

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

LUCAS EDUARDO FERREIRA DA SILVA

**APLICAÇÃO DA FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL NO ESTUDO
HIDRODINÂMICO DE UM REATOR ANAERÓBIO HÍBRIDO (UAHB)
ABIÓTICO COM VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL**

CAMPO MOURÃO

2018

LUCAS EDUARDO FERREIRA DA SILVA

**APLICAÇÃO DA FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL NO ESTUDO
HIDRODINÂMICO DE UM REATOR ANAERÓBIO HÍBRIDO (UAHB)
ABIÓTICO COM VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL**

Trabalho de Conclusão de Curso, do curso de Engenharia Ambiental, do Departamento Acadêmico de Ambiental (DAAMB), do Câmpus Campo Mourão, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Eudes José Arantes

CAMPO MOURÃO

2018

Dedico este trabalho aos meus pais,
Monica e Valdir, às minhas irmãs, Julia e
Juliane e à minha namorada, Ana Carolina.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me acompanhar em todos os momentos da vida, com muitas bênçãos e proteções, e por me proporcionar forças para a realização deste curso de graduação.

Aos meus pais, Monica Teresinha Ferreira da Silva e Valdir Jorge da Silva, por sempre me apoiarem em todas as decisões que tomei, me dando força para vencer todos os desafios da vida e por toda a confiança que sempre depositaram em mim. Obrigado pelas palavras, gestos e por todo amor que me concedem todos os dias, amo vocês.

Às minhas irmãs, Julia Ferreira da Silva e Juliane Ferreira da Silva, por todo o carinho e amor que me dão e por serem a alegria dos meus dias, vocês foram essenciais para que eu vencesse os momentos difíceis da graduação.

À minha namorada, Ana Carolina Monteiro Landgraf, pelo companheirismo, pelo amor, pelo incentivo dado em vários momentos da graduação e por ter me ajudado diretamente na realização deste trabalho, passando diversas noites comigo na universidade para a obtenção dos resultados desse estudo. Obrigado por ser essa mulher tão especial em minha vida. Seu amor foi fundamental para que toda essa jornada desse certo.

Aos meus avós, Rita Geralda Ferreira Rodrigues, Augusto Luiz Rodrigues, Antonia Rodrigues da Silva e Paulo Jorge da Silva, por todo o esforço que fizeram para me auxiliar em todos esses anos de graduação e pelo carinho dispensado a mim. Agradeço também a todos os meus parentes que me apoiaram nessa caminhada e que acreditaram no meu potencial de alcançar essa conquista.

Aos amigos que fiz em Campo Mourão, em especial ao Alisson Cezar Claudio, Aruani Letícia da Silva Tomoto, Éverton Souza Ramos, Fernando Castro Leal, Gabriela Rocha Nardon Meira, Guilherme de Paula, Guilherme Idelfonso Moreno, Hercules Rocha Montenegro, José Barreto dos Santos Júnior, Rafael Faria Carard e Tadeu Cosme Xavier Lourenço, vocês foram fundamentais nesses 5 anos de curso, alegrando meus dias e me possibilitando viver momentos incríveis.

Aos amigos de Cotia, que mantiveram contato comigo apesar da distância, um agradecimento especial a Caroline Santos, Lucas Silva, Lilian Pereira Figueiredo, Matheus Rodrigues Chacon e Rafael Oliveira Martinez, vocês são muito especiais em minha vida e espero que mantenhamos essa amizade para sempre.

Ao meu primo, Thiago Francisco Henrique Chaves e sua mãe, Maria de Fátima Henrique Chaves, por auxiliarem na minha vinda para Campo Mourão e pelo apoio que me deram durante toda a graduação. Ao meu padrinho, José Jorge da Silva, que também auxiliou muito na minha mudança para Campo Mourão.

Aos meus sogros, Neusa Monteiro Landgraf e Elias Henrique Schwenger Landgraf Júnior, por serem pessoas tão especiais em minha vida, me ajudando de várias maneiras e pelo apoio que sempre me dão.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Eudes José Arantes, por toda a dedicação e paciência em me guiar na realização de diversas pesquisas ao longo do curso e pela amizade criada nesse tempo de convivência.

Aos membros da banca examinadora, Dra. Karina Querne de Carvalho e Dra. Flávia Vieira da Silva Medeiros, por todas as contribuições que permitiram a melhoria deste trabalho.

À todos os professores do curso de Engenharia Ambiental da instituição, por contribuírem para minha vida acadêmica e pessoal, com diversos ensinamentos e valores, em especial ao Prof. Dr. Thiago Morais de Castro, que nunca mediu esforços para me ajudar, sempre contribuindo com suas experiências e conhecimentos.

Enfim, agradeço a todos que por alguma razão fizeram parte da minha formação profissional.

RESUMO

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar o comportamento hidrodinâmico de um reator anaeróbio híbrido abiótico por meio de fluidodinâmica computacional e de ensaios hidrodinâmicos de estímulo-resposta. Para a realização do estudo, foi utilizado um reator anaeróbio híbrido de 17,7 L preenchido com matrizes de fibra vinílica entrelaçada. Inicialmente, para avaliar o comportamento hidrodinâmico do reator e suas características e anomalias hidráulicas, foram realizados três ensaios hidrodinâmicos para cada um dos tempos de detenção hidráulico teóricos testados (TDH de 4 h, 8 h e 12 h), utilizando como traçador a eosina amarelada, sendo que a duração total dos ensaios foi de três vezes os TDH teóricos. Para a realização das simulações em fluidodinâmica computacional, foi utilizado o *software* ANSYS-CFX 19.0, versão acadêmica. A partir dos ensaios hidrodinâmicos, foi possível notar nas curvas de variação da concentração de eosina ao longo do tempo, adiantamentos médios dos picos de concentração de 46 %, 66 % e 53 % para os TDH de 4 h, 8 h e 12 h, respectivamente, sendo um indicativo da presença de caminhos preferencias no interior do reator. Essas curvas também permitiram a observação do lento decaimento da concentração do traçador ao longo do tempo, caracterizando o efeito de cauda longa, além da presença de alguns picos no decorrer das curvas, sendo um indicativo de forte recirculação interna no interior do reator. Com base no ajuste dos dados experimentais aos modelos uniparamétricos, observou-se que o regime de fluxo predominante no reator é o de mistura completa. Por meio do cálculo das características e anomalias hidráulicas, verificou-se que a maioria dos ensaios apresentaram volumes positivos de zonas mortas, o que pode ter influenciado no lento decaimento da curva de concentração do traçador. O número de Reynolds indicou regime de escoamento laminar, não houve a presença de curtos-circuitos hidráulicos nos três TDH testados e foi observado que a maioria dos ensaios apresentou eficiências hidráulicas insatisfatórias. As simulações em CFD, permitiram a obtenção do volume de zonas mortas no reator, que foi de aproximadamente 13 % nos três TDH simulados, além de terem permitido verificar a presença de caminhos preferencias no escoamento do fluido, entretanto não houve a validação das simulações, devido ao erro relativo ter sido acima de 50 % entre o volume de zonas mortas real e simulado.

Palavras-chave: Simulações numéricas. Eosina Y. Meio suporte.

ABSTRACT

The main objective of this work was to evaluate the hydrodynamic behavior of a hybrid anaerobic reactor by means of computational fluid dynamics and hydrodynamic stimulus-response tests. For a study, a 17,7 L hybrid anaerobic filled with mats of interlaced vinyl fiber was used. In order to evaluate the hydrodynamic behavior and its hydraulic characteristics and anomalies, three hydrodynamic tests were performed for each of the hydraulic detention methods tested (HRT of 4 h, 8h and 12 h) using a yellowish eosin tracer, and the total duration of the tests was three times the theoretical HRT. For the computational fluid dynamics simulations, the ANSYS-CFX 19.0 software, academic version, was used. From the hydrodynamic tests, it was possible to recognize the variation curves of the eosin concentration over time, mean advances of the concentration peaks of 46%, 66% and 53% for the HRT of 4 h, 8 to 12 h, respectively, being indicative of the presence of non-interior paths of the reactor. The curves also allowed an observation of the slow decay of tracer marking over time, characterizing the long tail effect, besides the presence of some peaks along the curves, being an indicative of strong internal recirculation inside the reactor. Based on the adjustment of the experimental data to the uniparametric models, it was observed that the predominant flow regime in the reactor is that of complete mixing. By calculating the hydraulic characteristics and anomalies, it was verified that in most cases the positive volumes of dead zones, which may have been influenced by the slow decay of the tracer concentration curve. The Reynolds number indicated a laminar flow regime, there were no hydraulic short-circuits in the three HRT tested and it was observed that the majority of the tests had unsatisfactory hydraulic efficiencies. The CFD simulations allowed to obtain the volume of dead zones in the reactor, which was approximately 13 % in the three simulated HRT, besides allowing to verify the presence of paths preference in the flow of the fluid, however there was no validation of the simulations, due to the relative error being above 50 % between the volume of real and simulated dead zones.

Key words: Numerical simulations; Eosin Y; Half support.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desenho esquemático das principais anomalias verificadas em reatores	19
Figura 2 - a) Desenho esquemático do reator UAHB em escala de banca. b) Foto do reator UAHB...	24
Figura 3 - Matrizes de fibra vinílica entrelaçada utilizadas como material suporte no reator UAHB abiótico.....	25
Figura 4 - Curva de calibração da eosina Y em espectrofotômetro de marca HACH® UV-VIS, modelo DR5000	26
Figura 5 - Geometria do reator UAHB em escala de bancada utilizado nas simulações numéricas no software ANSYS-CFX 19.0	31
Figura 6 - Local de entrada do fluido no reator UAHB e malha gerada para as simulações numéricas no software ANSYS-CFX 19.0	32
Figura 7 - Curvas de variação da concentração de eosina Y para o reator UAHB abiótico, operando com TDH de 4 h: (a) Ensaio 1; (b) Ensaio 2; (c) Ensaio 3.....	33
Figura 8 - Curvas de variação da concentração de eosina Y para o reator UAHB abiótico, operando com TDH de 8 h: (a) Ensaio 1; (b) Ensaio 2; (c) Ensaio 3.....	34
Figura 9 - Curvas de variação da concentração de eosina Y para o reator UAHB abiótico, operando com TDH de 12 h: (a) Ensaio 1; (b) Ensaio 2; (c) Ensaio 3.....	34
Figura 10 - Curvas de distribuição do tempo de residência para o reator UAHB abiótico operando com TDH de 4 h: (a) Ensaio 1; (b) Ensaio 2; (c) Ensaio 3	36
Figura 11 - Curvas de distribuição do tempo de residência para o reator UAHB abiótico operando com TDH de 8 h: (a) Ensaio 1; (b) Ensaio 2; (c) Ensaio 3	37
Figura 12 - Curvas de distribuição do tempo de residência para o reator UAHB abiótico operando com TDH de 12 h: (a) Ensaio 1; (b) Ensaio 2; (c) Ensaio 3	37
Figura 13 - Histograma da porcentagem do fluido (água) com velocidade inferior a $3,48 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ para o reator operado com TDH de 4 h.....	44
Figura 14 - Histograma da porcentagem do fluido (água) com velocidade inferior a $1,74 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ para o reator operado com TDH de 8 h.....	45
Figura 15 - Histograma da porcentagem do fluido (água) com velocidade inferior a $1,16 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ para o reator operado com TDH de 12 h.....	46
Figura 16 - Comportamento da velocidade da água no interior do reator UAHB para a simulação com TDH de 4 h.....	47
Figura 17 - Comportamento da velocidade da água no interior do reator UAHB para a simulação com TDH de 8 h.....	47
Figura 18 - Comportamento da velocidade da água no interior do reator UAHB para a simulação com TDH de 12 h.....	48
Figura 19 - Histograma da porcentagem de linhas de corrente em função do tempo necessário para que percorram todo o reator, considerando a simulação realizada com TDH de 4 h.....	49
Figura 20 - Histograma da porcentagem de linhas de corrente em função do tempo necessário para que percorram todo o reator, considerando a simulação realizada com TDH de 8 h.....	50
Figura 21 - Histograma da porcentagem de linhas de corrente em função do tempo necessário para que percorram todo o reator, considerando a simulação realizada com TDH de 12 h.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo de estudos utilizando meio suporte em sistemas de tratamento de efluentes	18
Tabela 2 - Resumo de estudos que avaliaram o comportamento hidrodinâmico de reatores	21
Tabela 3 - Resumo de estudos sobre simulações de reatores com o uso de ferramentas de fluidodinâmica computacional (CFD).....	23
Tabela 4 - Modelos teóricos uniparamétricos utilizados no ajuste das curvas experimentais	27
Tabela 5 - Equações para determinação da presença de zonas mortas, curtos-circuitos hidráulicos, eficiência hidráulica e número de Reynolds	28
Tabela 6 - Parâmetros utilizados no <i>software</i> para a realização das simulações nos diferentes tempos de detenção testados	32
Tabela 7 - Resultados dos modelos de dispersão e de tanques em série obtidos por meio do ajuste dos dados experimentais para os TDH de 4 h, 8 h e 12 h	38
Tabela 8 - Coeficientes de correlação obtidos por meio do ajuste dos dados experimentais com os modelos teóricos para os TDH de 4 h, 8 h e 12 h	38
Tabela 9 - Volume de zonas mortas, número de Reynolds, curtos-circuitos e eficiência hidráulica para os TDH de 4 h, 8 h e 12 h	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- APBR - *Anaerobic Packed Bed Reactor* (Reator Anaeróbio de Leito Fixo);
- ASBR – *Anaerobic Sequential Batch Reactor* (Reator Anaeróbio Sequencial em Batelada);
- CAD - *Computer-Aided Design*;
- CFD - *Computational Fluid Dynamics*;
- DP – Desvio padrão;
- DTR – Distribuição do Tempo de Residência;
- GD – Grande Dispersão;
- IC – Inclinação da curva de calibração;
- LD – Limite de detecção;
- LQ – Limite de quantificação;
- N-CSTR - Tanques de Mistura em Série;
- NUPEA – Núcleo de Pesquisa em Engenharia Ambiental;
- PD - Pequena Dispersão;
- RAALF – Reator anaeróbio aeróbio de leito fixo;
- RCAALF - Reatores combinados anaeróbio-aeróbio de leito fixo;
- TDH – Tempo de Detenção Hidráulico;
- UAHB – *Upflow Anaerobic Hybrid* (Reator Anaeróbio Híbrido);
- UASB - *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (Reator anaeróbio de manta de lodo e fluxo ascendente);
- UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná;

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	14
2.1 OBJETIVO GERAL	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3 REFERENCIAL TEÓRICO	15
3.1 REATORES ANAERÓBIOS HÍBRIDOS.....	15
3.2 MEIO SUPORTE EM REATORES.....	16
3.3 ESTUDO HIDRODINÂMICO DE REATORES.....	19
3.4 FERRAMENTAS DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD).....	22
4 MATERIAL E MÉTODOS	24
4.1 REATOR UAHB	24
4.2 ENSAIOS HIDRODINÂMICOS.....	25
4.3 LIMITE DE DETECÇÃO, LIMITE DE QUANTIFICAÇÃO E LINEARIDADE DO MÉTODO ANALÍTICO	28
4.4 ESTUDO COMPUTACIONAL	29
4.5 SIMULAÇÕES DO REATOR UAHB ABIÓTICO EM ESCALA DE BANCADA..	31
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
5.1 ENSAIOS HIDRODINÂMICOS.....	33
5.2 CARACTERÍSTICAS E ANOMALIAS HIDRÁULICAS.....	41
5.3 SIMULAÇÕES DO REATOR UAHB ABIÓTICO EM ESCALA DE BANCADA..	43
6 CONCLUSÕES	52
7 RECOMENDAÇÕES	53
REFERÊNCIAS	54

1 INTRODUÇÃO

O lançamento de esgotos domésticos e efluentes industriais tem acarretado num dos mais graves problemas ambientais vivenciados por todo o mundo, que é a poluição de corpos hídricos superficiais. Esse tipo de poluição causa diversos efeitos negativos sobre a saúde ambiental, deteriorando a qualidade da água, o que influencia diretamente nos usos preponderantes dos corpos hídricos (LEITE, 2004).

O tratamento destes efluentes pode se dar de inúmeras formas, que são baseadas em processos físico-químicos, biológicos e em operações físicas, sendo que, na maioria das vezes, a utilização de processos biológicos constitui-se a opção mais econômica. Dentre os métodos biológicos conhecidos, vale ressaltar os sistemas anaeróbios no tratamento de águas residuárias, pois apresentam vantagens em relação aos sistemas biológicos aeróbios convencionais, como o baixo consumo de energia, o alto grau de estabilização do lodo, uma menor produção de lodo em excesso e a produção de biogás aproveitável para a geração de energia (LETTINGA et al., 1980; FORESTI et al., 1999; PASSIG, 2005).

Neste contexto, destaca-se a aplicação dos processos anaeróbios por meio de reatores biológicos, principalmente pelos reatores anaeróbios de manta de lodo e fluxo ascendente (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket – UASB*), entretanto, mesmo essa tecnologia sendo consolidada no Brasil, estes sistemas ainda apresentam algumas desvantagens, principalmente pelo fato de que, embora possuam uma boa eficiência de remoção da matéria orgânica biodegradável e de sólidos suspensos totais, a qualidade dos efluentes provenientes destes reatores não atendem as normas ambientais previstas pela legislação, tornando-se assim necessário a adoção de um pós-tratamento (CHERNICHARO, 1997; CAVALCANTI, 2005; GONÇALVES, 2012).

Dessa forma, para minimizar as desvantagens supracitadas e melhorar o desempenho e a estabilidade dos reatores anaeróbios, surgiram estudos com modelos modificados destes sistemas, que foram denominados de reatores híbridos.

Para se avaliar o desempenho dos reatores biológicos é de extrema importância o conhecimento de seu comportamento hidrodinâmico, já que este tipo de estudo possibilita a detecção de falhas operacionais e de projeto, sendo que as mais comuns são as deficiências na distribuição do afluente, que podem formar caminhos preferenciais, regiões de zonas mortas e curtos-circuitos, afetando diretamente na

eficiência de tratamento do sistema (WERNER; EDUARDO, 1996; KREUTZ et al., 2018).

A modelagem hidrodinâmica pode ser realizada por meio de ensaios de estímulo e resposta, em que o sistema é perturbado pela utilização de traçadores inertes, como a eosina Y, o verde de bromocresol, o azul de bromofenol, dentre outros. A informação resultante deste traçador pode ser utilizada em conjunto com modelos de escoamento para prever o desempenho dos reatores.

Nesse cenário, a fluidodinâmica computacional (*Computational Fluid Dynamics* - CFD) representa uma ferramenta para modelar os reatores anaeróbios, sendo utilizada para analisar os aspectos hidrodinâmicos e as características de projeto dos reatores, que possuem relação direta com a eficiência de tratamento destes sistemas. Essa ferramenta se vale de simulações numéricas para realizar uma variedade de estudos, como avaliar o comportamento do escoamento de fluidos, simular transferências de calor e massa e também analisar reações químicas, além de outros tipos de utilizações em uma vasta gama de áreas de aplicação industrial e não industrial (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995).

