**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E SANEAMENTO**

**COAGULAÇÃO, FLOCULAÇÃO E FLOTAÇÃO DO EFLUENTE DE REATORES
ANAERÓBIOS, TRATANDO ESGOTO SANITÁRIO, COM APLICAÇÃO DE
DIFERENTES DOSAGENS DE COAGULANTE EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DA
TURBIDEZ DO ESGOTO AFLUENTE AO LONGO DO DIA.**

GUSTAVO CARNEIRO ARIANO

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de Hidráulica e Saneamento.

Orientador: Professor Dr. Marco Antônio Penalva Reali.

**São Carlos – São Paulo
OUTUBRO DE 2009**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTES
TRABALHOS, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO,
PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

A696c Ariano, Gustavo Carneiro
Coagulação, floculação e flotação do efluente de
reatores anaeróbios, tratando esgoto sanitário, com
aplicação de diferentes dosagens de coagulante em função
da variação da turbidez do esgoto afluente ao longo do
dia / Gustavo Carneiro Ariano ; orientador Marco Antônio
Penalva Reali. -- São Carlos, 2009.

Dissertação (Mestrado-Programa de Pós-Graduação e Área
de Concentração em Engenharia Hidráulica e Saneamento) --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São
Paulo, 2009.

1. Tratamento de esgoto sanitário. 2. Pós-tratamento
de efluentes de reator UASB por flotação. 3. ETE Anhumas.
I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **GUSTAVO CARNEIRO ARIANO**

Dissertação defendida e julgada em 11/09/2009 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Dr. **MARCO ANTONIO PENALVA REALI (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Prof. Dr. **RODRIGO BRAGA MORUZZI**
(Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho"/UNESP/Campus de Rio Claro)

Aprovado

Prof. Associado **ROQUE PASSOS PIVELI**
(Escola Politécnica/USP)

Aprovado

Prof. Associado **MARCELO ZAIAT**

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento.

Prof. Titular **GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA**
Presidente da Comissão da Pós-Graduação da EESC

Este trabalho é dedicado em memória de meu pai,
Engenheiro Civil Gilberto Hernandes Ariano.

AGRADECIMENTOS

Ao grandioso Deus por deixar Suas “impressões digitais” em todo o longo caminho por mim percorrido até a finalização de mais esta importante etapa de minha vida;

Minha mãe “Bebeco”, responsável pela minha educação e formação, a quem serei grato por toda vida;

Meu irmão Gilberto Ariano Filho, melhor jogador de biribol do mundo;

A minha noiva Larissa, por seu apoio incondicional, colaboração e paciência durante a elaboração desta pesquisa;

Professoras Margarida Marchetto e Solange Dombroski, por me incentivarem a iniciar o mestrado aqui na Escola de Engenharia de São Carlos, as quais serei sempre grato;

A Sociedade de Abastecimento de Água e Saneamento S/A – SANASA e a Fundação para o Incremento da Pesquisa e do Aperfeiçoamento Industrial – FIPAI , pelo financiamento de minha pesquisa;

Aos engenheiros do setor de operações de esgoto da SANASA, Sérgio Gandrin, Otávio e Renata, pela colaboração e troca de experiências durante minha pesquisa na ETE Anhumas;

Sr. Renato Rosseto, gerente do setor de operação de esgoto da SANASA;

Todo o corpo técnico do laboratório de análises de esgoto da SANASA, em especial Paiva, Vilma e Adriane;

Ao meu querido amigo professor Nelson, coordenador do laboratório central de análises de esgoto da SANASA;

Ao Engº José Everaldo Elorza Prado, por apoiar e acreditar no meu trabalho;

Meus amigos Miguel e João, pelo auxílio na finalização do trabalho;

A todos os professores, alunos, técnicos, funcionários e colaboradores do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos, por estes anos inesquecíveis e de grande importância para o meu crescimento intelectual;

Aos professores José Roberto Campos, Jurandir Povinelli, Sílvia Povinelli, Eduardo Mário Mediondo e Marco Antônio Penalva Reali, pelos ensinamentos durante as disciplinas em que pude participar;

Agradecimento especial aos engenheiros Luis Daniel, Leila Jorge Patrizzi, Rodrigo Moruzzi e Pedro Ivo, pela colaboração nos exames de qualificação;

Por fim, novamente ao meu orientador, professor Marco Antônio Penalva Reali, pela paciência, auxílio e pelo voto de confiança na elaboração deste trabalho.

“A falta de comprometimento com seus projetos faz com que todos os seus objetivos se tornem falhos”.

Frase de Minha Noiva Larissa Keiko.

SUMÁRIO

RESUMO.....	4
ABSTRACT.....	5
LISTA DE FIGURAS.....	6
LISTA DE TABELAS.....	13
LISTA DE ABREVIATURAS, FÓRMULAS E SÍMBOLOS	15
1 INTRODUÇÃO	20
2 OBJETIVOS	23
2.1 OBJETIVO GERAL	23
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
3 REVISÃO DA LITERATURA	24
3.1 USO DA FAD NO PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTES EM GERAL	24
3.2 USO DA FAD NO PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTES ANAERÓBIOS.....	27
4 MATERIAIS E MÉTODOS	39
4.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	39
4.1.1 SISTEMA DE ESGOTAMENTO DO RIBEIRÃO ANHUMAS	39
4.1.2 ETE ANHUMAS	40
4.2 ENSAIOS COM FLOTATESTES	48
4.2.1 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	48
4.2.2 PRODUTOS QUÍMICOS UTILIZADOS.....	50
4.2.2.1 Coagulantes.....	50
4.2.2.2 Polímeros.....	51
4.2.3 PARÂMETROS FIXADOS.....	52
4.2.3.1 Gradiente médio de velocidade na mistura rápida (Gmr).....	52
4.2.3.2 Pressão de saturação (Psat)	52
4.2.3.3 Velocidades de flotação (Vf).....	53

4.2.4	ROTEIRO DOS ENSAIOS	55
4.2.4.1	Fase 1: Variação da dosagem de coagulantes	55
4.2.4.1.1	Análises físico-químicas realizadas	56
4.2.4.1.2	Procedimentos	56
4.2.4.2	Fase 2: Variação da dosagem de polímeros	58
4.2.4.2.1	Análises físico-químicas	58
4.2.4.2.2	Procedimentos	59
4.2.4.3	Fase 3: Avaliação temporal do melhor coagulante e polímero	61
4.2.4.3.1	Análises físico-químicas	61
4.2.4.3.2	Procedimentos	62
4.2.4.4	Fase 4: Aplicação da $RD_m T_{(média)}$ ao longo do dia	65
4.2.4.4.1	Análises físico-químicas	66
4.2.4.4.2	Procedimentos	66
5	<u>RESULTADOS E DISCUSSÕES</u>	70
5.1	RESULTADOS DA FASE 1	70
5.1.1	AVALIAÇÃO DA DOSAGEM DE SULFATO DE ALUMÍNIO ($Al_2(SO_4)_3$)	70
5.1.1.1	Caracterização do esgoto bruto e efluente do reator UASB	70
5.1.1.2	Ensaio com <i>flotatestes</i>	74
5.1.2	AVALIAÇÃO DA DOSAGEM DE CLORETO DE POLIALUMÍNIO (PAC)	78
5.1.2.1	Caracterização do esgoto bruto e efluente do reator UASB	79
5.1.2.2	Ensaio com <i>flotatestes</i>	82
5.1.3	AVALIAÇÃO DA DOSAGEM DE CLORETO FÉRRICO ($FeCl_3$)	87
5.1.3.1	Caracterização do esgoto bruto e efluente do reator UASB	87
5.1.3.2	Ensaio com <i>flotatestes</i>	89
5.2	RESULTADOS DA FASE 2	93
5.2.1	DOSAGEM DE $Al_2(SO_4)_3$ ASSOCIADO A DIFERENTES TIPOS DE POLÍMEROS	94
5.2.1.1	Caracterização do esgoto bruto e efluente do reator UASB	94
5.2.1.2	Ensaio com <i>flotatestes</i>	97
5.2.2	DOSAGEM DE PAC ASSOCIADO A DIFERENTES TIPOS DE POLÍMEROS	103
5.2.2.1	Caracterização do esgoto bruto e efluente do reator UASB	103
5.2.2.2	Ensaio com <i>flotatestes</i>	106
5.2.3	DOSAGEM DE $FeCl_3$ ASSOCIADO A DIFERENTES TIPOS DE POLÍMEROS	113
5.2.3.1	Caracterização do esgoto bruto e efluente do reator UASB	113
5.2.3.2	Ensaio com <i>flotatestes</i>	116
5.2.4	DISCUSSÃO SOBRE RESULTADOS DA FASE 2	121
5.3	RESULTADOS DA FASE 3	122

5.3.1	AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO ESGOTO BRUTO E EFLUENTE DO REATOR UASB .	122
5.3.2	ESCOLHA DO COAGULANTE A SER EMPREGADO	128
5.3.3	ENSAIOS COM <i>FLOTATESTES</i>	130
5.3.3.1	Resultados do ensaio realizado com amostra coletada às 00:00 hs.....	130
5.3.3.2	Resultados do ensaio realizado com amostra coletada às 04:00 hs.....	133
5.3.3.3	Resultados do ensaio realizado com amostra coletada às 08:00 hs.....	138
5.3.3.4	Resultados do ensaio realizado com amostra coletada às 12:00 hs.....	142
5.3.3.5	Resultados do ensaio realizado com amostra coletada às 16:00 hs.....	146
5.3.3.6	Resultados do ensaio realizado com amostra coletada às 20:00 hs.....	150
5.3.4	RESUMO DA FASE 3.....	154
5.4	RESULTADOS DA FASE 4.....	154
5.4.1	CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE DO REATOR UASB	157
5.4.2	APLICAÇÃO DOS CENÁRIOS DE DOSAGENS DURANTE 24 HORAS	165
5.5	RESUMO DAS DISCUSSÕES	175
6	<u>CONCLUSÕES</u>	<u>178</u>
7	<u>RECOMENDAÇÕES</u>	<u>181</u>
8	<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	<u>183</u>

RESUMO

ARIANO, G. C. (2009). Coagulação, floculação e flotação do efluente de reatores anaeróbios, tratando esgoto sanitário, com aplicação de diferentes dosagens de coagulante em função da variação da turbidez do esgoto afluente ao longo do dia. Dissertação (mestrado), Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 181 p. São Carlos, SP.

Este trabalho avaliou a técnica de dosagem variável de coagulante em função da variação da turbidez do esgoto afluente a sistema de pós-tratamento por flotação do efluente de reatores UASB, localizado em Campinas, SP. Utilizou-se equipamento do tipo *Flotateste* para a flotação em escala de laboratório, sendo fixados os parâmetros: $T_{mr}=15$ s; $G_{mr}=800$ s⁻¹; $T_{floc}=20$ min; $G_{floc}=90$ s⁻¹; $P_{sat}=5,00$ Bar. Foram estudadas quatro velocidades de flotação (V_f), entre 8 à 20 cm.min⁻¹. Na fase 1 da pesquisa estudou-se os coagulantes $Al_2(SO_4)_3$, PAC e $FeCl_3$, sendo determinadas as melhores dosagens para o horário das 12:00 horas. Posteriormente, na segunda fase, foram fixadas as melhores dosagens de cada coagulante e associada dosagens variadas de polímeros catiônico, aniônico e não iônico. Em seguida, na fase 3, foi realizada avaliação temporal, com ensaios realizados em seis diferentes horários do dia, estabelecendo uma razão entre a variação da turbidez afluente com a dosagem de coagulante. Finalmente, na quarta fase, foram aplicados quatro cenários de dosagens em doze horários diferentes ao longo de 24 horas. Para fase 1, verificou-se remoção de SST, DQO e fósforo para as dosagens de $Al_2(SO_4)_3$ (11,77mg Al_2O_3 .L⁻¹), 76,5%; 67,6% e 63,9%; PAC (8,45 mg Al_2O_3 .L⁻¹), 62,5%; 75,0% e 82,7%; e $FeCl_3$ (24,38mgFe.L⁻¹), 60,0%; 55,9% e 90,3%, respectivamente, para $V_f=16$ cm.min⁻¹. Na fase 2, determinou-se como melhor polímero, para ambos coagulantes, o polímero catiônico (PC), sendo associado às melhores dosagens definidas na fase1. Desta maneira na fase 2 verificou-se remoção de SST, DQO e fósforo para as dosagens associadas de $Al_2(SO_4)_3$ + PC (11,77mg Al_2O_3 .L⁻¹ + 1,00 mg PC.L⁻¹), 94,4 %, 88,6 % e 70,4 %; PAC + PC (8,45mg Al_2O_3 .L⁻¹ + 1,00 mg PC.L⁻¹), 94,7 %, 62,3 % e 88,8 %; e $FeCl_3$ + PC (24,38mgFe.L⁻¹ + 1,00 mg PC.L⁻¹), 77,3 %, 61,6 % e 91,6 %, respectivamente. O cloreto férrico foi escolhido para ser utilizado nas fases seguintes devido a capacidade de precipitação de sulfeto o qual atingiu concentrações de até 15 mg.L⁻¹ no efluente anaeróbio. Em adição, foram fixadas as dosagens de polímero catiônico em 1,00 mg.L⁻¹. Assim, para fase 3, a aplicação de dosagem variada entre 12,07 a 25,51 mgFe.L⁻¹, para seis diferentes horários resultou em DQO < 50 mg.L⁻¹ e Fósforo < 0,50 mg.L⁻¹ para $V_f=16$ cm.min⁻¹. A aplicação de razão entre a dosagem de Fe^{+3} e a turbidez afluente (RD_mT) de 0,463 mg Fe^{+3} .L⁻¹.UNT⁻¹ (para turbidez < 50 UNT) e 0,244 mg Fe^{+3} .L⁻¹.UNT⁻¹ (para turbidez > 50 UNT) na fase 4, garantiu para todas as velocidades de flotação estudadas turbidez < 15 UNT em 100 % dos ensaios. Em adição, ao se realizar correlação entre a concentração de SST no efluente da FAD e a turbidez, chegou-se a conclusão de que este cenário atingiu remoção de lodo próxima a dosagem de $FeCl_3$ máxima definidas na fase 3 (74 mg $FeCl_3$.L⁻¹), com economia de 27,8 % no consumo do coagulante.

Palavras chave: Tratamento de esgoto sanitário, pós-tratamento de efluentes de reator UASB por flotação e ETE Anhumas.

ABSTRACT

ARIANO, G. C. (2009). Coagulation, flocculation and flotation of anaerobic reactor effluents, treating sewage with the employment of different amounts of coagulant, according to the variation in sewage turbidity throughout the day. Dissertation (masters), Department of Hydraulics and Sanitation, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 181 p. São Carlos, SP.

This study evaluated the variable coagulant dosage technique according to the variation in turbidity of the influent sewage of the post-treatment flotation system of the UASB reactor effluents, located in Campinas, SP. Laboratory scale flotation equipment was used, with fixed parameters: $T_{mr}=15$ s; $G_{mr}=800$ s⁻¹; $T_{floc}=20$ min; $G_{floc}=90$ s⁻¹; $P_{sat}=5,00$ Bar. Four flotation velocities (V_f), between 8 a 20 cm.min⁻¹, were studied. Phase 1 of the research studied the coagulants $Al_2(SO_4)_3$, PAC e $FeCl_3$, being determined the best dosages for 12:00 pm. In phase 2 the best dosages of each coagulant were fixed and the associated cationic, anionic and nonionic polymer dosages were varied. In phase 3 experiments were taken at six different periods of the day, establishing a ratio between the variation in influent turbidity and coagulant dosage. In the fourth phase, four different dosage scenarios were applied at twelve different periods during a 24 hour day, to verify the best dosage scenario. In phase 1, the removal of TSS, COD and phosphorus was verified to the dosages of $Al_2(SO_4)_3$ (11,77mg Al_2O_3 .L⁻¹), 76,5%; 67,6% and 63,9%; PAC (8,45 mg Al_2O_3 .L⁻¹), 62,5%; 75,0% and 82,7%; and $FeCl_3$ (24,38mg Fe^{+3} .L⁻¹), 60,0%; 55,9% e 90,3%, respectively, for $V_f=16$ cm.min⁻¹. In phase 2 the cationic polymer (PC) was determined to be the best polymer for both coagulants, when applied to the best dosages determined in phase 1. This way, in phase 2 the removal of TSS, COD and phosphorus was verified to the associated dosages of $Al_2(SO_4)_3$ + PC (11,77mg Al_2O_3 .L⁻¹ + 1,00 mg PC.L⁻¹), 94,4 %, 88,6 % and 70,4 %; PAC + PC (8,45mg Al_2O_3 .L⁻¹ + 1,00 mg PC.L⁻¹), 94,7 %, 62,3 % and 88,8 %; and $FeCl_3$ + PC (24,38mg Fe^{+3} .L⁻¹ + 1,00 mg PC.L⁻¹), 77,3 %, 61,6 % e 91,6 %, respectively. Ferric chloride was chosen in the following phases due to its sulfide precipitation ability, reaching concentrations of up to 15 mg.L⁻¹ in the anaerobic effluent. In addition, the cationic polymer dosages were fixed to 1,00 mg.L⁻¹. Thus, in phase 3, the dosage, varying between 12,07 to 25,51 mg Fe^{+3} .L⁻¹, applied to six different periods resulted, to $V_f=16$ cm.min⁻¹, in COD < 50 mg.L⁻¹ and phosphorus < 0,50 mg.L⁻¹. The ratio between the dosage of Fe^{+3} and the influent turbidity (RD_{mT}) of 0,463 mg Fe^{+3} .L⁻¹.UNT⁻¹ (for turbidities < 50 NTU) and 0,244 mg Fe^{+3} .L⁻¹.UNT⁻¹ (for turbidities ≥ 50 NTU) when applied in phase 4, ensured, in 100% of the experiments, turbidity < 15 NTU for the studied flotation velocities. In addition, when correlating the concentration of TSS in FAD effluents with the turbidity, the conclusion was that this scenario reached a sludge removal close to that obtained by the maximum $FeCl_3$ dosage defined in phase 3 (74 mg $FeCl_3$.L⁻¹), with an economy of 27,8% in coagulant consumption.

Keywords: Domestic wastewater treatment, post-treatment flotation system of the UASB reactor effluents and WWTP Anhumas.

LISTA DE FIGURAS

<u>FIGURA 1.1 – ASPECTOS RELEVANTES NA ESCOLHA DE ALTERNATIVA DE TRATAMENTO.</u>	<u>20</u>
<u>FIGURA 4.1 – MAPA LOCALIZAÇÃO ETE ANHUMAS, CAMPINAS-SP.</u>	<u>40</u>
<u>FIGURA 4.2 – FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DE TRATAMENTO (ETE ANHUMAS, CAMPINAS-SP).</u>	<u>41</u>
<u>FIGURA 4.3 – MAPA GERAL DA ETE ANHUMAS, CAMPINAS/SP.</u>	<u>41</u>
<u>FIGURA 4.4 – ETE ANHUMAS: GRADEAMENTO GROSSEIRO NA EEEB.</u>	<u>42</u>
<u>FIGURA 4.5 – ETE ANHUMAS: TRATAMENTO PRELIMINAR.</u>	<u>42</u>
<u>FIGURA 4.6 – ETE ANHUMAS: REATORES UASB.</u>	<u>43</u>
<u>FIGURA 4.7 – ETE ANHUMAS: QUEIMADORES DE BIOGÁS.</u>	<u>44</u>
<u>FIGURA 4.8 – ETE ANHUMAS: MISTURA RÁPIDA/COAGULAÇÃO.</u>	<u>44</u>
<u>FIGURA 4.9 – ETE ANHUMAS: FLOCULAÇÃO.</u>	<u>45</u>
<u>FIGURA 4.10 – ETE ANHUMAS: SISTEMA DE FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO (FAD).</u>	<u>46</u>
<u>FIGURA 4.11 – ETE ANHUMAS: CANAL DE SAÍDA EFLUENTE TRATADO/DESPEJO NO RIO.</u>	<u>46</u>
<u>FIGURA 4.12 – ETE ANHUMAS: DESIDRATAÇÃO DE LODO.</u>	<u>47</u>
<u>FIGURA 4.13 – ESQUEMA GERAL DO FLOTATESTES.</u>	<u>49</u>
<u>FIGURA 4.14 – FOTO DO FLOTATESTES UTILIZADO NOS ENSAIOS.</u>	<u>49</u>
<u>FIGURA 4.15 – FOTO DA DERIVAÇÃO NA LINHA DE AR DA ETE ANHUMAS PARA ALIMENTAÇÃO DO FLOTATESTES.</u>	<u>50</u>

<u>FIGURA 4.16 – CRITÉRIOS PARA ESCOLHA DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS NA FASE 1.</u>	<u>56</u>
<u>FIGURA 4.17 – PROCEDIMENTOS DOS ENSAIOS COM FLOTATESTES NA FASE 1.</u>	<u>57</u>
<u>FIGURA 4.18 – CRITÉRIOS PARA ESCOLHA DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS NA FASE 2.</u>	<u>59</u>
<u>FIGURA 4.19 – PROCEDIMENTOS DOS ENSAIOS COM FLOTATESTES NA FASE 2.</u>	<u>60</u>
<u>FIGURA 4.20 – CRITÉRIOS PARA ESCOLHA DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS NA FASE 3.</u>	<u>62</u>
<u>FIGURA 4.21 – PROCEDIMENTOS DOS ENSAIOS COM FLOTATESTES NA FASE 3.</u>	<u>64</u>
<u>FIGURA 4.22 - CRITÉRIOS PARA ESCOLHA DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS NA FASE 4.</u>	<u>66</u>
<u>FIGURA 4.23 – CENÁRIOS AVALIADOS DURANTE 24 HORAS NA FASE 4 DA PESQUISA.</u>	<u>67</u>
<u>FIGURA 4.24 – CRONOLOGIA DE COLETA E ENSAIOS PARA A FASE 4.</u>	<u>68</u>
<u>FIGURA 4.25 – PROCEDIMENTOS DOS ENSAIOS COM FLOTATESTES NA FASE 4.</u>	<u>69</u>
<u>FIGURA 5.1 – FASE 1: RESULTADOS DE TURBIDEZ PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE FLOTAÇÃO, ENSAIO COM $Al_2(SO_4)_3$.....</u>	<u>75</u>
<u>FIGURA 5.2 - FASE 1: RESULTADOS DE PH, ALCALINIDADE, COR APARENTE E TURBIDEZ PARA $V_F=16\text{ CM.MIN}^{-1}$, ENSAIO COM $Al_2(SO_4)_3$.....</u>	<u>76</u>
<u>FIGURA 5.3 - FASE 1: RESULTADOS DE ST, SST, SULFATO E CONDUTIVIDADE PARA $V_F=16\text{ CM.MIN}^{-1}$, ENSAIO COM $Al_2(SO_4)_3$.....</u>	<u>77</u>
<u>FIGURA 5.4 - FASE 1: RESULTADOS DE DQO E FÓSFORO PARA $V_F=16\text{ CM.MIN}^{-1}$, ENSAIO COM $Al_2(SO_4)_3$.....</u>	<u>78</u>

<u>FIGURA 5.5 – FASE 1: RESULTADOS DE TURBIDEZ PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE FLOTAÇÃO, ENSAIO COM PAC.....</u>	<u>83</u>
<u>FIGURA 5.6 - FASE 1: RESULTADOS DE PH, ALCALINIDADE, COR APARENTE E TURBIDEZ PARA VF=16 CM.MIN⁻¹, ENSAIO COM PAC</u>	<u>84</u>
<u>FIGURA 5.7 - FASE 1: RESULTADOS DE ST, SST, SULFATO E CONDUTIVIDADE PARA VF=16 CM.MIN⁻¹, ENSAIO COM PAC.....</u>	<u>85</u>
<u>FIGURA 5.8 - FASE 1: RESULTADOS DE DQO E FÓSFORO PARA VF=16 CM.MIN⁻¹, ENSAIO COM PAC.....</u>	<u>86</u>
<u>FIGURA 5.9 – FASE 1: RESULTADOS DE TURBIDEZ PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE FLOTAÇÃO, ENSAIO COM FECL₃.....</u>	<u>90</u>
<u>FIGURA 5.10 - FASE 1: RESULTADOS DE PH, ALCALINIDADE, COR APARENTE E TURBIDEZ PARA VF=16 CM.MIN⁻¹, ENSAIO COM FECL₃</u>	<u>91</u>
<u>FIGURA 5.11 - FASE 1: RESULTADOS DE ST, SST, SULFATO E CONDUTIVIDADE PARA VF=16 CM.MIN⁻¹, ENSAIO COM FECL₃.....</u>	<u>92</u>
<u>FIGURA 5.12 - FASE 1: RESULTADOS DE DQO E FÓSFORO PARA VF=16 CM.MIN⁻¹, ENSAIO COM FECL₃.....</u>	<u>93</u>
<u>FIGURA 5.13 – FASE 2: RESULTADOS DE TURBIDEZ PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE FLOTAÇÃO, ENSAIO COM AL₂(SO₄)₃ ASSOCIADO A POLÍMEROS</u>	<u>98</u>
<u>FIGURA 5.14 - FASE 2: RESULTADOS DE PH, ALCALINIDADE, COR APARENTE E TURBIDEZ PARA VF=16 CM.MIN⁻¹, ENSAIO COM AL₂(SO₄)₃ ASSOCIADO A POLÍMEROS</u>	<u>100</u>
<u>FIGURA 5.15 - FASE 2: RESULTADOS DE ST, SST, SULFATO E CONDUTIVIDADE PARA VF=16 CM.MIN⁻¹, ENSAIO COM AL₂(SO₄)₃ ASSOCIADO A POLÍMEROS</u>	<u>102</u>
<u>FIGURA 5.16 - FASE 2: RESULTADOS DE DQO E FÓSFORO PARA VF=16 CM.MIN⁻¹, ENSAIO COM AL₂(SO₄)₃ ASSOCIADO A POLÍMEROS</u>	<u>103</u>

