/L) pelo tempo com esferas de gel de poliacrilamida e aeração. (a) Azul de metileno; (b) Eosina Y; (c) Cloreto de lítio; (d) Azul de bromofenol; (e) verde de bromocresol.

Na Figura 8 é possível observar que na etapa com presença de esferas de gel de poliacrilamida e aeração, os melhores resultados foram obtidos com azul de metileno com menor quantidade de picos. Com o azul de bromofenol e a eosina Y teve foi verificado o mesmo comportamento, porém com a diferença de formação do fenômeno de cauda.

Os valores obtidos dos parâmetros TDH real, número de dispersão (D/uL), número de reatores de mistura completa em série (N-CSTR) ajustados aos modelos matemáticos teóricos, assim como o coeficiente de correlação (R^2) são apresentados na Tabela 3.

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

	Ensaio	TDH real (h)	TDH real (h)	N-CSTR	D/uL (PD)	D/uL (GD)	R ²
azul de metileno + água	1	4,0	6,0	6	0,08	0,07	0,7712
	2	4,5	6,0	10	0,05	0,04	0,8692
	3	6,9	6,0	6	0,09	0,07	0,6832
azul de metileno + esferas de gel poliacrilamida	1	5,8	6,0	4	0,14	0,10	0,0097
	2	5,4	6,0	4	0,14	0,10	0,0266
	3	5,8	6,0	4	0,13	0,09	0,0106
azul de metileno + aeração	1	6,7	6,0	7	0,07	0,08	0,1689
	2	6,6	6,0	5	0,09	0,07	0,1976
	3	5,6	6,0	5	0,10	0,06	0,3322
azul de metileno + esferas de gel poliacrilamida + aeração	1	6,5	6,0	6	0,09	0,07	0,2273
	2	6,0	6,0	7	0,07	0,06	0,2562
	3	5,6	6,0	5	0,11	0,08	0,3402
eosina Y + água	1	5,3	6,0	3	0,18	0,12	0,4414
	2	5,7	6,0	3	0,17	0,11	0,4632
	3	6,7	6,0	4	0,14	0,10	0,2922
Eosina Y + esferas de gel policrilamida	1	5,2	6,0	3	0,19	0,12	0,5341
	2	5,8	6,0	3	0,16	0,11	0,3801
	3	6,7	6,0	4	0,14	0,10	0,3121

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

	Ensaio	TDH real (h)	TDH real (h)	N-CSTR	D/uL (PD)	D/uL (GD)	R ²
Eosina Y + aeração	1	5,6	6,0	4	0,14	0,10	0,4190
	2	5,8	6,0	4	0,13	0,09	0,3814
	3	6,9	6,0	6	0,08	0,06	0,1517
Eosina Y + esferas de gel poliacrilamida + aeração	1	6,1	6,0	4	0,12	0,09	0,3097
	2	5,6	6,0	4	0,12	0,09	0,3532
	3	7,1	6,0	6	0,09	0,07	0,1499
Cloreto de Lítio + água	1	9,4	6,0	7	0,07	0,06	0,0092
	2	5,5	6,0	4	0,13	0,09	0,4032
	3	8,1	6,0	5	0,10	0,79	0,0670
Cloreto de Lítio + esferas de gel poliacrilamida	1	8,3	6,0	5	0,09	0,07	0,2459
	2	8,4	6,0	8	0,05	0,04	0,0160
	3	6,7	6,0	7	0,07	0,06	0,0253
Cloreto de Lítio + aeração	1	9,8	6,0	5	0,09	0,07	0,0968
	2	9,4	6,0	5	0,09	0,07	0,0227
	3	7,0	6,0	3	0,14	0,10	0,2135
Cloreto de Lítio + esferas de gel poliacrilamida + aeração	1	9,6	6,0	7	0,07	0,05	0,9674
	2	5,2	6,0	3	0,16	0,10	0,4905
	3	5,1	6,0	3	0,16	0,11	0,0206

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

	Ensaio	TDH real (h)	TDH real (h)	N-CSTR	D/uL (PD)	D/uL (GD)	R ²
Verde de bromocresol + água	1	7,1	6,0	3	0,17	0,11	0,0226
	2	7,1	6,0	3	0,16	0,11	0,0164
	3	7,1	6,0	3	0,15	0,11	0,3517
Verde de Bromocresol + esferas de gel poicrilamida	1	4,8	6,0	2	0,22	0,14	0,5866
	2	5,0	6,0	2	0,22	0,14	0,5664
	3	4,6	6,0	2	0,23	0,14	0,3971
Verde de bromocresol + aeração	1	5,3	6,0	2	0,21	0,13	0,4103
	2	6,6	6,0	5	0,11	0,08	0,2081
	3	6,8	6,0	4	0,11	0,09	0,2258
Verde de bromocresol + esferas de gel poliacrilamida + aeração	1	5,4	6,0	3	0,16	0,11	0,4402
	2	5,2	6,0	2	0,21	0,13	0,4828
	3	6,2	6,0	4	0,13	0,09	0,2977
Azul de bromofenol + água	1	5,1	6,0	2	0,27	0,16	0,0556
	2	4,8	6,0	3	0,20	0,13	0,0907
	3	6,0	6,0	3	0,19	0,12	0,0061

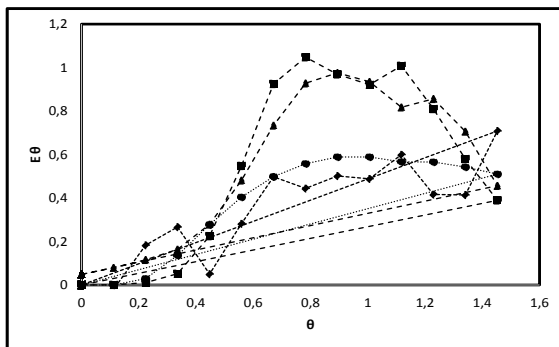
Tabela 3 - Parâmetros obtidos com o ajuste dos dados experimentais aos modelos teóricos uniparamétricos segundo Levenspiel (2000). (continua)