Com base no disposto acima, o objetivo deste trabalho será comparar os resultados obtidos nos ensaios hidrodinâmicos experimentais com testes computacionais em CFD de um reator anaeróbio híbrido (*Upflow Anaerobic Hybrid* - UAHB).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o comportamento hidrodinâmico de um reator anaeróbio híbrido abiótico por meio de fluidodinâmica computacional (CFD).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar o objetivo geral, têm-se os seguintes objetivos específicos:

- Realizar ensaios hidrodinâmicos de estímulo-resposta para determinação dos parâmetros hidrodinâmicos utilizando eosina Y como traçador;
- Simular o comportamento hidrodinâmico do reator UAHB com o uso de *softwares* de fluidodinâmica computacional (CFD);
- Comparar as características hidrodinâmicas da simulação numérica com os dados experimentais;
- Determinar, por meio de ferramentas de CFD, as características dos escoamentos e;
- Calcular as anomalias hidrodinâmicas (volume de zonas mortas e presença de curtos-circuitos hidráulicos) e as características hidráulicas do reator (eficiência hidráulica e número de Reynolds).

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 REATORES ANAERÓBIOS HÍBRIDOS

Os reatores anaeróbios híbridos podem ser descritos como sistemas que se originam da combinação entre duas ou mais concepções de reatores biológicos em uma mesma unidade, entretanto essa denominação acabou ficando particularizada para os reatores que combinam o UASB na parte inferior de suas estruturas e o filtro anaeróbio em suas partes superiores (SCHRANK, 2000; PASSIG, 2005; CAVALCANTI, 2005).

A necessidade de desenvolvimento destes tipos de reatores surgiu a partir das limitações apresentadas pelos reatores UASB, já que estes limites prejudicam a transferência de massa do processo e como esses sistemas apresentam um maior potencial de formação de espuma, foram necessárias modificações em sua concepção para aumentar a eficiência de remoção da matéria orgânica. Diante disto, o reator anaeróbio híbrido (UAHB) foi elaborado para atender a estas necessidades, sendo constituído por um fluxo ascendente por meio de um leito denso de lodo na parte inferior do reator e de um leito de lodo estacionário, contendo material suporte para a adesão celular (GUIOT; VAN DEN BERG, 1984; KENNEDY; GUIOT, 1986).

Schrank (2000) relata em sua pesquisa que os reatores híbridos são capazes de acumular em suas partes inferiores, elevadas concentrações de lodo, que permanece retido nos reatores devido a camada de enchimento introduzida em suas partes superiores. Essa camada (zona empacotada) funciona como um separador gás-sólido-líquido, além de proporcionar o polimento dos efluentes, o que reflete numa maior estabilidade do processo em condições de operação transiente.

Lima et al. (2015) dizem em seu estudo que estes sistemas híbridos são o resultado da combinação entre as vantagens do UASB e do filtro anaeróbio em um só reator, e têm por objetivo a redução das desvantagens de cada um destes reatores quando são operados separadamente.

Os reatores híbridos vêm sendo aplicados para o tratamento de uma vasta gama de águas residuárias industriais de elevadas cargas orgânicas, como os efluentes de matadouro, de produtos lácteos, farmacêuticos e de águas residuais oleosas (TAWFIK; EL-KAMAH, 2012).

Desse modo, verifica-se que o desenvolvimento deste tipo de tecnologia tem o intuito de melhorar a eficiência de tratamento de águas residuárias, por meio da combinação dos benefícios de cada um dos sistemas que compõem os reatores híbridos.

3.2 MEIO SUPORTE EM REATORES

Um dos fatores mais importantes que deve ser considerado na seleção da configuração de reatores anaeróbios, diz respeito a existência de condições que favoreçam a imobilização de biomassa ativa, uma vez que a não retenção desta biomassa no interior destes sistemas, pode influenciar diretamente no desempenho do tratamento (KATO et al, 1999).

O meio suporte é um material que tem por finalidade a retenção de sólidos no interior de reatores, que pode ocorrer tanto pela formação de um biofilme na superfície do material quanto pela retenção de sólidos nos interstícios do meio ou abaixo da camada suporte (CHERNICHARO, 1997). Ainda de acordo com Chernicharo (1997), as principais finalidades do material suporte são:

- a) atuar como um dispositivo para separar os sólidos dos gases;
- b) auxiliar na uniformização do escoamento no reator;
- c) melhorar o contato entre os constituintes do despejo afluente e os sólidos biológicos contidos no reator;
- d) permitir o acúmulo de grande quantidade de biomassa e conseqüente aumento do tempo de retenção celular;
- e) atuar como uma barreira física, não possibilitando o carreamento dos sólidos para fora do sistema de tratamento.

Segundo Araújo Júnior (2006), a utilização de meio suporte para a imobilização de biomassa em reatores vem sendo estudada como uma alternativa para aprimorar a configuração desses sistemas de tratamento, já que neste caso, a formação do biofilme sobre a superfície do meio suporte permite a criação de microambientes especiais, que auxiliam na interação entre as espécies envolvidas no processo, garantindo assim grande estabilidade das colônias. Porém, o emprego dessa alternativa traz consigo alguns questionamentos, que estão relacionados com a eficiência dos reatores que possuem biomassa imobilizada, pois pode haver um

grande decréscimo na velocidade global das reações, devido a influência dos fluxos de massa entre as fases líquida e sólida no processo de conversão.

Por esse motivo, a escolha do material suporte adequado torna-se uma etapa importante no desenvolvimento de reatores com leito fixo, uma vez que, segundo Araujo et al. (2016), características como geometria, dimensões e porosidade, podem exercer considerável influência nesse tipo de reator. Esses mesmos autores ainda destacam que diversos meios suportes com altas áreas superficiais têm sido desenvolvidos atualmente, entretanto, a grande maioria deles não consegue conciliar simultaneamente altos valores de porosidade no leito reacional com uma boa capacidade de aderência da biomassa, necessitando de frequentes contra lavagens para remover o excedente de biofilme presente nos meios.

Pontes (2009) relata em seu estudo que para uma adequada escolha do meio em que ocorrerá a adesão da biomassa, deve-se levar em consideração tanto as características físicas e químicas do material quanto da água residuária que será tratada. Chernicharo (1997) cita diversos materiais que são utilizados como meio suporte em reatores biológicos, sendo eles: quartzo, blocos cerâmicos, concha de ostras e mexilhões, calcário, anéis de plástico, cilindros vazados, blocos modulares de PVC, granito, esferas de poliuretano e bambu.

Diversos autores desenvolveram estudos com o uso de diferentes meios suportes, com o intuito de obter um melhor desempenho de tratamento em reatores. A Tabela 1 traz um resumo de alguns trabalhos que foram realizados utilizando meios suportes no tratamento.

Tabela 1 - Resumo de estudos utilizando meio suporte em sistemas de tratamento de efluentes

Referência	Tipo de Efluente	Inóculo	Tipo de Recheio	V (L)	TDH	Resultados Obtidos
Godinho (2017)	Esgoto sintético	Lodo de ETE	Anéis corrugados de Policloreto de Polivinila (PVC)	22,1	4, 8 e 12 horas	Remoção de DQO igual a 87, 81 e 68 % e de sólidos totais de 59, 58 e 53 %, para os TDH de 4, 8 e 12 horas, respectivamente; Melhor produção de biogás com TDH de 8 horas e aumento da carga orgânica volumétrica.
Belini (2016)	Esgoto sanitário sintético	Lodo anaeróbio flocculento de RALF	Anéis corrugados de Policloreto de Polivinila (PVC).	19,37	6, 8 e 12 horas	Remoção de DQO _{bruta} de 79,3; 75,1 e 79,6 %.
Kreutz (2012)	Abatedouro bovino	Lodo anaeróbio de abatedouro bovino	Argila expandida e espuma de poliuretano	4,75	14, 11 e 8 horas (Etapas 1 e 2); 11 e 8 horas (Etapa 3)	Remoção de DQO de 80, 49 e 68 %, para as etapas 1 e 2 e de 54 e 86 %, para a etapa 3; Remoção de SS de 93, 89 e 92 %, para as etapas 1 e 2 e de 65 e 91% para a etapa 3.
Baettker (2015)	Água residuária sintética à base de glicose	Lodo de ETE	Carvão vegetal, cerâmica de argila e borracha de pneu	1,3	8 e 4 horas	Remoção de DQO (%): Carvão vegetal: 94 e 79 %; cerâmica de argila: 81 e 60%; borracha de pneu: 88 e 63%, para os TDH de 8 e 4 horas, respectivamente

Fonte: Autoria própria (2018).

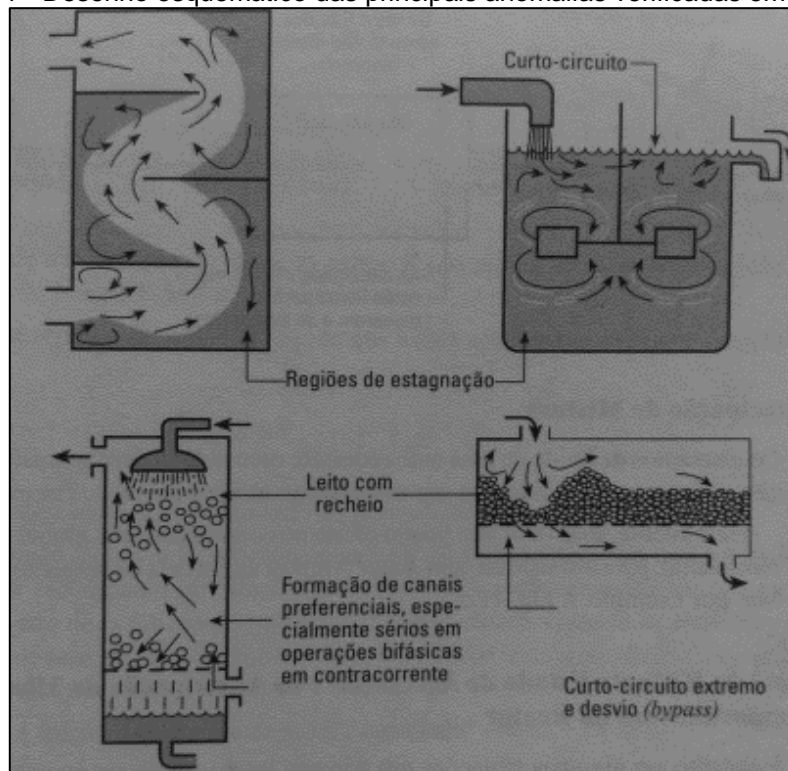
Legenda: V = volume; TDH = tempo de detenção hidráulica; ETE = estação de tratamento de esgoto; DQO = demanda química de oxigênio; SS = sólidos suspensos.

3.3 ESTUDO HIDRODINÂMICO DE REATORES

Os estudos hidrodinâmicos de reatores biológicos possibilitam a verificação da existência e a quantificação do volume de zonas mortas e curtos-circuitos hidráulicos, ou seja, possibilitam a identificação das anomalias hidráulicas presentes nos reatores. Além disso, permitem a obtenção de curvas de distribuição dos tempos de detenção hidráulico (TDH) na unidade, constituindo-se uma informação que propicia o conhecimento da fração do líquido que permanece no reator para cada tempo de detenção (CASTRO, 2010).

Entretanto, a aplicação mais importante deste tipo de estudo, diz respeito ao uso das curvas de distribuição do tempo de residência (DTR) para a avaliação do desempenho de reatores no tratamento de águas residuárias, já que possibilita o conhecimento do que está ocorrendo no interior do reator, permitindo identificar assim quais as anomalias que estão causando os desvios de idealidade do escoamento na unidade, como a formação de caminhos preferenciais do fluido e as zonas mortas (Figura 1) (LEVENSPIEL, 2000).

Figura 1 - Desenho esquemático das principais anomalias verificadas em reatores



Fonte: Adaptado de Levenspiel (2000).

Segundo Thackston, Shields e Schroeder (1987), as zonas mortas são regiões onde as parcelas do fluido escoado apresentam tempos de residência muito longos, ou seja, permanecem por mais tempo dentro de um reator, o que é prejudicial para a eficiência de tratamento de efluentes, uma vez que essas zonas são inoperantes com o fluxo principal do escoamento.

A obtenção das curvas DTR pode ser realizada a partir de uma técnica experimental, conhecida como técnica de estímulo-resposta, que consiste na injeção de um traçador inerte no sistema para avaliar quantitativamente os parâmetros cinéticos que ocorrem nos reatores (LEVENSPIEL, 2000; SALGADO, 2008).

De acordo com Carvalho et al. (2008), a hidrodinâmica de reatores pode influenciar na velocidade das reações biológicas, devido as variações na taxa de transferência de massa e na distribuição das reações ao longo do reator. Em função do escoamento imposto, podem existir regiões com diferentes composições no interior do reator, que são resultantes da distribuição de biomassa e do encadeamento das reações bioquímicas.

A determinação do regime hidráulico que melhor representa o comportamento de um reator depende das condições de fluxo e do padrão de mistura que ocorrem no interior destes sistemas, considerando que o tipo de escoamento é determinado a partir do formato e das estruturas hidráulicas de entrada e saída do fluxo. Os reatores podem apresentar dois tipos de fluxo, sendo eles: intermitente (batelada) e contínuo (regimes de fluxo em pistão, de fluxo disperso, mistura completa e associações de células em série e/ou em paralelo) (TOSCANI, 2010).

Neste sentido, nota-se que os estudos hidrodinâmicos resultam em informações importantes para o aperfeiçoamento das características destes sistemas de tratamento de efluentes. Na Tabela 2 são apresentados alguns trabalhos que aplicaram ensaios hidrodinâmicos com o uso de diferentes tipos de traçadores para a avaliação do comportamento de configurações distintas de reatores.

Tabela 2 - Resumo de estudos que avaliaram o comportamento hidrodinâmico de reatores

Referência	Tipo de fluido	Traçador	Tipo de Reator	V (L)	TDH (h)	Resultados Obtidos
Carvalho et al. (2008)	Esgoto doméstico	Eosina Y	UASB	160	10	Comportamento do reator próximo ao de mistura completa (sem variação de vazão afluente) e próximo ao fluxo pistonado (com amplitude de variação de vazão afluente); Observou o fenômeno de cauda longa e presença de zonas mortas.
Kreutz (2012)	Abatedouro bovino	Eosina Y	RAALF	4,75	8	Comportamento tendendo ao de mistura completa; Foi constatado presença de zonas mortas, recirculações e efeito de cauda longa.
Godinho (2017)	Esgoto sintético	Eosina Y	UAHB	22,1	12, 8 e 4	O regime de escoamento tendeu ao de mistura completa em série; Observou-se efeito de cauda longa, presença de zonas mortas e eficiência hidráulica média de 65 %.
Passig e Blundi (1996)	Água de torneira	Rodamina WT	Filtro anaeróbio	-	24	Ocorrência do fenômeno de cauda longa, o qual os autores atribuíam à provável presença de zonas mortas, de recirculação interna e/ou interação do traçador com o meio suporte.

Fonte: Autoria própria (2018).

Legenda: V = volume; TDH = tempo de detenção hidráulica; UASB = reator anaeróbio de manta de lodo e fluxo ascendente (do inglês *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*); RAALF = reator anaeróbio aeróbio de leito fixo; UAHB = reator anaeróbio híbrido.

3.4 FERRAMENTAS DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD)

A fluidodinâmica computacional pode ser conceituada como a utilização de métodos computacionais para a realização de simulações numéricas e soluções matemáticas de modelos aplicados à dinâmica dos fluidos, que se valem da solução das equações de conservação da quantidade de movimento, de massa e da energia para efetuar as simulações (D'BASTIANI, 2017).

Segundo Franzmann et al. (2003), a fluidodinâmica computacional envolve estudos de modelagem matemática, a geração de malhas numéricas em geometrias complexas, métodos numéricos e métodos de visualização científica. Uma parte do processo de modelagem consiste na análise individual de um equipamento ou acessório, que tem por objetivo a obtenção de informações sobre os padrões de escoamento do fluido, para auxiliar na melhoria da performance de alguns sistemas, como os reatores híbridos.

A utilização de ferramentas de CFD possui ao menos três fundamentos principais, sendo eles o pré-processamento, a solução e o pós-processamento dos dados. O pré-processamento constitui-se o momento em que alguns parâmetros são definidos, como o modelo que irá caracterizar o problema estudado, a criação da geometria por meio de ferramentas de desenho assistido por computador (*Computer Aided Design – CAD*) disponíveis no *software*, a geração de uma malha considerando a geometria estudada, além das condições de contorno e propriedades físicas e químicas associadas ao escoamento do fluido. Já na etapa de solução, ocorre a seleção do método numérico que será utilizado para solucionar as equações propostas no estudo. Por fim, na fase de pós-processamento, há a representação dos resultados obtidos por meio de gráficos, figuras e tabelas (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995).

Dessa forma, percebe-se que a fluidodinâmica computacional é uma ferramenta que pode contribuir para o desenvolvimento de reatores mais eficientes no tratamento de águas residuárias, já que é uma informação que pode contribuir muito para a etapa de projeto destes sistemas.

Na Tabela 3 é apresentado um resumo de alguns trabalhos que realizaram estudos computacionais via CFD de diferentes configurações de reatores.

Tabela 3 - Resumo de estudos sobre simulações de reatores com o uso de ferramentas de fluidodinâmica computacional (CFD)

Referência	Tipo de fluido	Tipo de Reator	V (L)	Resultados Obtidos
Cruz (2013)	Água potável e ar	UASB	18	Distribuição mais uniforme da água no reator operando com injeção de ar; Validação de uma de suas simulações com o modelo experimental, devido à proximidade nos resultados de zonas mortas entre a simulação e os ensaios hidrodinâmicos.
Koerich e Rosa (2016)	Vinhaça	ASBR	125 e 1000	Verificou-se presença de zonas estagnadas no interior do reator e que Diferentes vazões podem danificar a biomassa, devido a tensão de cisalhamento e ao arraste da biomassa para fora do reator.
D'Bastini (2017)	Água, lodo de reator UASB e biogás	UASB	140	Obtenção de resultados similares ao da literatura; A força de arraste é a que exerce a maior influência no perfil do escoamento gás/líquido; Nas simulações trifásicas, verificou-se que o gás foi o principal responsável pela qualidade da mistura dentro do reator, reduzindo de 44% o percentual de zonas mortas no reator para 0,02%
Okiyama (2014)	Água	APBR	3,5	O simulador CFD representou de forma adequada os dados experimentais; Operando com vazão de 2,3 L dia ⁻¹ verificou-se que o simulador não conseguiu se ajustar aos modelos experimentais para reator não ideal.

Fonte: Autoria própria (2018).

Legenda: V = volume; UASB = reator anaeróbio de manta de lodo e fluxo ascendente (do inglês *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*); ASBR = reator anaeróbio sequencial em batelada; APBR = reator anaeróbio de leito fixo (do inglês *Anaerobic packed bed reactor*).