FIGURA 5.17 – FASE 2: RESULTADOS DE TURBIDEZ PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE FLOTAÇÃO, ENSAIO COM PAC ASSOCIADO A POLÍMEROS.....	108
FIGURA 5.18 - FASE 2: RESULTADOS DE PH, ALCALINIDADE, COR APARENTE E TURBIDEZ PARA VF=16 CM.MIN⁻¹, ENSAIO COM PAC ASSOCIADO A POLÍMEROS	110
FIGURA 5.19 - FASE 2: RESULTADOS DE ST, SST, SULFATO E CONDUTIVIDADE PARA VF=16 CM.MIN⁻¹, ENSAIO COM PAC ASSOCIADO A POLÍMEROS.....	111
FIGURA 5.20 - FASE 2: RESULTADOS DE DQO E FÓSFORO PARA VF=16 CM.MIN⁻¹, ENSAIO COM PAC ASSOCIADO A POLÍMEROS.....	112
FIGURA 5.21 – FASE 2: RESULTADOS DE TURBIDEZ PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE FLOTAÇÃO, ENSAIO COM FECL₃ ASSOCIADO A POLÍMEROS.....	117
FIGURA 5.22 - FASE 2: RESULTADOS DE PH, ALCALINIDADE, COR APARENTE E TURBIDEZ PARA VF=16 CM.MIN⁻¹, ENSAIO COM FECL₃ ASSOCIADO A POLÍMEROS .	119
FIGURA 5.23 - FASE 2: RESULTADOS DE ST, SST, SULFATO E CONDUTIVIDADE PARA VF=16 CM.MIN⁻¹, ENSAIO COM FECL₃ ASSOCIADO A POLÍMEROS.....	120
FIGURA 5.24 - FASE 2: RESULTADOS DE DQO E FÓSFORO PARA VF=16 CM.MIN⁻¹, ENSAIO COM FECL₃ ASSOCIADO A POLÍMEROS.....	121
FIGURA 5.25 - FASE 3: TEMPERATURA, PH, TURBIDEZ, COR APARENTE, CONDUTIVIDADE E ALCALINIDADE PARA O ESGOTO BRUTO E EFLUENTE DO REATOR UASB AO LONGO DO DIA.	124
FIGURA 5.26 - FASE 3: DQO, FÓSFORO, SÓLIDOS TOTAIS, SÓLIDOS SUSPENSOS TOTAIS, SULFATO E SULFETO PARA O ESGOTO BRUTO E EFLUENTE DO REATOR UASB AO LONGO DO DIA.	127
FIGURA 5.27 - FASE 3: REAÇÃO DO CLORETO FÉRRICO (FECL₃) COM O ÁCIDO SULFÍDRICO (H₂S).....	129
FIGURA 5.28 – FASE 3: RESULTADOS DE TURBIDEZ PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE FLOTAÇÃO, ENSAIO COM AMOSTRA COLETADA ÀS 00:00 HS.....	131

FIGURA 5.29 – FASE 3: RESULTADOS DE COR APARENTE, TURBIDEZ, DQO, FÓSFORO, ST E SST, PARA VF= 16 CM.MIN⁻¹, ENSAIO COM AMOSTRA COLETADA ÀS 00:00 HS. 132

FIGURA 5.30 – FASE 3: RESULTADOS DE SULFATO, CONDUTIVIDADE, PH E ALCALINIDADE, PARA VF= 16 CM.MIN⁻¹, ENSAIO COM AMOSTRA COLETADA ÀS 00:00 HS 133

FIGURA 5.31 – FASE 3: RESULTADOS DE TURBIDEZ PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE FLOTAÇÃO, ENSAIO COM AMOSTRA COLETADA ÀS 04:00 HS 134

FIGURA 5.32 – FASE 3: RESULTADOS DE COR APARENTE, TURBIDEZ, DQO, FÓSFORO, ST E SST, PARA VF= 16 CM.MIN⁻¹, ENSAIO COM AMOSTRA COLETADA ÀS 04:00 HS 136

FIGURA 5.33 – FASE 3: RESULTADOS DE SULFATO, CONDUTIVIDADE, PH E ALCALINIDADE, PARA VF= 16 CM.MIN⁻¹, ENSAIO COM AMOSTRA COLETADA ÀS 04:00 HS 137

FIGURA 5.34 – FASE 3: RESULTADOS DE TURBIDEZ PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE FLOTAÇÃO, ENSAIO COM AMOSTRA COLETADA ÀS 08:00 HS 139

FIGURA 5.35 – FASE 3: RESULTADOS DE COR APARENTE, TURBIDEZ, DQO, FÓSFORO, ST E SST, PARA VF= 16 CM.MIN⁻¹, ENSAIO COM AMOSTRA COLETADA ÀS 08:00 HS 140

FIGURA 5.36 – FASE 3: RESULTADOS DE SULFATO, CONDUTIVIDADE, PH E ALCALINIDADE, PARA VF= 16 CM.MIN⁻¹, ENSAIO COM AMOSTRA COLETADA ÀS 08:00 HS 141

FIGURA 5.37 – FASE 3: RESULTADOS DE TURBIDEZ PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE FLOTAÇÃO, ENSAIO COM AMOSTRA COLETADA ÀS 12:00 HS 143

FIGURA 5.38 – FASE 3: RESULTADOS DE COR APARENTE, TURBIDEZ, DQO, FÓSFORO, ST E SST, PARA VF= 16 CM.MIN⁻¹, ENSAIO COM AMOSTRA COLETADA ÀS 12:00 HS 144

<u>FIGURA 5.39 – FASE 3: RESULTADOS DE SULFATO, CONDUTIVIDADE, PH E ALCALINIDADE, PARA VF= 16 CM.MIN⁻¹, ENSAIO COM AMOSTRA COLETADA ÀS 12:00 HS</u>	<u>145</u>
<u>FIGURA 5.40 – FASE 3: RESULTADOS DE TURBIDEZ PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE FLOTAÇÃO, ENSAIO COM AMOSTRA COLETADA ÀS 16:00 HS</u>	<u>147</u>
<u>FIGURA 5.41 – FASE 3: RESULTADOS DE COR APARENTE, TURBIDEZ, DQO, FÓSFORO, ST E SST, PARA VF= 16 CM.MIN⁻¹, ENSAIO COM AMOSTRA COLETADA ÀS 16:00 HS</u>	<u>148</u>
<u>FIGURA 5.42 – FASE 3: RESULTADOS DE SULFATO, CONDUTIVIDADE, PH E ALCALINIDADE, PARA VF= 16 CM.MIN⁻¹, ENSAIO COM AMOSTRA COLETADA ÀS 16:00 HS</u>	<u>149</u>
<u>FIGURA 5.43 – FASE 3: RESULTADOS DE TURBIDEZ PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE FLOTAÇÃO, ENSAIO COM AMOSTRA COLETADA ÀS 20:00 HS</u>	<u>151</u>
<u>FIGURA 5.44 – FASE 3: RESULTADOS DE COR APARENTE, TURBIDEZ, DQO, FÓSFORO, ST E SST, PARA VF= 16 CM.MIN⁻¹, ENSAIO COM AMOSTRA COLETADA ÀS 20:00 HS</u>	<u>152</u>
<u>FIGURA 5.45 – FASE 3: RESULTADOS DE SULFATO, CONDUTIVIDADE, PH E ALCALINIDADE, PARA VF= 16 CM.MIN⁻¹, ENSAIO COM AMOSTRA COLETADA ÀS 20:00 HS</u>	<u>153</u>
<u>FIGURA 5.46 – FASE 4: RESULTADOS DE TEMPERATURA E PH NO EFLUENTE DO REATOR UASB AO LONGO DE 24 HORAS.</u>	<u>159</u>
<u>FIGURA 5.47 – FASE 4: RESULTADOS DE TURBIDEZ NO EFLUENTE DO REATOR UASB AO LONGO DE 24 HORAS.....</u>	<u>160</u>
<u>FIGURA 5.48 – FASE 4: RESULTADOS DE ALCALINIDADE NO EFLUENTE DO REATOR UASB AO LONGO DE 24 HORAS.....</u>	<u>161</u>
<u>FIGURA 5.49 – FASE 4: RESULTADOS DE DQO BRUTA E DQO SOLÚVEL NO EFLUENTE DO REATOR UASB AO LONGO DE 24 HORAS</u>	<u>162</u>

<u>FIGURA 5.50 – FASE 4: RESULTADOS DE FÓSFORO NO EFLUENTE DO REATOR UASB AO LONGO DE 24 HORAS.....</u>	<u>163</u>
<u>FIGURA 5.51 – FASE 4: RESULTADOS DE SÓLIDOS TOTAIS (ST) E SÓLIDOS SUSPENSOS TOTAIS (SST) NO EFLUENTE DO REATOR UASB AO LONGO DE 24 HORAS.....</u>	<u>164</u>
<u>FIGURA 5.52 – FASE 4: RESULTADOS DE SULFETO NO EFLUENTE DO REATOR UASB AO LONGO DE 24 HORAS.....</u>	<u>165</u>
<u>FIGURA 5.53 – FASE 4: RESULTADOS DE TURBIDEZ REMANESCENTE PARA OS 4 CENÁRIOS DE DOSAGENS DURANTE PERÍODO DE 24 HORAS.....</u>	<u>166</u>
<u>FIGURA 5.54 – FASE 4: CORRELAÇÃO TURBIDEZ X SST PARA EFLUENTE FAD COLETADO NA VF = 16 CM.MIN⁻¹ (TAS = 230,4 M3.M⁻².D⁻¹).....</u>	<u>168</u>
<u>FIGURA 5.55 – FASE 4: HIDROGRAMA DE VAZÕES AFLUENTE AO SISTEMA DE FAD DA ETE ANHUMAS NA DATA DOS ENSAIOS (15 E 16.06.2009).....</u>	<u>169</u>
<u>FIGURA 5.56 – FASE 4: COMPARAÇÃO ENTRE OS CENÁRIOS DE DOSAGENS ESTUDADOS QUANTO A REMOÇÃO DE LODO.</u>	<u>170</u>
<u>FIGURA 5.57 – FASE 4: COMPARAÇÃO DOS CONSUMOS DE FECL₃ (ANIDRO) CALCULADOS PARA OS CENÁRIOS ESTUDADOS</u>	<u>172</u>
<u>FIGURA 5.58 – FASE 4: VARIAÇÃO DAS DOSAGENS APLICADAS NOS QUATRO CENÁRIOS ESTUDADOS.....</u>	<u>173</u>
<u>FIGURA 5.59 – FASE 4: VARIAÇÃO DO PH DE COAGULAÇÃO PARA OS QUATRO CENÁRIOS DE DOSAGENS ESTUDADOS</u>	<u>174</u>
<u>FIGURA 6.1 – CORRELAÇÕES ENTRE A TURBIDEZ NO EFLUENTE ANAERÓBIO E AS CONCENTRAÇÕES DE DQOBRUTA, DQOSOLÚVEL E DQOPARTICULADA.....</u>	<u>179</u>
<u>FIGURA 6.2 – RESULTADOS DE TURBIDEZ, DQOBRUTA, DQOSOLÚVEL E DQOPARTICULADA NO EFLUENTE ANAERÓBIO AO LONGO DE 24 HORAS.</u>	<u>180</u>

LISTA DE TABELAS

<u>TABELA 3.1 – QUALIDADE ESGOTO BRUTO E EFLUENTE UASB, SEGUNDO CAMPOS ET AL (2007).....</u>	<u>26</u>
<u>TABELA 3.2 – LISTA DE TRABALHOS DE MESTRADO E DOUTORADO RELACIONADOS À APLICAÇÃO DA FLOTAÇÃO NO PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTES ANAERÓBIOS JÁ REALIZADOS PELA EESC/SHS/USP.....</u>	<u>27</u>
<u>TABELA 3.3 – RESUMO DOS PARÂMETROS DE CONTROLE DA COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO-FLOTAÇÃO DE EFLUENTES ANAERÓBIOS ENCONTRADOS NA BIBLIOGRAFIA.</u>	<u>38</u>
<u>TABELA 5.1 – FASE 1: CARACTERÍSTICAS ESGOTO BRUTO E EFLUENTE UASB, ENSAIO COM $Al_2(SO_4)_3$.....</u>	<u>71</u>
<u>TABELA 5.2 – FASE 1: CARACTERÍSTICAS ESGOTO BRUTO E EFLUENTE UASB, ENSAIO COM PAC.....</u>	<u>79</u>
<u>TABELA 5.3 – FASE 1: CARACTERÍSTICAS ESGOTO BRUTO E EFLUENTE UASB, ENSAIO COM $FeCl_3$.....</u>	<u>87</u>
<u>TABELA 5.4 – FASE 2: CARACTERÍSTICAS ESGOTO BRUTO E EFLUENTE UASB, ENSAIO COM $Al_2(SO_4)_3$ ASSOCIADO A POLÍMEROS.....</u>	<u>95</u>
<u>TABELA 5.5 – FASE 2: CARACTERÍSTICAS ESGOTO BRUTO E EFLUENTE UASB, ENSAIO COM PAC ASSOCIADO A POLÍMEROS.....</u>	<u>104</u>
<u>TABELA 5.6 – FASE 2: CARACTERÍSTICAS ESGOTO BRUTO E EFLUENTE UASB, ENSAIO COM $FeCl_3$ ASSOCIADO A POLÍMEROS.....</u>	<u>113</u>
<u>TABELA 5.7 – FASE 3: RESUMO DA QUALIDADE DO ESGOTO BRUTO E EFLUENTE DO UASB AO LONGO DO DIA.</u>	<u>123</u>
<u>TABELA 5.8 – RESUMO DOS RESULTADOS E RELAÇÕES PARA AS MELHORES DOSAGENS DA FASE 3.....</u>	<u>154</u>

<u>TABELA 5.9 – DIVISÃO DOS RESULTADOS DA FASE 3 EM DOIS GRUPOS DE ACORDO COM A TURBIDEZ</u>	<u>155</u>
---	-------------------

<u>TABELA 5.10 – FASE 4: CARACTERÍSTICAS DO EFLUENTE DO REATOR UASB AO LONGO DO DIA.....</u>	<u>158</u>
---	-------------------

<u>TABELA 5.11 – FASE 4: RESUMO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS.....</u>	<u>167</u>
--	-------------------

LISTA DE ABREVIATURAS, FÓRMULAS E SÍMBOLOS

A8566 = Código do fabricante para um polímero sintético aniônico;

Abs_{254 nm} = Absorbância medida em espectrofotômetro para comprimento de onda de 254 nm;

Al₂(SO₄)₃ = Fórmula química do Sulfato de Alumínio, coagulante;

Al₂O₃ = Fórmula química do óxido de alumínio ou aluminato;

Al⁺³ = Íon trivalente do metal alumínio, substância ativa na reação de coagulação de sais de alumínio com a alcalinidade;

C8394 = Código do fabricante para um polímero sintético catiônico;

CaCO₃ = Fórmula química do carbonato de cálcio;

CCO = Sala de Controle e Comando;

cm = Centímetro ou centímetros, medida de comprimento;

CONAMA = Conselho Nacional do Meio Ambiente, órgão do Ministério do Meio Ambiente que legisla resoluções ambientais regulamentadoras em nível federal no Brasil;

DBO_{5,20} = Demanda Bioquímica de Oxigênio medida no quinto dia, com temperatura constante de 20° C;

DBO = Demanda Bioquímica de Oxigênio. Para este trabalho considerar DBO igual a DBO_{5,20};

DCA = Dosagem de Coagulante Aplicada, expressa em mg de Fe⁺³.L⁻¹;

DF = Distrito Federal do Brasil;

DQO = Demanda química de oxigênio. Para este trabalho considerar DQO igual a DQO_B;

DQO_B = Demanda Química de Oxigênio Bruta;

DQO_F = Demanda Química de Oxigênio Filtrada;

EESC = Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo;

EEEB = Estação Elevatória de Esgoto Bruto;

ETA = Estação de Tratamento de Água;

ETE = Estação de Tratamento de Esgoto;

ETEB = Estação de Tratamento de Esgoto do município de Brasília/DF;

FAD = Flotação por ar dissolvido;

FADAT = Flotação por Ar Dissolvido de Alta Taxa;

Fe⁺³ = Íon trivalente do metal ferro, substância ativa na reação de coagulação de sais de ferro com a alcalinidade;

Fe₂O₃ = Fórmula química do óxido de ferro;

FeCl₃ = Fórmula química do cloreto férrico, coagulante;

FIPAI = Fundação para o Incremento da Pesquisa e do Aperfeiçoamento Industrial;

g = Grama, medida de massa;

Gfloc = Gradiente médio de velocidade na floculação;

Gmr = Gradiente médio de velocidade na mistura rápida;

h = Hora (singular), medida de tempo;

H₂S = Fórmula química do sulfeto de hidrogênio, ácido sulfídrico ou gás sulfídrico;

hs = Horas (plural), medida de tempo;

KPa = Quilo pascal, unidade de pressão;

L = litro, medida de volume;

m = Metro ou metros, medida de comprimento;

m² = Metro quadrado ou metros quadrados, medida de área;

m³ = Metro cúbico ou metros cúbicos, medida de volume;

mg = miligrama, medida de massa;

min. = Minuto ou minutos, medida de tempo;

N300 = Código do fabricante para um polímero sintético não-iônico;

nm = Nímetro, medida de comprimento;

NTK = Nitrogênio Total Kjeldahl, compreende a parcela não oxidada de nitrogênio presente em uma amostra (orgânico + amoniacal);

N-NH₃ = Nitrogênio em termos de nitrogênio amoniacal;

PAC = Policloreto de alumínio ou cloreto de polialumínio, coagulante;

pH = Potencial hidrogeniônico, escala compreendida entre 0 e 14 que permite inferência quanto a acidez ou alcalinidade de uma amostra;

Psat = Pressão de saturação de ar em compartimento utilizado em unidades de flotação por ar dissolvido;

Pt = Platina-cobalto, padrão para análise de cor aparente;

P-PO₄³⁻ = Fósforo em termos de fosfato;

Qaf = Vazão afluyente;

Qr = Vazão de recirculação;

R = Fração de recirculação, percentual de água saturada com ar misturada à amostra bruta, em termos de volume;

RAlex = Reator Anaeróbio de Leito Expandido;

RD_mT = Razão entre a Dosagem de íon metálico aplicada (Al^{+3} ou Fe^{+3}) com a Turbidez do efluente anaeróbio, expresso em mg de Metal (Al^{+3} ou Fe^{+3}).L⁻¹.UNT⁻¹;

RD_mT_(média) = Média aritmética entre diferentes valores de RD_mT, expresso em mg de Metal (Al^{+3} ou Fe^{+3}).L⁻¹.UNT⁻¹;

RD_mT_(média≥50) = Média aritmética entre diferentes valores de RD_mT, nos ensaios da Fase 3 desta pesquisa em que a turbidez no efluente anaeróbio foi maior que 50 UNT, expresso em mg de Fe^{+3} .L⁻¹.UNT⁻¹;

RD_mT_(média<50) = Média aritmética entre diferentes valores de RD_mT, nos ensaios da Fase 3 desta pesquisa em que a turbidez no efluente anaeróbio foi menor que 50 UNT, expresso em mg de Fe^{+3} .L⁻¹.UNT⁻¹;

S = Representa o elemento enxofre;

s = segundo ou segundos, unidade de tempo;

S/A = Sociedade Anônima;

SANASA = Sociedade de Abastecimento de Água e Saneamento S/A, empresa operadora do sistema de água e esgoto do município de Campinas/SP;

SHS = Setor de Hidráulica e Saneamento;

SO₄ = Fórmula química do sulfato;

SP = São Paulo, estado da república federativa do Brasil;

SST = Sólidos suspensos totais;

ST = Sólidos Totais;

S* = Quantidade de ar fornecida à flotação (g de ar por m³ de efluente);

TAS = Taxa de Aplicação Superficial, neste estudo compreende a vazão de esgoto aplicada por unidade de área de um flotor;

TDH = Tempo de Detenção Hidráulica;

Tfloc = Tempo de floculação;

Tmr = Tempo de mistura rápida;

Turb. = Turbidez;

UASB = Do inglês *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*, reator biológico anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo;

UNT = Unidade Nefelométrica de Turbidez, unidade de medida para turbidez;

USP = Universidade de São Paulo;

Vf = Velocidade de flotação, conceituada pelo deslocamento ascensional de uma microbolha por unidade de tempo, expresso em cm.min.^{-1} ;

Vf1 = Velocidade de flotação número 1, referente à amostra coletada em ensaio com flotatestes após intervalo de tempo de 3'13" a 3'23";

Vf2 = Velocidade de flotação número 2, referente à amostra coletada em ensaio com flotatestes após intervalo de tempo de 2'07" a 2'17";

Vf3 = Velocidade de flotação número 3, referente à amostra coletada em ensaio com flotatestes após intervalo de tempo de 1'34" a 1'44";

Vf4 = Velocidade de flotação número 4, referente à amostra coletada em ensaio com flotatestes após intervalo de tempo de 1'14" a 1'24";

w = Largura (em pés) da garganta de calhas do tipo Parshall utilizadas para medição de vazão de fluídos em escoamento livre;

$\mu\text{S.cm}^{-1}$ = Microsiemens por centímetro, unidade da medida de condutividade elétrica;

°C = Graus Célsius, medida de temperatura.

1 INTRODUÇÃO

Já antes da era cristã, muitas civilizações possuíam algum tipo de sistema de saneamento, desde os aquedutos no antigo Egito até as primeiras companhias de água e esgoto na Roma antiga, passando também pelos hindus, que utilizavam sistemas avançados de tratamento de água, tais como filtração em areia e desinfecção por fervura através do esfriamento de barras de cobre na água. Mas foi a partir do século XVII da era cristã que surgiram avanços importantes na engenharia sanitária, notadamente pressionado pelas doenças associadas à água suja e a falta de higiene, que devastaram a Europa durante o renascimento. Foi também a partir deste período que surgiram as primeiras grandes obras de saneamento na Inglaterra, além dos avanços da microbiologia e finalmente a construção da primeira Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), já no início do século 20.

Com a difusão deste conceito, diversos países passaram a realizar o tratamento dos seus dejetos, antecedendo seu destino final, o que semeou uma sucessão de avanços na área de tratamento de águas residuárias e de águas para abastecimento. Desde então o grande desafio de pesquisadores, engenheiros e arquitetos envolvidos neste campo da ciência está relacionado em desenvolver e empregar concepções de tratamento que atendam três premissas básicas da engenharia de tratamento de águas residuárias: segurança, economia e conforto (**Figura 1.1**).

Figura 1.1 – Aspectos relevantes na escolha de alternativa de tratamento.

Segurança está relacionado a garantia do tratamento adequado e completo dos despejos, em níveis que atendam aos padrões e recomendações relativos ao uso ou

destino final dado ao esgoto tratado, mantendo a integridade e o bem estar do núcleo urbano e do meio ambiente.

A economia de um sistema de tratamento refere-se à escolha da alternativa que se traduza como a mais viável monetariamente nos aspectos de implantação (gastos com aquisição de terreno, materiais, equipamentos e mão-de-obra) e de operação (energia elétrica, insumos, descarte de lodo, funcionários e manutenção), fator muitas vezes decisivo na escolha da alternativa adotada.

Por fim, não menos importante, o quesito conforto é um aspecto fundamental que deve ser considerado quando da escolha do local a ser instalada ou da tecnologia a ser adotada para uma ETE, visando solucionar problemas e não criar novos problemas a população, tais como: geração de maus odores, ruídos, impacto visual desagradável e atração de vetores de doenças.

Mais recentemente, a escolha de alternativas de tratamento de águas residuárias vem apontando para uma tendência de somar características interessantes de diversas concepções de tratamento, sejam estes fundamentados em processos biológicos ou físico-químicos. Como exemplo pode ser citado o emprego aliado do tratamento biológico anaeróbio ao aeróbio, o que possibilita uma importante redução da potência instalada por volume de efluente tratado em uma ETE, porem sem perda de eficiência. **(CAMPOS et al., 1996)**. Da mesma forma, a flotação por ar dissolvido (FAD) vem sendo empregada no tratamento de águas residuárias em substituição de decantadores secundários seja em processos de lodos ativados, ou no polimento de efluentes de reatores anaeróbios, apresentando vantagens relacionadas à compacidade das unidades, geração de lodos mais espessados, grande versatilidade operacional, arraste parcial de gases voláteis, alta capacidade de remoção de sólidos suspensos e oxigenação do efluente tratado. Sabe-se que a qualidade dos efluentes de reatores anaeróbios, no tratamento de esgotos, em geral não atende as exigências ambientais. Em face disto, torna-se necessário o pós-tratamento deste tipo de efluente, o qual pode ser através de processos biológicos ou físico-químicos. O uso da FAD vem demonstrando ser uma alternativa atraente no polimento de efluentes anaeróbios, pois além das características vantajosas supracitadas, a flotação, quando aliada à coagulação e floculação, apresenta ainda certas vantagens comparadas ao pós-

tratamento de reatores anaeróbios através de processos biológicos aeróbios, dentre as mais importantes:

- Menor custo de implantação;
- Sistema robusto, resistente a variações bruscas de vazão e de qualidade do esgoto afluente;
- Alta resistência a agentes tóxicos;
- Elevada eficiência na remoção de Fósforo (por precipitação química).

Outro aspecto interessante na escolha da utilização do pós-tratamento físico-químico por FAD de efluentes anaeróbios é a possibilidade de posterior implantação, numa etapa futura, de tratamento biológico aeróbio complementar visando uma maior remoção da matéria orgânica carbonácea. Em adição, a possibilidade de modulação da estação pode permitir um dimensionamento mais realista da etapa aeróbia, visto a possibilidade de se utilizar dados de monitoramento reais do efluente para a implantação da 2ª etapa de projeto, evitando problemas relacionados ao super ou subdimensionamento do sistema.

Devido a estas vantagens, muitos estudos já foram realizados no âmbito da utilização da FAD no pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios. Porém, ainda é escassa a quantidade de pesquisas relacionadas ao pós-tratamento por FAD de efluentes de reatores anaeróbios utilizando reatores UASB em escala real. Como forma de prestar contribuição neste segmento da pesquisa científica, o presente trabalho estudou uma estação de tratamento situada na cidade de Campinas-SP, a ETE Anhumas. Inaugurada em fevereiro de 2007, a ETE Anhumas é considerada a maior ETE do interior do Brasil, possui capacidade para atendimento de 250 mil habitantes. Ela é dotada de um sistema de tratamento composto por 4 reatores UASB seguido de 4 unidades de Flotação por Ar Dissolvido (FAD). Projetada para tratar uma vazão média de 1.200 L.s^{-1} , a ETE Anhumas possui ainda etapas de coagulação (cloreto férrico) e floculação, visando atender aos requisitos de lançamento de matéria orgânica e nutrientes estabelecidos pela legislação vigente no Estado de São Paulo (**SANASA, 2008**).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

- Realizar a coagulação, floculação e flotação do efluente de reatores anaeróbios, tratando esgoto sanitário, com aplicação de diferentes dosagens de coagulante em função da variação da turbidez do esgoto afluente ao longo do dia.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar diferentes tipos e dosagens de coagulantes, através de ensaios com *flotateste*;
- Avaliar diferentes tipos e dosagens de polímeros associado a dosagem fixa de diferentes coagulantes, através de ensaios com *flotateste*;
- Realizar a variação da dosagem do melhor coagulante definido, associado ao melhor tipo e dosagem de polímero fixado, aplicado no efluente de reator UASB coletado em seis diferentes horários do dia, através de ensaios com *flotateste*;
- Avaliar a aplicação de razão entre a dosagem de íon metálico aplicada do respectivo coagulante e o valor da turbidez do efluente anaeróbio antes da flotação (RD_mT).