	Ensaio	TDH real (h)	TDH real (h)	N-CSTR	D/uL (PD)	D/uL (GD)	R ²
Azul de bromofenol + esferas de gel poliacrilamida	1	5,3	6,0	2	0,24	0,15	0,0138
	2	5,1	6,0	2	0,24	0,15	0,0534
	3	4,9	6,0	2	0,23	0,15	0,0601
Azul de bromofenol + aeração	1	5,7	6,0	4	0,13	0,10	0,3075
	2	6,4	6,0	5	0,11	0,08	0,2174
	3	5,9	6,0	3	0,15	0,11	0,4026
Azul de bromofenol + esferas de gel poliacrilamida + aeração	1	5,1	6,0	2	0,22	0,14	0,6566
	2	5,4	6,0	3	0,15	0,10	0,3740
	3	5,7	6,0	3	0,16	0,11	0,4555

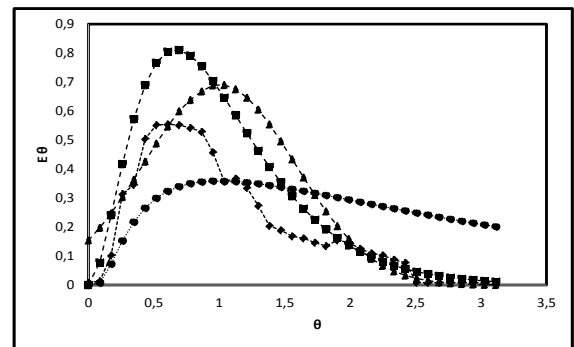
Com o ajuste uniparamétrico foi possível obter valores de 7 a 8 reatores de mistura completa em série (N-CSTR) para os ensaios RA (azul de metileno), de 3 a 4 reatores de mistura completa em série (N-CSTR), para eosina Y, e de 5 a 7 reatores de mistura completa em série (N-CSTR) para cloreto de lítio. Passig (2005) obteve valores aproximados de 2 a 4 reatores de mistura completa em série nos ensaios realizados com eosina Y em um reator UASB (18,8 m³) e Carvalho et al. (2008) de 4 a 5 reatores em um reator UASB de 160 L com o mesmo traçador.

Os valores do número de dispersão (D/uL) verificados nos modelos de dispersão de pequena e grande intensidade apresentaram diferença significativa entre os traçadores utilizados. Para o modelo de pequena e grande dispersão, e devido ao seu coeficiente de relação, o traçador que melhor se ajustou foi o azul de metileno, embora não tenha respeitado as premissas de $D/uL < 0,01$ e dispersão idêntica dentro e fora do volume de controle.

As curvas de Distribuição do Tempo de Residência (DTR) obtidas com o ajuste dos dados experimentais aos modelos uniparamétricos dos ensaios realizados no reator UASB são apresentadas nas Figuras 9, 10, 11 e 12.



(a)



(b)

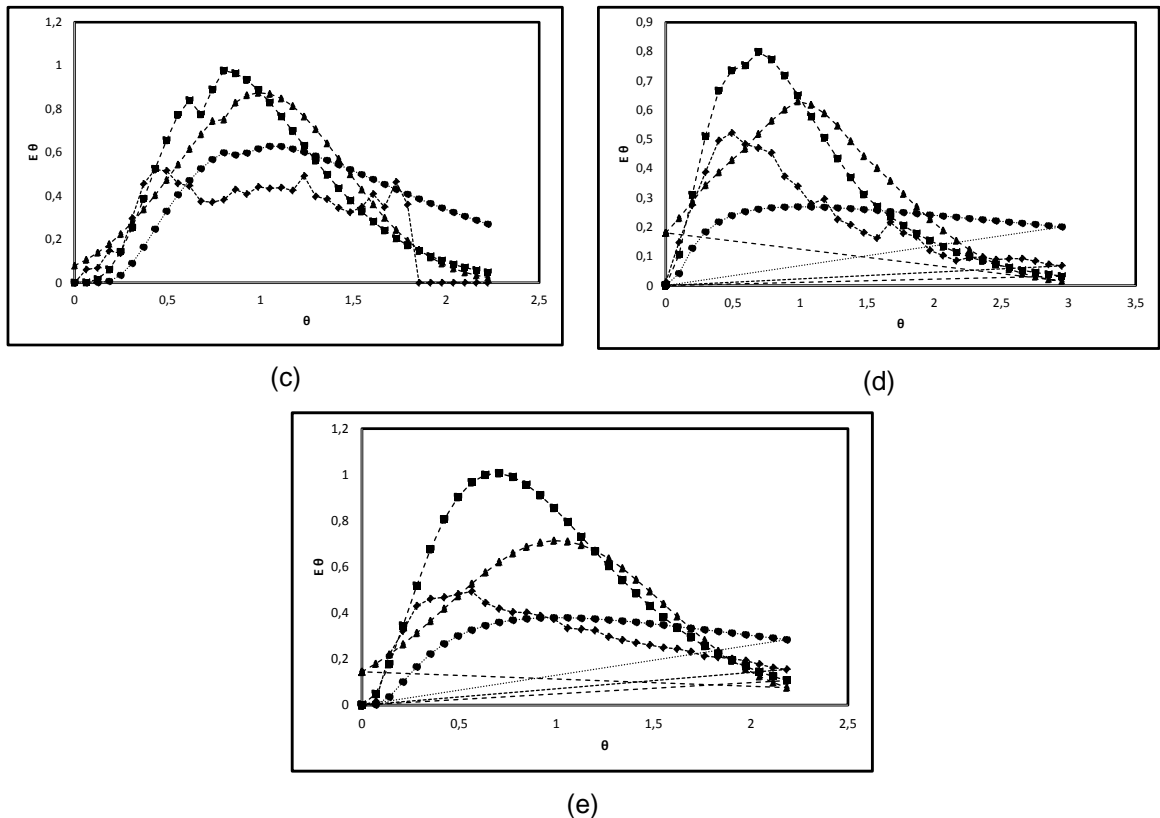


Figura 9 - Médias das curvas de DTR obtidas experimentalmente com os traçadores ao longo do tempo para os ensaios de estímulo-resposta apenas com água: a) Ensaios 1, 2 e 3 com azul de metileno; b) Ensaios 1, 2 e 3 com eosina Y; c) Ensaios 1, 2 e 3 com cloreto de lítio; d) Ensaios 1, 2 e 3 com azul de bromofenol; e) Ensaios 1, 2 e 3 com verde de bromocresol; Legenda: -◇- Dados Experimentais; -■- N-CSTR em série; -▲- Pequena Dispersão; -●- Grande Dispersão.