4 MATERIAL E MÉTODOS

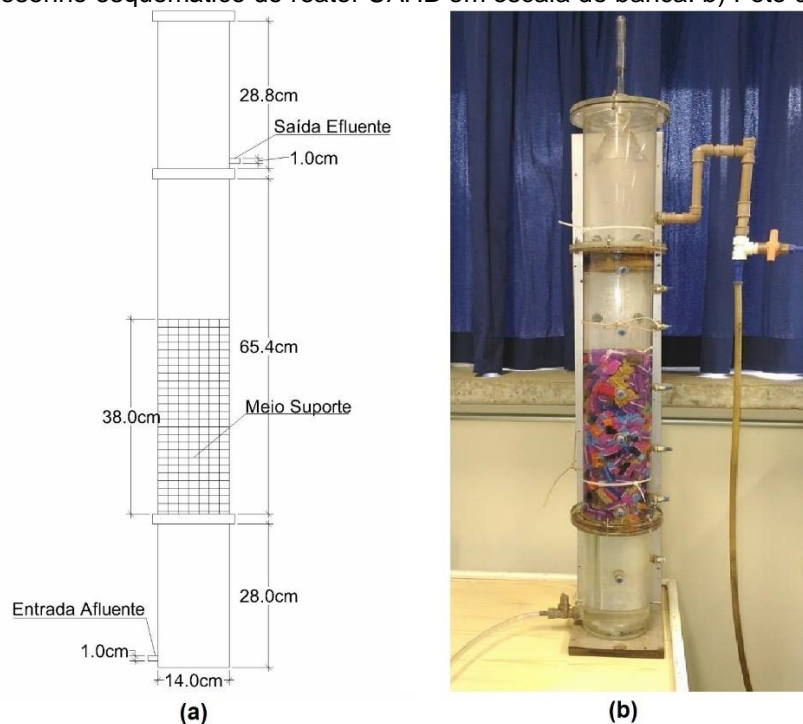
O presente trabalho foi desenvolvido no Núcleo de Pesquisa de Engenharia Ambiental (NUPEA) e no anexo externo do Laboratório de Saneamento (C-104), da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), câmpus Campo Mourão.

Para alcançar os objetivos definidos nesta pesquisa, o estudo foi dividido em algumas etapas, que contemplaram a realização de ensaios hidrodinâmicos, o cálculo das anomalias hidráulicas no reator e simulações numéricas por meio de ferramentas de fluidodinâmica computacional.

4.1 REATOR UAHB

O reator UAHB abiótico em escala de bancada é constituído de uma coluna cilíndrica de *plexiglass*, com volume útil de 21 L e volume total de 22 L, sem meio suporte e volume útil de 17,7 L e total de 18,7 L, com o meio suporte, diâmetro interno de 0,15 m e altura de 1,22 m. O separador trifásico (gás-sólido-líquido) está acoplado à coluna cilíndrica, encontrando-se a uma distância de 0,95 m da base do reator, com altura total de 0,25 m e 0,14 m de diâmetro (Figura 2).

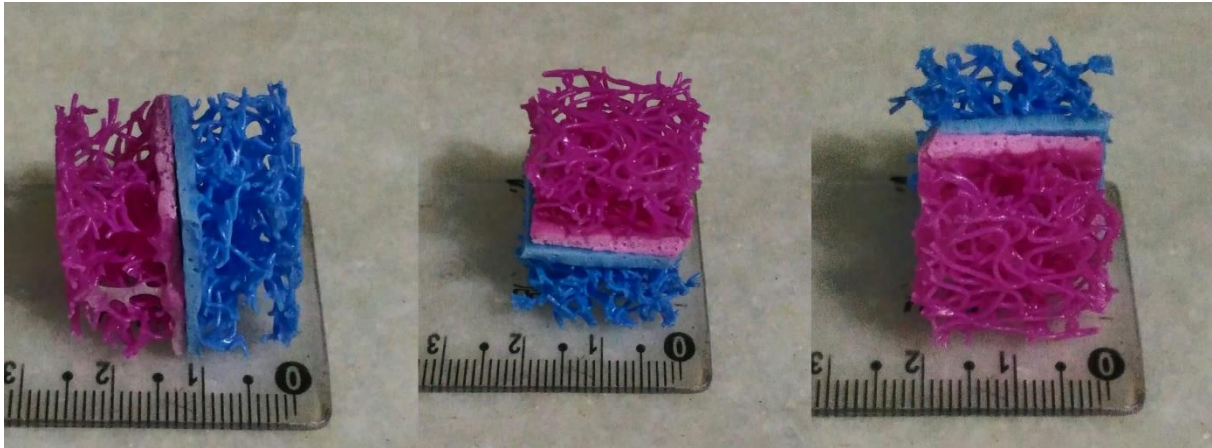
Figura 2 - a) Desenho esquemático do reator UAHB em escala de banca. b) Foto do reator UAHB



Fonte: Autoria própria (2018).

O material suporte instalado na região central do reator é composto por matrizes de fibra vinílica entrelaçada (Figura 3), possuindo dimensões de 2,5x2x2 cm, 3,53 g de massa, 3,0 mL de volume, uma densidade de 1,18 g mL⁻¹ e porosidade de 70 %. As matrizes ocuparam um volume de 3,3 L do reator, o que corresponde a aproximadamente 15,71 % de seu volume útil e 19,55 % de seu volume total.

Figura 3 - Matrizes de fibra vinílica entrelaçada utilizadas como material suporte no reator UAHB abiótico



Fonte: Autoria própria (2018).

Neste caso, como o reator é abiótico sua alimentação foi realizada com água potável, que se encontrava armazenada em um recipiente de 60 L, sendo conduzida ao reator por meio de uma bomba peristáltica, marca Provitec®, modelo DM 5000.

4.2 ENSAIOS HIDRODINÂMICOS

Para avaliar o comportamento hidrodinâmico do reator UAHB abiótico foram realizados três ensaios de estímulo e resposta para tempos de detenção hidráulico (TDH) de 4 h, 8 h e 12 h, utilizando-se como traçador o corante eosina amarelada (C₂₀H₆Br₄Na₂O₅), de peso molecular igual a 691,96 g, que foi injetado na entrada do reator em um tempo de 10 s, com o auxílio de uma seringa de 10 mL. O preparo do traçador se deu pela diluição de 0,20 g de eosina em 10 mL de água destilada.

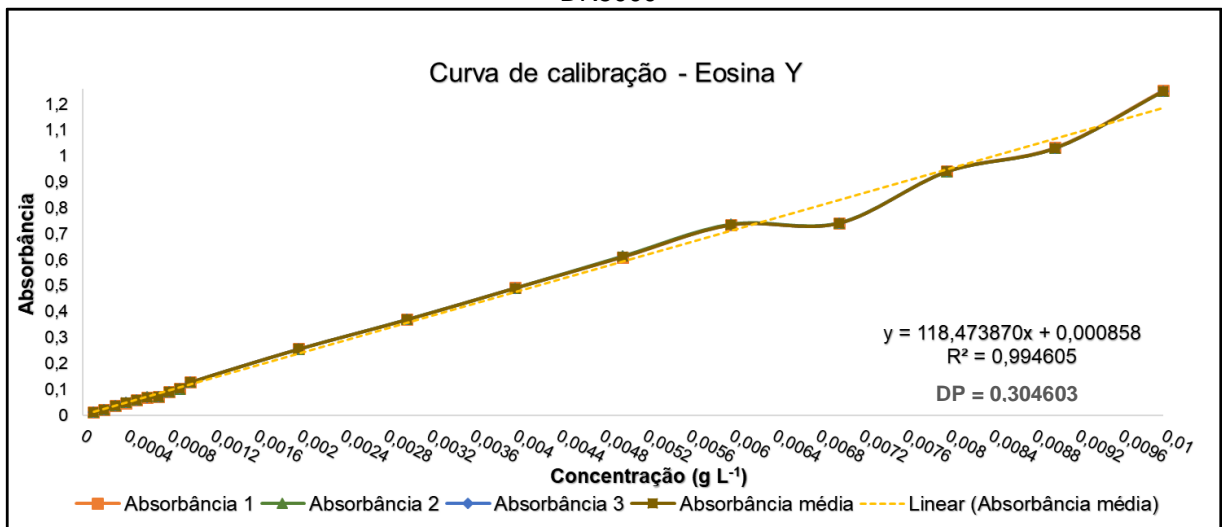
O tempo total de duração de cada um dos ensaios foi de três vezes os tempos de detenção hidráulicos teóricos em que o reator foi submetido, sendo que as coletas ocorreram em intervalos de 30 min para o ensaio com TDH de 4 h, de 45 min para o TDH de 8 h e de 60 min para o TDH de 12 h. Todas as coletas foram realizadas manualmente, considerando que a quantidade coletada era de 100 mL. Antes da

injeção do traçador no sistema, houve a coleta de uma amostra (branco) que serviu de referência na realização das leituras de absorvância das demais amostras.

Para a determinação das concentrações do traçador nas amostras, foi elaborada uma curva de calibração (Figura 4) da concentração de eosina Y, que englobou as faixas de absorvâncias obtidas nos ensaios hidrodinâmicos. Para a realização da curva, utilizou-se o método colorimétrico de leitura de absorvância de concentrações de eosina conhecidas, num comprimento de onda de 516 nm, em espectrofotômetro, de marca HACH® UV-Vis, modelo DR 5000. Após a leitura dessas absorvâncias, foi possível obter a equação para o cálculo da concentração de eosina nas amostras coletadas nos ensaios.

As concentrações conhecidas de eosina, em g L^{-1} , utilizadas para elaboração da curva de calibração foram de: 0,0001, 0,0002, 0,0003, 0,0004, 0,0005, 0,0006, 0,0007, 0,0008, 0,0009, 0,001, 0,002, 0,003, 0,004, 0,005, 0,006, 0,007, 0,008, 0,009 e 0,01.

Figura 4 - Curva de calibração da eosina Y em espectrofotômetro de marca HACH® UV-VIS, modelo DR5000



Fonte: Autoria própria (2018).

Legenda: DP = Desvio padrão das absorvâncias.

A partir das concentrações resultantes da espectrofotometria, confeccionaram-se curvas experimentais da variação da concentração do traçador pelo tempo, por meio do *software* Microsoft Excel®. Estas curvas foram normalizadas, resultando em curvas de distribuição do tempo de residência hidráulica (E_θ) em função do tempo adimensional (θ).

Os resultados obtidos foram ajustados aos modelos teóricos uniparamétricos de dispersão de pequena intensidade (PD) e de grande intensidade (GD) e de tanques

de mistura completa em série (N-CSTR), de acordo com Levenspiel (2000), sendo que as curvas experimentais seguiram as equações dispostas na Tabela 4 para a realização do ajuste.

Tabela 4 - Modelos teóricos uniparamétricos utilizados no ajuste das curvas experimentais

Modelo	Parâmetro	Equação
Dispersão de pequena intensidade (PD)	$\sigma^2_{\theta} = 2 \left(\frac{D}{uL} \right)$	$E_{\theta} = \frac{1}{2\sqrt{\pi(D/uL)}} \exp \left[\frac{(1-\theta)^2}{4(D/uL)} \right]$
Dispersão de grande intensidade (GD)	$\sigma^2_{\theta,ta} = 2 \left(\frac{D}{uL} \right) + 8 \left(\frac{D}{uL} \right)^2$	$E_{\theta,ta} = \frac{1}{2\sqrt{\pi(D/uL)}} \exp \left[\frac{(1-\theta)^2}{4(D/uL)} \right]$
Tanques de mistura completa em série (N-CSTR)	$N = \frac{1}{\sigma^2_{\theta}} = \frac{\theta^{-2} h}{\sigma^2}$	$E_{\theta} = \frac{N(N.\theta)^{N-1}}{(N-1)!} e^{-N\theta} e^{N-1}$

Fonte: Adaptado de Levenspiel (2000).

Em que θ = tempo de residência médio (adimensional); E_{θ} = função de distribuição do tempo de residência hidráulica; σ^2 = variância; σ^2_{θ} = variância (adimensional); N = número de reatores em série; D/uL = número de dispersão do reator.

As características hidráulicas quantificadas nesta pesquisa foram o número de Reynolds e a eficiência hidráulica, já com relação as anomalias hidráulicas, calculou-se o volume de zonas mortas e a presença de curtos-circuitos hidráulicos. O cálculo destes parâmetros seguiu as equações dispostas na Tabela 5.

Tabela 5 - Equações para determinação da presença de zonas mortas, curtos-circuitos hidráulicos, eficiência hidráulica e número de Reynolds

Anomalias	Equações	Referências
Zonas Mortas	$\beta = \frac{TDHr}{TDHt}$	Peña, Mara e Avella (2006)
	$Va = Vt \cdot \beta$	
	$Vd = Vt - Va$	
Curtos-Circuitos	$\psi = \frac{\tau_k}{\tau_r}$	Thackston, Shields Jr e Schroeder (1987)
Características Hidráulicas	Equações	Referências
Eficiência Hidráulica	$\lambda = \beta \left(1 - \frac{1}{N}\right)$	Persson, Somes e Wong (1999)
Número de Reynolds	$Re = \frac{(Vs \cdot \rho \cdot Dp)}{\mu (1 - \varepsilon)}$	Zaiat, Passig e Foresti (2000)

Fonte: Autoria própria (2018).

Em que β = relação entre o TDH real (h) e o TDH teórico (h); V_a = volume ativo do reator (m^3); V_t = volume total do reator (m^3); V_d = volume de zonas mortas (m^3); ψ = presença de curtos-circuitos; τ_k = tempo em que ocorre pico da concentração (h); τ_r = TDH real (h); λ = eficiência hidráulica; N = número de tanques CSTR em série; ρ = massa específica do fluido ($Kg\ m^{-3}$); V_s = velocidade média do fluido ($m\ s^{-1}$), D_p = diâmetro da partícula (m); μ = viscosidade dinâmica do fluido ($Pa\ s^{-1}$) e ε = porosidade do leito fixo.

4.3 LIMITE DE DETECÇÃO, LIMITE DE QUANTIFICAÇÃO E LINEARIDADE DO MÉTODO ANALÍTICO

Com vistas na validação do método analítico utilizado para o cálculo das concentrações de eosina Y (Figura 4), foram avaliados os parâmetros: limites de detecção (LD) e de quantificação (LQ) e a linearidade (r^2) do método.

De acordo com Brasil (2003), o limite de detecção pode ser definido como a menor quantidade detectável de um analito presente em uma amostra, considerando as condições experimentais estabelecidas. Já com relação ao limite de quantificação, este estabelece a menor quantidade de um analito em uma amostra que pode ser determinada com precisão e exatidão aceitáveis. A respeito da linearidade, esta pode

ser definida como a capacidade de uma metodologia analítica em demonstrar que os resultados obtidos são diretamente proporcionais à concentração do analito em uma amostra, considerando um intervalo determinado.

Para a determinação dos limites de detecção e quantificação (em g L⁻¹) foram utilizadas as equações 1 e 2 (BRASIL, 2003), que consideram em seus cálculos a razão entre o desvio padrão de concentrações conhecidas do analito e o coeficiente angular (inclinação da reta) obtidos por meio da curva de calibração (Figura 4). A partir desta curva também foi possível obter a linearidade do método, sendo que, segundo Brasil (2003), esse parâmetro deve apresentar r² com um mínimo aceitável de 0,99.

$$LD = \frac{DPa \cdot 3}{IC} \quad \text{Equação (1)}$$

$$LQ = \frac{DPa \cdot 10}{IC} \quad \text{Equação (2)}$$

Em que *LD* é o limite de detecção, *LQ* é o limite de quantificação, *DPa* representa o desvio padrão das absorbâncias obtidas na curva de calibração e *IC* é inclinação da curva de calibração.

Os limites de detecção e quantificação para este estudo foram de 0,0077 g L⁻¹ e 0,0257 g L⁻¹, respectivamente, possuindo uma linearidade (r² = 0,994605) da curva analítica da eosina Y (Figura 4) acima do seu mínimo aceitável, validando a equação para o cálculo da concentração de eosina nas amostras.

4.4 ESTUDO COMPUTACIONAL

Para realização das simulações em CFD foi utilizado o *software* ANSYS-CFX 19.0, versão acadêmica, que realiza as soluções numéricas de problemas pelo método dos volumes finitos. Para a execução das simulações no *software*, há a necessidade de que sejam seguidas algumas etapas. Primeiramente, na etapa de pré-processamento dos dados, definiram-se todas as variáveis necessárias para se efetuar as simulações numéricas. Já na segunda etapa, que é a de solução, houve a escolha de um método numérico para solucionar as equações atreladas ao problema, sendo que por fim, no pós-processamento dos dados, foi possível visualizar os resultados por meio de gráficos e figuras.

As simulações do comportamento hidrodinâmico do reator UAHB no *software*, permitiram a solução das equações representativas do escoamento, sendo elas: equações da conservação de massa (Equação 3) e da conservação da quantidade de movimento (Equações de Navier-Stokes) (Equação 4).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad \text{Equação (3)}$$

Em que $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ refere-se a taxa de variação da massa no volume considerado, $\nabla \cdot (\rho \vec{u})$ representa o fluxo líquido de massa através da superfície do volume considerado e \vec{u} é o vetor velocidade.

$$m\vec{a} = F_{superfície} + F_{corpo} \quad \text{onde:} \quad \vec{a} = \frac{D\vec{u}}{Dt} = \frac{\partial(\vec{u})}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla)(\vec{u})$$

Em que \vec{a} é vetor aceleração, F a força e m a massa.

A partir das hipóteses de escoamentos incompressíveis e propriedades físicas constantes, tem-se:

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla)\vec{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{u} + \vec{g} \quad \text{Equação (4)}$$

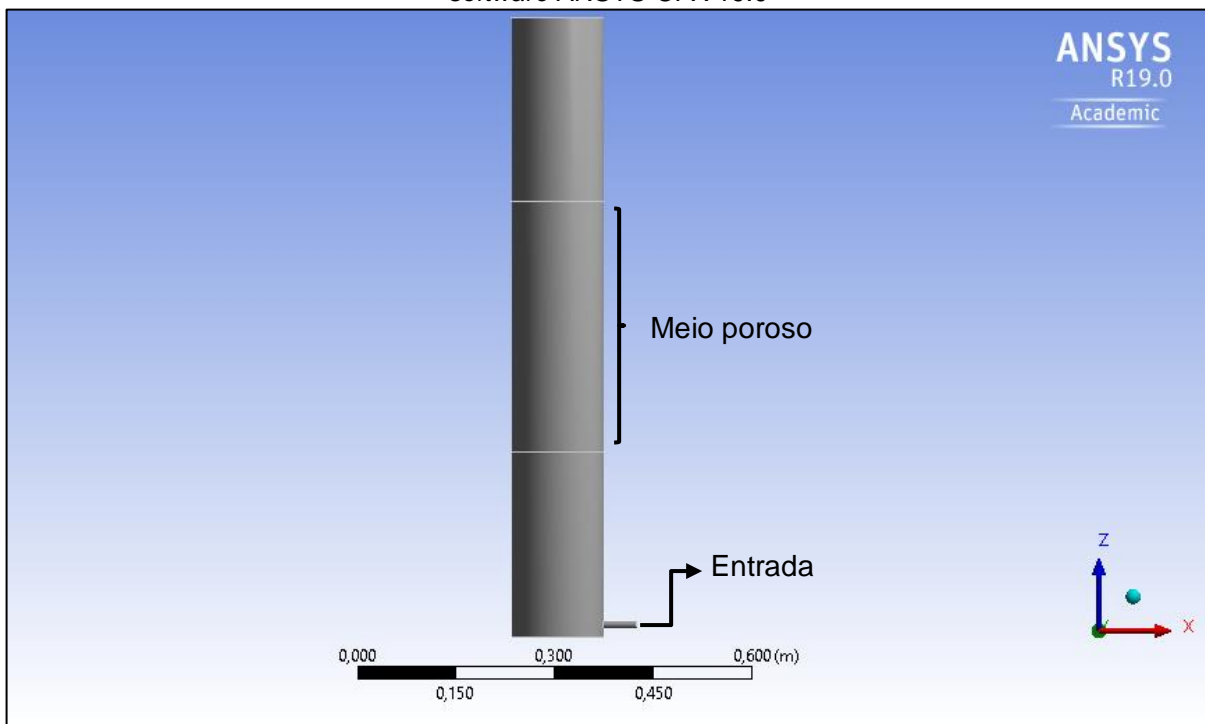
Sendo $\frac{\partial \vec{u}}{\partial t}$ a taxa de variação da quantidade de movimento, $(\vec{u} \cdot \nabla)\vec{u}$ o fluxo convectivo da quantidade de movimento, $-\frac{1}{\rho} \nabla p$ a força resultante devida ao gradiente de pressão, $\nu \nabla^2 \vec{u}$ o fluxo difusivo da quantidade de movimento ou dissipação de energia cinética dependendo das escalas em questão e \vec{g} o vetor de aceleração da gravidade.