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 USO DA FAD NO PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTES EM GERAL

BRATBY (1982), investigou a eficiência da flotação por ar dissolvido aplicada no tratamento de esgotos sanitários quimicamente precipitados, na Estação de Tratamento de Esgotos de Brasília-Sul (ETEB-Sul). O sistema de tratamento existente na ETEB-Sul consistia de gradeamento, caixa de areia, sedimentação primária, tratamento aeróbio por lodos ativados e sedimentação secundária sendo que o efluente final era encaminhado diretamente ao Lago Paranoá, bastante eutrofizado naquele momento. O sistema não era capaz de tratar toda a vazão afluyente ($0,90 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) e, desta forma, a vazão excedente ($0,45 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), após sedimentação primária, era desviada do sistema de lodos ativados e encaminhada diretamente ao Lago Paranoá. Essa operação (by-pass) era realizada durante todo o ano e estava prevista ampliação futura desse sistema, de modo a tratar a vazão total afluyente. Os experimentos realizados pelo referido autor visavam testar a possibilidade de instalação de um sistema de flotação por ar dissolvido para tratamento da vazão excedente, enquanto o sistema existente não fosse ampliado. Após a ampliação, o sistema de FAD poderia ser utilizado no tratamento físico-químico terciário, como polimento final. Além disso, o sistema de FAD poderia atuar como tratamento convencional em caso de vazão afluyente extremamente elevada e não suportada pela ETEB-Sul. As características do esgoto, após sedimentação primária, mantiveram-se praticamente constantes ao longo dos ensaios: DQO de $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, sólidos suspensos totais de $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, fosfato total igual a $3,0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ e pH ao redor de 6,5.

Os experimentos foram realizados em unidade piloto de flotação com seção circular. A introdução do coagulante e sua mistura com o esgoto (coagulação) e a floculação eram realizadas na tubulação de acesso à câmara de flotação, através de misturadores *in line*. O autor testou três produtos químicos diferentes para o tratamento químico: cloreto férrico, sulfato de alumínio e cal hidratada. O sulfato de alumínio foi escolhido após análise do custo do produto químico e da qualidade do lodo gerado. Durante os ensaios, com o efluente do decantador primário e após adição de $80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ de sulfato de alumínio, o sistema de FAD removeu 97% de sólidos suspensos totais, 84% de DQO e 92% de fosfato total.

BRATBY (1982) verificou também que o tempo de detenção de 30 s no interior da tubulação durante a mistura rápida proporcionou floculação suficiente para garantir a eficiência da flotação. Nenhuma alteração na eficiência da flotação foi observada com a variação da pressão no interior da câmara de saturação (entre 345 e 896 KPa), desde que a fração de recirculação fosse devidamente alterada, de forma a manter a relação ar/sólidos ao redor de 0,12 na câmara de flotação. O teor de sólidos do lodo flotado obtido nos ensaios chegou a 8,3%. O espessamento do lodo flotado foi realizado em filtro-prensa em escala piloto, com três diferentes formas de condicionamento: (i) com cal, (ii) com polímero aniônico e (iii) sem condicionamento algum. Após condicionamento com cal, o teor de sólidos do lodo espessado atingiu 40%. Com polímero aniônico, o teor de sólidos alcançou 22%, enquanto, sem condicionamento algum, o teor de sólidos obtido foi igual a 17%. O pioneirismo do autor no Brasil motivou uma série de estudos e pesquisas relacionados a aplicação da flotação no tratamento de águas residuárias de várias fontes e encontradas em literaturas diversas. As seguintes aplicações do uso da FAD no tratamento de águas residuárias merecem destaque:

- No tratamento primário visando remoção de gordura, óleos e graxas, fibras, ou precipitação química antecedendo ou não o tratamento biológico secundário;
- No adensamento de lodo biológico;
- Visando remoção por precipitação química de fósforo;
- Na clarificação de efluentes aeróbios;
- No pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios.

Esta última aplicação é a utilizada pela ETE Anhumas, cenário do presente estudo, e será melhor analisada na sequência deste texto.

Com relação a estudos realizados utilizando sistemas de flotação por ar dissolvido, em escala real, com tratamento biológico misto anaeróbio associado a aeróbio, **CAMPOS et al. (2007)**, estudaram a ETE Piçarrão. Esta estação de tratamento, assim como a ETE Anhumas, cenário da presente pesquisa, estão localizadas no município de Campinas-SP. Dentre os resultados apresentados pelos autores durante avaliação do sistema composto por reatores UASB, seguido de lodos ativados e flotação por ar

dissolvido secundária, destaca-se como relevante para a presente pesquisa o monitoramento da qualidade do esgoto bruto e do efluente dos reatores anaeróbios durante período entre fevereiro de 2006 a abril de 2007, cujos valores médios são apresentados a seguir (**Tabela 3.1**). Segundo os autores, o número de amostras coletadas durante o monitoramento dos reatores UASB foi de 250. Devido às semelhanças acima apontadas, tais resultados serviram de base para as discussões dos valores obtidos para o esgoto bruto e efluente do reator UASB durante os diversos ensaios desta pesquisa.

Tabela 3.1 – Qualidade esgoto bruto e efluente UASB, segundo CAMPOS *et al* (2007)

Variável	Esgoto Bruto	Efluente dos Reatores UASB	
		Resultados (Média)	Eficiência Média (%)
Turbidez (UNT)	251 ± 70	189	24,7
pH*	7,2 - 7,6	7,3 - 7,8	-
Cor (mg Pt/L)	1303 ± 350	541	58,5
Alcalinidade Total (mg.CaCO ₃ /L)	169 ± 35	271	-
Fósforo Total (mg P-PO ₄ /L)	6,10 ± 2,00	4,84	20,6
DBO _{5, 20°C} (mg/L)	257 ± 30	72	72,0
DQO (mg/L)	522 ± 80	184	64,8
Nitrogênio Amoniacal (mg NH ₃ -N/L)	22,5 ± 7,0	37,1	-
NTK (mg NH ₃ -N/L)	47 ± 15	39	17,0
Sólidos (mg/L)			
Suspensos Totais	266 ± 70	78	70,7
Fixos Totais	54 ± 10	17	68,5
Voláteis Totais	212 ± 40	61	71,2
Sólidos Sedimentáveis (mL/L)	5,0 ± 1,0	0,38	92,4
Sulfato (mg SO ₄ /L)	80 ± 60	0,2	99,7
Sulfeto (mg S/L)	0,29 ± 0,25	3,34	60,0
* Após adição de Soda; ND: Não Determinando; Temperatura no período: (25,0 ± 2,5)°C; - Não Calculado			

3.2 USO DA FAD NO PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTES ANAERÓBIOS

Em meados da década de 90, **CAMPOS et al. (1996)** publicaram a obra *Tratamento físico-químico por flotação de efluentes de reatores anaeróbios*. Desde então, o departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC/USP vem estudando esta alternativa de tratamento, sendo que atualmente diversos trabalhos relativos ao tema já foram publicados em revistas, jornais e periódicos especializados em todo o mundo. Portanto, o presente trabalho é uma continuidade das pesquisas já desenvolvidas por este departamento.

Durante estes anos alguns estudos em nível de mestrado e doutorado foram realizados pela EESC/SHS/USP, os quais são apresentados na **Tabela 3.2**.

Tabela 3.2 – Lista de trabalhos de Mestrado e Doutorado relacionados à aplicação da flotação no pós-tratamento de efluentes anaeróbios já realizados pela EESC/SHS/USP.

Autor (a)	Tipo	Título do Trabalho
PENETRA, R. G. (1998)	Dissertação Mestrado	Pós-tratamento físico-químico de efluentes de reatores anaeróbios de manta de lodo.
MARCHIORETTO, M. M. (1999)	Dissertação Mestrado	Ozonização seguida de coagulação/floculação e flotação como pós-tratamento de reator anaeróbio com chicanas tratando esgoto sanitário.
PORTO, T. G. (2001)	Dissertação Mestrado	Tratamento avançado de esgoto sanitário em sistema sequencial composto por processo biológico anaeróbio, flotação, filtração em areia e em membranas.
CARVALHO, M. E. (2003)	Dissertação Mestrado	Flotação de alta taxa aplicada no pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios.
PENETRA, R. G. (2003)	Tese Doutorado	Flotação aplicada ao pós-tratamento de efluente de reator anaeróbio de leito expandido tratando esgoto sanitário.
SANTOS, H. R. (2006)	Tese Doutorado	Coagulação e precipitação de efluente de reator anaeróbio e de efluente de lodos ativados precedido de reator UASB, com separação por Sedimentação ou FAD.
OLIVEIRA, A. L. (2007)	Tese Doutorado	Floto-filtração como pós-tratamento do efluente de reator anaeróbio tratando esgoto sanitário.
SANTOS, E.R.D. (2008)	Dissertação Mestrado	Emprego de polímeros em unidade piloto de floto-filtração como pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios de leito expansível tratando esgoto sanitário.

A seguir são apresentadas na sequência cronológica algumas pesquisas utilizadas como referência para este estudo, as quais contribuíram sobre maneira para o atual entendimento da flotação aplicada no pós-tratamento de efluentes de reatores UASB.

CAMPOS et al (1996) realizaram estudos preliminares em escala de laboratório, com vistas à avaliação da potencialidade do emprego de pós-tratamento por coagulação/floculação/flotação de efluente de reator anaeróbio tratando esgotos sanitários, visando remoção adicional de DQO, DBO, fósforo, nitrogênio, sólidos suspensos e coliformes. O efluente anaeróbio era proveniente de um reator anaeróbio compartimentado, de volume igual a 11 m³ e 12 h de tempo de detenção hidráulica, construído na Escola de Engenharia de São Carlos – USP. Os produtos químicos empregados para a coagulação foram cloreto férrico, o sulfato de alumínio e a cal hidratada. Durante todos os ensaios, foram mantidos fixos os seguintes parâmetros: 30 s de mistura rápida e gradiente médio de velocidade em torno de 600 s⁻¹; 20 minutos de floculação e gradiente médio de velocidade em torno de 40 s⁻¹; taxa de aplicação superficial equivalente de 70 m³.m⁻².d⁻¹ para o ensaio de flotação (velocidade de flotação de 4,8 cm.min⁻¹); fração de recirculação de 20% (em volume) e pressão de saturação de 450 kPa (22°C).

Os resultados obtidos por **CAMPOS et al (1996)**, a partir do sistema composto por reator anaeróbio de chicanas (11m³), flotação por ar dissolvido (utilizando *flotateste*) e desinfecção por radiação ultravioleta (escala piloto), indicaram potencialidade de remoção de DBO superior a 85% e de coliformes fecais superior a 99,999%. Os melhores resultados quanto à remoção de SST, fósforo, DQO, DBO e turbidez foram obtidos com a aplicação de cal. Entretanto, o uso da cal resultou em dosagens elevadas e pH efluente ao redor de 9,3. Considerando as remoções obtidas e as dosagens empregadas, o melhor resultado foi obtido através da aplicação de 100 mg.L⁻¹ de cloreto férrico, associada com 50 mg.L⁻¹ de cal. Neste caso, a remoção de DQO e de DBO foram idêntica e iguais a 73%. A remoção de fósforo alcançou 84%, enquanto a de nitrogênio (NTK) chegou a 49%. Além de promover remoção significativa de DBO e de DQO, o uso de tratamento químico proporcionou valores de remoção de fósforo dificilmente atingidos por processos biológicos. Ainda, segundo os autores, o uso da flotação por ar dissolvido, com adição de cloreto férrico e cal, melhorou a remoção de patogênicos. O lodo flotado pode receber a adição de cal (pH>12) para efetuar sua

desinfecção, podendo ser reaproveitado na agricultura, após um período de repouso. Em adição, os autores relatam que o uso de cloreto férrico em vez de sulfato de alumínio é justificado, pois a presença de ferro em lodos não redundaria em aspectos negativos, como aqueles decorrentes da presença de sulfato de alumínio, pois o alumínio é muito mais danoso ao solo e também pode provocar malefícios aos seres humanos, caso ocorra sua ingestão.

PENETRA (1998), apresentou resultados obtidos em laboratório e em instalação piloto de flotação com escoamento contínuo recebendo efluente de reator anaeróbio de manta de lodo (UASB), com 18 m³ de volume, tratando esgoto sanitário. Os ensaios em unidade em escala de laboratório foram realizados utilizando diferentes dosagens de cloreto férrico (entre 30 e 110 mg.L⁻¹) ou de polímero catiônico (entre 1,0 e 16,0 mg.L⁻¹), atuando como coagulantes. Além disso, foram estudadas as condições de floculação (tempo de 15 e de 25 min, e gradiente médio de velocidade de floculação entre 30 e 100 s⁻¹) diferentes valores de quantidade de ar fornecido ao processo (S*, entre 4,7 e 28,5 g de ar por m³ de fluente). Com a instalação piloto de FAD foram realizados apenas ensaios preliminares variando-se a taxa de aplicação superficial (140 e 210 m³.m⁻².d⁻¹) para diferentes valores de S* (14,8 a 29,5 g de ar por m³ de efluente). Com o emprego de dosagem de 65 mg.L⁻¹ de cloreto férrico, de tempo de 15 min e gradiente médio de velocidade de floculação de 80 s⁻¹ e de 19 g de ar por m³ de efluente, foram observados excelentes resultados em laboratório, com elevadas remoções de DQO (89%), de fosfato total (96%), de sólidos suspensos totais (96%), de turbidez (98%), de cor aparente (91%), de sulfetos (não detectado) e NTK (47%).

Considerando o sistema UASB e FAD, nos testes em laboratório, o autor observou remoções globais de 97,7% de DQO, de 98,0% de fosfato total, de 98,9% de SST, de 99,5% de turbidez, de 97,8% de cor aparente e de 59,0% de NTK. Nos ensaios com a instalação piloto de FAD, o sistema apresentou remoções de 93,6% de DQO, de 87,1% de SST, de 90% de sulfetos e de 30% de NTK.

MARCHIORETTO (1999), apresentou resultados obtidos em laboratório com o pós-tratamento do efluente de um reator anaeróbio com chicanas tratando esgoto sanitário,

empregando-se ozonização seguida de coagulação e flotação por ar dissolvido. Numa primeira etapa de ensaios, a partir de dosagens pré-fixadas de ozônio o autor realizou variação das dosagens do coagulante cloreto férrico, testando, para todas elas, uma série de valores de pH. De posse dos resultados alcançados, uma segunda fase de ensaios foi programada, em que foram fixadas dosagens de coagulante e, para todas elas, foram investigadas dosagens de ozônio, com quatro valores de pH cada uma (5, 5,5, 6,5 e 7,5). A terceira fase de estudos foi criada e refinada com base nos resultados dos ensaios anteriores. Foram escolhidos valores de pH (5,5) e de dosagem de ozônio que proporcionaram as melhores remoções de todos os parâmetros envolvidos, variando-se a dosagem de coagulante e testando-se, para cada uma, duas dosagens de ozônio. O mesmo se fez para o pH natural da água. No último estágio de estudos, foram repetidas as condições dos ensaios da etapa precedente, eliminando-se a dosagem nula de coagulante e realizando-se uma análise mais apurada das amostras. Segundo o autor, considerando as melhores condições de coagulação/flotação (dosagem de cloreto férrico), a aplicação de ozônio proporcionou significativos valores de remoção de DQO (82,2%), DBO (79%), fosfato total (93,4%), cor aparente (97,6%) e turbidez (97,2%), demonstrando que o sistema investigado constitui-se em alternativa eficiente, capaz de promover elevado grau de pós-tratamento de esgotos sanitários.

PENETRA et al (1999)(a), apresentaram o resultado de investigação realizada mediante variação da fração de recirculação do efluente pressurizado a 450 kPa, com emprego de equipamento em escala de laboratório, alimentado com o efluente de reator tipo UASB (18m³), tratando esgoto doméstico. O tempo de detenção hidráulico do reator UASB era de 8 horas. Durante os ensaios de floculação/flotação foram mantidos fixos a dosagem de cloreto férrico (65 mg.L⁻¹), mistura rápida com tempo de 30 s e $G_{mr} = 1100 \text{ s}^{-1}$, e floculação com tempo de 15 minutos e $G_{floc} = 80 \text{ s}^{-1}$. A fração de recirculação foi variada de 5 a 30%, em volume, e a velocidade de flotação entre 5 e 25 cm.min⁻¹ (72 e 360 m³.m⁻².d⁻¹). Como conclusão, a fração de recirculação de 20% (16 a 19 g ar.m⁻³), proporcionou grande estabilidade ao processo e forneceu excelentes resultados quanto à remoção de DQO (85%), fosfato total (95,4%) e de SST (95,1%). Considerando-se a eficiência global do sistema UASB e flotação, obteve-se até 97% de remoção de DQO (concentração do efluente na faixa de 20 a 30 mg.L⁻¹), até 98% de fosfato total (concentração na faixa de 0,5 a 0,6 mg.L⁻¹) e até 99% de SST (concentração em torno de 2 mg.L⁻¹). Quanto aos parâmetros NTK e sulfetos, foram

determinados apenas para a amostra obtida no ensaio, que forneceu melhores resultados de DQO (recirculação de 20%), sendo observadas eficiências de 24,3% (residual de 25,8 mg.L⁻¹) e 51,9% (residual de 0,52 mg.L⁻¹), respectivamente.

PENETRA et al (1999)(b), estudou a performance de uma unidade de flotação por ar dissolvido em escala de laboratório (*flotatest*) com a coagulação prévia de efluente de reator anaeróbio tipo UASB em escala piloto tratando esgoto doméstico. As condições operacionais físicas para mistura rápida e floculação/flotação foram mantidas constantes. As dosagens químicas (Cloreto Férrico) variaram de 30 a 110 mg.L⁻¹. O efeito do pH também foi verificado na faixa de 5,1 a 7,6 para as dosagens.

Os melhores resultados verificados por **PENETRA et al (1999)(b)** foram obtidos quando aplicado a dosagem de 65 mg.L⁻¹ de FeCl₃ e valores de pH entre 5,3 e 6,1. Nestas condições, as eficiências obtidas pela unidade de *flotatest* foram: eficiência entre 87 e 91% para DQO; entre 95 e 96% para fósforo total, 94% para SST; entre 96 e 97% para turbidez; entre 90 e 93% para cor aparente; e acima de 96% para Sulfeto. A eficiência global do sistema UASB-FAD atingiu eficiências de 98%, 98%, 98,4%, 99,3% e 98% para DQO, fósforo total, SST, turbidez e cor aparente, respectivamente.

PORTO, T. G. (2001), avaliou a eficácia de dois sistemas seqüenciais de tratamento de esgoto sanitário envolvendo processo biológico anaeróbio (em escala piloto) com processos físico-químicos de flotação (escala de laboratório), microfiltração tangencial (escala industrial) e osmose reversa (escala industrial). O autor realizou cinco baterias de ensaios (primeira etapa de estudos) utilizando um sistema seqüencial composto por: reator anaeróbio biológico, flotação por ar dissolvido, filtração em areia, filtração em cartucho de 5 µm, filtração em papel de filtro de 1,2 µm/filtração em cerâmica microporosa e filtração em membrana de nanofiltração. Numa segunda etapa de estudos o autor realizou uma bateria de ensaios utilizando um sistema seqüencial composto por: reator anaeróbio biológico, flotação por ar dissolvido, microfiltração tangencial e osmose reversa. Todos os efluentes gerados pelos dois sistemas de tratamento foram avaliados pelo autor, e a possibilidade de reuso (agrícola e industrial) dos mesmos foi investigada.

Segundo o autor, os efluentes da filtração em areia, filtração em cartucho, filtração de papel de filtro/filtração em cerâmica e nanofiltração (primeira etapa de estudos) apresentaram características compatíveis com a água necessária para a maioria dos processos industriais. Por outro lado, os efluentes da microfiltração tangencial e da osmose reversa (segunda etapa de estudos) se mostraram como uma boa alternativa para reuso agrícola e também para reuso industrial (principalmente o efluente da osmose reversa).

REALI et al. (2001)(a) estudaram a performance de unidade de flotação por ar dissolvido em escala de laboratório, utilizando efluente de reator UASB em escala piloto, tratando esgoto doméstico, com coagulação prévia através de cloreto férrico e polímero catiônico. Os autores estudaram as seguintes condições de coagulação/floculação: dosagem de coagulantes e polímeros, tempo de floculação e gradiente médio de floculação. Para a flotação, os autores investigaram a quantidade de ar requerida. Os ensaios foram divididos em 3 etapas, sendo que na primeira, foram realizadas dosagens de 1 a 16 mg.L⁻¹ de polímero catiônico, para determinar a dosagem ótima. A segunda etapa foram estudadas as condições de floculação, onde o gradiente médio de floculação estudado variou entre 30 a 100 s⁻¹, já o tempo de floculação pesquisado foi entre 15 a 20 min. Na terceira etapa da pesquisa foi realizada a análise da quantidade mínima de ar dissolvido requerida, aplicando cloreto férrico e polímero catiônico e variando o fornecimento de ar entre 4,7 a 28,5 g.m⁻³. A pressão de saturação foi fixada em 450 ± 10 KPa e a temperatura das amostra variou entre 23 a 24 °C.

Os melhores resultados apresentados pelos autores foram para a dosagem de 65 mg.L⁻¹, tempo de floculação de 15 min e gradiente médio de flotação igual a 80 s⁻¹. Nos ensaios com aplicação de polímero catiônico, a dosagem de 7 mg.L⁻¹ apresentou melhores resultados com tempo de floculação de 15 min e gradiente médio de floculação de 30 s⁻¹. A quantidade de ar dissolvido requerida variou entre 9,5 a 19,0 g de ar.m⁻³ de esgoto. Os melhores resultados de remoção de SST (95% e residual de 2 mg.L⁻¹), DQO (85% e residual de 20 mg.L⁻¹) e fósforo (95% e residual de 0,6 mg.L⁻¹) foram obtidos com a aplicação de cloreto férrico. No entanto, bons resultados foram apresentados quando da aplicação de polímero catiônico, com remoções de SST e DQO de 74% e 75%, respectivamente.

Em outro estudo, **REALI et al. (2001)(b)** estudou o comportamento de um sistema de FAD em escala de bancada (*flotateste*), com coagulação prévia (através de cloreto férrico e polímero catiônico) de efluente oriundo de unidade piloto de reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB). Os seguintes parâmetros foram fixados nos ensaios: $G_{mr}=1000\text{ s}^{-1}$; $T_{mr}=10\text{ s}$; $G_{floc}=80\text{ s}^{-1}$; $T_{floc}=20\text{ min}$; $R=20\%$ e $P_{sat}=4,5\text{ Bar}$. O trabalho foi dividido em três etapas, sendo na primeira avaliado a variação da dosagem de cloreto férrico (entre 15 a 65 mg de $\text{FeCl}_3\cdot\text{L}^{-1}$), na segunda fase foi avaliado a variação do uso de 1 a 7 mg. L^{-1} de polímero não-iônico sem adição de cloreto férrico, já a terceira fase os autores estudaram a associação de cloreto férrico e polímero não-iônico com variações das dosagens de 15 a 40 mg de $\text{FeCl}_3\cdot\text{L}^{-1}$ e 0 a 1,25 mg. L^{-1} , respectivamente. As amostras foram avaliadas para velocidades de flotação (V_f) de 10 e 25 cm. min^{-1} .

Segundo os autores, foi possível reduzir a dosagem de cloreto férrico de 65 para 30 mg de $\text{FeCl}_3\cdot\text{L}^{-1}$, com a adição de 0,4 mg. L^{-1} de polímero não-iônico. Para estas dosagens, coletando as amostras para $V_f=10\text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$, foi observado remoções de DQO, fosfato e turbidez de respectivamente, 79 %(residual de 23 mg. L^{-1}), 86 %(residual de 0,9 mg. L^{-1}) e 98 %(residual de 2,6 UNT).

PENETRA (2003), estudou os principais parâmetros operacionais da flotação por ar dissolvido, utilizada no pós-tratamento de efluentes de um reator anaeróbio de leito expandido (RALEx), tratando esgoto sanitário. O autor realizou inicialmente ensaios utilizando o *flotateste*, para identificar as melhores dosagens de coagulante (cloreto férrico), o polímero mais adequado, dentre os 26 testados, e sua respectiva dosagem, o pH de coagulação adequado, o tempo (T_{floc}) e o gradiente de velocidade (G_{floc}) de floculação mais apropriados e a quantidade de ar (S^*) requerida. Para obtenção das condições operacionais adequadas para a unidade piloto de flotação, os valores de T_{floc} e de G_{floc} foram variados de zero a 24 minutos e de 40 a 100 s^{-1} , respectivamente. As concentrações de cloreto férrico e de polímero sintético variaram de 15 a 92 mg de $\text{FeCl}_3\cdot\text{L}^{-1}$ e de 0,25 a 7,0 mg. L^{-1} , respectivamente. S^* variou de 2,85 a 28,5 g de ar. m^{-3} de efluente e a taxa de aplicação superficial (TAS) na unidade de flotação abrangeu de 180 a 250 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$. O desempenho da flotação durante a partida do reator anaeróbio também foi investigado.

Segundo o autor, o uso de 50 mg.L^{-1} de cloreto férrico, de T_{floc} igual a 20 min e G_{floc} de 80 s^{-1} , de R igual a 18%, de S^* de $19,7 \text{ g de ar.m}^{-3}$ de efluente e taxa de $180 \text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$, produziu excelentes resultados nos ensaios com a instalação piloto de flotação, com elevadas remoções de carga de DQO (80,6%), de fósforo total (90,1%) e de sólidos suspensos totais (92,1%) e com turbidez entre 1,6 e 15,4 UNT e residuais de ferro de $0,5 \text{ mg.L}^{-1}$, com remoção estimada, na forma de lodo, de 77 g de SST por m^3 de efluente tratado. Nestas mesmas condições, no sistema RALEx+FAD, foram observadas remoções globais de 91,6% de carga de DQO, de 90,1% de carga de fósforo e de 96,6% de carga de SST. O emprego da flotação por ar dissolvido (FAD) mostrou-se alternativa bastante atraente para o pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios. Se a coagulação estiver bem ajustada, o sistema composto de reator anaeróbio seguido de unidade de flotação consegue alcançar excelente remoção de matéria orgânica, redução significativa da concentração de fósforo e de sólidos suspensos, além de precipitação dos sulfetos dissolvidos, gerados no reator anaeróbio.

Em outro trabalho publicado, **PENETRA et al. (2003)** estudaram a performance de sistemas piloto de tratamento de esgoto sanitário utilizando reator anaeróbio de leito expandido e unidade de FAD. O trabalho teve por finalidade avaliar a influência das condições da flocculação do efluente anaeróbio quando da pós clarificação através de flotação, para isso os seguintes parâmetros foram fixados: dosagem de cloreto férrico (DCF)= $50 \text{ mg FeCl}_3.\text{L}^{-1}$; $R=18 \%$; $P_{\text{sat}}=4,5 \text{ Bar}$ e $\text{TAS}=180 \text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ ($V_f=12,5 \text{ cm.min}^{-1}$). Em adição, as seguintes condições de flocculação foram estudadas pelos autores: G_{floc} entre 60 e 100 s^{-1} e T_{floc} entre 13 e 20 min.