Os ensaios realizados com eosina Y apresentaram um TDH real de 5,3, 5,7 e 6,7, para os ensaios 1, 2 e 3, respectivamente.

Com a análises realizadas da curvas de DTR e dos resultados da Tabela 3, para os parâmetros de N-CSTR, pequena dispersão e grande dispersão, foi possível observar melhores ajustes para eosina Y e verde de bromocresol no modelo uniparamétrico N-CSTR em série em todos os ensaios realizados com água.

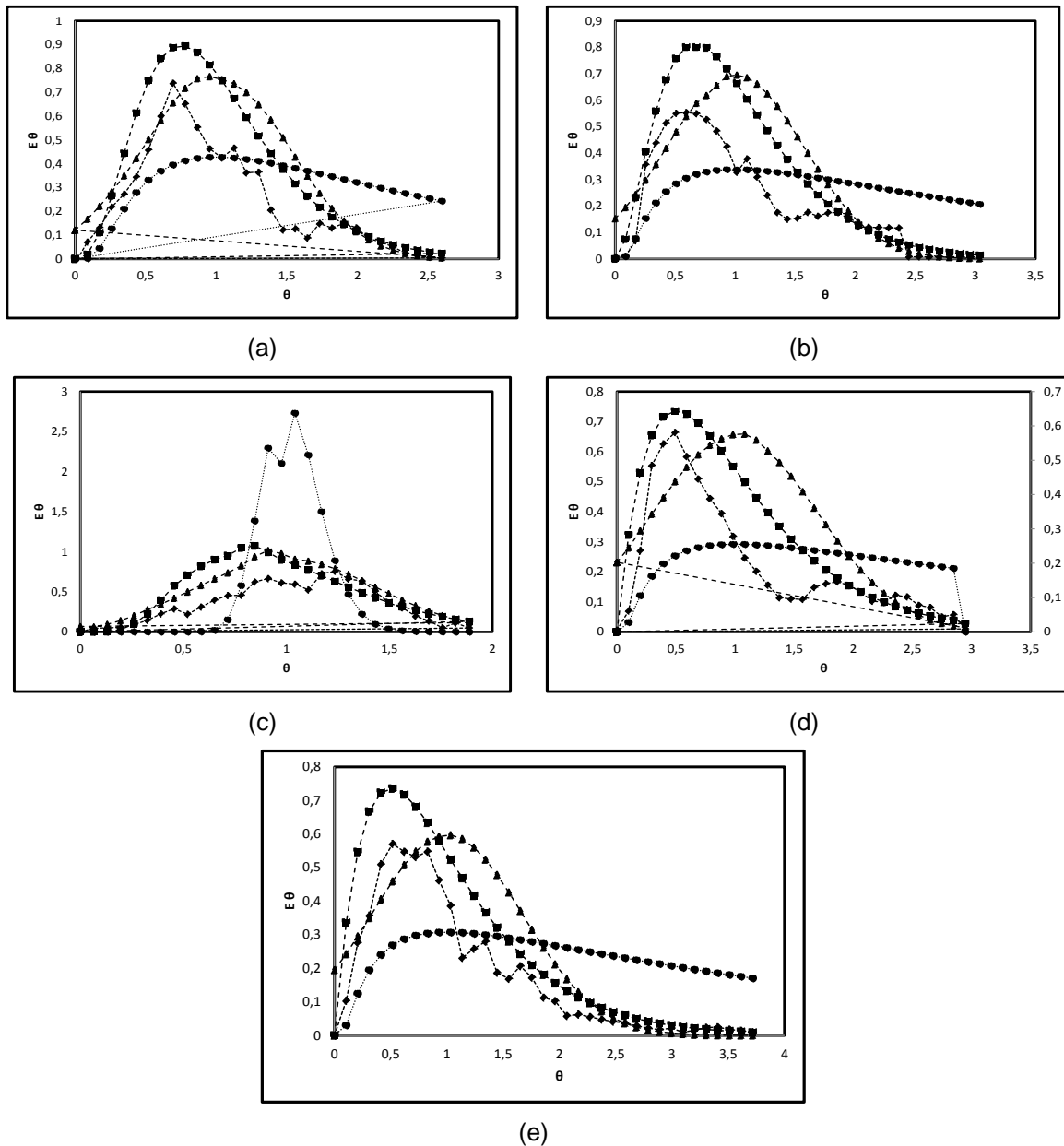


Figura 10 - Médias das curvas de DTR obtidas experimentalmente com os traçadores ao longo do tempo para os ensaios de estímulo-resposta com presença de esferas de gel poliacrilamida: a) Ensaios 1, 2 e 3 com azul de metileno; b) Ensaios 1, 2 e 3 com eosina Y; c) Ensaios 1, 2 e 3 com cloreto de lítio; d) Ensaios 1, 2 e 3 com azul de bromofenol; e) Ensaios 1, 2 e 3 com verde de bromocresol; Legenda: -♦- Dados Experimentais; -■- N-CSTR em série; -▲- Pequena Dispersão; -●- Grande Dispersão.

Em comparação aos resultados obtidos na Tabela 3 e os gráficos da Figura 10, pode-se analisar diferença pouco significativa entre os traçadores que melhor se ajustaram com a presença de esferas de gel de poliacrilamida, o azul de metileno com

TDH real variando de 5,4 a 5,8 h e a eosina Y com TDH real de 5,3 a 6,7 h. O parâmetro N-CSTR em série para o azul de metileno resultou em 4 em todos os ensaios e para a eosina Y de 3 a 4 reatores N-CSTR em série.