Com base nas simulações numéricas, foi possível calcular o volume de zonas mortas no reator, verificar a presença de caminhos preferenciais e analisar as características dos campos de velocidade. Após os estudos computacionais serem concluídos, estes foram comparados com os resultados experimentais proporcionados pelos ensaios hidrodinâmicos.

4.5 SIMULAÇÕES DO REATOR UAHB ABIÓTICO EM ESCALA DE BANCADA

Para a realização do estudo computacional, foi desenvolvida uma geometria simplificada do reator UAHB abiótico em escala de bancada na forma tridimensional, em que foram representadas a entrada do reator e a região onde o meio suporte foi alocado (Figura 5). A utilização de geometrias simplificadas é vantajosa em estudos computacionais, pois possibilita a redução do tempo de simulação e a obtenção de melhores resultados, já que são evitados problemas relativos a geração de malhas com configurações mais complexas.

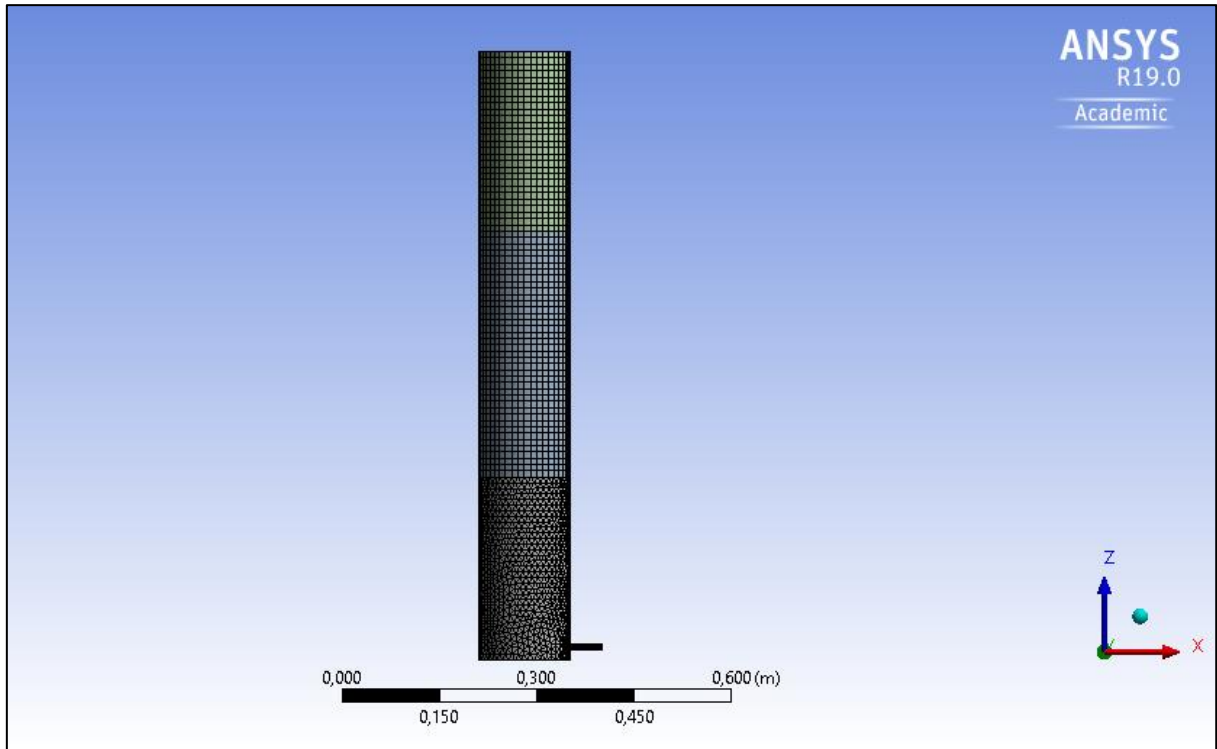
Figura 5 - Geometria do reator UAHB em escala de bancada utilizado nas simulações numéricas no software ANSYS-CFX 19.0



Fonte: Autoria própria (2018).

Após a criação da geometria do reator, houve a geração da malha no software (Figura 6), que foi composta por 65858 elementos hexaédricos e tetraédricos. A malha é responsável pela resolução das equações do movimento para o fluido simulado em várias seções da sua geometria, refletindo o comportamento do fluido ao longo de todo o reator.

Figura 6 - Local de entrada do fluido no reator UAHB e malha gerada para as simulações numéricas no software ANSYS-CFX 19.0



Fonte: Autoria própria (2018).

As propriedades do fluido e os parâmetros utilizados para realização das simulações nas três condições de operação testadas, são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros utilizados no software para a realização das simulações nos diferentes tempos de detenção testados

Parâmetros	TDH (h)		
	4	8	12
Velocidade de entrada da água (m s^{-1})	0,0156	0,0078	0,0052
Velocidade ascensional da água (m s^{-1})	$6,96 \cdot 10^{-5}$	$3,48 \cdot 10^{-5}$	$2,32 \cdot 10^{-5}$
Viscosidade dinâmica da água (Pa s^{-1})	0,001	0,001	0,001
Densidade da água (Kg m^{-3})	1000	1000	1000
Temperatura de referência ($^{\circ}\text{C}$)	25	25	25

Fonte: Autoria própria (2018).

Legenda: TDH = Tempo de Detenção Hidráulico.

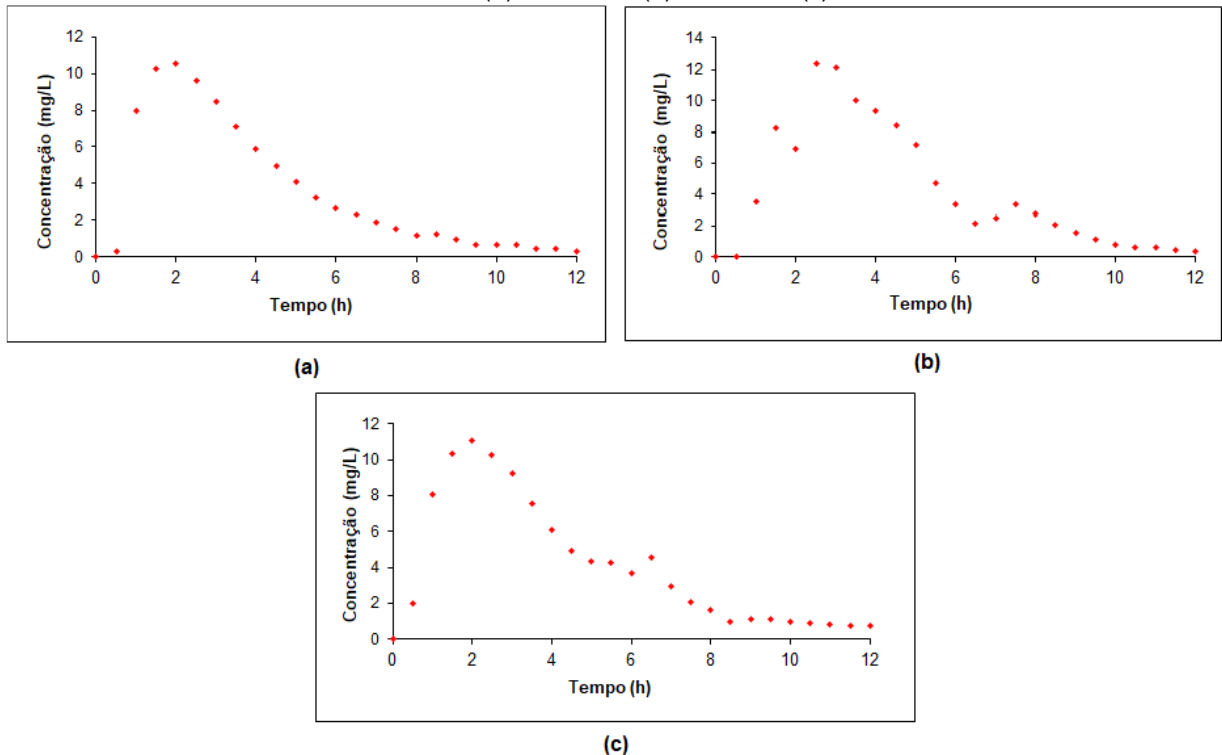
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico serão apresentados os resultados obtidos no desenvolvimento do trabalho com suas respectivas discussões, que contemplaram os resultados dos ensaios hidrodinâmicos, do cálculo das anomalias e características hidráulicas e das simulações numéricas do reator UAHB abiótico em escala de bancada.

5.1 ENSAIOS HIDRODINÂMICOS

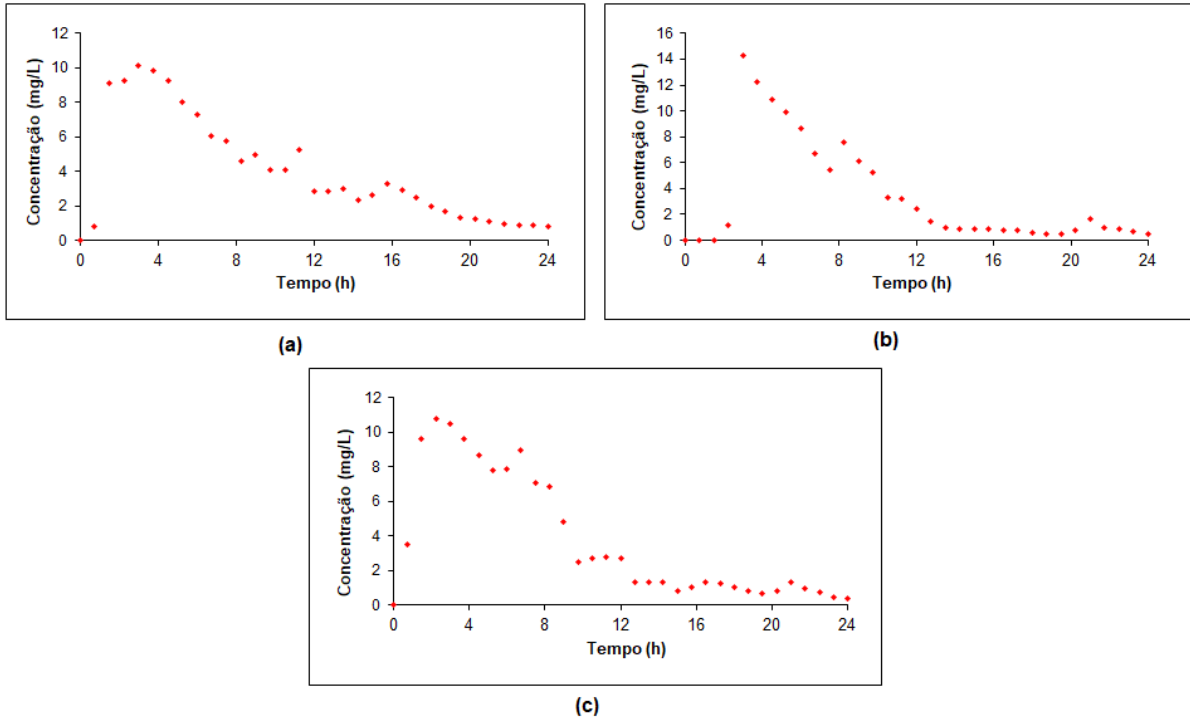
A partir dos resultados experimentais dos ensaios de estímulo-resposta, foi possível obter as curvas de variação da concentração de eosina Y ao longo do tempo, para as amostras coletadas na saída do reator, operando com o TDH de 4 h (Figura 7), de 8 h (Figura 8) e de 12 h (Figura 9).

Figura 7 - Curvas de variação da concentração de eosina Y para o reator UAHB abiótico, operando com TDH de 4 h: (a) Ensaio 1; (b) Ensaio 2; (c) Ensaio 3



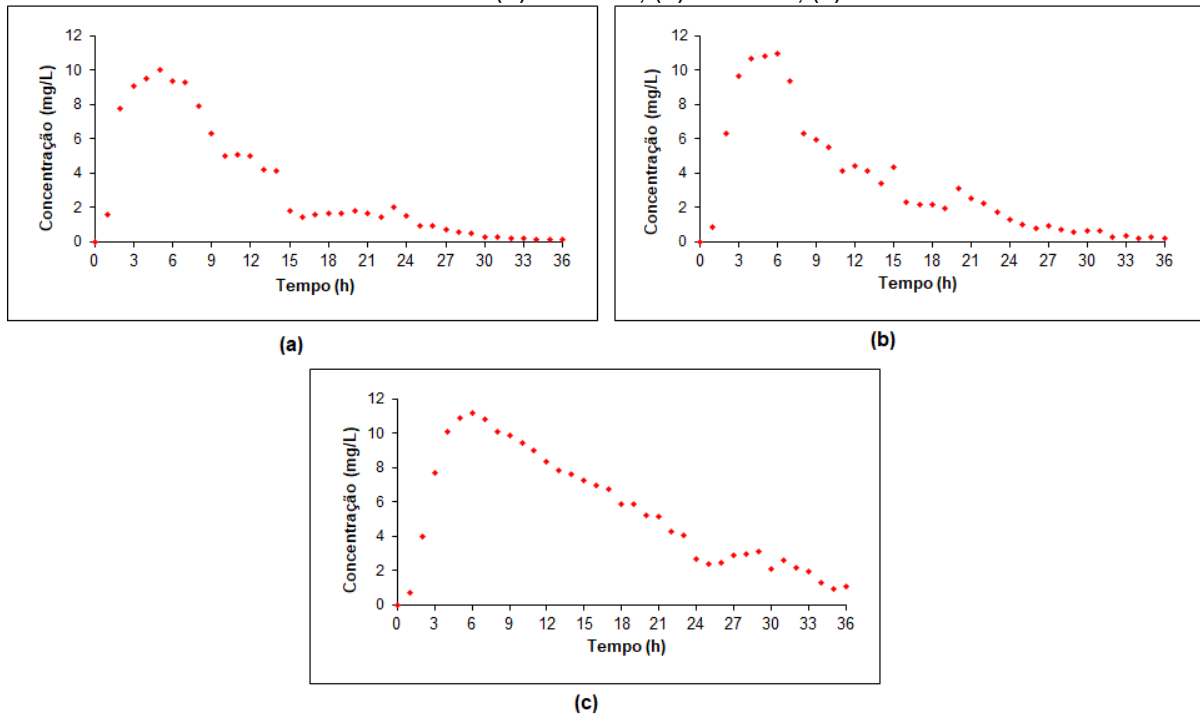
Fonte: Autoria própria (2018).

Figura 8 - Curvas de variação da concentração de eosina Y para o reator UAHB abiótico, operando com TDH de 8 h: (a) Ensaio 1; (b) Ensaio 2; (c) Ensaio 3



Fonte: Autoria própria (2018).

Figura 9 - Curvas de variação da concentração de eosina Y para o reator UAHB abiótico, operando com TDH de 12 h: (a) Ensaio 1; (b) Ensaio 2; (c) Ensaio 3



Fonte: Autoria própria (2018).

Com base nas curvas obtidas nos ensaios hidrodinâmicos, foi possível observar que os picos de concentração máxima da eosina Y para os ensaios com TDH de 4 h foram de 2 h para os ensaios 1 e 3 (Figuras 7a e 7c) e de 2,5 h para o

ensaio 2 (Figura 7b), apresentando concentração média de eosina Y nos picos de aproximadamente $11,26 \text{ mg L}^{-1}$. Já para os ensaios com TDH de 8 h, os picos foram de 3 h para os ensaios 1 e 2 (Figuras 8a e 8b) e de 2,25 h para o ensaio 3 (Figura 8c), com concentração média de eosina nesses pontos de $11,67 \text{ mg L}^{-1}$. Com relação aos ensaios com TDH de 12 h, verificaram-se picos de 6 h para os ensaios 2 e 3 (Figuras 9b e 9c) e de 5 h para o ensaio 1 (Figura 9a), apresentando concentração média de eosina Y nesses picos de $10,67 \text{ mg L}^{-1}$.

Por meio das Figuras 7, 8 e 9, verificou-se que em todos os ensaios houve o adiantamento dos picos de concentração da eosina Y, indicando a presença de caminhos preferenciais no interior do reator. Para os ensaios com TDH de 4 h, 8h e 12 h, foram observados adiantamentos médios de aproximadamente 46 %, 66 % e 53 %, respectivamente.

Rodrigues (2015) obteve adiantamento dos picos de concentração do traçador em seus ensaios hidrodinâmicos, trabalhando com eosina Y em dois reatores combinados anaeróbio-aeróbio de leito fixo (RCAALF) em escala de bancada, operados com tempos de detenção de 12 h e 18 h. A autora atribuiu tal fato a possível existência de curtos-circuitos hidráulicos e caminhos preferenciais no interior dos reatores.

A partir das curvas de variação também foi possível verificar o lento decaimento na concentração do traçador ao longo do tempo em todos os ensaios, caracterizando o efeito de cauda longa, o que de acordo com Levenspiel (2000), pode indicar a difusão do traçador em zonas mortas do reator. Lima (2001), Passig (2005), Carvalho (2006), Lourenço e Campos (2009), Martins (2013), Belini (2016) e Godinho (2017) são exemplos de outros autores que também obtiveram esse efeito em suas pesquisas.