Segundo os autores, os melhores resultados foram observados para $G_{\text{floc}}=80 \text{ s}^{-1}$ e $T_{\text{floc}}=20 \text{ min}$. Nestas condições, foram observadas as seguintes remoções de DQO, fósforo e SST: 94,4 % (residual de 53 mg.L^{-1}), 87 % (residual de $0,80 \text{ mg.L}^{-1}$) e 96,7 % (residual de 9 mg.L^{-1}), respectivamente.

CARVALHO, M.E. (2003), utilizou um sistema de tratamento seqüencial de esgoto sanitário constituído de um reator anaeróbio de leito expandido (RALEx), seguido de unidade piloto de flotação por ar dissolvido de alta taxa (FADAT) contendo placas paralelas em seu interior. Para tempo de flocculação de 20min, o autor estudou, como coagulantes, dosagens de cloreto férrico de 50 mg.L^{-1} e 70 mg.L^{-1} , taxas de aplicação

superficial de $504 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ e $1.008 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, gradiente médio de velocidade de floculação de 60 s^{-1} , 80 s^{-1} e 100 s^{-1} e frações de recirculação de 8%, 13% e 18%. Dentre o conjunto de condições operacionais da unidade piloto FADAT estudada, o autor considerou mais vantajoso: taxa de aplicação superficial no flotador de $504 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, dosagem de cloreto férrico de $70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, gradiente médio de velocidade de floculação de 80 s^{-1} e 8,1 g de ar por metro cúbico de efluente. Nessas condições foram obtidas as seguintes remoções: 84% de turbidez (residual entre 6,3 e 62 UNT), 73% de DQO (residual entre 20 e 156 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 75% de fósforo (residual entre 0,5 e 1,9 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) e 67% de SST (residual entre 8 e 80 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ de SST). Os resultados demonstraram que o emprego da unidade FADAT como pós-tratamento de efluente de reator anaeróbio proporciona economia de energia, tendo em vista requererem de 75 a 50% da quantidade de ar exigida pelos sistemas de flotação convencional.

REALI et al. (2007), estudou a performance de uma instalação piloto de flotação por ar dissolvido tratando esgoto sanitário proveniente de um sistema experimental composto por um Reator Anaeróbio de Leito Expandido (RALex). Durante o trabalho os autores testaram dois caminhos diferentes de dosagem de coagulante (FeCl_3). O primeiro caracterizou-se pela dosagem contínua de coagulante durante doze horas (08:00-20:00hs), sendo efetuados três ensaios para as dosagens de $10,3 \text{ mgFe}^{+3} \cdot \text{L}^{-1}$, $17,2 \text{ mgFe}^{+3} \cdot \text{L}^{-1}$ e $24,1 \text{ mgFe}^{+3} \cdot \text{L}^{-1}$, respectivamente. As coletas foram realizadas nos seguintes horários, variando a cada três horas: 08:00, 11:00, 14:00, 17:00 e 20:00 hs. Já a segunda verificação consistiu na aplicação de diferentes dosagens de coagulante ($14,5\text{-}31,7 \text{ mgFe}^{+3} \cdot \text{L}^{-1}$) durante 24 horas, de acordo com a variação da característica (turbidez e DQO) do esgoto afluente ao sistema de flotação. Os diferentes valores das dosagens adotadas neste último ensaio foram baseados nos estudos preliminares desenvolvidos por **PENETRA (2003)**.

Uma solução comercial de cloreto férrico (39%), com densidade de $1,41 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ e acidez próxima a 1,21% foi usada como coagulante. Durante todos os ensaios as seguintes condições operacionais foram mantidas constantes: tempo de floculação (Tfloc) em 20 minutos; gradiente médio de velocidade na floculação (Gfloc) em $80 \pm 5 \text{ s}^{-1}$; vazão de recirculação de $1,8 \pm 0,1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (18% da vazão afluente) e pressão na câmara de saturação de $450 \pm 10 \text{ kPa}$ e suprimento de ar da ordem de $17 \text{ g de ar} \cdot \text{m}^{-3}$ de esgoto. As duas verificações permitiram aos autores determinar uma razão lógica

entre a dosagem de coagulante aplicada em função da qualidade do esgoto afluyente (Fe^{+3} /Turbidez), de tal maneira que fossem garantidas as remoções dos principais parâmetros, tais como: SST, DQO, Fósforo e Turbidez.

Os resultados obtidos por **REALI et al. (2007)** demonstraram que para obtenção de eficiência de remoção de SST (95%), DQO (90%) e fósforo (70%) a faixa ótima da razão Fe^{+3} /Turbidez situou-se entre 0,012 e 0,013. Para o atingimento de remoções elevadas de fósforo (acima de 95%) a dosagem de coagulante (FeCl_3) situou-se na faixa entre 0,016 a 0,018 em termos de razão Fe^{+3} /Turbidez.

Posteriormente, **OLIVEIRA (2007)** avaliou sistema de floto-filtração, em escala de laboratório, no pós-tratamento de efluente anaeróbio. Seu trabalho objetivou: i) Comparar o desempenho de sistema floto-filtro com o uso de diferentes tipos de leito filtrante; ii) Verificar o desempenho do sistema segundo a variação de S^* e iii) Estudar a influência da TAS no desempenho da unidade. O referido trabalho foi desenvolvido utilizando-se o efluente de reator anaeróbio de leito expandido (RALex) em sistema piloto de floto-filtração, além de teste preliminares em escala de laboratório com o auxílio de *flotateste* e filtro de bancada. O trabalho foi dividido em duas fases: ensaios preliminares (fase 1) e ensaios com o floto-filtro (fase 2), sem utilização de leito filtrante (etapa 1 da fase 2) e com utilização do leito filtrante (etapa 2 da fase 2). A fase 1, realizada com unidade de flotação por ar dissolvido em escala de bancada, apresentou resultados satisfatórios em termos de redução de turbidez, cor e $\text{Abs}_{254\text{nm}}$ para dosagens de cloreto férrico entre 40 a 80 mg.L^{-1} na maior parte dos ensaios. Os dados desta fase serviram principalmente para a determinação e adoção dos melhores parâmetros operacionais a serem utilizados na fase seguinte. Na etapa 1 da fase 2, o sistema foi analisado sob a ótica da qualidade da água produzida em condições variáveis de dosagem de cloreto férrico, tempo e gradiente de floculação, fração de recirculação e taxa de aplicação superficial. Foram obtidas eficiências globais de 88 a 97% de redução na turbidez (residual < 20 UNT), 84 a 98% de SST (residual < 25 mg.L^{-1}), 87 a 94% de DQO_B (residual < 60 mg.L^{-1}), 78 a 92% de DQO_F (residual < 40 mg.L^{-1}), 85 a 96% de P-PO_4^{3-} (residual < 2 mg.L^{-1}) e menor que 30% para NTK e N-NH_3 .

SANTOS, E.R.D. (2008), avaliou o desempenho de uma unidade piloto de floto-filtração, que utilizou polímeros associados ao cloreto férrico no pós-tratamento de efluente de reator anaeróbio de leito expansível (RALex), tratando esgoto doméstico. Inicialmente, o autor testou em ensaios de *flotateste*, flotação em escala de laboratório, baixas dosagens de polímero catiônico sintético como auxiliar da flotação. Segundo o autor, as dosagens de coagulante deram-se na razão $\text{mg.Fe}^{+3}.\text{L}^{-1}$ por unidade de turbidez (UNT) do RALex (Fe/Turbidez) e variou entre 0,08 a 0,18 nos ensaios de bancada. O autor variou a dosagem fixa de polímero, associada ao cloreto férrico, entre 0,1 e 0,4 mg.L^{-1} . As variáveis operacionais dos ensaios de *flotateste* e de floto-filtração em escala piloto utilizadas foram: $G_{\text{floc}}=90\text{s}^{-1}$; $T_{\text{floc}}=18\text{min}$; $R=15\%$; $P_{\text{sat}}=4,5\text{ Bar}$; $TAS=300\text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$. Para os ensaios piloto de floto-filtração foi utilizado leito filtrante de areia. Dentre os ensaios pilotos de floto-filtração realizados, foram obtidos os melhores resultados ao utilizar dosagens variáveis de cloreto férrico segundo razão entre Fe/turbidez de 0,15 $\text{mg de Fe}^{+3}.\text{L}^{-1}.\text{UNT}^{-1}$, associada a dosagens de 0,4 mg.L^{-1} de polímero catiônico, produzindo efluente final com concentração de $\text{SST}<2\text{mg.L}^{-1}$.

Conforme observado, diversos estudos já foram realizados visando um melhor entendimento dos parâmetros de controle da coagulação-floculação-flotação de efluentes de reatores anaeróbios, sendo apresentado na **Tabela 3.3**, um resumo das melhores condições apontadas por alguns autores, as quais serviram de base para a presente pesquisa.

Tabela 3.3 – Resumo dos parâmetros de controle da coagulação-floculação-flotação de efluentes anaeróbios encontrados na bibliografia.

Autor	Melhores Resultados Segundo Bibliografia para pós-tratamento ef. Anaeróbio por FAD									Remoções (%)		
	Gmr s ⁻¹	Tmr s	R %	Gfloc s ⁻¹	Tfloc min	Psat Bar	DCF FeCl ₃ .L ⁻¹	DP mg.L ⁻¹	Vf cm.min ⁻¹	SST	DQO	Fósforo
CAMPOS et al. (1996) ***	600,0	30,0	20,0	40,0	20,0	4,5	100,0	0,0	4,9	73,0	73,0	84,0
PENETRA (1998) ***	1100,0	30,0	20,0	80,0	15,0	4,5	65,0	0,0	10,0	96,0	89,0	96,0
PENETRA et al. (1999)(a)***	1100,0	30,0	20,0	80,0	15,0	4,5	65,0	0,0	10,0	95,1	85,0	95,4
PENETRA et al. (1999)(b)***	-	-	-	-	-	-	65,0	-	-	94,0	96,0	91,0
REALI et al. (2001)(a)***	1100,0	30,0	20,0	80,0	15,0	4,5	65,0	0,0	10,0	95,0	85,0	95,0
REALI et al. (2001)(b)***	1000,0	10,0	20,0	80,0	20,0	4,5	30,0	0,4	10,0	-	79,0	86,0
CARVALHO, M.E. (2003) *	-	-	-	80,0	20,0	-	70,0	0,0	35,0	67,0	73,0	75,0
PENETRA (2003) ****	-	-	18,0	80,0	20,0	4,5	50,0	0,0	12,5	92,1	80,6	90,1
PENETRA et al. (2003) ****	-	-	18,0	80,0	20,0	4,5	50,0	-	12,5	96,7	94,4	87,0
REALI et al. (2007)***	-	-	18,0	80,0	20,0	4,5	42 - 92	0,0	12,5	95,0	90,0	70,0
SANTOS, E.R.D. (2008) **	-	-	15,0	90,0	18,0	4,5	-	0,4	20,8	>95	-	-

* Utilizou unidade de Flotação com Placas Internas (FADAT)

** Utilizou unidade de Floto-filtração

*** Utilizou unidade de flotação em escala de bancada (flotatest)

**** Utilizou unidade de flotação em escala piloto

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir são apresentadas a descrição da área de estudo e os métodos utilizados nos ensaios de FAD em escala de laboratório, utilizando *flotatestes*.

4.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Neste será possível verificar as características do sistema de esgotamento da bacia do ribeirão anhumas, bem como da própria ETE Anhumas, cenário desta pesquisa.

4.1.1 Sistema de Esgotamento do Ribeirão Anhumas

A área urbana do município de Campinas-SP está assentada sobre três bacias hidrográficas. Ao norte e ao leste, a bacia do rio Atibaia; a oeste a bacia do ribeirão Quilombo; e ao sul a bacia do rio Capivari. Todas bacias convergem suas águas para o rio Tietê, e na seqüência, para o rio Paraná.

No âmbito da bacia do rio Atibaia, destaca-se o setor de esgotamento do Ribeirão Anhumas, que compreende vinte e quatro bairros do município de Campinas, sendo a maioria já totalmente ocupada. Os despejos gerados por estes bairros são encaminhados para a ETE Anhumas, onde é realizado o tratamento e posterior lançamento no ribeirão Anhumas. Este último, após receber o esgoto tratado, contribui no abastecimento das cidades de Paulínia, Sumaré, Americana e Piracicaba, fato que ajuda a entender a importância desta estação para a saúde pública na região.

A ETE Anhumas foi inaugurada em fevereiro de 2007 e é considerada a maior estação de tratamento de esgoto do interior do Brasil. Projetada para tratar uma vazão média diária de 1.200 L.s^{-1} , o equivalente a 250 mil habitantes (**SANASA 2008**), esta estação recebe a contribuição de todo o setor de esgotamento do Ribeirão Anhumas. (**Figura 4.1**).

Figura 4.1 – Mapa Localização ETE Anhumas, Campinas-SP.

Fonte: SANASA (2008)

4.1.2 ETE Anhumas

A ETE Anhumas é uma das unidades de tratamento de esgoto sanitário do município de Campinas/SP e utiliza uma tecnologia mista, associando tratamento biológico (anaeróbico) com físico-químico. Sua capacidade atual é da ordem de 1.200 L.s^{-1} em termos de vazão média, no entanto, de acordo com o departamento de operação da SANASA, recebe hoje pouco menos da metade de sua capacidade, vazão em torno de 550 L.s^{-1} .

Na **Figura 4.2** e **Figura 4.3**, são apresentados o fluxograma resumido do processo de tratamento e o mapa geral da ETE Anhumas, respectivamente. Em sua configuração atual, o esgoto chega por gravidade até a EEEB, onde passa por gradeamento grosseiro antes de ser recalcado para o tratamento preliminar. O material retido no gradeamento é encaminhado por meio de esteira transportadora até uma caçamba, sendo posteriormente removido e transportado para aterro sanitário (**Figura 4.4**). O tratamento preliminar situa-se em cota bem elevada, a fim de garantir carga hidráulica no processo de tratamento, desta maneira, o esgoto escoar por gravidade pelo tratamento preliminar, passando pelo peneiramento, medição de vazão e remoção de

areia, sendo posteriormente encaminhado para o tratamento biológico. O material retido é armazenado em caçambas e segue também para aterro sanitário (**Figura 4.5**).

Figura 4.2 – Fluxograma simplificado de tratamento (ETE Anhumas, Campinas-SP)

Fonte: SANASA

Figura 4.3 – Mapa geral da ETE Anhumas, Campinas/SP.

Fonte: SANASA

Figura 4.4 – ETE Anhumas: Gradeamento grosseiro na EEEB.

Fonte: SANASA

Figura 4.5 – ETE Anhumas: Tratamento Preliminar.

Fonte: SANASA

Após o tratamento preliminar dá início ao tratamento biológico, o qual é realizado por quatro módulos de reatores UASB que totalizam dezesseis reatores UASB dimensionados para TDH=9 hs, na vazão média (**Figura 4.6**). Os gases produzidos pelos reatores são recolhidos e encaminhados para conjunto de queimadores (**Figura 4.7**). Já o efluente dos reatores segue para a etapa físico-química subsequente do tratamento.

Figura 4.6 – ETE Anhumas: Reatores UASB.

Fonte: SANASA

A etapa físico-química do tratamento inicia com a chegada do efluente dos reatores UASB até o canal de medição de vazão e mistura rápida na unidade de floculação. A coagulação é realizada através da aplicação de solução comercial de cloreto férrico e polímero, sendo estes produtos dosados na concentração comercial, sem dissolução prévia, diretamente no canal de entrada (**Figura 4.8**). Após a coagulação, o efluente acessa ao sistema de floculação, que é composto de quatro módulos independentes, cada qual com três câmaras de (**Figura 4.9**).

Figura 4.7 – ETE Anhumas: Queimadores de Biogás.

Fonte: SANASA

Figura 4.8 – ETE Anhumas: Mistura rápida/coagulação

Fonte: SANASA

Figura 4.9 – ETE Anhumas: Floculação

Fonte: SANASA

O efluente floculado, segue então para a etapa final de tratamento que é a clarificação através de quatro flotadores por ar dissolvido circulares dimensionados para uma Taxa de Aplicação Superficial (TAS) de $122 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ ($V_f=8,47 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$). O ar dissolvido provém de unidade de saturação de ar que possui o papel de utilizar parte do efluente tratado para fazer a saturação de ar e posterior recirculação pressurizada para cada flotador. Para isso, bombas de recirculação recalcam parte do esgoto tratado para dentro de câmaras de saturação, as quais são pressurizadas recebendo ar de conjunto de compressores ($P_{\text{sat}}=5 \text{ Bar}$). Após a saturação do ar no efluente tratado, o efluente saturado é encaminhado para a zona de contato de cada flotador, despressurizando-se e arrastando parte significativa do material coloidal afluente ao sistema de FAD. O conjunto partícula-microbolha acaba se acumulando na superfície do tanque de flotação, permitindo a remoção através de raspagem superficial, sendo o material (já considerado lodo) encaminhado para desidratação ou retornado para os reatores UASB (**Figura 4.10**). Após esta etapa, efluente clarificado dos flotadores segue para o rio, sendo realizada dosagem de cloro (hipoclorito) e medição de vazão (**Figura 4.11**). O lodo desidratado é acondicionado em caçambas, e posteriormente transportado para aterro sanitário (**Figura 4.12**).

UNIDADES

- 1 – Flotador por Ar Dissolvido (FAD);
- 2 – Bombas de recirculação;
- 3 – Câmara de Saturação de Ar;
- 4 – Compressores de Ar;
- 5 – Zona de Contato do FAD;
- 6 – Lodo flotado;
- 7 – Remoção do lodo;
- 8 – Saída efluente FAD.

Figura 4.10 – ETE Anhumas: Sistema de Flotação por Ar Dissolvido (FAD)

Fonte: SANASA

UNIDADES

- 1 – Canal de saída efluente tratado;
- 2 – Despejo efluente tratado no rio.

Figura 4.11 – ETE Anhumas: Canal de saída efluente tratado/despejo no rio

Fonte: SANASA

Figura 4.12 – ETE Anhumas: Desidratação de lodo

Fonte: SANASA

4.2 ENSAIOS COM FLOTATESTE

A seguir são apresentadas as informações referentes aos ensaios de flotação em escala de laboratório, através do uso de *flotateste*, realizados com o efluente dos reatores UASB da ETE Anhumas.

4.2.1 Equipamentos Utilizados

Os ensaios de variação de dosagens de coagulantes e polímeros foram realizados em escala de laboratório, através do uso *flotateste*. O equipamento *flotateste*, desenvolvido por **REALI (1991)**, é composto por conjunto de vasos cilíndricos, independentes entre si, e interligados à câmara de saturação. Para efetuar a floculação, cada vaso possui agitador próprio e, para efetuar a flotação, a câmara de saturação possui entrada de água, proveniente de rede de abastecimento público, e do ar comprimido, proveniente de compressor de ar (**Figura 4.13**).

Na **Figura 4.14**, verifica-se a imagem do equipamento utilizado nesta pesquisa, o qual é munido de quatro jarros com capacidade de 2 litros cada um deles, quatro motores acoplados a quatro hastes metálicas removíveis presentes no interior dos jarros, inversor de frequência, display indicativo da rotação das hastes e uma câmara de saturação de ar (capacidade de até 8 Bar).

A alimentação e pressurização da câmara de saturação de ar do equipamento foi realizada através de derivação da linha proveniente de um dos compressores da ETE Anhumas, mostrada na **Figura 4.15**.

Figura 4.15 – Foto da derivação na linha de ar da ETE Anhumas para alimentação do *flotateste*

4.2.2 Produtos Químicos Utilizados

A seguir são apresentadas as características e dados de fabricação dos coagulantes e polímeros utilizados nos ensaios.

4.2.2.1 Coagulantes

Nos ensaios foram utilizados os seguintes coagulantes: Sulfato de Alumínio; PAC e o Cloreto Férrico.

- Sulfato de Alumínio

Denominação: Sulfato de Alumínio Isento de Ferro

Fornecimento: em pó

Fornecedor: Kemira Kemwater

Fórmula: $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

Teor de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$: 56,44% (Dados do Fabricante)

Teor de Al_2O_3 : 16,82% (Dados do Fabricante)

Teor de Fe_2O_3 : 0,00% (Dados do Fabricante)

-
- PAC

Denominação: Cloreto de Polialumínio (PAC)

Fornecimento: Líquido

Fornecedor: Nheel Química Ltda.

Fórmula: $Al_n(OH)_m Cl_{3n-m}$

Teor de Al_2O_3 : 9,81% (Dados do Fabricante)

- Cloreto Férrico

Denominação: Cloreto Férrico

Fornecimento: Líquido

Fornecedor: Ashland

Fórmula: $FeCl_3$

Teor de $FeCl_3$: 39% (Dados do Fabricante)

4.2.2.2 Polímeros

Para auxiliar a floculação, foram estudados três diferentes tipos de polímeros sintéticos, diferenciados pela carga iônica, sendo eles: polímero catiônico, polímero não iônico e polímero aniônico.

- Polímero Catiônico

Denominação: Polímero Catiônico

Fornecimento: em pó

Fornecedor: Kemira Kemwater

Tipo: C 8394

- Polímero Não Iônico

Denominação: Polímero Não Iônico

Fornecimento: em pó

Fornecedor: Kemira Kemwater

Tipo: N 300

- Polímero Aniônico

Denominação: Polímero Aniônico

Fornecimento: em pó

Fornecedor: Kemira Kemwater

Tipo: A 8566

4.2.3 Parâmetros Fixados

Para o desenvolvimento dos ensaios com flotatestes os seguintes parâmetros foram fixados: $G_{mr}=800 \text{ s}^{-1}$; $T_{mr}=15 \text{ s}$; $G_{floc}=90 \text{ s}^{-1}$; $T_{floc}=20 \text{ min}$; $P_{sat}=5 \text{ Bar}$ e $R=17 \%$. Além da fixação destas condições de ensaio, foram também investigadas quatro diferentes velocidades de flotação (V_f), sendo: $V_{f1} = 8,00 \text{ cm.min}^{-1}$; $V_{f2} = 12,00 \text{ cm.min}^{-1}$; $V_{f3} = 16,00 \text{ cm.min}^{-1}$ e $V_{f4} = 20,00 \text{ cm.min}^{-1}$.

As condições de ensaio utilizadas nesta pesquisa foram baseadas nos valores reportados em bibliografia, no entanto alguns parâmetros se aproximaram das condições operacionais de projeto da ETE Anhumas, conforme a seguir. Os demais resultados foram fixados por constituírem condições de boa performance segundo diversos autores (**Tabela 3.3**) (item 3).

4.2.3.1 Gradiente médio de velocidade na mistura rápida (G_{mr})

A mistura rápida na ETE Anhumas é realizada através de ressalto hidráulico ocasionado em medidor de vazão do tipo Parshall ($w=5 \text{ pés}$). Conforme abordado, durante os ensaios com *flotatestes*, foi fixado $G_{mr}=800 \text{ s}^{-1}$, valor que se aproxima de G_{mr} obtidos em calhas Parshall de dimensões similares ao existente na ETE Anhumas, entre 800 e 1000 s^{-1} (**RICHTER & NETO, 1991**).

4.2.3.2 Pressão de saturação (P_{sat})

O projeto da câmara de saturação de ar da ETE Anhumas foi dimensionado para funcionar com mesmo valor de pressão de saturação do fixado nesta pesquisa, que foi $P_{sat} = 5 \text{ Bar}$.

4.2.3.3 Velocidades de flotação (V_f)

A velocidade de flotação é um parâmetro que representa indiretamente a Taxa de Aplicação Superficial (TAS) a que um flotor é submetido. A unidade de medida usual é expressa em $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$. Usualmente a TAS é expressa em $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ou $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$, sendo a conversão para $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$ possível através da divisão da TAS ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$) por 14,4 ($\text{m} \cdot \text{min} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$). Devido à semelhança entre os conceitos de TAS e V_f e a simplicidade de conversão das unidades, a avaliação de diferentes valores de V_f vem sendo realizada por diversos autores, visando verificar o desempenho da FAD para diversas TAS, em escala de laboratório.

A seguir são apresentadas quatro condições operacionais vislumbradas em projeto para o funcionamento da ETE Anhumas, sendo realizada novamente uma comparação entre os valores de V_f estudados nesta pesquisa, com as previstas no projeto da estação de tratamento cenário desta pesquisa.

- Vazão média de fim de plano afluente e todos os flotores operando (V_{f1})

Diâmetro Flotor = 17,80m;

Área Útil = 248,85 m^2 ;

Vazão Média Afluente (Fim de Plano) = 1.200 $\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$

Flotores Operando = 4,00;

Vazão Afluente por Flotor (Q_{af}) = 300 $\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$ = 25.920 $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$;

Fração de Recirculação (R) = 17 %;

Vazão Recirculação (Q_r) = 51 $\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$ = 4.406,4 $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$;

Vazão Aplicada por Flotor ($Q_{af} + Q_r$) = 30.326,4 $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$;

Taxa Aplicação Superficial = 121,87 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$;

Velocidade de Flotação = 8,46 $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$;

Valor Fixado na Pesquisa (V_{f1}) = 8,00 $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$.

-
- Vazão média de fim de plano afluente e um flotador em manutenção (Vf2)

Diâmetro Flotador = 17,80m;

Área Útil = 248,85 m²;

Vazão Média Afluente (Fim de Plano) = 1.200 L.s⁻¹

Flotadores Operando = 3,00;

Vazão Afluente por Flotador (Qaf) = 400 L.s⁻¹ = 34.560 m³.d⁻¹;

Fração de Recirculação (R) = 17 %;

Vazão Recirculação (Qr) = 68 L.s⁻¹ = 5.875,2 m³.d⁻¹;

Vazão Aplicada por Flotador (Qaf + Qr) = 40.435,2 m³.d⁻¹;

Taxa Aplicação Superficial = 162,49 m³.m⁻².d⁻¹;

Velocidade de Flotação = 11,28 cm.min⁻¹;

Valor Fixado na Pesquisa (Vf2) = 12,00 cm.min⁻¹.

- Vazão máxima de fim de plano afluente e todos os flotadores operando (Vf3)

Diâmetro Flotador = 17,80m;

Área Útil = 248,85 m²;

Vazão Máxima Afluente (Fim de Plano) = 2.200 L.s⁻¹

Flotadores Operando = 4,00;

Vazão Afluente por Flotador (Qaf) = 550 L.s⁻¹ = 47.520 m³.d⁻¹;

Fração de Recirculação (R) = 17 %;

Vazão Recirculação (Qr) = 93,5 L.s⁻¹ = 8.078,4 m³.d⁻¹;

Vazão Aplicada por Flotador (Qaf + Qr) = 55.598,4 m³.d⁻¹;

Taxa Aplicação Superficial = 223,42 m³.m⁻².d⁻¹;

Velocidade de Flotação = 15,51 cm.min⁻¹;

Valor Fixado na Pesquisa (Vf3) = 16,00 cm.min⁻¹.