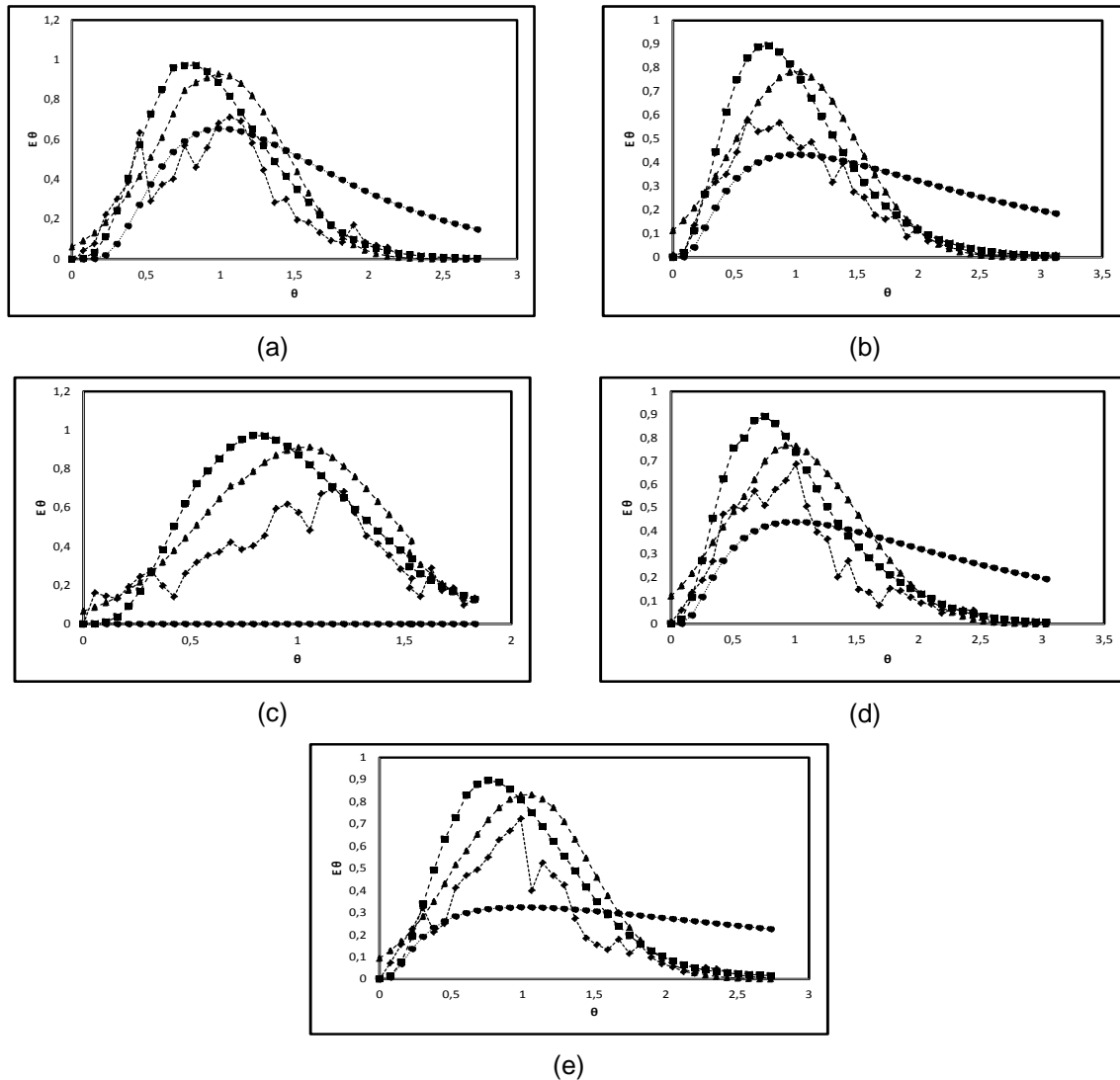


Figura 11 - Médias das curvas de DTR obtidas experimentalmente com os traçadores ao longo do tempo para os ensaios de estímulo-resposta com aeração: a) Ensaios 1, 2 e 3 com azul de metileno; b) Ensaios 1, 2 e 3 com eosina Y; c) Ensaios 1, 2 e 3 com cloreto de lítio; d) Ensaios 1, 2 e 3 com azul de bromofenol; e) Ensaios 1, 2 e 3 com verde de bromocresol; Legenda: \dashv Dados Experimentais; \blacksquare N-CSTR em série; \blacktriangle Pequena Dispersão; \bullet Grande Dispersão.

Com a injeção de ar no reator, os melhores ajustes encontrados foram para os traçadores eosina Y, azul de metileno e azul de bromofenol que apresentaram TDH real

similares, sendo 5,6 a 6,7 h, 5,6 a 6,9 h e de 5,7 a 6,4 h, respectivamente. No ajuste uniparamétrico para o modelo de pequena dispersão os valores foram de 0,07, 0,09 e 0,10 para azul de metileno, 0,14, 0,13 e 0,08 para eosina Y e de 0,13, 0,11 e 0,15 para azul de bromofenol.