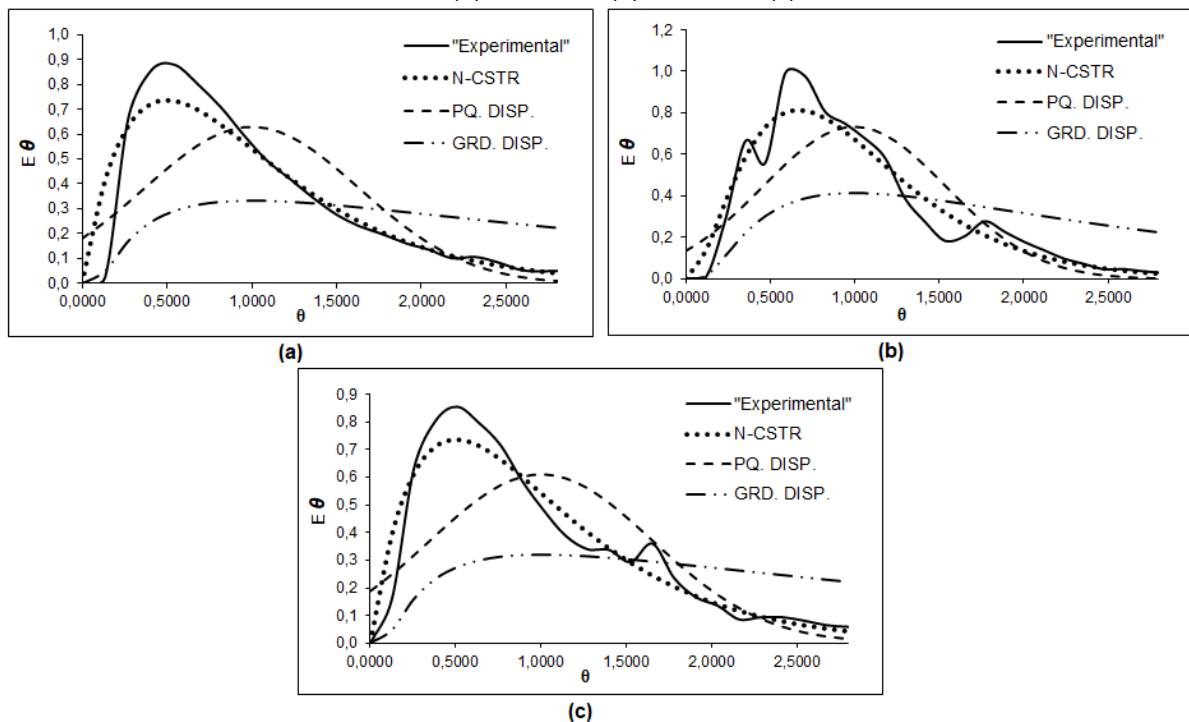
Passig e Blundi (1996), trabalhando com filtro anaeróbio de fluxo ascendente abiótico com o traçador rodamina WT, observaram o fenômeno de cauda longa em seu estudo, atribuindo tal efeito a três possibilidades: difusão do traçador em zonas estagnadas do reator; retenção do traçador devido a sua interação com o meio suporte e/ou existência de recirculação interna no reator.

Outro aspecto que pode ser observado nas curvas de variação da concentração do traçador é a presença de alguns picos decrescentes em intervalos regulares ao longo da curva, o que de acordo com Levenspiel (2000), indicam forte recirculação interna do fluido no reator.

Landgraf et al. (2017), avaliando o comportamento hidrodinâmico de um reator UASB, com volume útil de 21 L, TDH de 20 h e traçador eosina Y, verificou a presença de diversos picos em sua curva de concentração. Os autores atribuíram este efeito, a possível existência de caminhos preferenciais no reator ou a problemas relacionados com a manutenção da vazão.

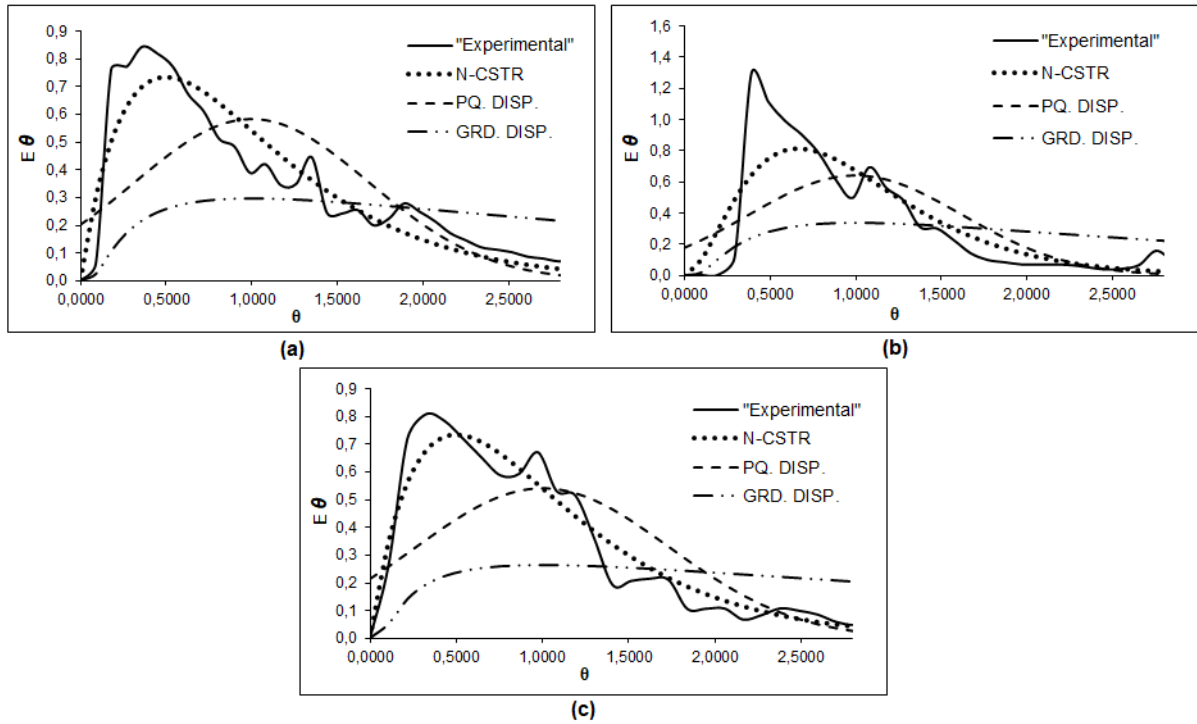
Por meio do ajuste dos dados experimentais dos ensaios realizados aos modelos teóricos uniparamétricos, foram obtidas as curvas de Distribuição do Tempo de Residência (DTR) em função do tempo adimensional para as três condições em que o reator foi operado: TDH de 4 h (Figura 10), 8 h (Figura 11) e 12 h (Figura 12).

Figura 10 - Curvas de distribuição do tempo de residência para o reator UAHB abiótico operando com TDH de 4 h: (a) Ensaio 1; (b) Ensaio 2; (c) Ensaio 3



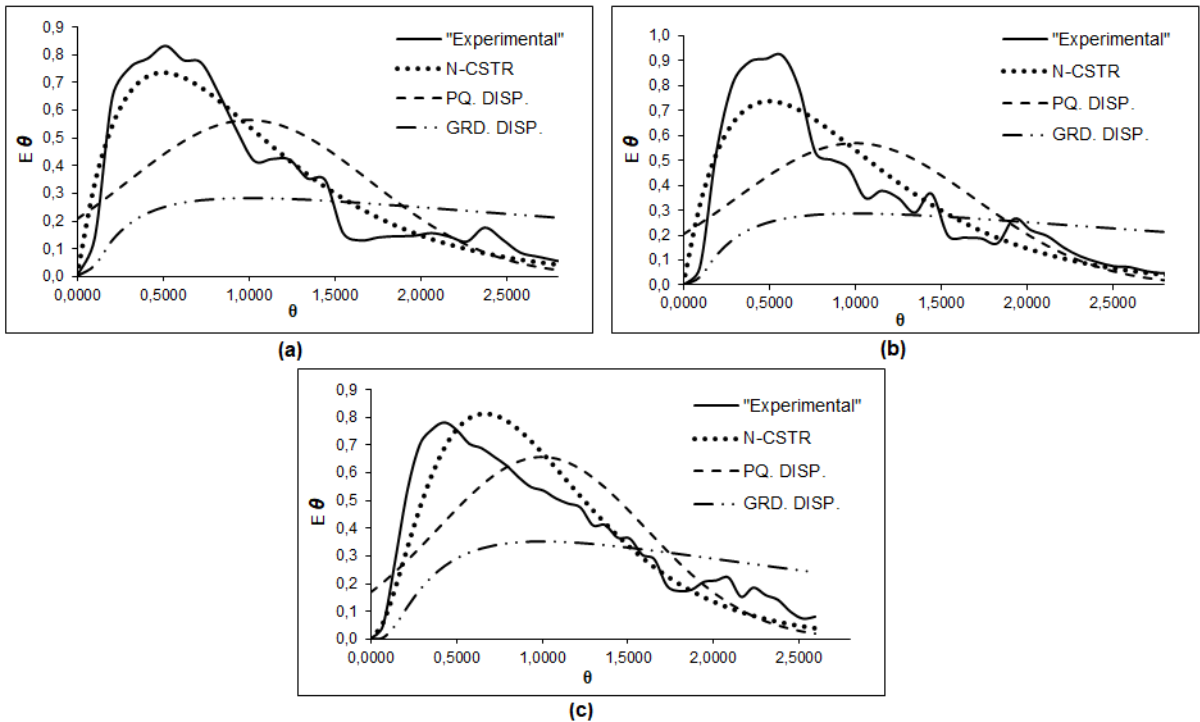
Fonte: Autoria própria (2018).

Figura 11 - Curvas de distribuição do tempo de residência para o reator UAHB abiótico operando com TDH de 8 h: (a) Ensaio 1; (b) Ensaio 2; (c) Ensaio 3



Fonte: Autoria própria (2018).

Figura 12 - Curvas de distribuição do tempo de residência para o reator UAHB abiótico operando com TDH de 12 h: (a) Ensaio 1; (b) Ensaio 2; (c) Ensaio 3



Fonte: Autoria própria (2018).

Além das curvas DTR, o ajuste dos dados experimentais aos modelos teóricos uniparamétricos permitiu a obtenção dos números de dispersão para os modelos de

pequena dispersão (PD) e grande dispersão (GD) e o número de reatores em série para o modelo de tanques de mistura completa em série (N-CSTR), para os diferentes tempos de detenção utilizados (Tabela 7). Os coeficientes de correlação (r^2) obtidos para os modelos matemáticos teóricos estão dispostos na Tabela 8.

Tabela 7 - Resultados dos modelos de dispersão e de tanques em série obtidos por meio do ajuste dos dados experimentais para os TDH de 4 h, 8 h e 12 h

Ensaio	TDH _{teórico} (h)	TDH _{real} (h)	N-CSTR (N)	Pequena Dispersão (D/ μ L)	Grande Dispersão (D/ μ L)
1	4	3,7	2	0,201	0,727
2		4,2	3	0,148	0,470
3		3,9	2	0,212	0,784
1	8	8,3	2	0,235	0,910
2		7,6	3	0,194	0,689
3		6,9	2	0,271	1,128
1	12	9,7	2	0,249	0,994
2		10,4	2	0,244	0,965
3		13,9	3	0,184	0,640

Fonte: Autoria própria (2018).

Tabela 8 - Coeficientes de correlação obtidos por meio do ajuste dos dados experimentais com os modelos teóricos para os TDH de 4 h, 8 h e 12 h

Ensaio	TDH _{teórico} (h)	Coeficientes de correlação (r^2)		
		N-CSTR	Pequena Dispersão (D/ μ L)	Grande Dispersão (D/ μ L)
1	4	0,952	0,790	0,463
2		0,964	0,834	0,559
3		0,967	0,764	0,374
1	8	0,923	0,626	0,194
2		0,882	0,708	0,455
3		0,969	0,766	0,269
1	12	0,972	0,774	0,360
2		0,944	0,710	0,323
3		0,935	0,751	0,346

Fonte: Autoria própria (2018).

Observando as Figuras 10, 11 e 12, nota-se que as curvas de distribuição do tempo de residência (DTR) de todos os ensaios também apresentaram o efeito de cauda longa, o que pode estar relacionado com a difusão do traçador no meio suporte. Kreutz (2012), realizando estudo com reator anaeróbico aeróbico de leito fixo (RAALF), preenchido com argila expandida e matrizes cúbicas de espuma de poliuretano como meio suporte, percebeu em suas curvas DTR o efeito de cauda longa, atribuindo a ocorrência desse fenômeno a retenção (difusão) do traçador em zonas ativas do material poroso.

Nardi et al. (1999) ressaltam que em reatores com meios porosos, as curvas DTR podem apresentar caudas longas tanto pela presença de zonas mortas no

interior do reator, quanto pela retenção do traçador no meio suporte, entretanto, os autores dizem que não é possível distinguir esses fenômenos nas curvas de resposta.

A partir dos dados apresentados na Tabela 7, percebe-se que para a primeira condição de operação do reator (TDH de 4 h), o TDH real variou entre 3,7 e 4,2 h nos ensaios realizados, apresentando uma diferença média de aproximadamente 1,67 % em relação ao TDH teórico. Para a segunda condição de operação (TDH de 8 h), o TDH real variou entre 6,9 e 8,3, evidenciando uma diferença média de 5 % em comparação ao TDH teórico. Já para a terceira condição de operação (TDH de 12 h), o TDH real variou entre 9,7 e 13,9, com diferença média de aproximadamente 5,56 % em relação ao TDH teórico. Com isso, verificou-se que na média, os ensaios apresentaram adiantamentos da resposta do traçador de 1,67 %, 5 % e 5,56 %, para os TDH de 4 h, 8 h e 12 h, respectivamente.

Godinho (2015), trabalhando com reator UASB em escala de bancada (22 L) e eosina Y como traçador, observou adiantamento do TDH experimental em relação ao teórico, obtendo um TDH real médio de 7,1 h para um TDH teórico de 8 h. Souza (2012), utilizando espumas de poliuretano como meio suporte em reator Aeróbio-Anóxico de Leito Fixo de 7,08 L, em ensaios realizados sob condições abióticas (alimentação com água) como no presente estudo, também obteve adiantamento do TDH experimental, operando com TDH teóricos de 1 h, 3 h e 5 h.

Ainda na Tabela 7, é possível observar que os valores médios do número de dispersão ($D/\mu\text{L}$) obtidos nos ensaios com TDH de 4 h, para os modelos de pequena e grande dispersão, foram de 0,187 e 0,660, respectivamente. Com relação aos ensaios com TDH de 8 h, os modelos de pequena e grande dispersão, apresentarem valores médios de 0,233 e 0,909, respectivamente. Já para o TDH de 12 h, o número médio para os modelos de pequena e grande dispersão foram de 0,226 e 0,866, respectivamente.

Kreutz (2012) obteve valores próximos aos obtidos nesse estudo para os modelos de pequena e grande dispersão. A autora afirmou que estes valores são considerados elevados, indicando que o escoamento disperso tende à mistura completa. Levando em consideração essa afirmação e os coeficientes de correlação (r^2) dispostos na Tabela 8, pode-se notar que a assertiva se aplica a este estudo, já que o modelo N-CSTR foi o que apresentou melhor ajuste aos dados experimentais.

Freitas (2013), realizando ensaios hidrodinâmicos em um RAALF preenchido com argila expandida e espuma de poliuretano, também verificou valores médios de

$D/\mu\text{L}$ elevados, o que segundo a autora indicou grande dispersão longitudinal do fluido e grau de mistura elevado no interior do reator. Outro ponto destacado no estudo foi que o RAALF apresentou como regime de fluxo predominante o de mistura completa, devido a elevada dispersão longitudinal dos modelos de dispersão e pelo modelo N-CSTR em série ter se ajustado melhor aos dados experimentais.

O modelo de tanques de mistura completa em série (N-CSTR) para o presente estudo, indicou de 2 a 3 reatores nos ensaios realizados para os diferentes TDH. Valores semelhantes foram reportados por Passig e Blundi (1996), Passig (2005), Kreutz (2012), Martins (2012) e Nascimento Junior (2013).

A partir da análise das curvas DTR (Figuras 10, 11 e 12) e dos coeficientes de correlação (Tabela 8), pode-se notar que o modelo N-CSTR em série foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais em todos os ensaios realizados, apresentando correlações médias altas (r^2 médios de 0,961, 0,925 e 0,950 para os TDH de 4 h, 8 h e 12 h, respectivamente).

Já com relação aos modelos uniparamétricos de dispersão, foi verificado que o modelo de pequena intensidade apresentou melhor ajuste aos resultados obtidos experimentalmente em todos os ensaios realizados (r^2 médios de 0,796, 0,700 e 0,745 para os TDH de 4 h, 8 h e 12 h, respectivamente), apesar de inicialmente os ensaios não respeitarem suas premissas ($D/\mu\text{L} < 0,01$ e dispersão idêntica dentro e fora do volume de controle). Porém, mesmo o modelo PD apresentando boa correlação, verificou-se que o ajuste realizado não foi satisfatório, em razão da grande dispersão dos valores experimentais. O mesmo foi verificado por Martins (2012) e Godinho (2015).

Levando em consideração a elevada dispersão longitudinal observada no parâmetro $D/\mu\text{L}$ para os modelos PD e GD e o melhor ajuste dos resultados experimentais ao modelo N-CSTR em série, é possível afirmar que o regime predominante no reator UAHB é o de mistura completa.

5.2 CARACTERÍSTICAS E ANOMALIAS HIDRÁULICAS

Com base nos resultados experimentais dos ensaios hidrodinâmicos, foi possível calcular as características e anomalias hidráulicas do reator estudado. Os resultados do volume de zonas mortas, número de Reynolds, presença de curtos-circuitos e eficiência hidráulica para os TDH de 4 h, 8 h e 12 h podem ser observados na Tabela 9.

Tabela 9 - Volume de zonas mortas, número de Reynolds, curtos-circuitos e eficiência hidráulica para os TDH de 4 h, 8 h e 12 h

Ensaio	TDH _t (h)	TDH _r (h)	Pico (h)	Volume de zonas mortas (%)	Número de Reynolds	Curtos- circuitos (Ψ)	Eficiência hidráulica (λ)
1	4	3,7	2	8,25	8,72	0,54	0,46
2		4,2	2,5	-5,84	8,72	0,59	0,71
3		3,9	2	1,56	8,72	0,51	0,49
1	8	8,3	3	-4,20	4,36	0,36	0,52
2		7,6	3	4,69	4,36	0,39	0,64
3		6,9	2,25	13,31	4,36	0,32	0,43
1	12	9,7	5	19,09	2,91	0,51	0,40
2		10,4	6	13,39	2,91	0,58	0,43
3		13,9	6	-15,69	2,91	0,43	0,77

Fonte: Autoria própria (2018).

Legenda: TDH_t = TDH teórico (h); TDH_r = TDH real (h).

Com base na Tabela 9, é possível observar que os ensaios 2 para o TDH de 4 h, 1 para o TDH de 8 h e 3 para de 12 h apresentaram volume de zonas mortas com porcentagens negativas. Segundo Peña, Mara e Avella (2006), esse valor negativo pode ser explicado pela existência de caminhos preferenciais no interior do reator, o que também pode ter influenciado no valor superior do TDH real em relação ao TDH teórico para esses ensaios.