- Vazão máxima de fim de plano afluente e um flotador em manutenção (Vf4)

Diâmetro Flotador = 17,80m;

Área Útil = 248,85 m²;

Vazão Máxima Afluente (Fim de Plano) = 2.200 L.s⁻¹

Flotadores Operando = 3,00;

Vazão Afluente por Flotador (Q_{af}) = $733,33 \text{ L.s}^{-1} = 63.360 \text{ m}^3.\text{d}^{-1}$;
Fração de Recirculação (R) = 17 %;
Vazão Recirculação (Q_r) = $124,67 \text{ L.s}^{-1} = 10.771,15 \text{ m}^3.\text{d}^{-1}$;
Vazão Aplicada por Flotador ($Q_{af} + Q_r$) = $74.131,15 \text{ m}^3.\text{d}^{-1}$;
Taxa Aplicação Superficial = $297,89 \text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$;
Velocidade de Flotação = $20,69 \text{ cm.min}^{-1}$;
Valor Fixado na Pesquisa (V_{f4}) = $20,00 \text{ cm.min}^{-1}$.

4.2.4 Roteiro dos Ensaios

Os ensaios de flotação em escala de laboratório foram realizados em quatro fases, sendo estas apresentadas a seguir:

- Fase 1: Variação da dosagem de coagulantes;
- Fase 2: Variação da dosagem de polímeros;
- Fase 3: Avaliação temporal do melhor coagulante e polímero;
- Fase 4: Aplicação da $RD_m T_{(média)}$ ao longo do dia.

4.2.4.1 Fase 1: Variação da dosagem de coagulantes

A variação da dosagem de coagulantes utilizou efluente do reator UASB coletado no horário das 12 hs. Foram estudados como coagulantes o sulfato de alumínio, PAC e o cloreto férrico, visando determinar a melhor dosagem, sem adição de polímeros. A seguir são apresentados critérios para definição das análises físico-químicas das amostras, bem como os procedimentos de ensaio para esta fase 1.

O critério para escolha das melhores dosagens para cada coagulante foi através da avaliação das seguintes variáveis:

- Maior Remoção de turbidez, ou seja, dosagens que atingiram turbidez remanescente < 15 UNT para a velocidade de flotação 3 ($V_f3 = 16 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$);
- Menor dosagem aplicada.

De posse das melhores dosagens para cada coagulante, a pesquisa encaminhou para a segunda fase, que contempla a fixação dessas dosagens de coagulantes estabelecidas na fase 1, mas agora com o acréscimo de dosagem variada de diferentes tipos de polímeros, conforme verificado a seguir.

4.2.4.2 Fase 2: Variação da dosagem de polímeros

Na fase 2, foram fixadas as dosagens de coagulantes definidas na fase 1, e variadas as dosagens de polímeros catiônicos, não-iônicos e aniônicos, sendo mantido o horário das 12 hs para a coleta do efluente do reator UASB. As análises físico-químicas realizadas, bem como os procedimentos adotados nos ensaios são apresentados a seguir.

4.2.4.2.1 Análises físico-químicas

As análises físico-químicas realizadas na fase 2 foram definidas de acordo com o ponto de coleta, conforme **Figura 4.18**, a seguir.

Figura 4.18 – Critérios para escolha das análises físico-químicas na fase 2.

4.2.4.2.2 Procedimentos

Além das melhores dosagens de coagulantes estabelecidas na fase 1, durante os ensaios da fase 2 foram fixados os parâmetros: $G_{mr}=800 \text{ s}^{-1}$; $T_{mr}=15 \text{ s}$; $G_{floc}=90 \text{ s}^{-1}$; $T_{floc}=20 \text{ min}$; $R=17 \%$; $P_{sat}=5,00 \text{ Bar}$; $Vf1=8 \text{ cm.min}^{-1}$; $Vf2=12 \text{ cm.min}^{-1}$; $Vf3=16 \text{ cm.min}^{-1}$; $Vf4=20 \text{ cm.min}^{-1}$. O roteiro dos ensaios para a fase 2 seguiu os procedimentos apresentados na **Figura 4.19**.

Figura 4.19 – Procedimentos dos ensaios com flotatestes na fase 2.

As amostras relativas a velocidade de flotação 3 (Vf_3) foram avaliadas quanto ao valor da turbidez remanescente. Assim, as amostras que atenderam ao quesito turbidez < 15 UNT foram submetidas a análise mais detalhada, as demais amostras (turbidez > 15 UNT) foram submetidas a análise simplificada (ver **Figura 4.18**);

O roteiro de ensaios apresentados anteriormente relata os procedimentos de variação das dosagens de polímeros. A faixa de dosagem de polímeros aplicada para cada ensaio foi bem estreita, variando a cada $0,50 \text{ mg.L}^{-1}$.

Assim, de posse dos resultados obtidos para cada ensaio, foi realizada avaliação das melhores dosagens e melhor tipo de polímero através da análise das seguintes variáveis:

-
- Dosagens que atingiram turbidez remanescente < 15 UNT para todas as velocidades de flotação estudadas (Vf1; Vf2; Vf3 e Vf4);
 - Menor dosagem de polímero aplicada.

Após a verificação dos resultados obtidos para cada ensaio, foi possível definir qual o melhor tipo e qual a melhor dosagem de polímero a ser utilizada com determinado coagulante.

A fase seguinte da pesquisa, denominada de avaliação temporal, teve por finalidade a verificação das dosagens mais satisfatórias em função da variação das características do efluente do reator UASB ao longo do dia. Para isso foi necessário a escolha do melhor coagulante e polímero a ser empregado na fase 3 da pesquisa, conforme detalhamento a seguir.

4.2.4.3 Fase 3: Avaliação temporal do melhor coagulante e polímero

Na fase de avaliação temporal, foi realizada seis coletas em seis dias distintos, fixando-se a dosagem de polímero definida na fase 2 e variando novamente a dosagem de coagulante. No entanto, foi escolhido um único coagulante e polímero a serem estudados. As análises físico-químicas realizadas, bem como os procedimentos e critérios dos ensaios são apresentados a seguir.

4.2.4.3.1 Análises físico-químicas

As análises físico-químicas realizadas na fase 3 foram definidas de acordo com o ponto de coleta, conforme **Figura 4.20**, a seguir.

Figura 4.20 – Critérios para escolha das análises físico-químicas na fase 3.

4.2.4.3.2 Procedimentos

A ETE Anhumas está situada na região mais valorizada da cidade de Campinas, em localização totalmente urbanizada com prevalência de ocupação residencial de alto padrão. Desta maneira, para a escolha do coagulante a ser empregado na seqüência desta pesquisa, e visando subsidiar a SANASA no que tange a utilização dos resultados ora apresentados neste documento, foram levados em consideração dois aspectos operacionais: a infraestrutura existente e o controle de odores na estação.

O primeiro aspecto a ser considerado, referente a infraestrutura existente na ETE Anhumas, está associada a presença de bombas dosadoras, reservatórios e instrumentos compatíveis com a escolha adotada, considerando o uso em escala real.

O outro aspecto considerado para a escolha do coagulante adotado nas fases posteriores desta pesquisa relaciona-se com a capacidade do coagulante em auxiliar o

controle de odores na estação, em especial a emissão de gás sulfídrico (H_2S) para a atmosfera.

Com a escolha do coagulante a ser utilizado, foi também escolhido o polímero que obteve melhores resultados quando associado ao respectivo coagulante, conforme os ensaios elaborados na fase 2 desta pesquisa.

Assim, definidos o coagulante e o polímero a serem empregados e de posse dos resultados obtidos nos ensaios anteriores, o próximo passo foi determinar, em função da variação da qualidade do efluente do reator UASB ao longo do dia, as melhores dosagens, visando estabelecer uma Razão entre a Dosagem de íon metálico aplicada (Al^{+3} ou Fe^{+3}) com a Turbidez do efluente anaeróbio (RD_mT).

Para isso, foram realizados ensaios utilizando efluente do reator anaeróbio da ETE Anhumas coletado em seis diferentes horários, com variação a cada quatro horas, sendo definido os seguintes horários de coleta: 00:00hs; 04:00hs; 08:00hs; 12:00hs; 16:00hs e 20:00hs.

Nestes ensaios foram fixadas as dosagens de polímero estabelecidas na fase 2, sendo variado apenas as dosagens do coagulante.

Também foram fixados os parâmetros: $G_{mr}=800 \text{ s}^{-1}$; $T_{mr}=15 \text{ s}$; $G_{floc}=90 \text{ s}^{-1}$; $T_{floc}=20 \text{ min}$; $R=17 \%$; $P_{sat}=5,00 \text{ Bar}$; $V_{f1}=8 \text{ cm.min}^{-1}$; $V_{f2}=12 \text{ cm.min}^{-1}$; $V_{f3}=16 \text{ cm.min}^{-1}$; $V_{f4}=20 \text{ cm.min}^{-1}$. O roteiro dos ensaios para a fase 3 seguiu os procedimentos apresentados na **Figura 4.21**.

Figura 4.21 – Procedimentos dos ensaios com flotatestes na fase 3.

As amostras foram avaliadas quanto aos valores de turbidez remanescente para a amostra referente a velocidade de flotação de 16 cm.min^{-1} , conforme o seguinte critério de classificação: i) Turbidez menor que 6 UNT e ii) Menor Dosagem de Coagulante aplicada. Assim, as três melhores amostras avaliadas conforme o critério estabelecido para este ensaio, foram submetidas a análise mais detalhada, as demais amostras foram submetidas a análise simplificada (ver **Figura 4.20**);

Para definição das melhores dosagens em cada horário baseou-se nos resultados analíticos obtidos para as amostras compreendidas na velocidade de flotação 3 ($Vf3=16 \text{ cm.min}^{-1}$), considerando os seguintes critérios:

- DQO bruta remanescente $< 50 \text{ mg.L}^{-1}$ ou eficiência de remoção superior a 80%;
- Fósforo Total Remanescente $< 0,50 \text{ mg.L}^{-1}$;
- Menor dosagem aplicada.

As melhores dosagens definidas para cada horário ensaiado nesta fase 3, foram utilizadas para o cálculo dos valores da RD_mT . Desta maneira, foram definidos para cada um dos horários um valor diferente para a RD_mT , totalizando, portanto seis valores ao final da fase 3. Na **equação 4.1** é apresentado o cálculo do valor da RD_mT , obtida para cada um dos seis diferentes ensaios:

$$RD_mT = \frac{D}{T} \quad \text{(equação 4.1)}$$

Sendo,

RD_mT = Razão entre a Dosagem de íon metálico aplicada (Al^{+3} ou Fe^{+3}) com a Turbidez do efluente do reator UASB, expresso em mg Metal (Al^{+3} ou Fe^{+3}). L^{-1} .UNT $^{-1}$);

D = Melhor Dosagem de coagulante aplicada no respectivo ensaio, expresso em mg do íon Metálico atuante (Al^{+3} ou Fe^{+3}). L^{-1} ;

T = Turbidez medida no efluente anaeróbio para o respectivo ensaio, expresso em UNT.

4.2.4.4 Fase 4: Aplicação da $RD_mT_{(média)}$ ao longo do dia

Na fase 4, foi realizada uma aplicação do valor obtido para $RD_mT_{(média)}$ nos ensaios da fase 3, sendo realizado doze ensaios com coletas a cada duas horas, num mesmo dia. Desta maneira, são apresentados a seguir os critérios para escolha das análises físico-químicas, bem como os procedimentos dos ensaios realizados com *flotatestes*.

4.2.4.4.1 Análises físico-químicas

As análises físico-químicas realizadas na fase 4 foram definidas de acordo com o ponto de coleta, conforme **Figura 4.22**, a seguir.

Figura 4.22 - Critérios para escolha das análises físico-químicas na fase 4.

4.2.4.4.2 Procedimentos

Após a definição das melhores dosagens ensaiadas para os diferentes horários e características do efluente do reator UASB da ETE Anhumas na fase 3, a próxima fase da pesquisa objetivou verificar três cenários para a dosagem de coagulante (**Figura 4.23**).

1º Cenário: Este cenário simulou a fixação da dosagem durante o período de 24 horas com valor equivalente a maior dosagem dentre as melhores dosagens definidas na fase 3. Desta maneira, este cenário teve por finalidade verificar o comportamento da remoção de turbidez no efluente com a aplicação de dosagens elevadas do coagulante;

2° Cenário: De forma inversa ao primeiro cenário, o segundo cenário simulou a fixação da dosagem durante o período de 24 horas com valor equivalente a menor dosagem dentre as melhores dosagens definidas na fase 3. Portanto, este cenário teve por finalidade verificar o comportamento da remoção de turbidez no efluente com a aplicação de baixas dosagens do coagulante;

Figura 4.23 – Cenários avaliados durante 24 horas na fase 4 da pesquisa.

3° Cenário: Para o terceiro cenário foi realizada a variação da dosagem de coagulante, de acordo com a turbidez do efluente do reator UASB. Para isso, foi elaborada uma equação empírica para cálculo da Dosagem de Coagulante (em termos de massa de íon metálico), a qual é representada pelo produto entre a turbidez medida no efluente do reator UASB com o valor da $RD_mT_{(média)}$, sendo esta última variável calculada conforme **equação 4.2**, a seguir:

$$RD_mT_{(média)} = \frac{\sum_{i=1}^{20} RD_mT_i}{N} \quad (\text{equação 4.2})$$

Sendo,

$RD_{mT(média)}$ = Média Aritmética entre os valores de RD_{mT} obtidos para os seis diferentes ensaios realizados entre 0 e 20 hs na fase 3, expresso em mg de Metal (Al^{+3} ou Fe^{+3}). $L^{-1}.UNT^{-1}$;

$\sum_{8\text{ Hs}}^{20\text{ Hs}} RD_{mT}$ = Somatório dos diferentes valores da RD_{mT} obtidos nos ensaios entre 0 e 20 hs realizados na fase 3, expresso em mg de Metal (Al^{+3} ou Fe^{+3}). $L^{-1}.UNT^{-1}$;

N = Número de ensaios da fase 3, ou seja, N=6.

Desta maneira, a dosagem de coagulante aplicada para o 3º cenário foi obtida através da **equação 4.3**, expressa a seguir:

$$\text{Dosagem Coagulante} = T \times RD_{mT(média)}$$

(equação 4.3)

Após o estabelecimento dos cenários para a fase 4 desta pesquisa, foram realizados doze ensaios durante um período de 24 horas, sendo realizadas coletas de amostras do reator UASB a cada duas horas, conforme cronologia apresentada na **Figura 4.24**.

Figura 4.24 – Cronologia de coleta e ensaios para a fase 4.

Para todos os cenários avaliados foram fixadas as mesmas dosagens de polímeros utilizadas na fase 3. Em adição, foram também mantidos fixos os parâmetros básicos de ensaios, conforme item 4.5, sendo estes: $G_{mr}=800\text{ s}^{-1}$; $T_{mr}=15\text{ s}$; $G_{floc}=90\text{ s}^{-1}$; $T_{floc}=20\text{ min}$; $R=17\%$; $P_{sat}=5,00\text{ Bar}$; $V_{f1}=8\text{ cm.min}^{-1}$; $V_{f2}=12\text{ cm.min}^{-1}$; $V_{f3}=16\text{ cm.min}^{-1}$; $V_{f4}=20\text{ cm.min}^{-1}$. O roteiro dos ensaios para a fase 4 seguiu os procedimentos apresentados na **Figura 4.25**.

Figura 4.25 – Procedimentos dos ensaios com flotatestes na fase 4.

A avaliação do cenário mais interessante para a operação da ETE Anhumas foi realizada através do estabelecimento dos seguintes critérios:

- Cenário que conseguiu atingir em pelo menos 90 % das amostras turbidez remanescente menor que 15 UNT, para todas as velocidades de flotação estudadas;
- Cenário que implicou em menor quantidade de coagulante empregado ao longo do dia.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são apresentados os resultados para as quatro fases desta pesquisa, bem como as respectivas discussões e comentários.

5.1 RESULTADOS DA FASE 1

Durante a fase 1 desta pesquisa, foram estudados três tipos de coagulantes: sulfato de alumínio; cloreto de polialumínio (PAC) e cloreto férrico. As dosagens foram variadas visando estabelecer uma melhor dosagem para o horário das 12:00 hs, sendo as características do esgoto bruto e efluente do reator UASB para cada ensaio, bem como os resultados da aplicação da técnica de dosagem variável de coagulantes, dispostos a seguir.

5.1.1 Avaliação da Dosagem de Sulfato de Alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$)

Os resultados da avaliação da dosagem de sulfato de alumínio nesta fase 1 da pesquisa foram divididos em dois itens: caracterização do esgoto bruto e efluente do reator UASB, e ensaios com *flotatestes*.

5.1.1.1 Caracterização do esgoto bruto e efluente do reator UASB

Durante os ensaios realizados para avaliação da melhor dosagem de sulfato de alumínio nesta fase 1 da pesquisa, o esgoto bruto, bem como o efluente do reator UASB apresentaram as características conforme a **Tabela 5.1**.

Assim, pode ser verificado que o valor do pH para o esgoto bruto, 7,20, estava próximo da neutralidade. Em adição, o resultado de pH para o efluente do reator UASB foi de 6,70, levemente inferior ao valor aferido para o esgoto bruto. Desta maneira, o valor de pH do efluente do reator UASB obtido para este ensaio manteve-se em faixa apropriada para coagulação, considerada entre 6,50 a 7,50 (**PROSAB, 1999**).

Tabela 5.1 – Fase 1: Características Esgoto Bruto e Efluente UASB, ensaio com $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

Análise	Unidade	Esgoto Bruto	Efluente UASB
Temperatura	°C	20,0	20,0
pH	UpH	7,1	6,7
Cor	mg Pt/L	1677,0	841,0
Condutividade	$\mu\text{S/cm}$	68,6	67,5
Turbidez	UNT	244,0	133,0
DQO	mg/L	533,0	142,0
Fósforo	mg/L	4,2	2,9
Alcalinidade	mg/L	164,0	224,0
ST	mg/L	784,0	688,0
SST	mg/L	300,0	68,0
Sulfato	mg/L	71,0	11,0
Sulfeto	mg/L	0,3	5,8

Data Coleta: 29.05.2008.

Quanto a alcalinidade, para o efluente do reator UASB ($224,00 \text{ mg.L}^{-1}$) o resultado foi superior ao verificado na amostra coletada do esgoto bruto ($164,00 \text{ mg.L}^{-1}$). Assim, nota-se que a alcalinidade presente no efluente anaeróbio é naturalmente suficiente para a coagulação química com sulfato de alumínio, não implicando em necessidade de aplicação de alcalinizante.

Ainda de acordo com a **Tabela 5.1**, a variação da cor aparente para o esgoto bruto e efluente do reator UASB indica eficiência de remoção da ordem de 50 %, sendo o resultado para a cor aparente aferido para o efluente anaeróbio igual a $841,00 \text{ mgPt.L}^{-1}$. Com relação ao esgoto bruto, o resultado obtido na análise foi de $1677,00 \text{ mg Pt.L}^{-1}$. O valor de cor aparente do esgoto bruto verificado para este ensaio apresentou valor alto, quando comparado ao valor médio de $1.303 \pm 350 \text{ mg Pt.L}^{-1}$, obtido por **CAMPOS et. al. (2007)**. De forma análoga, a concentração de cor aparente para o efluente do reator UASB também apresentou elevado valor, comparado com o apresentado pelos autores, onde a concentração média de cor aparente para o efluente dos reatores UASB monitorados foi de 541 mg Pt.L^{-1} .

Também de acordo com a **Tabela 5.1**, o reator anaeróbio atingiu remoção de turbidez de aproximadamente 45 %, resultando em turbidez do efluente do UASB igual a $133,00 \text{ UNT}$, enquanto que para o esgoto bruto, o valor medido para turbidez foi de $244,00 \text{ UNT}$. O valor obtido para a turbidez do esgoto bruto neste ensaio é de fato muito próximo ao obtido por **CAMPOS et. al. (2007)**, onde os autores obtiveram para o

esgoto bruto turbidez de 251 ± 70 UNT. Com relação a turbidez determinada para o efluente anaeróbio, nota-se que o valor encontrado neste ensaio é menor do que o obtido por **CAMPOS et. al. (2007)**, onde o valor médio da turbidez do efluente dos reatores UASB monitorados pelos autores foi de 189 UNT, com eficiência de remoção da ordem de 25 %. Desta maneira, pode-se considerar uma elevada eficiência de remoção de turbidez para o reator UASB no evento do ensaio com sulfato de alumínio nesta fase 1 da pesquisa.

Com relação aos resultados de sólidos totais (ST) e sólidos suspensos totais (SST) obtidos para esgoto bruto e efluente do reator UASB, nota-se que o reator UASB atingiu remoção de apenas 12 %, com a concentração de ST para o efluente do reator verificada em $688,00 \text{ mg.L}^{-1}$. No entanto, também de acordo com a **Tabela 5.1**, os resultados para a variação da concentração de SST no esgoto bruto e efluente do UASB obtidos foram de $300,00$ e $68,00 \text{ mg.L}^{-1}$ respectivamente. Desta maneira, a remoção de SST obtida pelo reator UASB no evento deste ensaio com sulfato de alumínio na fase 1 foi de aproximadamente 77 %. Em comparação com o estudo realizado por **CAMPOS et. al. (2007)**, os resultados de eficiência de remoção de SST e concentração de SST no efluente anaeróbio foram próximos aos obtidos pelos autores, 70,7 % e $78,00 \text{ mg.L}^{-1}$, respectivamente.

No que tange aos resultados obtidos para a variação de sulfato e sulfeto no esgoto bruto e efluente do reator UASB, pode-se verificar (**Tabela 5.1**) que a concentração de sulfato presente no esgoto bruto ($71,00 \text{ mg.L}^{-1}$) reduz drasticamente após a passagem pelo reator anaeróbio, sendo a concentração no efluente do reator igual a $11,00 \text{ mg.L}^{-1}$. No entanto, em comparação com estudo realizado por **CAMPOS et. al. (2007)**, a concentração de sulfato no efluente anaeróbio pode ser ainda considerada alta, pois de acordo com os autores o valor médio para esta variável em efluente de característica semelhante foi de $0,2 \text{ mg.L}^{-1}$. Já para o esgoto bruto, o valor de $71,00 \text{ mg.L}^{-1}$ obtido para o sulfato também pode ser considerado alto, acima do limite superior apresentado por **METCALF & EDDY (2003)**, em que os autores estabelecem faixa de 20 a 50 mg.L^{-1} , para esgoto doméstico.

Ainda de acordo com a **Tabela 5.1**, a concentração de sulfeto no esgoto bruto ($0,29 \text{ mg.L}^{-1}$) apresentou valor muito próximo ao obtido por **CAMPOS et. al. (2007)**, onde os

autores obtiveram valor de $0,29 \pm 0,25 \text{ mg.L}^{-1}$. Porém, quando se compara as concentrações de sulfeto no efluente do UASB obtidos neste ensaio ($5,76 \text{ mg.L}^{-1}$) com o obtido pelos autores ($3,34 \text{ mg.L}^{-1}$), verifica-se que a concentração de sulfeto no efluente anaeróbio, quando do evento deste ensaio com sulfato de alumínio nesta fase 1 da pesquisa, estava elevada.

Com relação aos resultados de Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Fósforo Total, apresentados na **Tabela 5.1**, pode-se inferir que o esgoto bruto apresentava características típicas de esgoto doméstico, com valores de DQO e fósforo iguais a respectivamente $533,00 \text{ mg.L}^{-1}$ e $4,20 \text{ mg.L}^{-1}$.

De acordo com **METCALF & EDDY (2003)**, a concentração de DQO em esgotos domésticos situa-se na faixa de 250 a 800 mg.L^{-1} . Já a concentração de fósforo, segundo os mesmos autores, situa-se na faixa de 4 a 12 mg.L^{-1} .

Com relação ao efluente do reator UASB, nota-se que o sistema atingiu boa eficiência na remoção de DQO (73,36 %), superior ao valor médio apresentado por **CAMPOS et. al. (2007)**, que foi de 64,8 %.

Desta maneira, o efluente apresentou concentração de DQO de $133,00 \text{ mg.L}^{-1}$, também inferior ao valor médio obtido pelos autores, que foi de 184 mg.L^{-1} . Com relação a concentração de fósforo no efluente anaeróbio, o valor encontrado foi de $2,91 \text{ mg.L}^{-1}$. Este valor também pode ser considerado baixo, quando comparado com o resultado médio de $4,84 \text{ mg.L}^{-1}$, obtido por **CAMPOS et. al. (2007)**.

5.1.1.2 Ensaio com *flotateste*

Após a verificação do desempenho do reator UASB e das características do afluente ao sistema de flotação por ar dissolvido da ETE Anhumas, quando da data dos ensaios com *flotateste*, a seguir são apresentados os resultados obtidos com a aplicação de diferentes dosagens para diferentes velocidades de flotação, conforme definido na metodologia.

Na **Figura 5.1**, são apresentados os resultados do ensaio realizado variando a dosagem de sulfato de alumínio, expresso em termos de aluminato (Al_2O_3). A variação da dosagem de coagulante no ensaio foi na faixa de 8,41 a 15,14 mg de $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{L}^{-1}$.

De acordo com o critério de escolha estabelecido em turbidez < 15 UNT, para esta fase da pesquisa, nota-se que as dosagens de 11,77 e 15,14 mg de $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{L}^{-1}$ atenderam o critério para a velocidade de flotação igual a $16 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$. Após a avaliação do primeiro critério, relacionado a turbidez < 15 UNT, a dosagem definida como a melhor, para esta primeira fase da pesquisa foi considerada aquela em que necessitou menor dosagem, ou seja, a dosagem de 11,77 mg de $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{L}^{-1}$.

Figura 5.1 – Fase 1: Resultados de Turbidez para diferentes velocidades de flotação, ensaio com $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

A seguir são apresentados os resultados das medições de pH, alcalinidade, cor aparente, turbidez, ST, SST, sulfato, condutividade, DQO e fósforo para as dosagens de 11,77 e 15,14 mg de $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{L}^{-1}$, referentes a velocidade de flotação de 16 cm.min⁻¹.

Figura 5.2 - Fase 1: Resultados de pH, Alcalinidade, Cor aparente e Turbidez para Vf=16 cm.min⁻¹, ensaio com Al₂(SO₄)₃

Os resultados apresentados na **Figura 5.2** permitem inferir que tanto para a dosagem de 11,77 quanto para a de 15,14 mg de Al₂O₃.L⁻¹ as remoções de cor aparente e turbidez foram satisfatórias. A dosagem de 11,77 mg de Al₂O₃.L⁻¹ foi a que obteve maior remoção para cor aparente e turbidez, atingindo eficiências de 85,37 % e 91,28 %, respectivamente. O pH para ambas as dosagens consideradas ficou acima do limite de 5,00, estabelecido pela resolução **CONAMA 357/2005** no lançamento. A alcalinidade residual presente para ambas as amostras indica que tal parâmetro não foi limitante para a coagulação.