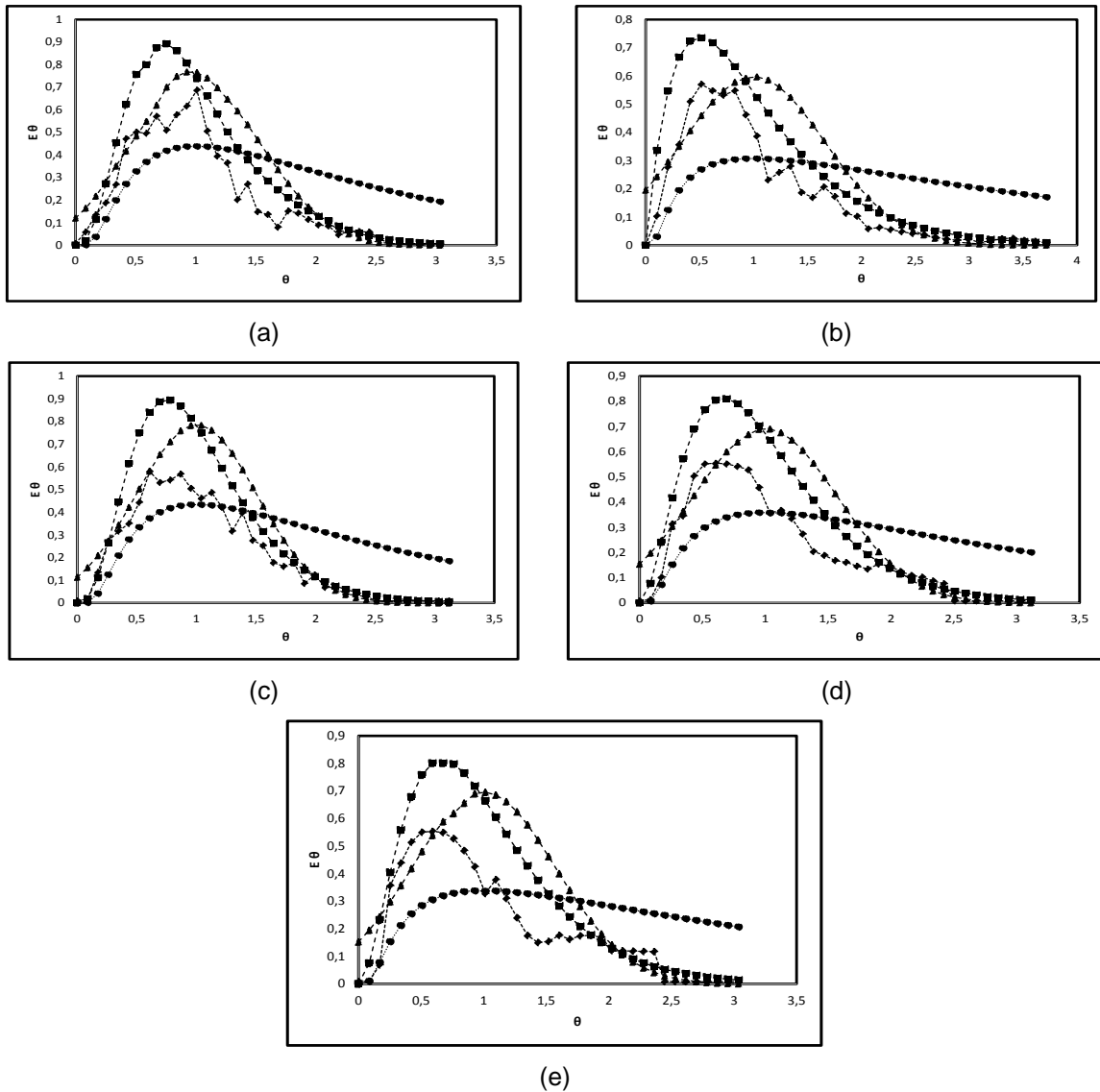


Figura 12 - Médias das curvas de DTR obtidas experimentalmente com os traçadores ao longo do tempo para os ensaios de estímulo-resposta com esferas de gel de poliacrilamida e aeração: a) Ensaio 1, 2 e 3 com azul de metileno; b) Ensaio 1, 2 e 3 com eosina Y; c) Ensaio 1, 2 e 3 com cloreto de lítio; d) Ensaio 1, 2 e 3 com azul de bromofenol; e) Ensaio 1, 2 e 3 com verde de bromocresol; Legenda: -♦- Dados Experimentais; -■- N-CSTR em série; -▲- Pequena Dispersão; -●- Grande Dispersão.

Devido à presença das esferas de gel e aeração, os resultados para o TDH real foram mais próximos ao teórico com azul de metileno (6,5, 6,0 e 5,6 h) e verde de bromocresol (5,4, 5,2, 6,2 h). O parâmetro N-CSTR em série desse dois traçadores resultaram em 6, 7 e 5 reatores N-CSTR em série para azul de metileno e de 3, 2 e 4 para verde de bromocresol, respectivamente.

Carvalho et al. (2008) avaliaram a hidrodinâmica de um reator UASB (160 L), tratando esgoto doméstico, com vazão afluyente de 16 L.h⁻¹ e TDH de 10 h. Os autores verificaram de 4 e 5 reatores de mistura completa em série.

5.2 VOLUME DE ZONAS MORTAS

Zonas mortas são locais no interior do reator onde partículas ficam estacionadas por um tempo maior, se comparado ao tempo teórico de detenção hidráulico (SIQUEIRA e TEIXEIRA, 1999).

Nas Tabelas 4, 5, 6 e 7 são apresentados os dados médios de tempo de detenção hidráulico teórico e experimental (TDHe), volume de zonas mortas (Vd) e volume total do reator (Vt) dos cinco traçadores.

Tabela 4 – Médias dos dados analisados para a zona morta dos traçadores em ensaios sem esferas de gel policrilamida.

	Eosina Y	Bromofonel Azul	Bromocresol Verde	Azul de Metileno	Cloreto de Litio
TDHt (h)	6	6	6	6	6
TDHe (h)	5,8	5,2	7,1	3,6	8,1
Vt (m³)	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Vd (%)	3,3	13,3	-18,3	40,0	-35,0

* Tempo de Detenção Hidráulico teórico (TDHt); Experimental (TDHe); Volume de zonas mortas (Vd); Volume Total do reator (Vt).

Pela Tabela 4 é possível verificar que o volume de zonas mortas no reator somente com água resultou maior com os traçadores azul de metileno e bromocresol verde, devido às características de cada traçador, que podem ter sofrido recirculação.

Tabela 5 – Médias dos dados analisados para a zona morta dos traçadores em ensaios com esferas de gel poliacrilamida.

	Eosina Y	Bromofenol Azul	Bromocresol Verde	Azul de Metileno	Cloreto de Lítio
TDHt (h)	6	6	6	6	6
TDHe (h)	5,9	5,2	4,8	5,6	8,3
Vt (m³)	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Vd (%)	1,7	13,3	20,0	6,7	-38,3

Pela Tabela 5 é possível verificar que os traçadores que obtiveram maior volume de zonas mortas foram bromofenol azul e bromocresol verde, provavelmente porque os traçadores se acumularam mais facilmente nas esferas de gel de poliacrilamida, ficando por mais tempo estagnados no interior do reator.