Calheiros, Perico e Nunes (2009) obtiveram em seu estudo TDH real maior do que o teórico, justificando tal fenômeno pela existência de caminhos preferenciais. Os autores trabalharam com uma unidade de tratamento preliminar seguida por um sistema de reatores anaeróbios sequenciais, sendo que cada reator possuía um volume útil de 862,37 L. Seus ensaios hidrodinâmicos foram realizados com traçador composto por uma solução de cloreto de sódio (NaCl).

Baettker (2015), avaliando a estabilidade e o comportamento hidrodinâmico de três filtros anaeróbios em escala de bancada (cada um dos filtros com 1,3 L de volume total), preenchidos com três tipos diferentes de meio suporte (carvão vegetal, cerâmica de argila e borracha de pneu automotivo) e operados para tempos de

detenção hidráulica de 4 h e 8 h, obteve volumes de zonas mortas com valores negativos. A autora presumiu a existência de caminhos preferenciais no escoamento do fluido.

Ainda com relação ao volume de zonas mortas (Tabela 9), pode-se notar que na maioria dos ensaios foram verificados volumes positivos para essa anomalia. Godinho (2017), desenvolvendo estudo com reator anaeróbio híbrido (UAHB), preenchido com meio suporte de anéis corrugados de Policloreto de Polivinila (PVC), em TDH de 4 h, 8 h e 12 h, também observou valores positivos de zonas mortas, afirmando que essas regiões estagnadas exercem influência no lento decaimento do traçador ao longo do tempo (efeito de cauda longa). O mesmo efeito foi observado nas curvas de variação do traçador para o presente estudo (Figuras 7, 8 e 9).

O número de Reynolds para os TDH de 4 h, 8 h e 12 h foram de 8,72, 4,36 e 2,91, respectivamente, indicando escoamento laminar no reator UAHB, já que segundo Streeter e Wylie (1982), esse regime de escoamento ocorre para valores inferiores a 2000.

Já com relação aos curtos-circuitos hidráulicos, foi possível verificar relações Ψ médias de aproximadamente 0,55 para o TDH de 4 h, 0,36 para o TDH de 8 h e de 0,53 para o TDH de 12 h. Sarathai, Koottatep e Morel (2010), afirmam que essa anomalia ocorre quando Ψ é menor ou igual a 0,3, portanto, nota-se que não houve a presença de curtos-circuitos hidráulicos nos TDH testados.

A eficiência hidráulica (λ), de acordo com Persson, Somes e Wong (1999), é classificada em boa para $\lambda > 0,75$; satisfatória para $0,5 < \lambda \leq 0,75$; e baixa para $\lambda \leq 0,5$. Por meio da Tabela 9, observa-se que em cinco dos nove ensaios realizados foram evidenciadas eficiências hidráulicas insatisfatórias (ensaios 1 e 3 com TDH de 4 h, ensaio 3 com TDH de 8 h e ensaios 1 e 2 para o TDH de 12 h), o que pode ser explicado pela presença de zonas mortas no interior do reator, já que foram os ensaios que apresentaram os maiores valores para essa anomalia. Rodrigues (2015) também observou eficiências insatisfatórias em seu estudo, justificando tais resultados pela presença de zonas mortas e curtos-circuitos hidráulicos, considerando que essas anomalias interferem na distribuição uniforme do traçador ao longo do reator.

Já para o ensaio 2 com TDH de 4 h e ensaios 1 e 2 com TDH de 8 h, foram verificadas eficiências hidráulicas satisfatórias, sendo que o único ensaio que apresentou uma boa eficiência foi o terceiro para o TDH de 12 h. Essas melhores eficiências obtidas, segundo Rincón, Galindo e Pérez (2011), podem indicar a

presença quase nula de zonas mortas ao longo do reator, o que acaba ficando evidenciado nestes ensaios, já que foram observados valores negativos e um valor bem baixo (ensaio 2 – TDH de 8 h, em que o volume de zonas mortas representou apenas 4,69 % do volume do reator).

5.3 SIMULAÇÕES DO REATOR UAHB ABIÓTICO EM ESCALA DE BANCADA

Com base nas simulações do reator UAHB realizadas para os TDH de 4 h, 8 h e 12 h, foi possível obter o comportamento da velocidade do fluido no interior do reator, além da porcentagem de zonas mortas e o tempo que o fluido necessita para percorrer toda a seção do reator.

Ren et al. (2008), que realizaram a modelagem matemática de um reator UASB em seu estudo, consideraram que as zonas mortas ocorrem em regiões onde a fase líquida apresenta velocidades inferiores a 5 % da velocidade ascensional média. Levando em consideração essa premissa, foram elaborados três histogramas acumulativos da porcentagem de água no interior do reator com velocidades inferiores a 5 % da velocidade ascensional dos três TDH testados (Figuras 13, 14 e 15). Para o reator UAHB operado com os TDH de 4 h, 8 h e 12 h, foram obtidos os valores $3,48 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$, $1,74 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ e $1,16 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$, respectivamente, como 5 % da velocidade ascensional média.

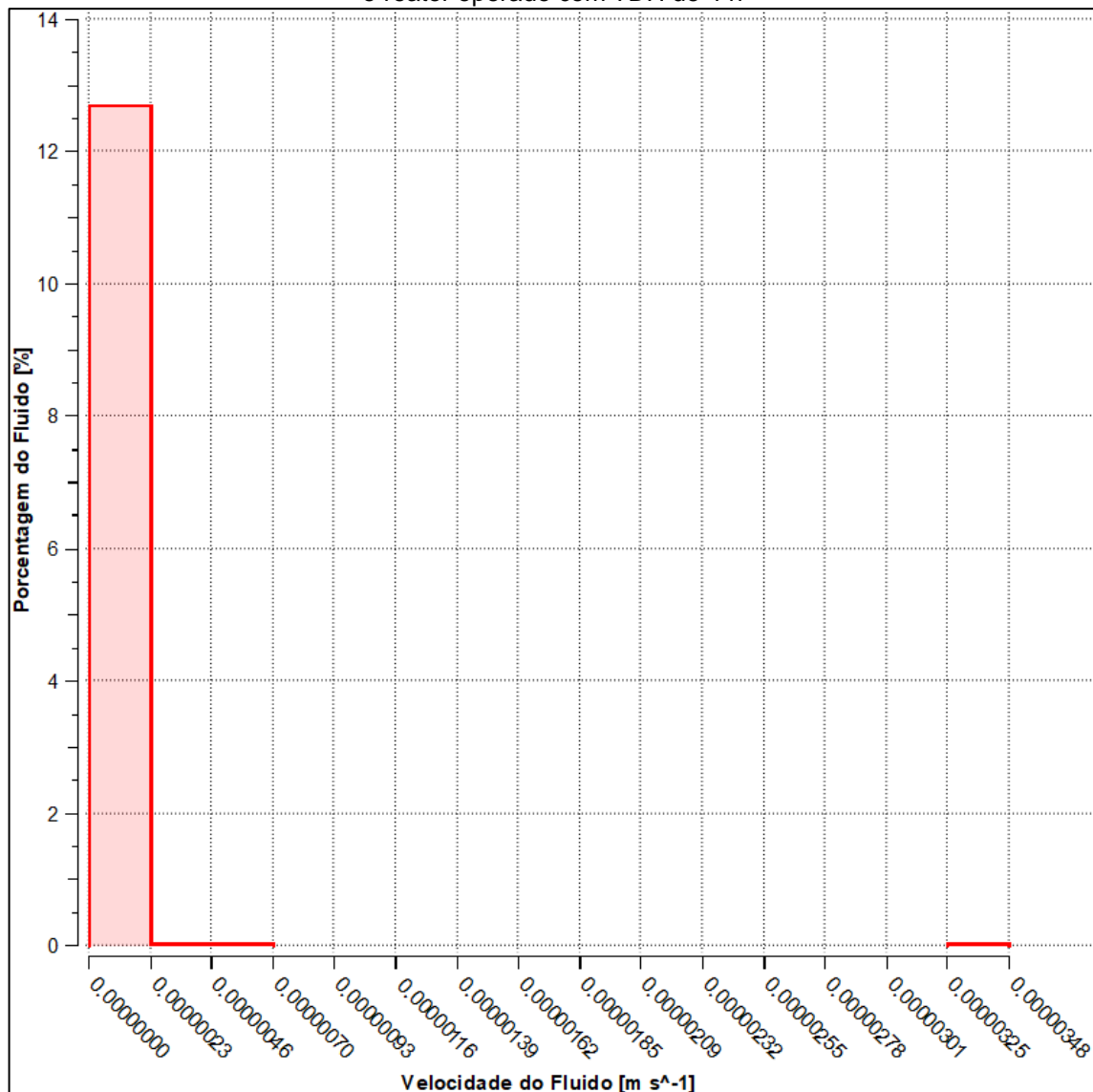
Por meio das Figuras 13, 14 e 15, observou-se que as simulações para os três TDH testados, apresentaram volumes de zonas mortas no interior do reator próximos a 13 %. Cruz (2013), simulando um reator UASB de 18 L, preenchido com um polímero absorvente em 35 % do seu volume útil, obteve volumes de zonas mortas de 15 %, sendo um valor muito próximo ao observado nas simulações deste estudo.

Singh, Viraraghavan e Bhattacharyya (2006) realizaram simulações matemáticas de dois reatores UASB de 8 L, operados sob condições distintas de temperatura. Os autores observaram que para o reator operado a 32 °C, o volume de zonas mortas foi de 10 % e que para o outro reator, operado a 20 °C, o volume foi de 11 %. Esses valores também são muito similares aos verificados neste estudo.

Comparando os resultados obtidos para o volume de zonas mortas nas simulações (13 % para os três tempos testados) com os valores médios obtidos experimentalmente para essa anomalia (1,32 %, 4,27 %, 5,60 % para os TDH de 4 h, 8 h e 12 h, respectivamente), verificaram-se erros relativos acima de 50 % entre o

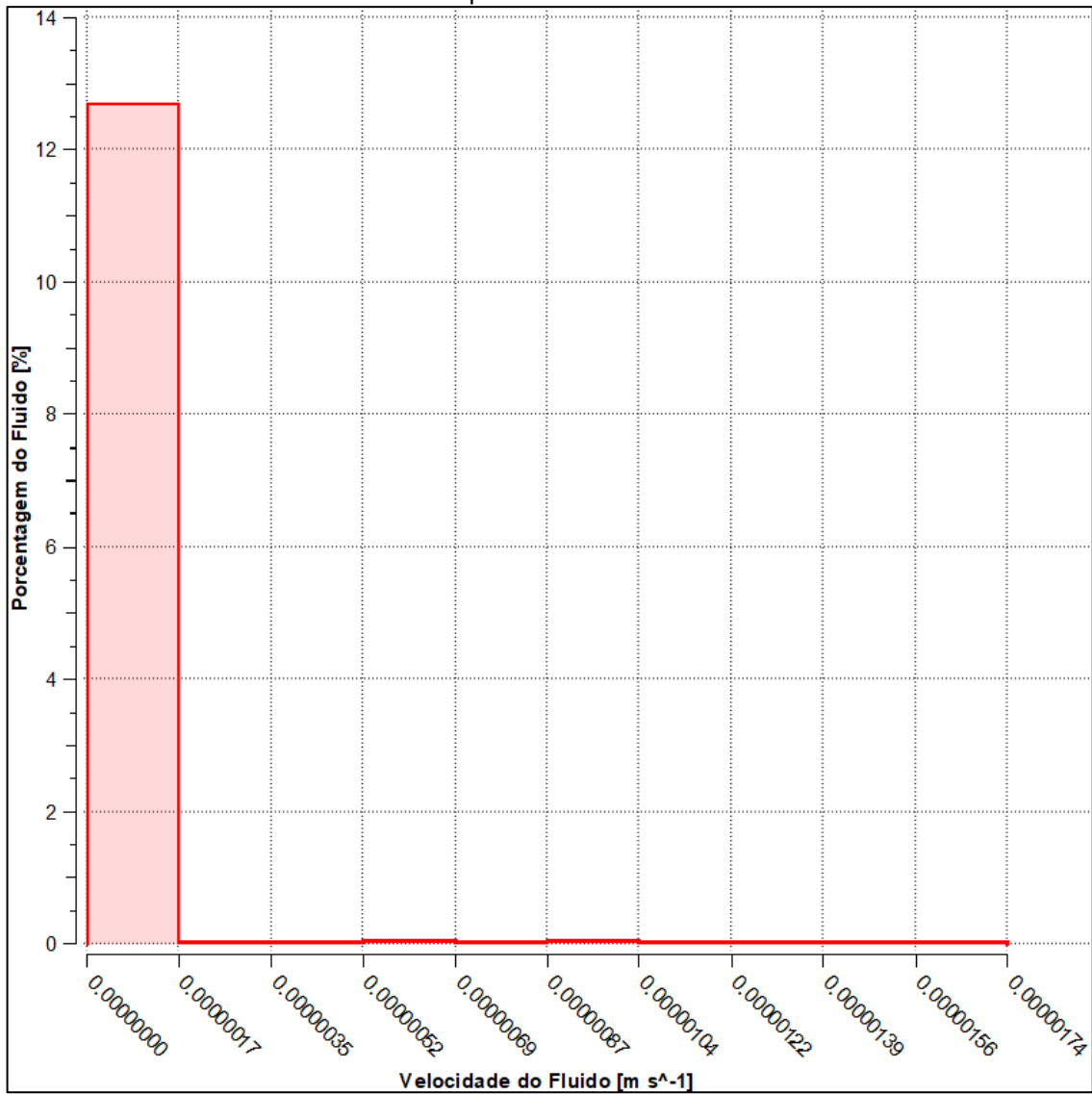
valor simulado e o valor experimental, demonstrando uma má representação dos ensaios pelas simulações. Tal fato pode indicar a necessidade de uma malha mais refinada para a realização dos estudos computacionais. De acordo com Fortuna (2000), para uma boa solução numérica há a necessidade de uma malha de boa qualidade, que seja bem refinada em regiões onde os gradientes das variáveis dependentes são mais elevados.

Figura 13 - Histograma da porcentagem do fluido (água) com velocidade inferior a $3,48 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ para o reator operado com TDH de 4 h



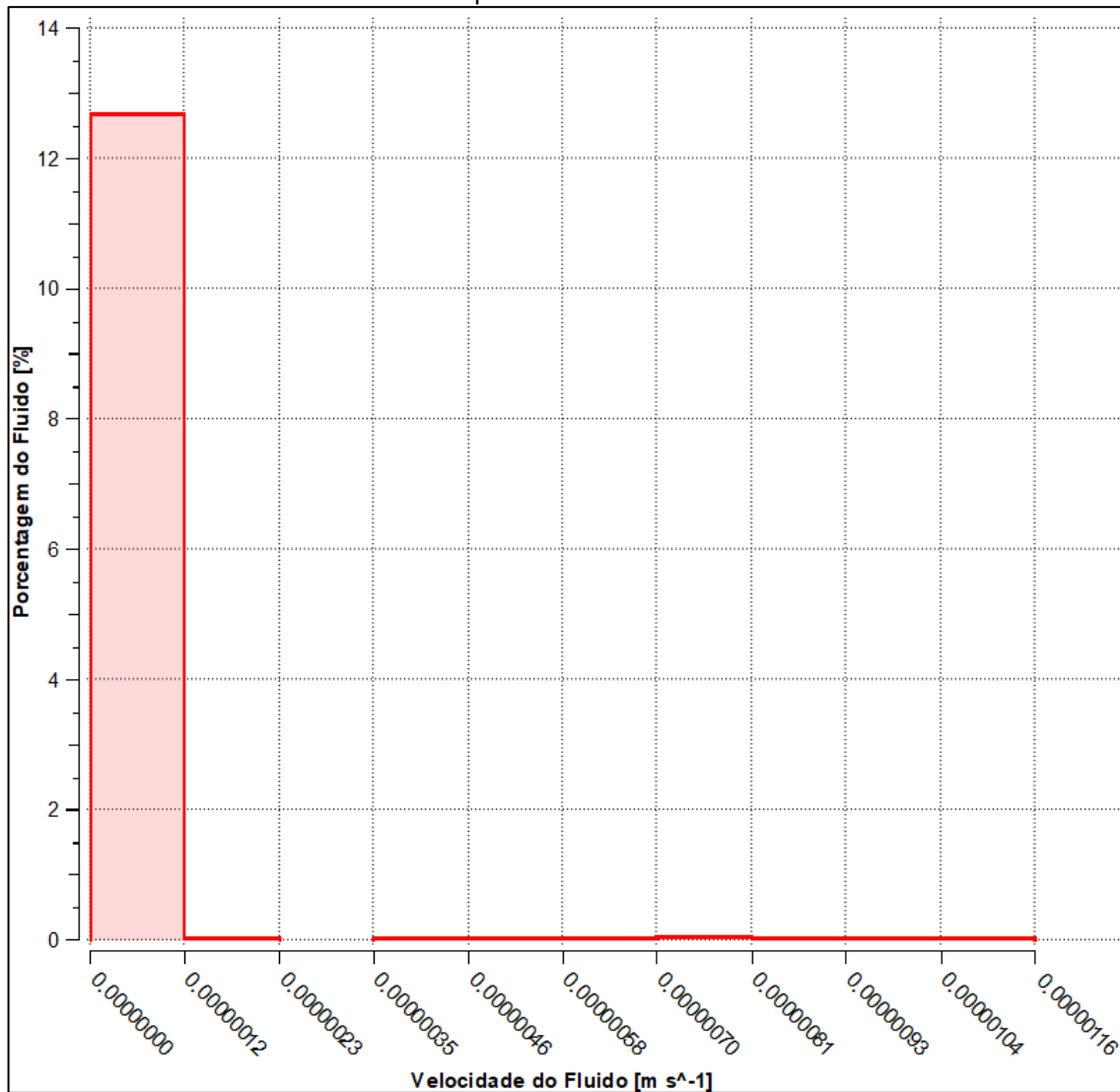
Fonte: Autoria própria (2018).

Figura 14 - Histograma da porcentagem do fluido (água) com velocidade inferior a $1,74 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ para o reator operado com TDH de 8 h



Fonte: Autoria própria (2018).