Figura 5.3 - Fase 1: Resultados de ST, SST, Sulfato e Condutividade para $V_f=16 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$, ensaio com $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

De acordo com a **Figura 5.3**, nota-se que ambas as dosagens consideradas atingiram mesma eficiência para remoção de SST, 76,47 %. Com relação a remoção de ST, a dosagem de 11,77 mg de $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{L}^{-1}$ atingiu maior eficiência de remoção, da ordem de 48 %. A concentração de sulfato para as dosagens de 11,77 e 15,14 mg de $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{L}^{-1}$ foram de 8,00 e 7,00 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectivamente. A condutividade elétrica pouco variou após a aplicação do coagulante, sendo obtidas os valores de 67,4 e 58,8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para as dosagens de 11,77 e 15,14 mg de $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{L}^{-1}$, respectivamente.

Quanto aos resultados de DQO e fósforo total (**Figura 5.4**) foi verificado que para a maior dosagem obteve-se menores concentrações remanescentes nas amostras. Para a dosagem de 15,14 mg de $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{L}^{-1}$, obteve-se concentrações de 42,00 e 0,83 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectivamente para DQO e fósforo. A amostra relativa a dosagem de 11,77 mg de

$\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{L}^{-1}$ apresentou valores maiores para DQO e fósforo, sendo 46,00 e 1,05 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectivamente.

Figura 5.4 - Fase 1: Resultados de DQO e Fósforo para $V_f=16 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$, ensaio com $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

Devido ao critério menos rigoroso para esta primeira fase da pesquisa, sendo estabelecido como critério de escolha da melhor dosagem: i) amostra com turbidez < 15 UNT para $V_f=16 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ e ii) Menor dosagem de coagulante aplicada, para este ensaio com sulfato de alumínio a dosagem de 11,77 mg de $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{L}^{-1}$ foi definida como a dosagem a ser fixada na associação e estudo com diferentes polímeros na fase 2.

5.1.2 Avaliação da Dosagem de Cloreto de Polialumínio (PAC)

A seguir são apresentados os resultados da avaliação da dosagem de cloreto de polialumínio (PAC) nesta fase 1, através dos dois itens: caracterização do esgoto bruto e efluente do reator UASB e ensaios com *flotatestes*.

5.1.2.1 Caracterização do esgoto bruto e efluente do reator UASB

Durante os ensaios realizados para avaliação da melhor dosagem de PAC nesta fase 1 da pesquisa, o esgoto bruto, bem como o efluente do reator UASB apresentaram as características conforme a **Tabela 5.2**.

Tabela 5.2 – Fase 1: Características Esgoto Bruto e Efluente UASB, ensaio com PAC

Análise	Unidade	Esgoto Bruto	Efluente UASB
Temperatura	°C	22,0	22,0
pH	UpH	7,0	7,1
Cor	mg Pt/L	1509,0	732,0
Condutividade	μS/cm	67,4	66,9
Turbidez	UNT	204,0	89,1
DQO	mg/L	461,0	132,0
Fósforo	mg/L	4,5	3,7
Alcalinidade	mg/L	160,0	224,0
ST	mg/L	634,0	374,0
SST	mg/L	224,0	32,0
Sulfato	mg/L	75,0	10,0
Sulfeto	mg/L	0,3	4,8

Conforme **Tabela 5.2**, o pH se encontrava neutro para o esgoto bruto, 7,00. Já o resultado aferido para a amostra do efluente anaeróbio, notadamente obteve-se pH superior ao do esgoto bruto, com 7,13. Novamente, para este ensaio, pode ser verificado que o pH do efluente do reator UASB manteve-se em faixa apropriada para coagulação, considerada entre 6,50 a 7,50 (**PROSAB, 1999**).

Também de acordo com a **Tabela 5.2**, verificou-se novamente para este ensaio que a alcalinidade do efluente do reator UASB (224,00 mg.L⁻¹) apresentou concentração acima da do esgoto bruto, que foi de 160 mg.L⁻¹. Desta maneira, percebe-se novamente que, também para a amostra coletada neste ensaio, alcalinidade presente no efluente anaeróbio foi naturalmente suficiente para a coagulação química com PAC, não implicando em necessidade de aplicação de alcalinizante.

Analizando os resultados da **Tabela 5.2**, verifica-se que a variação da cor aparente para o esgoto bruto e efluente do reator UASB indicaram eficiência de remoção de 51,49 %, resultando no valor de 732 mg Pt.L⁻¹ para a cor aparente no efluente

anaeróbio. A cor aparente para o esgoto bruto apresentou concentração de 1509,00 mg Pt.L⁻¹, valor que é superior ao obtido por **CAMPOS et. al. (2007)**, que foi de 1.303 ± 350 mg Pt.L⁻¹. Comparando o resultado de cor aparente obtidos para o efluente do UASB no evento deste ensaio (732 mg Pt.L⁻¹), com os resultados médios obtidos pelos autores citados (541 mg Pt.L⁻¹), também foi notada a maior concentração para o efluente do reator cenário desta pesquisa.

Ainda considerando a **Tabela 5.2**, quanto a turbidez, o reator anaeróbio atingiu remoção acima de 56 %, implicando no valor de 89,10 UNT para a turbidez do efluente do reator UASB. A turbidez para o esgoto bruto no evento deste ensaio com PAC, foi medido em 204 UNT. Ambos os resultados foram inferiores aos valores obtidos por **CAMPOS et al. (2007)**. No estudo apresentado pelos autores, os valores médios monitorados para esgoto bruto e efluente de reatores UASB foram de, respectivamente, 251 ± 70 UNT e 189 UNT.

Quanto aos resultados de sólidos totais (ST) e sólidos suspensos totais (SST) obtidos para esgoto bruto e efluente do reator UASB no evento deste ensaio (**Tabela 5.2**), pode ser verificado que a eficiência do reator UASB na remoção de ST foi superior a 41 %, sendo as concentrações medidas para esgoto bruto e efluente do UASB de 634,00 e 374,00 mg.L⁻¹, respectivamente.

Quanto aos valores de SST, no evento deste ensaio a remoção calculada foi da ordem de 85 %, com valores para esgoto bruto e efluente anaeróbio de 224,00 e 32,00 mg.L⁻¹, respectivamente. **CAMPOS et. al. (2007)**, apresentaram resultados médios inferiores para remoção e concentração de SST, 70,7 % e 78,00 mg.L⁻¹, respectivamente. Desta maneira, a carga de sólidos suspensos totais afluente ao sistema de flotação por ar dissolvido da ETE Anhumas pode ser considerada baixa no evento deste ensaio, quando comparado ao apresentado pelos autores.

Ainda de acordo com os resultados apresentados (**Tabela 5.2**), pode-se observar que a concentração de sulfato presente no esgoto bruto (75,00 mg.L⁻¹) reduz após a passagem pelo reator anaeróbio, sendo a concentração no efluente do reator igual a 10,00 mg.L⁻¹. No entanto, em comparação com estudo realizado por **CAMPOS et. al. (2007)**, a concentração de sulfato no efluente anaeróbio, também para este ensaio com

PAC, pode ser ainda considerada alta. Segundo o estudo apresentado pelos autores, o valor médio para sulfato foi de $0,2 \text{ mg.L}^{-1}$. Já para o esgoto bruto, o valor de $75,00 \text{ mg.L}^{-1}$ obtido para o sulfato também pode ser considerado alto, acima do limite superior apresentado por **METCALF & EDDY (2003)**, em que os autores estabelecem faixa de 20 a 50 mg.L^{-1} , para esgoto doméstico..

Quanto a concentração de sulfeto no esgoto bruto, o valor obtido na amostra recolhido no evento deste ensaio com PAC apresentou valor de $0,30 \text{ mg.L}^{-1}$, mais uma vez muito próximo ao valor obtido por **CAMPOS et. al. (2007)**, que foi de $0,29 \pm 0,25 \text{ mg.L}^{-1}$. Já para o efluente do reator UASB, o resultado obtido na amostra deste ensaio foi de $4,78 \text{ mg.L}^{-1}$, novamente superior ao obtido pelos autores ($3,34 \text{ mg.L}^{-1}$). Tal situação indica que, mais uma vez, a concentração de sulfeto no efluente do reator UASB durante os ensaios com PAC estava acima do valor médio apresentado por **CAMPOS et. al. (2007)**.

Com relação a Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Fósforo Total, conforme **Tabela 5.2**, os resultados permitem inferir que o esgoto bruto apresentava características típicas de esgoto doméstico, com valores de DQO e fósforo iguais a respectivamente $461,00 \text{ mg.L}^{-1}$ e $4,50 \text{ mg.L}^{-1}$. De acordo com **METCALF & EDDY (2003)**, a concentração de DQO em esgotos domésticos situa-se na faixa de 250 a 800 mg.L^{-1} . Já a concentração de fósforo, segundo os mesmos autores, situa-se na faixa de 4 a 12 mg.L^{-1} .

Não obstante, para o efluente do reator UASB, nota-se que o sistema atingiu boa eficiência na remoção de DQO ($71,37 \%$), superior ao valor médio apresentado por **CAMPOS et. al. (2007)**, que foi de $64,8 \%$. Desta maneira, o efluente anaeróbio apresentou concentração de DQO de $132,00 \text{ mg.L}^{-1}$, também inferior ao valor médio obtido pelos autores, que foi de 184 mg.L^{-1} . Com relação a concentração de fósforo no efluente anaeróbio, o valor encontrado foi de $3,70 \text{ mg.L}^{-1}$. Este valor também pode ser considerado baixo, quando comparado com o resultado médio de $4,84 \text{ mg.L}^{-1}$, obtido por **CAMPOS et. al. (2007)**.

5.1.2.2 Ensaio com *flotateste*

Depois da verificação do desempenho do reator UASB e das características do afluente ao sistema de flotação por ar dissolvido da ETE Anhumas, quando da data dos ensaios com PAC no *flotateste*, a seguir são apresentados os resultados obtidos com a aplicação de diferentes dosagens de PAC para diferentes velocidades de flotação, conforme definido na metodologia para esta fase 1.

Na **Figura 5.5**, estão apresentados os resultados do ensaio realizado variando a dosagem de cloreto de polialumínio (PAC), expresso em termos de aluminato (Al_2O_3). A variação da dosagem de coagulante no ensaio foi na faixa de 5,07 a 11,82 mg de $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{L}^{-1}$.

Conforme abordado na metodologia, o critério para definição das amostras a serem caracterizadas e posteriormente definidas como melhor dosagem, nesta fase da pesquisa, considerou: i) turbidez < 15 UNT, para $V_f=16 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ (critério de escolha) e ii) menor dosagem de coagulante aplicada.

Assim, analisando a **Figura 5.5**, verifica-se que as dosagens de 8,45 e 11,82 mg de $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{L}^{-1}$ atenderam o primeiro critério, ou seja, apresentaram turbidez menor que 15 UNT para a velocidade de flotação de $16 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$.

Desta maneira, ao considerar-se o segundo critério, menor dosagem aplicada, a dosagem de 8,45 mg de $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{L}^{-1}$ representou a melhor dosagem do ensaio.

Figura 5.5 – Fase 1: Resultados de Turbidez para diferentes velocidades de flotação, ensaio com PAC

A seguir são apresentados os resultados das medições de pH, alcalinidade, cor aparente, turbidez, ST, SST, sulfato, condutividade, DQO e fósforo para as dosagens de 8,45 e 11,82 mg de Al_2O_3 .L⁻¹, referentes a velocidade de flotação de 16 cm.min⁻¹.

Figura 5.6 - Fase 1: Resultados de pH, Alcalinidade, Cor aparente e Turbidez para Vf=16 cm.min⁻¹, ensaio com PAC

Conforme pode ser visto na **Figura 5.6**, o pH das amostras relativas as dosagens consideradas esteve próximo a 7, dentro do padrão de lançamento estabelecido pela resolução **CONAMA 357/2005**, que estabelece pH entre 5 e 9. Em adição, pode ser verificado que a alcalinidade natural presente no efluente do UASB foi suficiente para a coagulação, nestas dosagens, sendo que para a maior dosagem considerada (11,82 mg de Al₂O₃ .L⁻¹), houve respectivo consumo de alcalinidade da ordem de 86 mg de CaCO₃.L⁻¹, restando ainda um residual de 138,00 mg de CaCO₃.L⁻¹ não consumidos na coagulação. Com relação a remoção de cor aparente, para ambas as dosagens de 8,45 e 11,82 mg de Al₂O₃ .L⁻¹ foram medidos valores remanescentes muito próximos, 348,00 e 347,00 mg Pt.L⁻¹, respectivamente. As eficiências de remoção de cor aparente, para ambas dosagens foram da ordem de 52 %. Quanto a turbidez, para esta velocidade de flotação de 16 cm.min⁻¹, foi observado uma remoção satisfatória para ambas as dosagens, com turbidez residual inferior a 15 UNT.

Figura 5.7 - Fase 1: Resultados de ST, SST, Sulfato e Condutividade para $V_f=16 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$, ensaio com PAC

Com a análise da **Figura 5.7**, nota-se que para a variável sólidos totais (ST), a concentração remanescente para ambas dosagens consideradas foram iguais, com valor de $225 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Tal resultado propiciou remoção calculada de cerca de 40 %, em relação a concentração do efluente do reator UASB. Já quanto aos resultados de sólidos suspensos totais (SST), a dosagem de $8,45 \text{ mg}$ de $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{L}^{-1}$ atingiu maior remoção (62,5 %) comparada a dosagem de $11,82 \text{ mg}$ de $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{L}^{-1}$ (56,25 %). Assim, os valores remanescentes de SST para as dosagens de $8,45$ e $11,82 \text{ mg}$ de $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{L}^{-1}$ foram respectivamente de $12,00$ e $14,00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Com relação a concentração de sulfato nas amostras recolhidas após flotação, para a dosagem de $8,45 \text{ mg}$ de $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{L}^{-1}$ foi observado valor de $9,00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, enquanto que para a dosagem de $11,82 \text{ mg}$ de $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{L}^{-1}$, o valor foi menor e igual a $8,00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Ainda de acordo com a **Figura 5.7**, a condutividade elétrica para as amostras com dosagens de $8,45$ e $11,82 \text{ mg}$ de $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{L}^{-1}$ apresentaram valores respectivos de $61,9$ e $60,8 \mu\text{S}/\text{cm}$.

Figura 5.8 - Fase 1: Resultados de DQO e Fósforo para $V_f=16 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$, ensaio com PAC

Quanto a DQO e fósforo total, de acordo com a **Figura 5.8**, a dosagem de 8,45 mg de $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{L}^{-1}$ implicou em menor concentração residual de DQO na amostra (33,00 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) comparado com a dosagem de 11,82 mg de $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{L}^{-1}$ (35,00 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$). A situação foi inversa quanto ao valor de fósforo residual, onde verificou-se que para a dosagem de 11,82 mg de $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{L}^{-1}$ a concentração de fósforo foi inferior (0,60 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) comparada com a dosagem de 8,45 mg de $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{L}^{-1}$ que implicou em concentração de fósforo na amostra de 0,64 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

Conforme abordado na metodologia, para a fase 1 desta pesquisa foi adotado critério menos rigoroso para escolha da melhor dosagem i) amostra com turbidez $< 15 \text{ UNT}$ para $V_f=16 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ e ii) Menor dosagem de coagulante aplicada, com isso, nos estudos com uso de PAC, a dosagem de 8,45 mg de $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{L}^{-1}$ foi definida como a dosagem a ser fixada na associação e estudo com diferentes polímeros na fase 2.

5.1.3 Avaliação da Dosagem de Cloreto Férrico (FeCl_3)

A seguir são apresentados os resultados da avaliação da dosagem de cloreto férrico nesta fase 1, através dos dois itens: caracterização do esgoto bruto e efluente do reator UASB e ensaios com *flotatestes*.

5.1.3.1 Caracterização do esgoto bruto e efluente do reator UASB

As características do esgoto bruto e do efluente do reator UASB, no evento dos ensaios com cloreto férrico nesta fase 1, estão apresentados na **Tabela 5.3**.

Tabela 5.3 – Fase 1: Características Esgoto Bruto e Efluente UASB, ensaio com FeCl_3

Análise	Unidade	Esgoto Bruto	Efluente UASB
Temperatura	°C	21,00	21,00
pH	UpH	7,08	7,19
Cor	mg Pt/L	1718,00	648,00
Condutividade	$\mu\text{S/cm}$	712,00	635,00
Turbidez	UNT	117,00	47,30
DQO	mg/L	508,00	143,00
Fósforo	mg/L	2,98	3,21
Alcalinidade	mg/L	172,00	240,00
ST	mg/L	688,00	374,00
SST	mg/L	232,00	80,00
Sulfato	mg/L	70,00	11,00
Sulfeto	mg/L	0,22	2,42

Conforme apresentado, pode-se verificar que tanto para o esgoto bruto quanto para o efluente do reator, o pH esteve próximo a neutralidade. Em adição, considerando o pH do efluente do reator, que foi de 7,19, pode-se considerar que este valor manteve-se dentro de faixa apropriada para coagulação, considerada entre 6,50 a 7,50 (**PROSAB, 1999**). Quanto a evolução da alcalinidade, verificou-se que para o esgoto bruto o valor foi menor do que na saída do reator UASB, com respectivos valores de 172,00 e 240,00 mg.L^{-1} . Mais uma vez, para este ensaio com FeCl_3 , verificou-se que a alcalinidade presente no efluente anaeróbio pode ser considerada suficiente para a coagulação química com cloreto férrico.

Com relação a evolução da concentração de cor aparente, segundo a **Tabela 5.3**, pode ser calculado uma remoção de cor aparente da ordem de 62 %, com valor

remanescente no efluente anaeróbio de 648 mg Pt.L⁻¹. A cor aparente no esgoto bruto (1718 mg Pt.L⁻¹) quando comparada ao valor médio obtido por **CAMPOS et. al. (2007)**, que foi de 1.303 ± 350 mg Pt.L⁻¹, pode ser considerada elevada. Da mesma forma, para o efluente anaeróbio, os resultados dos autores indicaram valor médio de 541 mg Pt.L⁻¹, menor que a concentração obtida no evento deste ensaio com FeCl₃ para o efluente do reator UASB, que foi de 648 mg Pt.L⁻¹. Quanto aos resultados de turbidez, mais uma vez foram verificados resultados menores do que os apresentados por **CAMPOS et. al. (2007)**. Para o esgoto bruto e efluente do reator UASB, no evento deste ensaio, foram determinados os respectivos valores de 117,00 e 47,30 UNT, com remoção equivalente a 59,57 %.

Já os resultados médios apresentados pelos autores foram, para esgoto bruto e efluente dos reatores UASB, respectivamente, 251 ± 70 UNT e 189 UNT. Ainda de acordo com os resultados da **Tabela 5.3**, percebe-se que a evolução dos resultados de SST, para esgoto bruto e efluente UASB, indica remoção de 65,52 % desta variável. Com relação aos resultados apresentados para ST, a remoção foi menor, calculada em 45,64 %. Quanto a concentração remanescente de SST no efluente anaeróbio (80,00 mg.L⁻¹), este valor foi próximo ao valor médio apresentado por **CAMPOS et. al. (2007)**, que foi de 78,00 mg.L⁻¹. Com relação a concentração de sulfato, é possível verificar uma redução abrupta após a passagem pelo reator UASB, devido a provável redução de sulfato a sulfeto no ambiente anaeróbio. No entanto, a concentração verificada para o efluente anaeróbio (11,00 mg.L⁻¹) é superior ao valor médio apresentado por **CAMPOS et. al. (2007)**, cujo valor foi de 0,20 mg.L⁻¹, também no efluente dos reatores UASB monitorados pelos autores. Já para o esgoto bruto, o valor de 70,00 mg.L⁻¹ obtido para o sulfato também pode ser considerado alto, acima do limite superior apresentado por **METCALF & EDDY (2003)**, em que os autores estabelecem faixa de 20 a 50 mg.L⁻¹, para esgoto doméstico. Quanto a concentração de sulfeto, o valor verificado no evento deste ensaio foi de 2,42 mg.L⁻¹, abaixo do valor médio obtido por **CAMPOS et. al. (2007)**, que foi de 3,34 mg.L⁻¹. Por fim, quanto as características do esgoto bruto apresentados na **Tabela 5.3**, os valores obtidos para DQO e fósforo foram de, respectivamente, 508,00 mg.L⁻¹ e 2,98 mg.L⁻¹. Tais valores situaram-se dentro da faixa estabelecida para esgoto doméstico, segundo **METCALF & EDDY (2003)**, onde os autores estabelecem para DQO e fósforo as respectivas faixas de 250 a 800 mg.L⁻¹ e 4 a 12 mg.L⁻¹. Já com relação aos valores para o efluente do reator UASB, nota-se que o sistema atingiu boa eficiência na remoção de DQO (71,85 %), superior ao valor

médio apresentado por **CAMPOS et. al. (2007)**, que foi de 64,8 %. Desta maneira, o efluente anaeróbio apresentou concentração de DQO de 143,00 mg.L⁻¹, também inferior ao valor médio obtido pelos autores, que foi de 184 mg.L⁻¹. Com relação a concentração de fósforo no efluente anaeróbio, o valor encontrado foi de 3,21 mg.L⁻¹. Este valor também pode ser considerado baixo, quando comparado com o resultado médio de 4,84 mg.L⁻¹, obtido por **CAMPOS et. al. (2007)**.

5.1.3.2 Ensaio com *flotateste*

Depois da verificação do desempenho do reator UASB e das características do afluente ao sistema de flotação por ar dissolvido da ETE Anhumas, quando da data dos ensaios com cloreto férrico no *flotateste*, a seguir são apresentados os resultados obtidos com a aplicação de diferentes dosagens do coagulante para diferentes velocidades de flotação, conforme definido na metodologia para esta fase 1.

Na **Figura 5.9** e, estão apresentados os resultados do ensaio realizado variando a dosagem de cloreto férrico, expresso em termos de ferro (Fe). A variação da dosagem de coagulante no ensaio foi na faixa de 18,96 a 25,73 mg Fe⁺³.L⁻¹. Conforme abordado na metodologia, o critério para definição das amostras a serem caracterizadas e posteriormente definidas como melhor dosagem, nesta fase da pesquisa, considerou: i) turbidez < 15 UNT, para Vf=16 cm.min⁻¹ (critério de escolha) e ii) menor dosagem de coagulante aplicada.

Assim, analisando a **Figura 5.9**, verifica-se que as dosagens de 24,38 e 25,73 mg Fe⁺³.L⁻¹ atenderam o primeiro critério, ou seja, apresentaram turbidez menor que 15 UNT para a velocidade de flotação de 16 cm.min⁻¹. Desta maneira, ao considerar-se o segundo critério, menor dosagem aplicada, a dosagem de 24,38 mg Fe⁺³.L⁻¹ representou a melhor dosagem do ensaio.

Figura 5.9 – Fase 1: Resultados de Turbidez para diferentes velocidades de flotação, ensaio com FeCl₃

A seguir são apresentados os resultados das medições de pH, alcalinidade, cor aparente, turbidez, ST, SST, sulfato, condutividade, DQO e fósforo para as dosagens de 24,38 e 25,73 mg Fe⁺³.L⁻¹, referentes a velocidade de flotação de 16 cm.min⁻¹.

Figura 5.10 - Fase 1: Resultados de pH, Alcalinidade, Cor aparente e Turbidez para Vf=16 cm.min⁻¹, ensaio com FeCl₃

Conforme pode ser visto na **Figura 5.10**, o pH das amostras relativas as dosagens consideradas esteve próximo a 7, dentro do padrão de lançamento estabelecido pela resolução **CONAMA 357/2005**, que estabelece pH entre 5 e 9. Quanto a alcalinidade residual, pode ser verificado que a alcalinidade natural presente no efluente do UASB foi suficiente para a coagulação, nestas dosagens. Desta maneira, para a maior dosagem considerada (25,73 mg Fe⁺³.L⁻¹), houve respectivo consumo de alcalinidade da ordem de 84 mg de CaCO₃.L⁻¹, restando ainda um residual de 156,00 mg de CaCO₃.L⁻¹ não consumidos na coagulação. Com relação a remoção de cor aparente, a dosagem de 24,38 mg Fe⁺³.L⁻¹ apresentou melhor remoção (77,93 %), com residual de 143,00 mg Pt.L⁻¹. Quanto a turbidez, para esta velocidade de flotação de 16 cm.min⁻¹, foi observado uma remoção satisfatória para ambas as dosagens, com turbidez remanescente inferior a 15 UNT.

Figura 5.11 - Fase 1: Resultados de ST, SST, Sulfato e Condutividade para $V_f=16 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$, ensaio com FeCl_3

Conforme a **Figura 5.11**, nota-se que para a dosagem de $24,38 \text{ mg Fe}^{+3} \cdot \text{L}^{-1}$ a concentração remanescente de ST ($306,00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) foi menor do que para a dosagem de $25,73 \text{ mg Fe}^{+3} \cdot \text{L}^{-1}$ ($382,00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). De forma análoga, a dosagem de $24,38 \text{ mg Fe}^{+3} \cdot \text{L}^{-1}$ atingiu melhor remoção de SST, com eficiência calculada de 60 % e concentração residual de $32,00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

Ainda de acordo com a **Figura 5.11**, quanto a concentração de sulfato para as dosagens consideradas, verificou-se que ocorreu para ambas redução do valor, comparada ao resultado apresentado para o efluente do reator UASB. O menor valor verificado também foi para a amostra relativa a dosagem de $24,38 \text{ mg Fe}^{+3} \cdot \text{L}^{-1}$, cujo valor determinado foi de $8,00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. A condutividade elétrica apresentou pouca

variação entre os valores afluente e pós-flotação. Para as dosagens de 24,38 e 25,73 mg Fe⁺³.L⁻¹, foram verificados os valores de 656,00 e 667,00 µS/cm.

Figura 5.12 - Fase 1: Resultados de DQO e Fósforo para Vf=16 cm.min⁻¹, ensaio com FeCl₃

Os resultados de DQO e fósforo total são apresentados na **Figura 5.12**. Com relação a variação da DQO, a dosagem de 24,38 mg Fe⁺³.L⁻¹ foi a dosagem que apresentou melhor remoção (55,94 %), apresentando um valor remanescente de DQO de 63,00 mg.L⁻¹. Já com relação a concentração de fósforo, a dosagem de 25,73 mg Fe⁺³.L⁻¹ apresentou remoção superior entre as dosagens, calculada em 93,15 %, sendo a concentração residual de fósforo medida em 0,22 mg.L⁻¹. No entanto, boa remoção pode ser observada também para a amostra relativa a dosagem de 24,38 mg Fe⁺³.L⁻¹, calculada em 90,34 %, sendo a concentração residual medida em 0,31 mg.L⁻¹.

Conforme abordado na metodologia, para a fase 1 desta pesquisa foi adotado critério menos rigoroso para escolha da melhor dosagem i) amostra com turbidez < 15 UNT para Vf=16 cm.min⁻¹ e ii) Menor dosagem de coagulante aplicada, com isso, nos estudos com uso de cloreto férrico, a dosagem de 24,38 mg Fe⁺³.L⁻¹ foi definida como a dosagem a ser fixada na associação e estudo com diferentes polímeros na fase 2.