Tabela 6 – Médias dos dados analisados para a zona morta dos traçadores em ensaios com aeração.

	Eosina Y	Bromofenol Azul	Bromocresol Verde	Azul de Metileno	Cloreto de Lítio
TDHt (h)	6	6	6	6	6
TDHe (h)	5,8	5,8	5,8	6,6	9,4
Vt (m³)	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Vd (%)	3,3	1,7	-10,0	10,0	-56,7

Pela Tabela 6 é possível notar que ao contrário dos ensaios realizados com água e aeração, o volume de zonas mortas resultou maior para azul de metileno, provavelmente devido a maior recirculação durante a passagem no interior do reator.

Os resultados negativos obtidos para o volume de zonas mortas não são considerados por terem valores pequenos.

Tabela 7 – Médias dos dados analisados para a zona morta dos traçadores em ensaios com esferas de gel poliacrilamida e aeração.

	Eosina Y	Bromofenol Azul	Bromocresol Verde	Azul de Metileno	Cloreto de Lítio
TDHt (h)	6	6	6	6	6
TDHe (h)	5,8	5,9	6,6	6,6	9,4

Vt (m³)	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Vd (%)	3,3	1,7	-10,0	-10,0	-56,7

Pela Tabela 7 é possível observar que o volume de zonas mortas resultou maior com o traçador eosina Y, provavelmente devido à presença de curto-circuitos e à estagnação do traçador nas esferas de gel.

Young e Young (1988) avaliaram o comportamento hidráulico de filtros anaeróbios de fluxo ascendente para número de Reynolds menor do que 25. Segundo os autores, o volume de zonas mortas aumenta com o aumento do número de Reynolds. Os autores reportaram volumes de zonas mortas variando de 50% a 75% do volume dos filtros.

Singh et al. (2006) operaram dois reatores UASB (8 L cada) durante 900 d. Segundo os autores, a mistura de gás desempenha papel crucial para garantir eliminação de grande parte do espaço morto no reator UASB. Os resultados obtidos para o cálculo de zonas mortas foram de 10% para temperatura de 32 °C e 11% para temperatura de 20%.

Peña et al. (2006) obtiveram volume de zonas mortas de 0,9% para TDH de 10 h, 2,4% para TDH de 8 h, 2,7% para TDH de 6 h e de 1,1% para TDH de 5 h em ensaios realizados com o cloreto de lítio em um reator UASB com volume de 296 m³ tratando esgotos sanitários da cidade Ginebra, Valle Del Cauca, sudoeste da Colômbia.

5.2 PRESENÇA DE CURTO-CIRCUITOS

Com a análise dos resultados obtidos, foi possível determinar se houve ou não presença de curto-circuito nos ensaios hidrodinâmicos, conforme apresentado na Tabela 8.

Na etapa com presença de água e na etapa com esferas de gel de poliacrilamida não foi verificada presença de curto-circuito com os traçadores utilizados, devido ao Ψ ter sido maior que 0,3. Com a injeção de ar no interior do reator apenas o traçador eosina Y não apresentou curto-circuito.

Na etapa com presença de esferas de gel de poliacrilamida e injeção de ar, foi

verificada presença de curto-circuitos em todos os traçadores e condições operacionais, com exceção do traçador verde de bromocresol.

Tabela 8 – Ocorrência de curto-circuitos (Ψ) para cada ensaio.

Ψ	Azul de Metileno	Eosina Y	Cloreto de Lítio	Azul de Bromofenol	Verde de Bromocresol
Água	0,6364	0,5833	0,4487	0,4167	0,7292
Esferas de gel poliacrilamida	0,4645	0,5366	0,4336	0,3855	0,3941
Aeração	0,2381	0,3819	0,1717	0,2500	0,2406
Esferas de gel poliacrilamida e aeração	0,2210	0,0798	0,1759	0,3886	0,3274

5.3 EFICIÊNCIA HIDRÁULICA

Na Tabela 9 é possível notar os resultados médios da eficiência hidráulica nos ensaios com eosina Y, azul bromofenol, verde bromocresol, azul de metileno e cloreto de lítio sem esferas de gel poliacrilamida.

Tabela 9 – Eficiência hidráulica encontrada para cada ensaio no reator UASB ($\lambda \geq 0,75$: boa eficiência hidráulica; $0,75 \leq \lambda < 0,5$: eficiência hidráulica satisfatória; $\lambda \leq 0,5$: eficiência hidráulica pobre).

λ	Azul de Metileno	Eosina Y	Cloreto de Lítio	Azul de Bromofenol	Verde de Bromocresol
Água	0,3999	0,5000	0,4001	0,4999	0,4001
Esferas de gel poliacrilamida	0,6666	0,7000	0,6669	0,5713	0,4001
Aeração	0,8126	0,7857	0,4002	0,7500	0,7273
Esferas de gel poliacrilamida e aeração	0,7500	0,7857	0,4000	0,6249	0,6666

Nos dados analisados dos traçadores eosina Y, bromofenol azul, bromocresol verde e cloreto de lítio observou-se que o resultado da eficiência hidráulica (λ) resultou em 0,50, 0,49995, 0,40007, 0,39990 e 0,40011, respectivamente. Como os valores foram inferiores ou iguais a 0,5, há eficiência hidráulica pobre que pode ter ocorrido pela presença de curto-circuitos hidráulicos.

Nos resultados médios da eficiência hidráulica nos ensaios com eosina Y, azul bromofenol, verde bromocresol, azul de metileno e cloreto de lítio com esferas de gel poliacrilamida.

É possível observar na Tabela 9 que a eficiência hidráulica nos ensaios com eosina Y, bromofenol azul, azul de metileno e cloreto de lítio resultou em valores superiores a 0,5 e inferiores a 0,75, ou seja, a eficiência hidráulica foi satisfatória (de 0,7, 0,57135, 0,66661, e 0,66687, respectivamente).