Figura 15 - Histograma da porcentagem do fluido (água) com velocidade inferior a $1,16 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ para o reator operado com TDH de 12 h



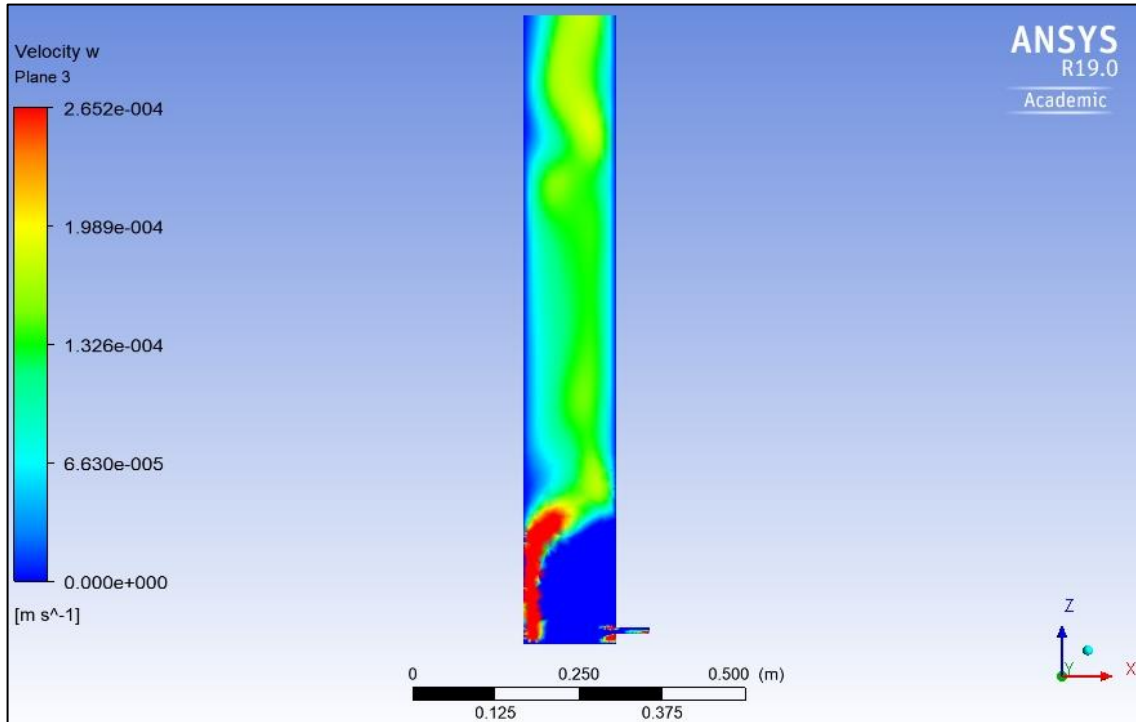
Fonte: Autoria própria (2018).

O comportamento dos campos de velocidade da água no reator para os tempos de detenção utilizados nesse estudo, podem ser observados nas Figuras 16, 17 e 18. A partir desses campos, foi possível observar que para todos os TDH simulados, houve uma região (em azul escuro) próxima a entrada do reator que apresentou velocidades próximas a 0 m s^{-1} , configurando-se uma região de zonas mortas. Verificou-se também que as três simulações apresentaram maiores velocidades da água junto a lateral oposta da entrada do reator.

Outro ponto que pode ser destacado pelos perfis de velocidade é que para o TDH de 12 h (Figura 18), houve a presença de caminhos preferenciais na região central do reator (zona em vermelho), onde foram observadas maiores velocidades ascensionais, indicando uma maior facilidade do fluido em atravessar por aquela

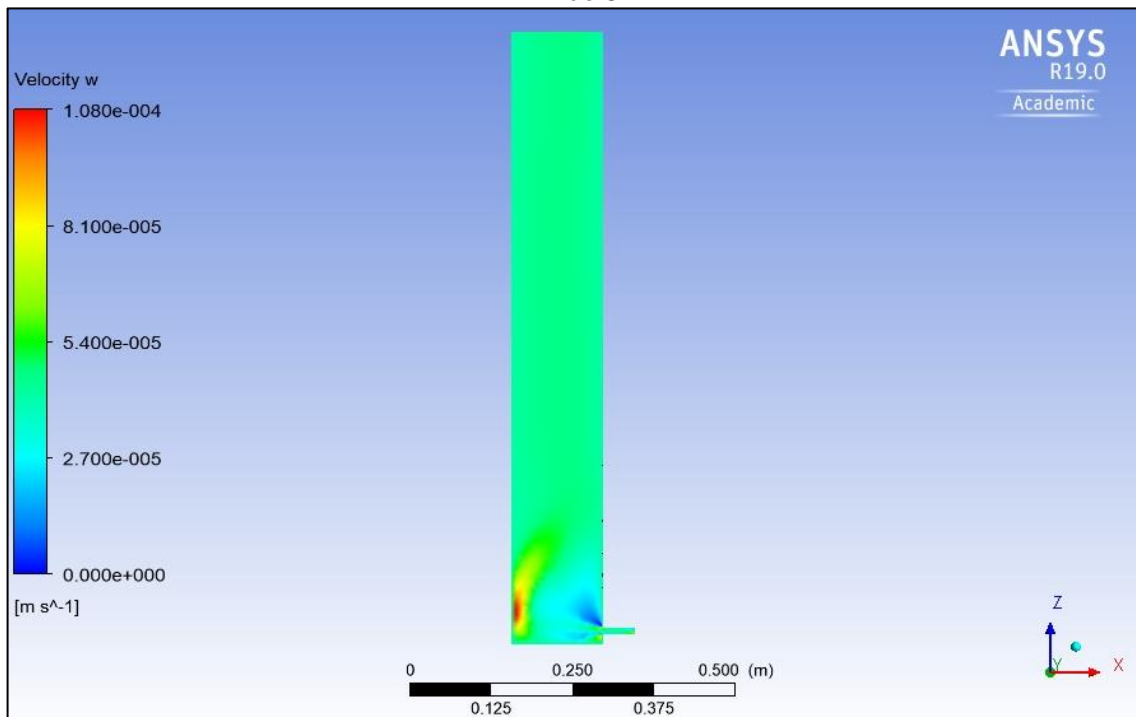
região. Além disso, notou-se que para o TDH de 8 h, a simulação indicou uma distribuição mais homogênea das velocidades ao longo do reator.

Figura 16 - Comportamento da velocidade da água no interior do reator UAHB para a simulação com TDH de 4 h



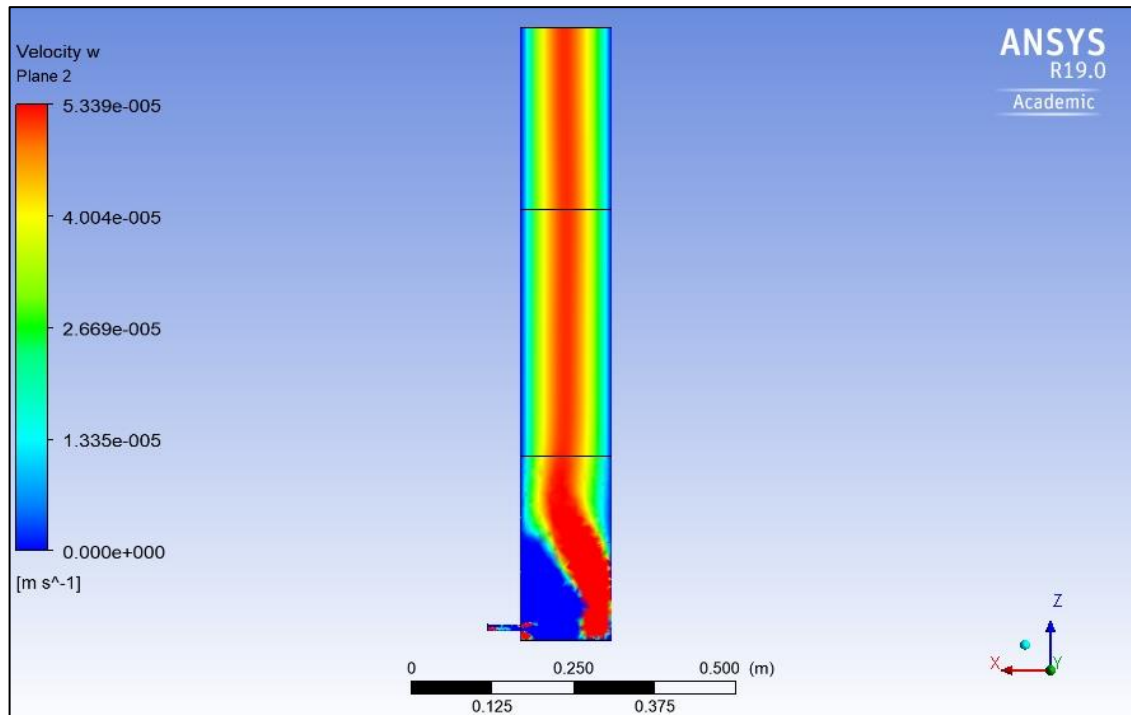
Fonte: Autoria própria (2018).

Figura 17 - Comportamento da velocidade da água no interior do reator UAHB para a simulação com TDH de 8 h



Fonte: Autoria própria (2018).

Figura 18 - Comportamento da velocidade da água no interior do reator UAHB para a simulação com TDH de 12 h.

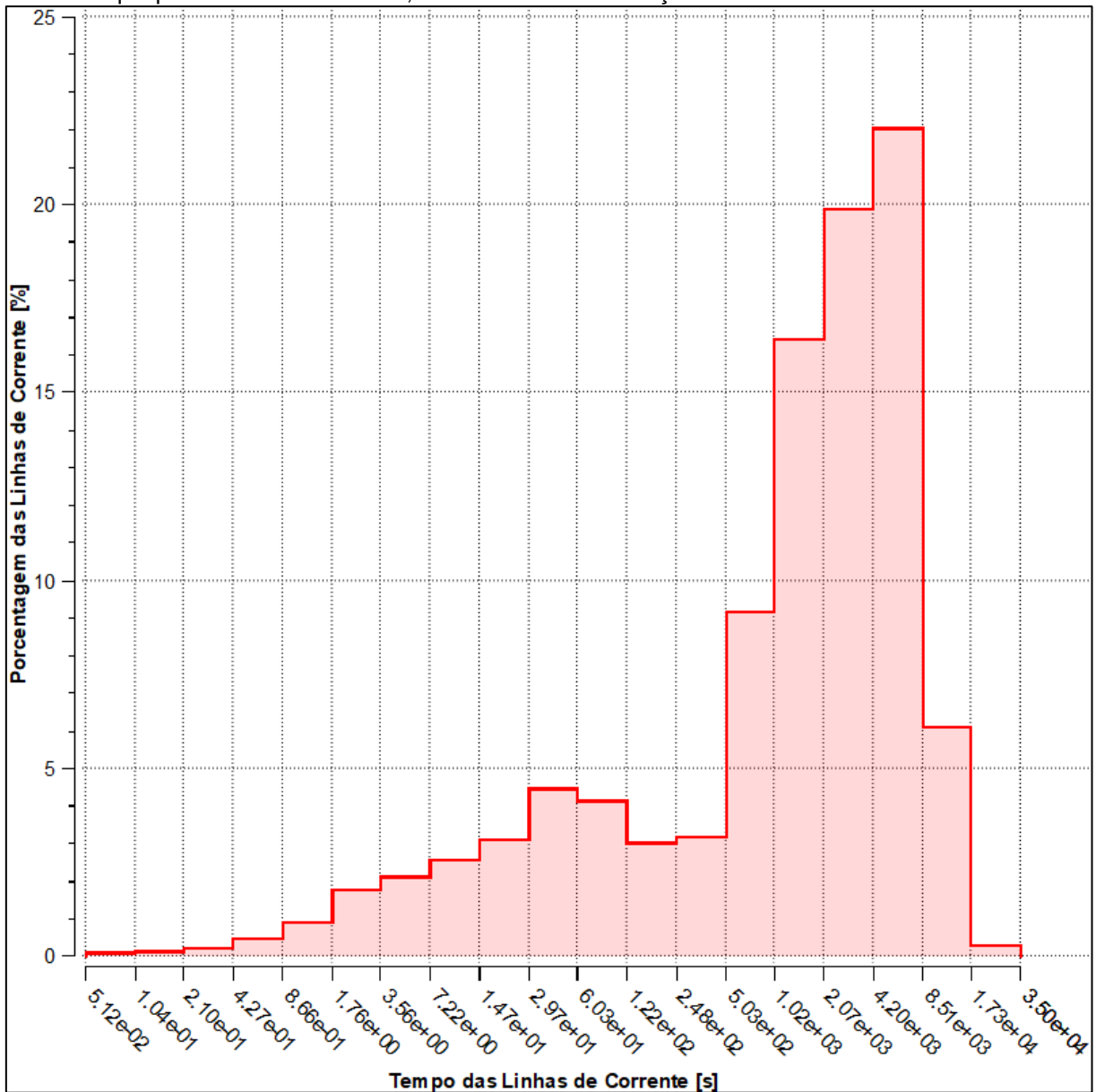


Fonte: Autoria própria (2018).

As simulações também permitiram analisar o tempo que os diferentes fluxos de água necessitam para percorrer toda a seção do reator, sendo que tal análise foi realizada por meio da avaliação do comportamento das linhas de corrente (*Streamlines*) do fluido no reator UAHB estudado. Nas Figuras 19, 20 e 21 são apresentados os histogramas com as porcentagens de linhas de correntes em relação ao tempo que estas levam para percorrer todo o reator.

A partir da análise dessas figuras, pode-se notar que para os diferentes tempos de detenção simulados, houveram porcentagens consideráveis de linhas de corrente que apresentaram baixos tempos para atravessar toda a seção do reator UAHB, sendo que para o TDH de 4 h, foi verificado uma porcentagem de aproximadamente 50 % de linhas com tempos menores do que 0,6 h, para o TDH de 8 h, uma porcentagem de aproximadamente 43 % de linhas com tempos menores do que 1,6 h e para o TDH de 12 h, uma porcentagem de 48 % de linhas com tempos menores do que 2,25 h. Isso pode indicar a presença de caminhos preferenciais no interior do reator, uma vez que estas regiões promovem a saída mais rápida do fluido, o que também ficou evidenciado nos ensaios hidrodinâmicos realizados neste estudo. Cruz (2013), simulando diferentes condições de entrada em reatores UASB, também verificou a formação de caminhos preferenciais.

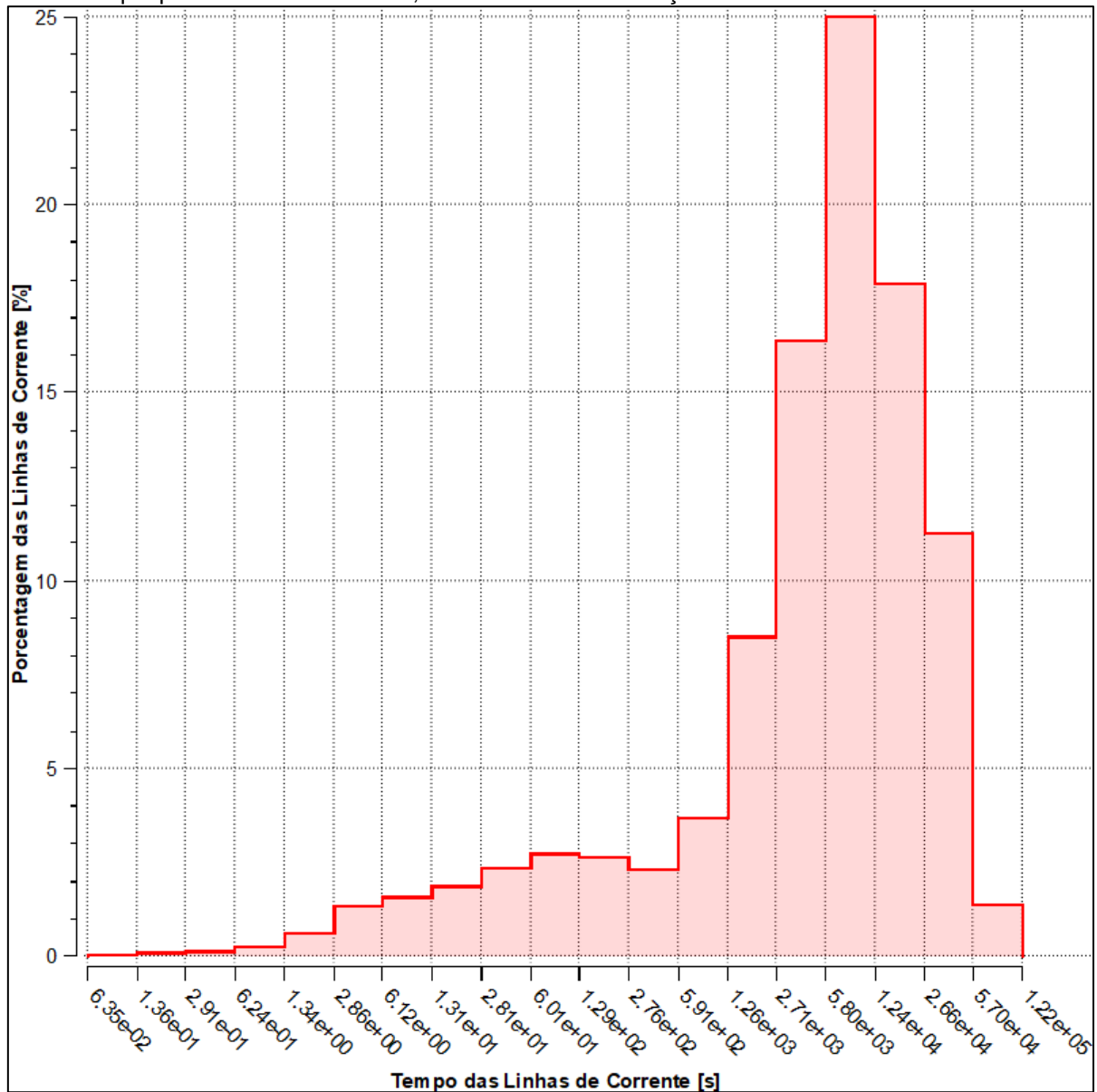
Figura 19 - Histograma da porcentagem de linhas de corrente em função do tempo necessário para que percorram todo o reator, considerando a simulação realizada com TDH de 4 h



Fonte: Autoria própria (2018).

Com base na Figura 19, pode-se observar que uma pequena parcela (6 %) das linhas de corrente apresentaram tempos mais próximos aos do TDH simulado (4 h). Além disso, verificou-se que o tempo máximo para algumas *streamlines* atravessarem o reator foi de aproximadamente 10 h.