5.2 RESULTADOS DA FASE 2

Conforme apresentado, para a fase 1 desta pesquisa foram definidas as melhores dosagens para os coagulantes estudados, apresentados novamente a seguir:

-
- Sulfato de Alumínio: 11,77 mg de $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{L}^{-1}$;
 - PAC: 8,45 mg de $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{L}^{-1}$;
 - Cloreto Férrico: 24,38 mg $\text{Fe}^{+3}\cdot\text{L}^{-1}$.

Assim, para a realização dos estudos de avaliação de diferentes polímeros desta fase 2 da pesquisa, estas dosagens foram fixadas, sendo variada as dosagens de polímeros, conforme resultados apresentados a seguir.

5.2.1 Dosagem de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ Associado a Diferentes Tipos de Polímeros

A seguir são apresentados os resultados da avaliação da melhor dosagem de sulfato de alumínio (11,77 mg de $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{L}^{-1}$), definida na fase 1, associado a diferentes polímeros em diferentes dosagens. As características de cada um dos polímeros constam no item 4.4.2 deste texto. Desta maneira, são agora apresentados os resultados deste ensaio, divididos em dois itens: caracterização do esgoto bruto e efluente do reator UASB e ensaios com *flotateste*.

5.2.1.1 Caracterização do esgoto bruto e efluente do reator UASB

As características do esgoto bruto e do efluente do reator UASB, no evento dos ensaios com sulfato de alumínio associado a polímeros nesta fase 2, estão apresentados na **Tabela 5.4**.

Conforme apresentado, verifica-se que o pH do esgoto bruto esteve próximo a neutralidade, no entanto o pH do efluente do reator UASB foi medido em 7,60, valor que já pode ser considerado elevado, pois ultrapassa em 0,10 a faixa considerada apropriada de 6,50 a 7,50, segundo **PROSAB (1999)**. No entanto, o ensaio foi desenvolvido devido ao entendimento de que o valor situou-se próximo ao limite máximo, fato considerado aceitável para o prosseguimento do ensaio.

Tabela 5.4 – Fase 2: Características Esgoto Bruto e Efluente UASB, ensaio com $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ associado a Polímeros

Análise	Unidade	Esgoto Bruto	Efluente UASB
Temperatura	°C	26,0	25,0
pH	UpH	7,0	7,6
Cor	mg Pt/L	1828,0	751,0
Condutividade	$\mu\text{S/cm}$	731,0	908,0
Turbidez	UNT	174,0	55,9
DQO	mg/L	563,0	272,0
Fósforo	mg/L	3,2	3,9
Alcalinidade	mg/L	156,0	344,0
ST	mg/L	746,0	626,0
SST	mg/L	288,0	144,0
Sulfato	mg/L	70,0	11,0
Sulfeto	mg/L	0,7	1,4

Quanto a evolução da alcalinidade, verificou-se que para o esgoto bruto o valor foi menor do que na saída do reator UASB, com respectivos valores de 156,00 e 344,00 mg.L^{-1} . Mais uma vez, para este ensaio, verificou-se que a alcalinidade presente no efluente anaeróbio pode ser considerada suficiente para a coagulação química com sulfato de alumínio e polímeros.

Com relação a evolução da concentração de cor aparente, segundo a **Tabela 5.4**, pode ser calculado uma remoção de cor aparente da ordem de 59 %, com valor remanescente no efluente anaeróbio de 751,00 mg Pt.L^{-1} . A cor aparente no esgoto bruto (1828,00 mg Pt.L^{-1}) quando comparada ao valor médio obtido por **CAMPOS et. al. (2007)**, que foi de $1.303 \pm 350 \text{ mg Pt.L}^{-1}$, pode ser considerada elevada. Da mesma forma, para o efluente anaeróbio, os resultados dos autores indicaram valor médio de 541 mg Pt.L^{-1} , menor que a concentração obtida no evento deste ensaio para o efluente do reator UASB, que foi de 751,00 mg Pt.L^{-1} . Quanto aos resultados de turbidez, mais uma vez foram verificados resultados menores do que os apresentados por **CAMPOS et. al. (2007)**.

Para o esgoto bruto e efluente do reator UASB, no evento deste ensaio, foram determinados os respectivos valores de 174,00 e 55,90 UNT, com remoção equivalente a 67,87 %. Já os resultados médios apresentados pelos autores foram respectivamente, para esgoto bruto e efluente dos reatores UASB, $251 \pm 70 \text{ UNT}$ e 189 UNT, e eficiência média calculada de 24,7 %.

Ainda de acordo com os resultados da **Tabela 5.4**, percebe-se que a evolução dos resultados de SST, para esgoto bruto e efluente do reator UASB, indica remoção de exatamente 50 % desta variável. Com relação aos resultados apresentados para ST, a remoção não foi relevante, calculada em 16,09 %. Quanto a concentração remanescente de SST no efluente anaeróbio ($144,00 \text{ mg.L}^{-1}$), este valor foi superior ao valor médio apresentado por **CAMPOS et. al. (2007)**, que foi de $78,00 \text{ mg.L}^{-1}$.

Com relação a concentração de sulfato, é possível verificar uma redução abrupta após a passagem pelo reator UASB, devido a provável redução de sulfato a sulfeto no ambiente anaeróbio. No entanto, a concentração verificada para o efluente do reator UASB ($11,00 \text{ mg.L}^{-1}$) é superior ao valor médio apresentado por **CAMPOS et. al. (2007)**, cujo valor foi de $0,20 \text{ mg.L}^{-1}$, também no efluente dos reatores UASB monitorados pelos autores. Já para o esgoto bruto, o valor de $70,00 \text{ mg.L}^{-1}$ obtido para o sulfato novamente pode ser considerado alto, acima do limite superior apresentado por **METCALF & EDDY (2003)**, em que os autores estabelecem faixa de 20 a 50 mg.L^{-1} , para esgoto doméstico. Quanto a concentração de sulfeto, o valor verificado no evento deste ensaio foi de $2,42 \text{ mg.L}^{-1}$, abaixo do valor médio obtido **CAMPOS et. al. (2007)**, que foi de $3,34 \text{ mg.L}^{-1}$.

A DQO para o esgoto bruto neste ensaio apresentou valor de $563,00 \text{ mg.L}^{-1}$, conforme **Tabela 5.4**. Esta concentração pode ser considerada dentro da faixa para esgoto doméstico estabelecida por **METCALF & EDDY (2003)**, que varia de 250 a 800 mg.L^{-1} . Já para o efluente do reator UASB, o valor determinado para a DQO foi de $272,00 \text{ mg.L}^{-1}$. Desta maneira é possível calcular a eficiência de remoção do reator anaeróbio, obtendo-se o valor de 51,69 %.

Esta eficiência pode ser considerada baixa em relação aos valores anteriores obtidos nesta pesquisa ou ainda em comparação ao valor médio obtido por **CAMPOS et. al. (2007)**, que foi de 64,8 %. Em adição, chama atenção a relação com a eficiência na remoção de sólidos em suspensão obtida no evento deste ensaio (50 %), valor também considerado baixo quando comparado aos ensaios anteriores. Desta maneira, a concentração de DQO afluente ao sistema de flotação por ar dissolvido no evento deste ensaio pode ser considerada alta. Com relação aos resultados de fósforo averiguados para o esgoto bruto e o efluente do reator UASB durante este ensaio, de

acordo com a **Tabela 5.4**, foram medidos os valores respectivos de 3,20 e 3,85 mg.L⁻¹. Assim, percebe-se que a concentração no efluente do reator foi superior ao do esgoto bruto. Em adição, pode-se considerar ainda que a concentração deste parâmetro no esgoto bruto se apresentou abaixo da faixa para esgoto doméstico, segundo **METCALF & EDDY (2003)**, que deve ser entre 4 a 12 mg.L⁻¹. Já para o efluente do reator, o valor verificado de fósforo foi menor do que o valor médio apresentado por **CAMPOS et. al. (2007)**, que corresponde a 4,84 mg.L⁻¹.

5.2.1.2 Ensaio com *flotateste*

Depois da verificação do desempenho do reator UASB e das características do afluente ao sistema de flotação por ar dissolvido da ETE Anhumas, quando da data dos ensaios com sulfato de alumínio associando diferentes tipos de polímeros no *flotateste*, a seguir são apresentados os resultados obtidos com a aplicação de dosagem fixa de 11,77 mg de Al₂O₃.L⁻¹ do coagulante, associando diferentes dosagens e tipos de polímeros, conforme definido na metodologia para esta fase 2.

Na **Figura 5.13**, estão apresentados os resultados do ensaio realizado, utilizando-se três diferentes tipos de polímeros:

- C8394: Polímero Catiônico;
- N300: Polímero Não Iônico;
- A8566: Polímero Aniônico.

Polímero	Dosagem (mg/L)	Turbidez (NTU) Velocidade de Flotação (cm/min)				pH Coagulação
		8	12	16	20	
C8394	0,50	3,05	3,86	5,62	11,82	7,30
C8394	1,00	23,00	23,30	24,30	23,80	7,30
C8394	2,00	22,80	22,70	23,30	23,00	7,50
N300	0,50	12,77	15,48	20,11	20,46	7,63
N300	1,00	18,95	19,63	19,97	19,91	7,60
N300	2,00	21,10	20,80	22,70	24,70	7,30
A8566	0,50	16,91	19,44	20,09	21,11	7,24
A8566	1,00	21,20	21,40	21,10	21,30	7,30
A8566	2,00	20,40	20,50	22,40	23,20	7,50

Condições do ensaio:

Gmr=800 s⁻¹; Tmr=15 s; Gfloc= 90 s⁻¹; Tfloc= 20 min; R=17 %; Psat= 5,0 ± 0,2 Bar; Temp. = 26 ± 2° C.

Dados da Coleta:

Data: 11.09.2008

Horário: 12:00 hs.

Dosagem Fixa:

D = 70 mg Al₂(SO₄)₃.L⁻¹ = 11,77 mgAl₂O₃.L⁻¹

Características Efluente:

Temp.=25°C; pH=7,60; Cor aparente= 751 mgPt.L⁻¹; Condutividade=908 µS.cm⁻¹; Turb.=55,9 UNT; DQO=272 mg.L⁻¹; Fósforo=3,85 mg.L⁻¹; Sulfeto=1,36 mg.L⁻¹; Alcalinidade Total=344 mgCaCO₃.L⁻¹; ST=626 mg.L⁻¹; SST=144 mg.L⁻¹ e Sulfato=11 mg.L⁻¹.

Figura 5.13 – Fase 2: Resultados de Turbidez para diferentes velocidades de flotação, ensaio com Al₂(SO₄)₃ associado a polímeros

As dosagens aplicadas foram de 0,50; 1,00 e 2,00 mg.L⁻¹ de cada polímero, sendo mantido fixo a dosagem de sulfato de alumínio igual a 11,77 mg de Al₂O₃.L⁻¹. Através da análise dos resultados apresentados na **Figura 5.13**, verifica-se que o polímero catiônico C8394 obteve melhores resultados na associação com sulfato de alumínio, quando aplicado dosagem de 0,50 mg.L⁻¹. Verifica-se também que dosagens maiores que 0,50 mg.L⁻¹ aparentemente não resultam em melhoria na formação de flocos e conseqüentemente na clarificação após a flotação, mesmo para baixas velocidades de flotação. Com relação aos polímeros não iônico (N300) e aniônico (A8566), os resultados não foram satisfatórios quanto a remoção de turbidez, para as dosagens consideradas.

Para a fase 2, o critério considerado para definição da melhor dosagem de polímero foi: i) turbidez < 15 UNT para todas as velocidades de flotação estudadas e ii) Menor dosagem de polímero aplicada. Desta maneira, novamente de acordo com a **Figura 5.13**, nota-se que apenas o resultado referente a associação de 11,77 mg de Al₂O₃.L⁻¹ com 0,50 mg.L⁻¹ do polímero C8394 atendeu a este critério.

Desta maneira, após avaliação do resultado apresentado na **Figura 5.13**, fica evidente que o melhor resultado obtido para este ensaio foi com a dosagem de 0,50 mg.L⁻¹ de polímero catiônico (C8394) associado a 11,77 mg de Al₂O₃.L⁻¹ de sulfato de alumínio.

Os resultados de pH, alcalinidade, cor aparente, turbidez, sólidos totais, sólidos suspensos totais, sulfato, condutividade elétrica, DQO e fósforo total, para a velocidade de flotação de 16 cm.min⁻¹, para esta melhor dosagem, são apresentados na **Figura 5.14**.

Conforme pode ser visto na **Figura 5.14**, o pH da amostra relativa a dosagem considerada foi de 7,30, atendendo portanto padrão de lançamento estabelecido pela resolução **CONAMA 357/2005**, que estabelece pH entre 5 e 9. Quanto a alcalinidade residual, pode ser verificado que a alcalinidade natural presente no efluente do UASB foi suficiente para a coagulação. Conforme apresentado, pode-se inferir que houve consumo de alcalinidade da ordem de 125 mg de CaCO₃.L⁻¹, restando ainda um residual de 219,00 mg de CaCO₃.L⁻¹ não consumidos na coagulação.

Figura 5.14 - Fase 2: Resultados de pH, Alcalinidade, Cor aparente e Turbidez para $V_f=16 \text{ cm.min}^{-1}$, ensaio com $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ associado a polímeros

Com relação a remoção de cor aparente, a dosagem associada de $11,77 \text{ mg}$ de Al_2O_3 com $0,50 \text{ mg.L}^{-1}$ do polímero C8394 atingiu remoção da ordem de 79% , com residual de $155,00 \text{ mg Pt.L}^{-1}$. Quanto a turbidez, foi observado turbidez remanescente inferior a 15 UNT para todas as velocidades de flotação estudadas ($8; 12; 16$ e 20 cm.min^{-1}), sendo obtido valor de apenas $5,62 \text{ UNT}$ para a velocidade de flotação 16 cm.min^{-1} , que representa a taxa de aplicação superficial dos flotadores da ETE Anhumas quando da operação normal no fim de plano de projeto, para a vazão média ($Q=1.200 \text{ L.s}^{-1}$).

Conforme a **Figura 5.15**, com relação a concentração de sólidos totais (ST) para a amostra analisada, verifica-se boa remoção desta variável para a dosagem considerada (72,84 %), apresentando concentração residual de 170,00 mg.L⁻¹ na amostra recolhida para Vf=16 cm.min⁻¹. No que tange a evolução da concentração de sólidos suspensos totais (SST), ótima remoção foi verificada para a dosagem considerada (94,44 %), com residual medido de 8,00 mg.L⁻¹.

Ainda de acordo com a **Figura 5.15**, pode-se verificar que houve uma singela redução da concentração de sulfato após o ensaio com flotação, com valor medido para a dosagem considerada de 7,00 mg.L⁻¹, menor que a concentração de 11,00 mg.L⁻¹ aferido para o efluente do reator UASB. Já com relação a condutividade elétrica, verificou-se considerável decaimento na amostra recolhida para Vf=16 cm.min⁻¹, sendo calculada a diferença em relação ao efluente anaeróbio de 289,00 µS/cm.

Tal diferença deve ser relacionada à boa remoção de sólidos dissolvidos totais. Quanto a eficiência obtida na remoção de matéria orgânica, em termos de DQO, verifica-se através da **Figura 5.16** que a dosagem considerada de 0,50 mg.L⁻¹ do polímero C8394 associado a 11,77 mg de Al₂O₃ de sulfato de alumínio foi suficiente para se chegar a uma concentração de DQO igual a 31,00 mg.L⁻¹.

Figura 5.15 - Fase 2: Resultados de ST, SST, Sulfato e Condutividade para $V_f=16 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$, ensaio com $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ associado a polímeros

Tal valor representa uma remoção global acima de 94 %. Não obstante, quanto a evolução da concentração de fósforo, verificou-se um residual alto de fósforo na amostra referente a $V_f=16 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$, equivalente a $1,14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Tal valor representa uma remoção da ordem de 70 % que, considerando a potencialidade da remoção de fósforo através da precipitação química com sais de alumínio, não pode ser denominada boa. De fato, analisando novamente o resultado de pH de coagulação para amostra (**Figura 5.13**) percebe-se que o valor de 7,30 ainda não é o ideal para a precipitação do fósforo. De acordo com **JENKINS & HERMANOWICZ (1991)**, a solubilidade mínima do fosfato de alumínio (AlPO_4) está por volta de pH 6,3.

Figura 5.16 - Fase 2: Resultados de DQO e Fósforo para $V_f=16 \text{ cm.min}^{-1}$, ensaio com $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ associado a polímeros

O presente ensaio associando polímeros com o coagulante sulfato de alumínio teve por finalidade definir o melhor polímero e a respectiva melhor dosagem. No entanto, para esta definição foi estabelecido o critério de turbidez menor que 15 UNT para todas as velocidades de flotação estudadas (8;12;16 e 20 cm.min^{-1}). Desta maneira, conforme verificado nos resultados apresentados, apenas o polímero catiônico C8394 atendeu esta premissa, para também apenas uma dosagem (0,50 mg.L^{-1}). Assim, no caso de eventual utilização nas fases seguintes do sulfato de alumínio como coagulante, fica definido a utilização do polímero catiônico C8394 e respectiva dosagem fixa de 0,50 mg.L^{-1} .

5.2.2 Dosagem de PAC Associado a Diferentes Tipos de Polímeros

A seguir são apresentados os resultados da avaliação da melhor dosagem de cloreto de polialumínio (PAC), estabelecida em 8,45 $\text{mg de Al}_2\text{O}_3.\text{L}^{-1}$ na fase 1, associado a diferentes polímeros em diferentes dosagens. As características de cada um dos polímeros constam no item 4.4.2 deste texto. Desta maneira, são agora apresentados os resultados deste ensaio, divididos em dois itens: caracterização do esgoto bruto e efluente do reator UASB e ensaios com *flotateste*.

5.2.2.1 Caracterização do esgoto bruto e efluente do reator UASB

As características do esgoto bruto e do efluente do reator UASB, no evento dos ensaios com PAC associado a polímeros nesta fase 2, estão apresentados na **Tabela 5.5**.

Tabela 5.5 – Fase 2: Características Esgoto Bruto e Efluente UASB, ensaio com PAC associado a Polímeros

Análise	Unidade	Esgoto Bruto	Efluente UASB
Temperatura	°C	24,0	24,0
pH	UpH	7,1	7,2
Cor	mg Pt/L	1736,0	805,0
Condutividade	μS/cm	750,0	761,0
Turbidez	UNT	251,0	143,0
DQO	mg/L	454,0	199,0
Fósforo	mg/L	5,9	3,4
Alcalinidade	mg/L	180,0	212,0
ST	mg/L	596,0	140,0
SST	mg/L	192,0	76,0
Sulfato	mg/L	74,0	11,0
Sulfeto	mg/L	1,5	3,2

Conforme apresentado, verifica-se que o pH do esgoto bruto esteve próximo a neutralidade, bem como o pH do efluente do reator UASB, apresentando respectivos valores de 7,10 e 7,20. Quanto ao pH do efluente anaeróbio, pode-se considerar dentro de faixa apropriada para coagulação química, estabelecida em entre 6,50 e 7,50, segundo (**PROSAB, 1999**).

Quanto a evolução da alcalinidade, verificou-se que para o esgoto bruto o valor foi menor do que na saída do reator UASB, com respectivos valores de 180,00 e 212,00 mg.L⁻¹. Mais uma vez, para este ensaio, verificou-se que a alcalinidade presente no efluente anaeróbio pode ser considerada suficiente para a coagulação química com PAC e polímeros.

Com relação a concentração de cor aparente, segundo a **Tabela 5.5**, pode ser calculado uma remoção de cor aparente da ordem de 53 %, com valor remanescente no efluente anaeróbio de 805,00 mg Pt.L⁻¹. A cor aparente no esgoto bruto (1736,00 mg Pt.L⁻¹) quando comparada ao valor médio obtido por **CAMPOS et. al. (2007)**, que foi de 1.303 ± 350 mg Pt.L⁻¹, pode ser considerada elevada. Da mesma forma, para o efluente anaeróbio, os resultados dos autores indicaram valor médio de 541 mg Pt.L⁻¹, menor que a concentração obtida no evento deste ensaio para o efluente do reator UASB, que

foi de 805,00 mg Pt.L⁻¹. Quanto aos valores apresentados de turbidez, verificou-se um aumento em relação aos ensaios anteriores, principalmente na saída do reator UASB (143,00 UNT). Já com relação ao esgoto bruto também foi verificado um valor maior do que nos ensaios anteriores e desta semelhante ao valor médio apresentado por **CAMPOS et. al. (2007)**, que foi de 251 ± 70 UNT.

Ainda de acordo com os resultados da **Tabela 5.5**, percebe-se que a evolução dos resultados de SST, para esgoto bruto e efluente do reator UASB, indica remoção acima de 60 % desta variável. Com relação aos resultados apresentados para ST, também foi verificada uma boa remoção para esta variável, calculada em 76,51 %. Quanto a concentração remanescente de SST no efluente anaeróbio (76,00 mg.L⁻¹), muito próximo valor médio apresentado por **CAMPOS et. al. (2007)**, que foi de 78,00 mg.L⁻¹.

Com relação a concentração de sulfato, é possível verificar uma redução abrupta após a passagem pelo reator UASB, devido a provável redução de sulfato a sulfeto no ambiente anaeróbio. No entanto, a concentração verificada para o efluente do reator UASB (11,00 mg.L⁻¹) é superior ao valor médio apresentado por **CAMPOS et. al. (2007)**, cujo valor foi de 0,20 mg.L⁻¹, também no efluente dos reatores UASB monitorados pelos autores. Já para o esgoto bruto, o valor de 74,00 mg.L⁻¹ obtido para o sulfato novamente pode ser considerado alto, acima do limite superior apresentado por **METCALF & EDDY (2003)**, em que os autores estabelecem faixa de 20 a 50 mg.L⁻¹, para esgoto doméstico. Quanto a concentração de sulfeto, o valor verificado no evento deste ensaio foi de 3,23 mg.L⁻¹, também situou-se próximo ao valor médio obtido **CAMPOS et. al. (2007)**, que foi de 3,34 mg.L⁻¹.

A DQO para o esgoto bruto neste ensaio apresentou valor de 454,00 mg.L⁻¹, conforme **Tabela 5.5**. Esta concentração pode ser considerada dentro da faixa para esgoto doméstico estabelecida por **METCALF & EDDY (2003)**, que varia de 250 a 800 mg.L⁻¹. Já para o efluente do reator UASB, o valor determinado para a DQO foi de 199,00 mg.L⁻¹. Desta maneira é possível calcular a eficiência de remoção do reator anaeróbio, obtendo-se o valor de 56,17 %. Esta eficiência pode ser considerada baixa em relação aos valores anteriores obtidos nesta pesquisa ou ainda em comparação ao valor médio obtido por **CAMPOS et. al. (2007)**, que foi de 64,8 %.

Com relação aos resultados de fósforo averiguados para o esgoto bruto e efluente do reator UASB durante este ensaio, de acordo com a **Tabela 5.5**, foram medidos os valores respectivos de 5,90 e 3,40 mg.L⁻¹. Assim, pode-se considerar que a concentração deste parâmetro no esgoto bruto se apresentou dentro da faixa para esgoto doméstico, segundo **METCALF & EDDY (2003)**, que deve ser entre 4 a 12 mg.L⁻¹. Já para o efluente do reator, o valor verificado de fósforo foi menor do que o valor médio apresentado por **CAMPOS et. al. (2007)**, que corresponde a 4,84 mg.L⁻¹.

5.2.2.2 Ensaio com *flotateste*

Depois da verificação do desempenho do reator UASB e das características do afluente ao sistema de flotação por ar dissolvido da ETE Anhumas, quando da data dos ensaios com PAC associando diferentes tipos de polímeros no *flotateste*, a seguir são apresentados os resultados obtidos com a aplicação de dosagem fixa de 8,45 mg de Al₂O₃.L⁻¹ do coagulante, associando diferentes dosagens e tipos de polímeros, conforme definido na metodologia para esta fase 2.

Na **Figura 5.17**, estão apresentados os resultados do ensaio realizado, utilizando-se três diferentes tipos de polímeros:

- C8394: Polímero Catiônico;
- N300: Polímero Não Iônico;
- A8566: Polímero Aniônico.

As dosagens aplicadas foram de 0,50; 1,00 e 2,00 mg.L⁻¹ de cada polímero, sendo mantido fixo a dosagem de PAC igual a 8,45 mg de Al₂O₃.L⁻¹.

Através da análise dos resultados apresentados na **Figura 5.17**, verifica-se que para a velocidade de flotação igual a 8 cm.min^{-1} , todos os polímeros estudados apresentaram resultados satisfatórios. De forma análoga, todas as dosagens testadas apresentaram turbidez menor que 10 UNT.

Com relação aos resultados de turbidez verificados para a velocidade de flotação de 12 cm.min^{-1} , situação semelhante foi observada, sendo verificado resultados de turbidez remanescentes menor que 15 UNT para todas as dosagens ensaiadas para cada um dos polímeros testados.

Já com relação a velocidade de flotação igual a 16 cm.min^{-1} , conforme verificado na **Figura 5.17**, verifica-se que o polímero aniônico A8566, para as dosagens de 1,00 e $2,00 \text{ mg.L}^{-1}$, ultrapassa o limite do critério de escolha para a turbidez do ensaio, estabelecido em 15 UNT.

Em adição, nota-se que os demais resultados ficam abaixo do limite. Finalmente, para a maior das velocidades de flotação (20 cm.min^{-1}), apenas um dos polímeros consegue garantir turbidez menor que 15 UNT: o polímero catiônico C8394. Assim, conforme verificado, as dosagens de $0,50$ e $2,00 \text{ mg.L}^{-1}$ atendem ao critério turbidez menor que 15 UNT para todas as velocidades de flotação.

Figura 5.17 – Fase 2: Resultados de Turbidez para diferentes velocidades de flotação, ensaio com PAC associado a polímeros

Para esta fase da pesquisa definiu-se os seguintes critérios para escolha da melhor dosagem e tipo de polímero: i) turbidez menor que 15 UNT para todas as velocidades de flotação estudadas (8; 12; 16 e 20 cm.min⁻¹) e ii) Menor dosagem de polímero aplicada.

Desta maneira, conforme os resultados apresentados, fica evidente que o melhor resultado obtido para este ensaio foi com a dosagem de $0,50 \text{ mg.L}^{-1}$ de polímero catiônico (C8394) associado a $8,45 \text{ mg de Al}_2\text{O}_3.\text{L}^{-1}$ de PAC. Os resultados de pH, alcalinidade, cor aparente, turbidez, sólidos totais, sólidos suspensos totais, sulfato, condutividade elétrica, DQO e fósforo total, para a velocidade de flotação de 16 cm.min^{-1} , para esta melhor dosagem, bem como para a dosagem de $2,00 \text{ mg.L}^{-1}$ são apresentados a seguir (**Figura 5.18**).