A eficiência hidráulica do bromocresol verde foi igual a 0,40007, ou seja, eficiência pobre, que pode ter ocorrido devido à recirculação ou curto-circuito hidráulico no interior do reator.

Pelos resultados nos ensaio com aeração é possível notar que com eosina Y e azul de metileno se encontraram com uma eficiência hidráulica maiores que 0,5, e igual a 0,78573 e 0,81259, respectivamente; e a eficiência hidráulica do cloreto de lítio resultou pobre, sendo de 0,40018, provavelmente devido à presença de curto-circuito.

Os com esferas de gel poliacrilamida e aeração observou-se que a eficiência hidráulica da eosina Y resultou em 0,78575, maior que 0,75, e a do cloreto de lítio menor que 0,5, sendo de 0,40004, provavelmente devido a curto-circuitos hidráulicos.

5.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise estatística foi realizada com o objetivo de avaliar a influência das condições abiótica, presença de esferas de gel de poliacrilamida e de aeração e destes fatores ao mesmo tempo no comportamento hidrodinâmico do reator com base nos modelos uniparamétricos.

As análises estatísticas foram realizadas com a ferramenta ANOVA fator duplo com repetição e precisão de 95% e o teste de *Tukey*, com o auxílio do *software* de tratamento estatístico SISVAR 5.3.

Houve a escolha do traçador que apresentou melhores resultados durante o trabalho, sendo ele o eosina Y. As análises foram realizadas com o objetivo de

apresentar diferenças estatísticas com presença de esferas, de ar e com a presença das duas.

Na Tabela 10 são apresentados os resultados das análises estatísticas para os modelos de N-CSTR em série, pequena e grande dispersão com o traçador eosina Y com esferas de gel de poliacrilamida.

Tabela 10 – Dados da análise estatística ANOVA fator duplo com repetição e precisão de 95%

Modelo Uniparamétrico	SQ	gl	MQ	Fc	Pr>Fc	Observação
N-CSTR	10,55	2	4,86	10,582	0,0000	Significante
PD	0,673	2	0,362	2,68	0,0109	Significante
GD	0,569	2	0,302	3,858	0,0098	Significante

Legenda: SQ: soma dos quadrados; gl: grau de liberdade; MQ: média quadrada; Fc: Fator calculado; Pr: probabilidade.

Com os resultados obtidos, pode-se analisar que os três modelos uniparamétricos, se encontraram significantes estatisticamente, devido aos valores do Fator calculado (Fc) e da Probabilidade (Pr) terem sido menores que 0,05, comprovando a diferença estatística na comparação entre os modelos. Através das hipóteses levantadas, pode-se aceitar que a presença de esferas de gel de poliacrilamida e de ar influem no comportamento hidrodinâmico no interior do reator UASB.

Pelos valores encontrados para o fator calculado, observa-se que a presença de esferas de gel de poliacrilamida e ar influenciou mais no modelo N-CSTR com Fc de 10,582, superior aos valores dos modelos uniparamétricos de pequena e grande dispersão de 2,68 e 3,858, respectivamente.

Na Tabela 11 são apresentados os resultados dos testes estatísticos de *Tukey* para os modelos uniparamétricos N-CSTR, PD e GD dos ensaios com eosina Y e esferas de gel de poliacrilamida.

Tabela 11 – Dados estatísticos do Teste de *Tukey*.

Modelo Uniparamétrico	Reator	Médias (erro padrão)	
N-CSTR	PE	0,483	a1
	PA	1,372	a2
	BA	1,281	a2
PD	PE	0,473	a1
	PA	0,392	a2
	BA	0,283	a1 a2
GD	PE	0,209	a1
	PA	0,298	a2
	BA	0,204	a1 a2

Legenda: PE: presença de esferas de gel poliacrilamida; PA: presença de ar; BA: presença de esferas de gel e aeração.

O teste de *Tukey* foi realizado após os resultados obtidos da ANOVA apresentarem diferença entre os modelos. Com o teste de *Tukey* observou-se mais detalhadamente em qual dos ensaios hidrodinâmicos houve maior interferência das esferas de gel de poliacrilamida.

Pelos resultados obtidos na Tabela 11 para o teste de *Tukey* foi possível observar que houve diferença significativa com a presença de esferas de gel poliacrilamida (PE) e menos significância em BA, denotado por a1 e a2 que representam variações ou diferenças nos resultados.

Dentre os três modelos, PE e PA foram os que apresentaram menor diferença, que pode ser resultado das características hidrodinâmicas e hidráulicas para cada modelo.

6 CONCLUSÕES

Através dos dados e resultados obtidos pelas análises e determinações, do tempo de operação do reator UASB, pode-se concluir:

Com a utilização dos traçadores foi possível realizar melhor análise dos ensaios hidrodinâmicos, representando melhor o caminho percorrido por cada traçador no interior do reator.

Nas etapas com os ensaios hidrodinâmicos com presença de esferas de gel de poliacrilamida foi possível notar que estas representaram adequadamente o lodo anaeróbio, com a eosina Y como traçador mais representativo e com menor variação dos parâmetros analisados.

Nas etapas com injeção de ar e na etapa com injeção de ar e presença de esferas de gel de poliacrilamida, a presença de curto-circuitos foi observada em todos os ensaios, demonstrando a influência destes fatores no comportamento hidrodinâmico do reator.

Com exceção dos ensaios 1 e 2 de cloreto de lítio com esferas de gel de poliacrilamida, as demais curvas de DTR apresentaram picos nas concentrações dos traçadores no início das curvas, indicativo da presença de caminhos preferenciais.

Os ensaios com azul bromofenol e verde bromocresol apresentaram maior volume de zonas mortas, nas etapas com água (abiótico) e esferas de gel de poliacrilamida.

Houve presença de curto-circuito nas etapas com água (abiótico) ou esferas de gel de poliacrilamida. As análises com traçador eosina Y foram os único que não apresentaram curto-circuito na etapa com injeção de ar no interior do reator.

Com a presença de esferas de gel de poliacrilamida e injeção de ar, com exceção do traçador verde de bromocresol, todos os demais traçadores apresentarem presença de curto-circuitos.