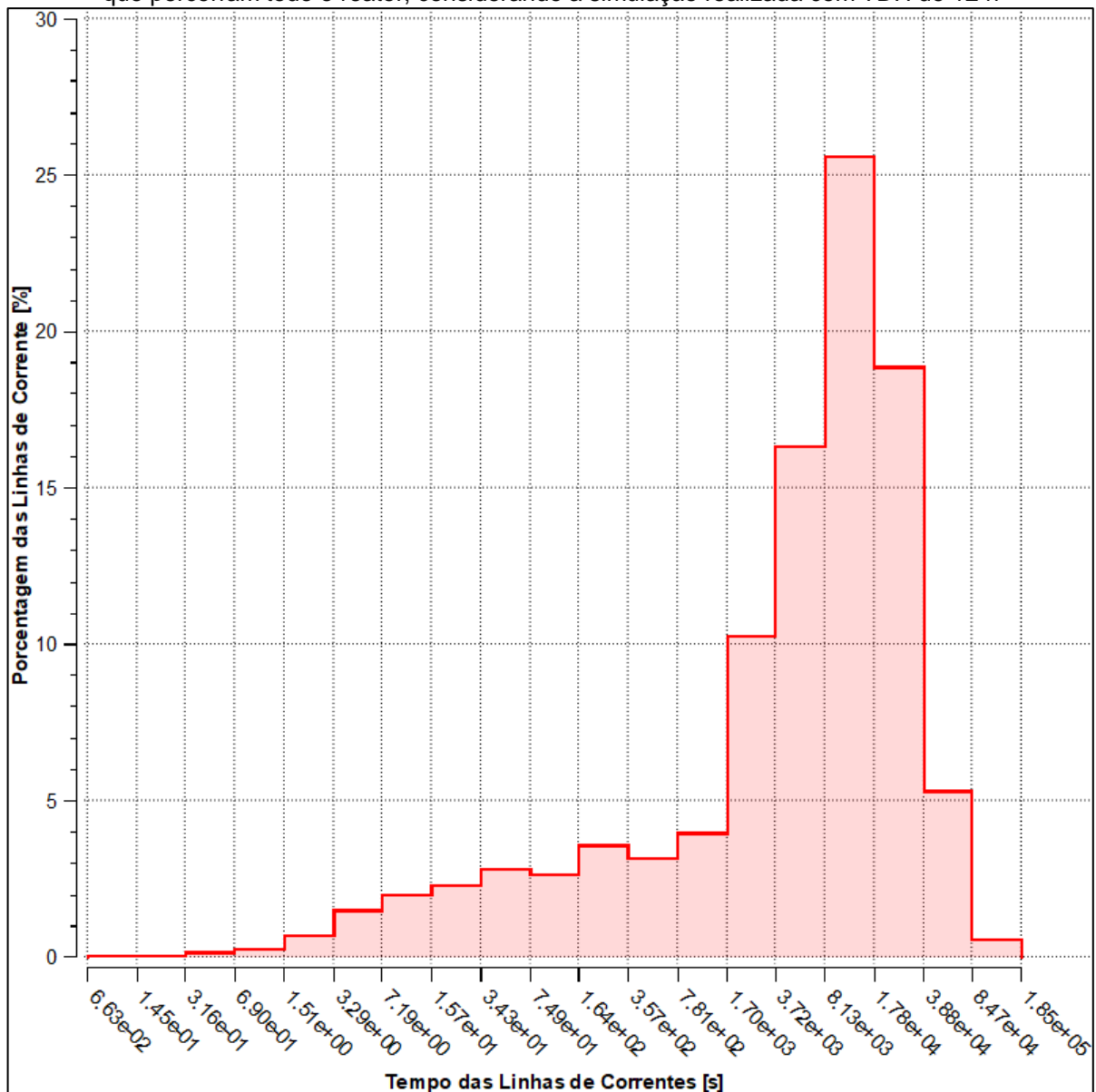
Figura 20 - Histograma da porcentagem de linhas de corrente em função do tempo necessário para que percorram todo o reator, considerando a simulação realizada com TDH de 8 h



Fonte: Autoria própria (2018).

Já com relação a Figura 20, foi possível notar que 18 % das linhas de corrente percorreram o reator em tempos entre 3,4 e 7,4 h e que aproximadamente 12 % levaram tempos maiores do que o TDH teórico simulado para percorrer todo o reator, sendo que o tempo máximo observado foi de 33,9 h.

Figura 21 - Histograma da porcentagem de linhas de corrente em função do tempo necessário para que percorram todo o reator, considerando a simulação realizada com TDH de 12 h



Fonte: Autoria própria (2018).

Observando a Figura 21, verificou-se que 19 % das linhas de corrente levaram de 4,9 a 10,8 h para percorrer todo o reator, considerando que o tempo máximo de uma *streamline* para esse TDH (12 h) foi de aproximadamente 51,4 h, o que é extremamente elevado, podendo indicar zonas de estagnação e recirculação do fluido no reator simulado.

6 CONCLUSÕES

A partir dos ensaios hidrodinâmicos realizados, pode-se concluir que na maioria dos ensaios houve adiantamento dos picos de concentração de eosina Y, indicando a presença de caminhos preferenciais no reator. Os ensaios também permitiram a observação do fenômeno de cauda longa nas curvas de variação da concentração de eosina Y ao longo do tempo e nas curvas de distribuição do tempo de residência (DTR), que pode ter ocorrido devido a difusão do traçador em zonas ativas do material suporte, pela retenção do traçador em zonas estagnadas do reator e pela ocorrência de recirculação interna do fluido. A presença de alguns picos ao longo das curvas de variação para o TDH testados, indicam que houve a ocorrência de recirculação interna no reator UAHB estudado.

Por meio do ajuste dos dados experimentais aos modelos teóricos uniparamétricos, foi possível concluir que em grande parte dos ensaios foram obtidos TDH reais menores do que os teóricos, o que reflete o adiantamento da resposta do traçador. Outro aspecto demonstrado pelo ajuste dos dados experimentais foi a tendência do reator UAHB ao regime de mistura completa, já que o modelo N-CSTR apresentou os maiores coeficientes de correlação.

Com relação as anomalias e características hidráulicas, notou-se que três ensaios apresentaram valores negativos para o volume de zonas mortas, sendo um indicativo da presença de caminhos preferenciais no reator. Porém, verificou-se que a maioria dos ensaios apresentaram valores positivos para o volume de zonas mortas, o que pode ter influenciado no lento decaimento da concentração de eosina ao longo do tempo (efeito de cauda longa). Foi verificado que o número de Reynolds indicou escoamento laminar no reator; não houve a presença de curtos-circuitos hidráulicos em nenhum dos ensaios e que a eficiência hidráulica variou entre satisfatória e boa entre os ensaios, sendo que a maioria apresentou eficiências insatisfatórias.

A partir das simulações, pode-se observar que o reator UAHB apresentou caminhos preferenciais no escoamento do fluido, além de zonas mortas, que se localizaram principalmente próximo a entrada do reator. Essas anomalias também foram verificadas durante a realização dos ensaios hidrodinâmicos. Porém, devido aos altos erros relativos observados entre os resultados dos ensaios hidrodinâmicos e das simulações para o volume de zonas mortas, não foi possível validar as simulações em CFD.

7 RECOMENDAÇÕES

Com base nos resultados obtidos neste estudo, as seguintes sugestões são recomendadas para a realização de novas pesquisas:

- Tratar algum tipo de água residuária no reator UAHB para verificar a sua eficiência;
- Avaliar o comportamento hidrodinâmico do reator UAHB em outros tempos de detenção hidráulico;
- Realizar os ensaios hidrodinâmicos com a utilização de outros tipos de traçadores;
- Realizar as simulações numéricas com malhas mais refinadas.

REFERÊNCIAS

- ARAUJO, T. L. da S.; ARAÚJO JÚNIOR, M. M. de; ARAUJO, P. L. da S.; LERMONTOV, A.; FORESTI, E. Reator anaeróbio híbrido: alternativa para aumento de capacidade de reatores UASB. **Hydro**, n. 120, p. 24-31, out. 2016.
- ARAÚJO JÚNIOR, M. M. de. **Reator combinado anaeróbio-aeróbio de leito fixo para remoção de matéria orgânica e nitrogênio de água residuária de indústria produtora de lisina**. 2006. 160 f. Tese (Doutorado) – Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
- BAETTKER, E. C. **Avaliação do desempenho de filtros anaeróbios preenchidos com diferentes meios suportes no tratamento de água residuária sintética**. 2015. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.
- BELINI, A. D. **Otimização da remoção da matéria carbonácea e nitrogenada de esgoto sanitário por sistema combinado anaeróbio-aeróbio de leito fixo**. 108 f. Dissertação (Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.
- BRASIL, Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). R. E, nº 899 de 29 de maio de 2003 – Guia para validação de métodos qualitativos e bioanalíticos. Disponível em: <http://portal.anvisa.gov.br/documents/10181/2718376/RE_899_2003_COMP.pdf/ff6fdc6b-3ad1-4d0f-9af2-3625422e6f4b>. Acesso em: 05 jan. 2018.
- CALHEIROS, H. C.; PERICO, A. C. S.; NUNES, C. F. Estudo experimental de aspectos hidrodinâmicos e da partida de um reator anaeróbio sequencial tratando esgotos domésticos. **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 4, n. 3, p. 144-156, 2009.
- CARVALHO, K. Q. de. **Resposta dinâmica de reator UASB em escala piloto submetido a cargas orgânicas e hidráulicas cíclicas: modelos matemáticos e resultados experimentais**. 2006. 193 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
- CARVALHO, K. Q. de; SALGADO, M. T.; PASSIG, F. H.; PIRES, E. C. Avaliação Hidrodinâmica de Reator UASB Submetido à Variação Cíclica de Vazão. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 13, n. 2, p. 226-235, abr/jun. 2008.
- CASTRO, F. M. S. de. **Estudo do comportamento hidrodinâmico de uma nova proposta de configuração interna para reator UASB**. 2010. 102 f. Dissertação (Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2010.

CAVALCANTI, M. P. **Tratamento de esgoto doméstico em reator híbrido de fibra de Vidro tipo UASB e filtro anaeróbio para comunidades de pequeno porte.** 2005. 84 f. Dissertação (Mestre em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Universidade Federal do Pernambuco. Recife, 2005.

CHERNICHARO, C., A. de I. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias: Reatores anaeróbios.** 1. ed. Belo Horizonte: UFMG, 1997, 245 p. 3.v.

CRUZ, D. B. **Estudo hidrodinâmico computacional de reator UASB em escala de bancada com validação experimental.** 2013. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2013.

D'BASTIANI, C. **Aplicação de modelagem multifásica para estudo de biorreatores anaeróbios.** 2017. 210 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências Ambientais) – Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, 2017.

FORESTI, E., FLORÊNCIO, L., HAANDEL, A. V.; ZAIAT, M.; CAVALCANTI, P. F. F. Fundamentos do tratamento anaeróbio. In: Campos, J. R. (coordenador). **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo.** Rio de Janeiro. ABES, 435 p., 1999.

FORTUNA, A. O. **Técnicas Computacionais para Dinâmica de Fluidos: Conceitos Básicos e Aplicações.** 1 ed. São Paulo: Ed. EDUSP, 2000.

FRANZMANN, B. R.; SANTOS, C. M.; SOARES, C.; MEIER, H. F. Verificação e validação de um modelo 3-D e transiente para o escoamento multifásico em tanques sépticos. **Biblioteca virtual de desarrollo sostenible y salud ambiental.** 2003. Disponível em: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/abes22/xcviii.pdf>>. Acesso em: 29 set. 2017.

FREITAS, D. C. **Estudo do comportamento hidrodinâmico de reator anaeróbio-aeróbio de leito fixo tratando efluente bovino.** 2012. 51 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2013.

GODINHO, J. P. **Análise hidrodinâmica e de remoção orgânica de reator anaeróbio de manta de lodo e fluxo ascendente (UASB) submetido a sobrecarga hidráulica.** 2015. 69 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2015.

GODINHO, J. P. **Comportamento dinâmico e hidrodinâmico de reator anaeróbio híbrido (UAHB) submetido à variação de carga hidráulica horária no tratamento de esgoto sanitário.** 2017. 128 f. Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

- GONÇALVES, G. de C. **Desempenho de reator anaeróbio híbrido no tratamento de águas residuárias de suinocultura**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.
- GUIOT, S. R.; VAN DEN BERG, L. Performance and biomass retention of upflow anaerobic reactor combining a sludge blanket and a filter. *Biotechnology Letters*, v. 6, p. 161 - 164, 1984.
- KATO, M. T.; NETO, C. O. de A.; CHERNICHARO, C. A. de L.; FORESTI, E.; CYBIS, L. F. Configurações de Reatores Anaeróbios. In: Campos, J. R. (coordenador). **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. Rio de Janeiro. ABES, 435 p., 1999.
- KENNEDY, K. J.; GUIOT, S. R. Anaerobic Upflow Bed-Filter–Development and Application. *Water science and technology*, v. 18, n. 12, p. 71-86, 1986.
- KOERICH, D. M.; ROSA, L. M. Uso da fluidodinâmica computacional no estudo de biorreatores aplicados ao tratamento de efluentes. In: Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental, 10, 2016, Porto Alegre.
- KREUTZ, C. **Comportamento de reator anaeróbio-aeróbio no tratamento de efluente bovino**. Cascavel. 2012. 99 f. Tese (Doutorado), Universidade do Oeste do Paraná, 2012.
- KREUTZ, C.; CARVALHO, K. Q. de; PASSIG, F. H.; BELINI, A. D.; CORDOVIL, C. S. de C. M. dos S.; GOMES, S. D. Impact of the hydraulic loading rate on the hydrodynamic characteristics of an anaerobic fixed bed reactor treating cattle slaughterhouse wastewater. *Engenharia Agrícola*, [s.l.], v. 38, n. 3, p.403-410, jun. 2018.
- LANDGRAF, A. C. M.; SILVA, L. E. F da; TOMOTO, A. L. da S.; ARANTES, E. J; CASTRO, T. M. de. Análise do comportamento hidrodinâmico de um reator UASB. *Acta Tecnológica*, v. 12, n. 1, p. 11 – 20, 2017.
- LEITE, A. E. de B. **Simulação do lançamento de esgotos domésticos em rios usando um modelo de qualidade d'água, SisBahia**. 2004. 86 f. Dissertação (Mestre em Saúde Pública) – Escola Nacional de Saúde Pública, Fiocruz, Rio de Janeiro, 2004.
- LETTINGA, G.; VAN VELSEN, A. F. M.; HOBMA, S. W.; DE ZEEUW, W.; KLAPWIJK, A. Use of upflow sludge blanket (USB) reactor concept for biological wastewater treatment, especially for anaerobic treatment. *Biotechnology and Bioengineering*, v. 22, p. 699-734, 1980.
- LEVENSPIEL, O. **Engenharia das Reações Químicas**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2000.
- LIMA, C. A. A. **Tratamento de esgoto sanitário em reator horizontal de leito fixo (RAHLF) - Escala Piloto**. 2001. 165 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

LIMA, D. de A.; LIMA, J. de F.; SOUSA, G. L. S.; HENRIQUE, I. N.; SOUSA, J. T. de. Tratamento de esgoto sanitário em reator anaeróbio híbrido. 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/282735304_TRATAMENTO_DE_ESGOTO_SANITARIO_EM_REATOR_ANAEROBIO_HIBRIDO>. Acesso em: 15 set. 2017.

LOURENÇO, A. M. P.; CAMPOS, C. M. M. Hydrodynamic behavior of a lab-scale upflow anaerobic sludge blanket reactor (UASB) operated with an adopted hydraulic retention time (HRT) of 12 hours. **Ciência e Agrotecnologia**. v. 33, p. 1139-1144, jul./ago. 2009.

MARTINS, J. E. M. **Avaliação do comportamento de um reator UASB tratando esgotos sanitários da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, câmpus Campo Mourão**. 2012. 104 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2012.

MARTINS, V. F. **Comparação do comportamento hidrodinâmico de reatores anaeróbios de manta de lodo e fluxo ascendente (UASB) em diferentes escalas**. 2013. 64 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2013.

NASCIMENTO JUNIOR, S. L. **Estudo do comportamento hidrodinâmico de reator anaeróbio-aeróbio de leito fixo tratando efluente bovino**. 2013. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2013.

NARDI, I. R.; ZAIAT, M.; FORESTI, E. Influence of the tracer characteristics on hydrodynamic models of packed-bed bioreactors. **Bioprocess Engineering**. pp 469-476, 1999.

OKIYAMA, D. C. G. **Simulação numérica da hidrodinâmica de biorreator em leito fixo para tratamento de vinhaça**. 2014. 86 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2014.

PASSIG, F. 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.

PASSIG, F. H.; BLUNDI, C. E. **Caracterização hidrodinâmica de um filtro anaeróbio de fluxo ascendente**. 1996. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/237217382_CHARACTERIZACAO_HIDRODINAMICA_DE_UM_FILTRO_ANAEROBIO_DE_FLUXO_ASCENDENTE>. Acesso em: 12 out. 2018.

PEÑA, M. 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.

PERSSON, J.; SOMES, N. L. G.; WONG, T. H. F. Hydraulics efficiency of constructed wetlands and ponds. **Water Science & Technology**. v. 40, n. 3, p. 291 – 300, 1999.

PONTES, A. F. V. **Avaliação de desempenho de reator anaeróbio-aeróbio com recirculação da fase líquida no tratamento de água residuária proveniente de abatedouro de aves**. 2009. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

RINCÓN, N.; GALINDO, A., PÉREZ, J. Evaluación del comportamiento hidráulico en un reactor anaerobio de doble cámara (RADCA). **Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia**. v. 61, p. 53-63. 2011.

REN, T.; MU, Y.; NI, B.; YU, H. Hydrodynamics of Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactors. **AIChE Journal: Environment and Energy Engineering**, Newark, v. 55, n. 2, p. 516-528, 2008. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/aic.11667/pdf>>. Acesso em: 10 out. 2018.

RODRIGUES, C. M. **Análise de parâmetros hidrodinâmicos de reator anaeróbio-aeróbio de leito fixo com biomassa imobilizada**. 2015. 71 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2015.

SALGADO, M. T. **Modelo matemático para avaliação hidrodinâmica em reatores tubulares operando em regime não-permanente**. 2008. 145 f. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2008.

SARATHAI, T.; KOOTTATEP, T.; MOREL, A. Hydraulic characteristics of an anaerobic baffled reactor as onsite wastewater treatment system. **Journal of Environmental Science**, 22(9): 1319-1326, 2010.

SINGH, K. S.; VIRAGHAVAN, T.; BHATTACHARYA, D. Sludge Blanket Height and Flow Pattern in UASB Reactor: Temperature Effects. **Journal Environmental and Engineering**, v. 132, n.8, p. 895-900, 2006. Disponível em: <<http://cedb.asce.org/cgi/WWWdisplay.cgi?153817>>. Acesso em: 30 out. 2018.

SOUZA, T. 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.

SCHRANK, S. G. **Tratamento anaeróbio de águas residuárias da indústria têxtil**. 2000. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2000.

STREETER, V. L.; WYLIE, B. E. **Mecânica dos fluidos**. 7. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 589 p., 1982.

TAWFIK, A.; EL-KAMAH, H. Treatment of fruit-juice industry wastewater in a two-stage anaerobic hybrid (AH) reactor system followed by a sequencing batch reactor (SBR), **Environmental Technology**, v. 33, n. 4, 429-436, 2012.

THACKSTON, E. L.; SHIELDS JR., D. F.; SCHROEDER, P. R. Residence time distributions of shallow basins. **Journal of Environmental Engineering**. v. 116, n. 6, p. 1319–1332. 1987.

TOSCANI, D. C. **Avaliação e aplicação de simulações matemáticas para definição de regime hidráulico e constantes cinéticas de remoção de matéria orgânica em reatores de tratamento de esgoto sanitário**. 2010. 206 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method**, 1. ed. Harlow: Longman Scientific and Technical, 1995.

WERNER, S. H.; EDUARDO, C. P. Modelagem hidrodinâmica de reatores anaeróbios de escoamento ascendente e manta de lodo (UASB). **Biblioteca virtual de desarrollo sostenible y salud ambiental**. São Carlos. 1996.

ZAIAT, M.; PASSIG, F. H.; FORESTI, E. A mathematical model and criteria for designing horizontal-flow anaerobic immobilized biomass reactors for wastewater treatment. **Bioresource Technology**, v. 71, p. 235-243, 2000.