O traçador Eosina Y apresentou melhor eficiência hidráulica nas etapas com esferas de gel e com aeração e esferas de gel.

As análises estatísticas realizadas com o teste ANOVA e *Tukey* mostraram que houve diferença estatística entre os três modelos uniparamétricos (N-CSRT, PD e GP). Pode-se concluir que houve efeito nas diferentes etapas com: apenas esferas de gel de poliacrilamida ou aeração e aeração e esferas de gel de poliacrilamida.

O melhor comportamento hidrodinâmico apresentado foi com a utilização do traçador eosina Y, tendo os melhores resultados, dentre eles o de coeficiente de correlação.

REFERÊNCIAS

CARVALHO, Karina Q.; SALGADO, Monique T.; PASSIG, Fernando H.; PIRES, Eduardo C. Avaliação Hidrodinâmica de Reator UASB Submetido à Variação Cíclica de Vazão. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 2, p. 226-235, 2008.

COLETTI, Fábio J.; POLVINELLI, Jurandyr; DANIEL, Luiz A. Pós-tratamento por lodos ativados de efluentes provenientes de processos anaeróbios de tratamento de esgoto sanitário: Determinação de constantes cinéticas. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 19, 1997, Ravello, Itália. **Anais...** Ravello. ABES, 1997.

FORESTI, Eugenio. Anaerobic treatment of domestic sewage: established technologies and perspectives. **Water Science and Technology**, v. 45, n. 10, p. 181–186, 2002.

GONÇALVES, Ricardo F.; ARAÚJO, Vera L.; CHERNICHARO, Carlos A. Tratamento Secundário de Esgoto Sanitário Através da Associação em Série de Reatores UASB e Biofiltros Aerados Submersos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 19, Foz do Iguaçu, 1997. **Anais...** Rio de Janeiro. ABES, 1997.

GUJER W.; ZEHNDER A.J.B. **Conversion processes in anaerobic digestion**. *Water Science and Technology*, v 15, 127–167. 1983.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Senso 2010**. Disponível em <http://www.ibge.gov.br/>. Acesso em: 24 de ago. 2013.

JORDÃO, Eduardo P.; PESSÔA, Constantino A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 4. ed. Rio de Janeiro: ABES, 1995.

LETTINGA, Gatzke; ROERSMA, R.; GRIN, P. Anaerobic treatment of raw domestic sewage at ambient temperatures using a granular bed UASB reactor. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 25, n. 7, p. 1701-1723, 1983.

LEVENSPIEL, Octave. **Engenharia das Reações Químicas**. 3 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2000.

METCALF & EDDY. **Wastewater engineering: treatment and reuse**. 4th Ed. New York. McGraw Hill. 2003.

MORGAN-SAGASTUME, Juan M.; JIMÉNEZ, B.; NOYOLA, Adalberto. Tracer Studies in a Laboratory and Pilot Scale UASB Reactor. **Environmental Technology**, v. 18, n. 8, p. 817-825, 1997.

NARNOLI, S. K.; MEHROTRA, Indu. Sludge blanket of UASB reactor: Mathematical simulation. **Water Research**, Roorkee, p.715-726, 1997.

O'ROURKE, J. T.; **Kinetics of anaerobic treatment at reduced temperature**, Tese de PhD. 1968. Universidade de Stanford, California, United States of America. 1968.

PASSIG, Fernando H. **Reator Anaeróbio Híbrido Para o Tratamento de Esgoto Sanitário**. 2005. 148 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2005.

PAULINO, C. M. (2011). **Avaliação da eficiência global e dos reatores UASB da ETE Monjolinho**. Universidade Federal de São Carlos, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia. São Carlos, São Paulo, 2011.

PEÑA, Miguel. R.; MARA, D. D.; AVELLA, G. P. Dispersion and treatment performance analysis of an UASB reactor under different hydraulic loading rates. **Water Research**, v.50, n.3, p. 445-452, 2006.

PIRES, Eduardo C.; RIBEIRO, A. P. Avaliação Preliminar do Comportamento Hidrodinâmico de Reatores Anaeróbios de Escoamento Ascendente e Manta de Lodo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 11, 1992. **Anais...**São Carlos. Escola de Engenharia de São Carlos, 1992.

SINGH, Kripa S.; VIRAGHAVAN, Thiruvengkatachari; BHATTACHARYA, Debarj. Sludge Blanket Height and Flow Pattern in UASB Reactor: Temperature Effects. **Journal Environmental and Engineering**, v. 132, n.8, p. 895-900, 2006.

Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **DIAGNÓSTICOS DOS SERVIÇOS DE ÁGUA E ESGOTOS.**

SEGHEZZO, Lucas. **Anaerobic treatment of domestic wastewater in subtropical regions.** Wageningen. 2004. 172 f. Ph.D. Thesis – sub-department of environmental technology, Wageningen Universid, The Netherlands.

SIQUEIRA, Roberto N., TEIXEIRA, Evandro. C. Avaliação de diversos indicadores de eficiência hidráulica como ferramenta para a análise do desempenho de UTAE. IN: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 20, 1999. Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, RJ: ABES, 1999.

SOUZA, Tais H. Y. **Estudo Hidrodinâmico de Reator Aeróbio-Anóxico de Leito Fixo (RAALF).** 2012. 71 f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2012.

SPERLING, Marcos Von. **Introdução à Qualidade da Água e ao Tratamento de Esgoto, Princípio do Tratamento Biológico de Águas Residuárias.** 2ª Ed. Belo Horizonte, 1996.

YOUNG, Harley. W.; YOUNG, James. C. Hydraulic characteristics of upflow anaerobic filters. **Journal. Environmental. Engeneering.** Fayetteville, v 114, n 3, p. 621–638, dez. 1988.

VAN HAANDEL, Adrianus C.; LETTINGA, Gaetze. **Tratamento anaeróbio de esgotos: Um manual para regiões de clima quente.** Campina Grande: 1994.

VON SPERLING, Marcos. **Introdução à Qualidade da Água e ao Tratamento de Esgoto, Princípio do Tratamento Biológico de Águas Residuárias.** 2ª Ed. Belo Horizonte, 1996