Conforme pode ser visto na **Figura 5.18**, o pH das amostras relativas as dosagens consideradas situaram-se próximas a neutralidade, atendendo portanto padrão de lançamento estabelecido pela resolução **CONAMA 357/2005**, que estabelece pH entre 5 e 9. Quanto a alcalinidade residual, pode ser verificado que a alcalinidade natural presente no efluente do UASB foi suficiente para a coagulação.

No entanto, verificou-se para este ensaio um baixo consumo de alcalinidade para as dosagens consideradas, com maior consumo calculado em $12,00 \text{ mg de CaCO}_3.\text{L}^{-1}$, relativo a associação de $8,45 \text{ mg de Al}_2\text{O}_3.\text{L}^{-1}$ com $2,00 \text{ mg.L}^{-1}$ do polímero catiônico C8394.

Com relação a remoção de cor aparente, a dosagem associada de $8,45 \text{ mg de Al}_2\text{O}_3$ com $2,00 \text{ mg.L}^{-1}$ do polímero C8394 atingiu maior remoção da ordem de 93 %, com residual de 57 mg Pt.L^{-1} . A dosagem associada de $8,45 \text{ mg de Al}_2\text{O}_3$ com $0,50 \text{ mg.L}^{-1}$ do polímero C8394 também atingiu boa remoção de cor aparente, da ordem de 86 %, com residual presente na amostra em concentração igual a $112,00 \text{ mg Pt.L}^{-1}$.

Quanto a turbidez, verificou-se para a velocidade de flotação de 16 cm.min^{-1} maior remoção para o resultado relativo a dosagem de $0,50 \text{ mg.L}^{-1}$ de polímero, onde verificou-se turbidez remanescente de 8,54 UNT. Apresentando, portanto, maior remoção para a velocidade de flotação que representa a taxa de aplicação superficial dos flotadores da ETE Anhumas quando da operação normal no fim de plano de projeto, para a vazão média ($Q=1.200 \text{ L.s}^{-1}$).

Figura 5.18 - Fase 2: Resultados de pH, Alcalinidade, Cor aparente e Turbidez para Vf=16 cm.min⁻¹, ensaio com PAC associado a polímeros

Conforme a **Figura 5.19**, com relação a concentração de sólidos totais (ST) para as amostras analisadas, verificou-se um aumento em relação ao valor determinado para o efluente do reator UASB. Já com relação a evolução da concentração de sólidos suspensos totais (SST), ótima remoção foi verificada para ambas dosagens, sendo para 0,50 e 2,00 mg.L⁻¹ eficiências calculadas de 94,74 % e 89,47 %, respectivamente.

Ainda de acordo com a **Figura 5.19**, pode-se verificar que houve uma singela redução da concentração de sulfato após o ensaio com flotação, para ambas as dosagens, verificado teor igual a 9,00 mg.L⁻¹ desta variável. Já com relação a condutividade elétrica, o resultado relativo a dosagem de 0,50 mg.L⁻¹ de polímero resultou em valor de 677,00 µS/cm, já para a dosagem de 2,00 mg.L⁻¹, foi observado o menor resultado, apresentando a intensidade de 670,00 µS/cm para a condutividade.

Figura 5.19 - Fase 2: Resultados de ST, SST, Sulfato e Condutividade para $V_f=16 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$, ensaio com PAC associado a polímeros

Quanto a eficiência obtida na remoção de matéria orgânica, em termos de DQO, verifica-se através da **Figura 5.20** que o melhor resultado observado foi para a dosagem de $2,00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ de polímero, onde se obteve remoção global calculada acima de 85 %. Com relação a dosagem de $0,50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ de polímero, verificou-se remoção global menor, calculada em 83,48 %, com DQO remanescente de $75,00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

Já a remoção de fósforo verificada para as dosagens consideradas foi boa, sendo que para $0,50$ e $2,00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ do polímero, obteve-se remoções de respectivamente 88,82 % e 91,47 %. Considerando o pH de coagulação para ambas as dosagens, situado próximo a 7,00 (**Figura 5.17**), verifica-se que a medida que o pH se aproxima do valor

de 6,3, menor se torna a fração dissolvida de fosfato de alumínio (AlPO_4), conforme proposto por **JENKINS & HERMANOWICZ (1991)**.

Figura 5.20 - Fase 2: Resultados de DQO e Fósforo para $V_f=16 \text{ cm.min}^{-1}$, ensaio com PAC associado a polímeros

O presente ensaio associando polímeros com o coagulante cloreto de polialumínio (PAC) teve por finalidade definir o melhor polímero e a respectiva melhor dosagem. No entanto, para esta definição foi estabelecido o critério de turbidez menor que 15 UNT para todas as velocidades de flotação estudadas (8;12;16 e 20 cm.min^{-1}). Desta maneira, conforme verificado nos resultados apresentados, apenas o polímero catiônico C8394 atendeu esta premissa, para duas dosagens (0,50 e 2,00 mg.L^{-1}). Em adição, conforme definido, o segundo critério para escolha da melhor dosagem relaciona-se a menor dosagem aplicada dentre as que atenderam ao primeiro critério. Portanto, no caso de eventual utilização nas fases seguintes do PAC como coagulante, fica definido a utilização do polímero catiônico C8394 e respectiva dosagem fixa de 0,50 mg.L^{-1} .

5.2.3 Dosagem de FeCl₃ Associado a Diferentes Tipos de Polímeros

A seguir são apresentados os resultados da avaliação da melhor dosagem de cloreto férrico (FeCl₃), estabelecida em 24,38 mg Fe⁺³.L⁻¹ na fase 1, associado a diferentes polímeros em diferentes dosagens. As características de cada um dos polímeros constam no item 4.4.2 deste texto. Desta maneira, são agora apresentados os resultados deste ensaio, divididos em dois itens: caracterização do esgoto bruto e efluente do reator UASB e ensaios com *flotatestes*.

5.2.3.1 Caracterização do esgoto bruto e efluente do reator UASB

As características do esgoto bruto e do efluente do reator UASB, no evento dos ensaios com FeCl₃ associado a polímeros nesta fase 2, estão apresentados na **Tabela 5.6**.

Tabela 5.6 – Fase 2: Características Esgoto Bruto e Efluente UASB, ensaio com FeCl₃ associado a Polímeros

Análise	Unidade	Esgoto Bruto	Efluente UASB
Temperatura	°C	23,0	23,0
pH	UpH	7,0	7,9
Cor	mg Pt/L	1411,0	621,0
Condutividade	μS/cm	713,0	818,0
Turbidez	UNT	231,0	109,0
DQO	mg/L	410,0	164,0
Fósforo	mg/L	2,6	2,6
Alcalinidade	mg/L	164,0	328,0
ST	mg/L	666,0	418,0
SST	mg/L	600,0	88,0
Sulfato	mg/L	78,0	12,0
Sulfeto	mg/L	0,2	4,4

Conforme apresentado, verifica-se que o pH do esgoto bruto esteve neutro, no entanto o pH do efluente do reator UASB foi medido em 7,92, valor que já pode ser considerado elevado, pois ultrapassa em 0,42 a faixa considerada apropriada de 6,50 a 7,50, segundo **PROSAB (1999)**. No entanto, o ensaio foi desenvolvido devido ao entendimento de que o valor situou-se próximo ao limite máximo, fato considerado aceitável para o prosseguimento do ensaio.

Quanto a evolução da alcalinidade, verificou-se que para o esgoto bruto o valor foi menor do que na saída do reator UASB, com respectivos valores de 164,00 e 328,00 mg.L⁻¹. Mais uma vez, para este ensaio, verificou-se que a alcalinidade presente no efluente anaeróbio pode ser considerada suficiente para a coagulação química com sulfato de alumínio e polímeros.

Com relação a evolução da concentração de cor aparente, segundo a **Tabela 5.6**, pode ser calculado uma remoção de cor aparente da ordem de 56 %, com valor remanescente no efluente anaeróbio de 621,00 mg Pt.L⁻¹. A cor aparente no esgoto bruto (1411,00 mg Pt.L⁻¹) situou-se próximo ao valor médio obtido por **CAMPOS et. al. (2007)**, que foi de 1.303 ± 350 mg Pt.L⁻¹. Já a cor aparente no efluente do reator UASB foi superior ao valor apresentado pelos autores, cuja média foi de 541 mg Pt.L⁻¹.

Quanto aos resultados de turbidez, mais uma vez foram verificados resultados menores do que os apresentados por **CAMPOS et. al. (2007)**. Para o esgoto bruto e efluente do reator UASB, no evento deste ensaio, foram determinados os respectivos valores de 231,00 e 109,00 UNT, com remoção equivalente a 52,81 %. Já os resultados médios apresentados pelos autores foram respectivamente, para esgoto bruto e efluente dos reatores UASB, 251 ± 70 UNT e 189 UNT, e eficiência média calculada de 24,7 %.

Conforme **Tabela 5.6**, no evento deste ensaio pode-se perceber também que a concentração de SST no esgoto bruto esteve elevada, 600,00 mg.L⁻¹, acima da faixa estabelecida para esgoto doméstico, 120 a 400 mg.L⁻¹, segundo **METCALF & EDDY (2003)**. Não obstante, a concentração de SST no efluente do reator também foi alta (88,00 mg.L⁻¹). No entanto, a remoção de SST calculada para o sistema anaeróbio pode ser considerada boa, 85,33 %, comparada com valor médio apresentado por **CAMPOS et. al. (2007)**, que foi de 70,7 %. Com relação aos resultados apresentados para ST, a remoção calculada foi 37,24 %, sendo a concentração no efluente do reator UASB igual a 418,00 mg.L⁻¹.

Com relação a concentração de sulfato, é possível verificar uma redução abrupta após a passagem pelo reator UASB, devido a provável redução de sulfato a sulfeto no ambiente anaeróbio. No entanto, a concentração verificada para o efluente do reator UASB (12,00 mg.L⁻¹) é superior ao valor médio apresentado por **CAMPOS et. al.**

(2007), cujo valor foi de $0,20 \text{ mg.L}^{-1}$, também no efluente dos reatores UASB monitorados pelos autores. Já para o esgoto bruto, o valor de $78,00 \text{ mg.L}^{-1}$ obtido para o sulfato novamente pode ser considerado alto, acima do limite superior apresentado por **METCALF & EDDY (2003)**, em que os autores estabelecem faixa de 20 a 50 mg.L^{-1} , para esgoto doméstico. O valor elevado de sulfato no esgoto bruto certamente influenciou para o valor também alto de sulfeto no efluente do reator UASB, medido em $4,35 \text{ mg.L}^{-1}$. Tal valor é superior ao valor médio obtido **CAMPOS et. al. (2007)**, que foi de $3,34 \text{ mg.L}^{-1}$.

A DQO para o esgoto bruto neste ensaio apresentou valor de $410,00 \text{ mg.L}^{-1}$, conforme **Tabela 5.6**. Esta concentração pode ser considerada dentro da faixa para esgoto doméstico estabelecida por **METCALF & EDDY (2003)**, que varia de 250 a 800 mg.L^{-1} . Já para o efluente do reator UASB, o valor determinado para a DQO foi de $164,00 \text{ mg.L}^{-1}$. Desta maneira é possível calcular a eficiência de remoção do reator anaeróbio, obtendo-se o valor de 60 %. Esta eficiência situou-se próxima ao valor médio obtido por **CAMPOS et. al. (2007)**, que foi de 64,8 %.

Com relação aos resultados de fósforo averiguados para o esgoto bruto e o efluente do reator UASB durante este ensaio, de acordo com a **Tabela 5.6**, foram medidos os valores respectivos de 2,55 e $2,63 \text{ mg.L}^{-1}$. Assim, percebe-se que a concentração no efluente do reator foi superior ao do esgoto bruto.

Em adição, pode-se considerar ainda que a concentração deste parâmetro no esgoto bruto se apresentou abaixo da faixa para esgoto doméstico, segundo **METCALF & EDDY (2003)**, estabelecido entre 4 a 12 mg.L^{-1} . Já para o efluente do reator, o valor verificado de fósforo foi menor do que o valor médio apresentado por **CAMPOS et. al. (2007)**, que corresponde a $4,84 \text{ mg.L}^{-1}$, podendo também ser considerado baixo.

5.2.3.2 Ensaio com *flotateste*

Depois da verificação do desempenho do reator UASB e das características do afluente ao sistema de flotação por ar dissolvido da ETE Anhumas, quando da data dos ensaios com cloreto férrico associando diferentes tipos de polímeros no *flotateste*, a seguir são apresentados os resultados obtidos com a aplicação de dosagem fixa de 24,38 mg $\text{Fe}^{+3} \cdot \text{L}^{-1}$ do coagulante, associando diferentes dosagens e tipos de polímeros, conforme definido na metodologia para esta fase 2.

Desta maneira, a seguir estão apresentados os resultados do ensaio realizado, utilizando-se três diferentes tipos de polímeros, sendo estes:

- C8394: Polímero Catiônico;
- N300: Polímero Não Iônico;
- A8566: Polímero Aniônico.

As dosagens aplicadas foram de 0,50; 1,00 e 2,00 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ de cada polímero, sendo mantido fixo a dosagem de cloreto férrico igual a 24,38 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Considerando os resultados do ensaio com *flotateste* apresentados na **Figura 5.21**, pode-se verificar que para as velocidades de flotação iguais a 8 e 12 $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$, todas as dosagens testadas resultaram em turbidez remanescente inferior ao critério de escolha do ensaio, estabelecido em valor menor que 15 UNT.

Já com relação a velocidade de flotação de 16 $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$, pode-se verificar que a turbidez ultrapassa o limite de 15 UNT para as dosagens de 0,50 e 1,00 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ relativas ao polímero aniônico A8566. No entanto, para a dosagem igual a 2,00 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ do mesmo polímero, a turbidez remanescente medida foi de 13,08 UNT.

Figura 5.21 – Fase 2: Resultados de Turbidez para diferentes velocidades de flotação, ensaio com FeCl₃ associado a polímeros

Ainda analisando os resultados do ensaio, apresentados na **Figura 5.21**, verifica-se que para a maior velocidade de flotação avaliada (20 cm.min⁻¹), apenas o polímero catiônico C8394 consegue atender o requisito de turbidez < 15 UNT, para as dosagens

de 1,00 e 2,00 mg.L⁻¹. Podendo-se considerar este polímero, conforme o critério estabelecido, com o melhor polímero a ser associado ao coagulante cloreto férrico.

Quanto a melhor dosagem a ser utilizada, conforme já abordado o segundo critério para desempate e definição de melhor dosagem nesta fase 2 está relacionado a menor dosagem de polímero aplicada. Desta maneira, a dosagem de 1,00 mg.L⁻¹ do polímero catiônico C8394 representam a melhor dosagem e tipo de polímero. Para tanto, para as duas dosagens classificadas no critério turbidez menor que 15 UNT foram realizadas análises das variáveis pH, alcalinidade, cor aparente, turbidez, sólidos totais, sólidos suspensos totais, sulfato, condutividade elétrica, DQO e fósforo total, para a velocidade de flotação de 16 cm.min⁻¹, sendo apresentadas a seguir (**Figura 5.22**).

Na **Figura 5.22**, verifica-se que os valores de pH para as dosagens consideradas situaram-se dentro da faixa de 5 a 9, estabelecida como condição de lançamento pela resolução **CONAMA 357/2005**, sendo obtido para as dosagens de polímero relativas a 1,00 e 2,00 mg.L⁻¹, valores de pH 7,15 e 7,20, respectivamente. Já quanto a alcalinidade chama atenção o elevado valor aferido para o efluente do reator UASB, igual a 328 mg de CaCO₃.L⁻¹. Tal valor foi suficiente para a coagulação com cloreto férrico, visto que o maior consumo medido foi de 104 mg de CaCO₃.L⁻¹, verificado para a dosagem de 1,00 mg.L⁻¹ do polímero C8394, associado a dosagem de cloreto férrico de 24,38 mg Fe⁺³.L⁻¹.

Ainda analisando a **Figura 5.22**, verifica-se que a melhor remoção de cor aparente foi obtida para a dosagem de 2,00 mg.L⁻¹ de polímero (83,09 %). A cor aparente para a amostra referente a dosagem de 1,00 mg.L⁻¹ apresentou valor alto (196 mg Pt.L⁻¹) comparado a resultados de ensaios anteriores, no entanto a eficiência global de remoção foi satisfatória, da ordem de 86 %. Quanto a turbidez, verificou-se que para ambas dosagens de 1,00 e 2,00 mg.L⁻¹ do polímero C8394, a turbidez remanescente foi menor que 10 UNT para a velocidade de flotação de 16 cm.min⁻¹ (230,4 m³.m⁻².dia), que simula a operação normal da ETE Anhumas para a vazão média de fim de plano.

Figura 5.22 - Fase 2: Resultados de pH, Alcalinidade, Cor aparente e Turbidez para Vf=16 cm.min⁻¹, ensaio com FeCl₃ associado a polímeros

Conforme a **Figura 5.23**, com relação a concentração de sólidos totais (ST), verificou-se maior remoção para a dosagem de 1,00 mg.L⁻¹, calculada em 14,83 %, sendo medido a concentração residual de 356 mg.L⁻¹. Quanto aos resultados apresentados de SST, foi verificado uma concentração remanescente igual 20 mg.L⁻¹ para ambas as dosagens apresentadas. Já quanto ao teor de sulfato, foi verificado uma queda com relação ao valor determinado para o efluente do reator UASB, que foi de 12,00 mg.L⁻¹. Os resultados obtidos para ambas dosagens apresentaram concentrações de sulfato após a flotação iguais a 8,00 mg.L⁻¹. Valores também próximos puderam ser observados para ambas as dosagens consideradas quanto a intensidade da condutividade elétrica. Para as dosagens de 1,00 e 2,00 mg.L⁻¹ foram obtidos os valores respectivos de 744 e 748 μ S/cm.

Figura 5.23 - Fase 2: Resultados de ST, SST, Sulfato e Condutividade para $V_f=16 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$, ensaio com FeCl_3 associado a polímeros

Quanto a eficiência obtida na remoção de matéria orgânica, em termos de DQO, verifica-se através da **Figura 5.24** que a maior remoção verificada foi relacionada a dosagem de $1,00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ de polímero, calculada em termos globais equivalente a 84,63 %. As concentrações remanescentes de DQO para as dosagens de $1,00$ e $2,00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ de polímero foram de 63 e $78 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectivamente. Por fim, ainda de acordo com a **Figura 5.24**, foram verificadas boas remoções de fósforo para ambas dosagens de $1,00$ e $2,00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (acima de 90 %).

Figura 5.24 - Fase 2: Resultados de DQO e Fósforo para $V_f=16 \text{ cm.min}^{-1}$, ensaio com FeCl_3 associado a polímeros

Assim, conforme já discutido, e de acordo com os critérios i) Turbidez menor que 15 UNT para $V_f=16 \text{ cm.min}^{-1}$ e ii) Menor dosagem de polímero aplicada, a dosagem de $1,00 \text{ mg.L}^{-1}$ do polímero catiônico C8394 fica definido como a melhor dosagem e tipo de polímero deste ensaio.

5.2.4 Discussão Sobre Resultados da Fase 2

Conforme pode ser observado, para os três coagulantes estudados ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, PAC e FeCl_3) nesta fase 2, os melhores resultados observados foram com a associação de polímero catiônico. Tal fato pode ser explicado conforme **METCALF & EDDY (2003)**.

Segundo os autores, os polímeros ou polieletrólitos são divididos em três categorias, de acordo com sua carga, após ser aplicado no esgoto : catiônico (positiva), aniônico (negativa) e não iônico (neutro). Os autores relatam que a atuação dos polieletrólitos ocorre basicamente através de dois processos: i) Adsorção e neutralização de cargas e ii) Adsorção e formação de pontes.

Ainda de acordo com os autores, a atuação dos polieletrólitos aniônicos e não-iônicos se dá através do mecanismo de adsorção e formação de pontes, sendo pouco provável a atuação da adsorção e neutralização de cargas. Já os polieletrólitos que apresentam carga positiva e massa molecular muito elevada possuem a capacidade de atuar com

os dois mecanismos de desestabilização dos colóides, o que pode acarretar que esta categoria de polímero apresente maior eficiência perante os demais.

Além disto, segundo **METCALF & EDDY (2003)**, via de regra os colóides presentes no esgoto sanitário apresentam carga negativa na sua superfície, o que também pode favorecer a atuação do polímero catiônico com relação ao mecanismo de desestabilização e neutralização de cargas.

5.3 RESULTADOS DA FASE 3

A fase 3 foi subdividida em três itens principais, sendo eles:

- Avaliação das características do esgoto bruto e efluente do reator UASB;
- Escolha do coagulante a ser empregado;
- Ensaios com *flotatestes*.

5.3.1 Avaliação das Características do Esgoto Bruto e Efluente do Reator UASB

Para esta fase da pesquisa foram realizados seis ensaios utilizando-se o efluente do reator UASB da ETE Anhumas, coletado em seis diferentes horários ao longo do dia, com intervalo entre os horários das coletas estabelecido em quatro horas.

Na **Tabela 5.7**, são apresentados os resultados das análises físico e químicas para os horários considerados nesta fase da pesquisa.

Tabela 5.7 – Fase 3: Resumo da qualidade do esgoto bruto e efluente do UASB ao longo do dia.

Período	Ponto	Resultados Analíticos											
		Temp.	pH	Turb.	Cor	Cond.	Alc.	DQO	P	ST	SST	SO ₄	S-2
		°C	UpH	UNT	mgPt/L	µS/cm	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
00:00hs	Esg. Bruto	25,0	7,0	94,4	822,0	712,0	89,0	175,0	3,2	384,0	102,0	47,0	1,1
	Ef. UASB	26,0	7,3	32,7	733,0	743,0	239,0	139,0	0,9	440,0	64,0	14,0	12,9
04:00hs	Esg. Bruto	23,0	7,3	76,0	575,0	489,0	144,0	148,0	5,5	400,0	60,0	44,0	0,1
	Ef. UASB	24,0	7,2	33,0	686,0	694,0	240,0	125,0	7,6	752,0	48,0	5,0	12,0
08:00hs	Esg. Bruto	22,0	7,1	133,0	1267,0	722,0	200,0	498,0	11,0	564,0	220,0	30,0	0,0
	Ef. UASB	22,0	6,9	59,0	630,0	700,0	240,0	95,0	7,0	336,0	66,0	4,0	10,5
12:00hs	Esg. Bruto	25,0	6,9	128,0	3050,0	708,0	204,0	595,0	10,4	636,0	312,0	48,0	0,4
	Ef. UASB	25,0	7,2	56,6	780,0	692,0	244,0	189,0	6,9	502,0	116,0	3,0	11,8
16:00hs	Esg. Bruto	20,0	7,1	114,0	1715,0	710,0	156,0	527,0	5,5	608,0	195,0	56,0	0,4
	Ef. UASB	20,0	7,2	39,0	546,0	755,0	228,0	118,0	6,7	342,0	24,0	5,0	5,9
20:00hs	Esg. Bruto	24,0	7,1	130,0	1200,0	720,0	174,0	404,0	5,6	626,0	196,0	65,0	0,2
	Ef. UASB	25,0	7,2	43,5	704,0	750,0	228,0	179,0	6,5	402,0	90,0	9,0	11,0

Desta maneira, conforme apresentado na **Figura 5.25**, verifica-se que durante os ensaios desta fase 3 a temperatura do esgoto bruto e efluente do reator foram muito próximas, sendo calculado valores médios entre 23 e 24 °C. Quanto aos valores de pH, observou-se semelhança entre os resultados do esgoto bruto e efluente anaeróbio, sendo observado resultados próximos a pH 7, variando entre 6,9 a 7,3. Já com relação a turbidez, para o esgoto bruto observou-se valores entre 76 e 133 UNT, sendo menor e maior valores determinados nos horários das 04:00 hs e 08:00 hs, respectivamente. A média de turbidez para o esgoto bruto foi de 112,57 UNT, inferior ao valor médio observado por **CAMPOS et al. (2007)**, cujo valor apresentado pelos autores foi de 251 ± 70 UNT.

Quanto a turbidez no efluente do reator UASB, verificou-se semelhança com relação a curva de variação para o esgoto bruto. A menor turbidez, no entanto, foi verificada às 00:00 hs, valor de 32,7 UNT. Já o maior resultado foi verificado no horário das 08:00 hs, valor de 59 UNT. O valor médio calculado da turbidez no efluente para o período foi de 43,97 UNT, valor que também pode ser considerado baixo, comparado com valor médio apresentado por **CAMPOS et al. (2007)**, que foi de 189 UNT. Quanto a eficiência média do reator UASB, pode-se verificar remoção acima de 60 %, número elevado também comparado ao estudo dos autores citados, que apresentaram valor médio de 24,7 % da remoção de turbidez pelos reatores UASB estudados. Ainda de acordo com a **Figura 5.25**, verifica-se que a cor aparente no esgoto bruto sofreu grande variação no período de 24 horas, com pico no horário das 12:00 hs (3050 mg Pt.L⁻¹). A menor concentração foi verificada no horário das 04:00 horas, cujo valor no esgoto bruto foi de 575 mg Pt.L⁻¹.

Figura 5.25 - Fase 3: Temperatura, pH, Turbidez, Cor aparente, Condutividade e Alcalinidade para o esgoto bruto e efluente do reator UASB ao longo do dia.

No efluente do reator, verificou-se uma variação pequena nos valores de cor aparente ao longo de 24 horas, sendo calculado valor médio de $679,83 \text{ mg Pt.L}^{-1}$. Tal valor foi superior ao resultado de 541 mg Pt.L^{-1} , apresentado por **CAMPOS et al. (2007)**. Quanto a evolução dos resultados de condutividade elétrica no esgoto bruto e efluente do reator, verificou-se proximidade entre a média dos resultados para o período. No entanto, no horário das 04:00 hs o esgoto bruto apresentou o menor resultado ($489 \mu\text{S/cm}$), que destoou dos demais valores plotados no gráfico.

Quanto a alcalinidade, conforme **Figura 5.25**, verificou-se uma grande variação no esgoto bruto, com valores entre 89 a $244 \text{ mg de CaCO}_3.\text{L}^{-1}$ para os horários das 00:00 hs e 12:00 hs, respectivamente. Já para o efluente do reator UASB, notou-se uma baixa variação nos resultados ao longo do dia, com diferença entre os resultados mínimos e máximos da ordem de $12 \text{ mg de CaCO}_3.\text{L}^{-1}$. Ainda, percebeu-se valores sempre superiores de alcalinidade no efluente do UASB, comparado com o esgoto bruto, com valores médios respectivos de 236,50 e $161,17 \text{ mg de CaCO}_3.\text{L}^{-1}$.

Com relação aos resultados de DQO para o esgoto bruto, de acordo com a **Figura 5.26**, verifica-se que o pico de concentração de matéria orgânica pode ser verificado no horário das 12:00 hs, cujo valor medido foi de 595 mg.L^{-1} . Já as menores concentrações foram verificadas durante a madrugada, nos horários das 00:00 e 04:00 hs, com respectivos valores de 175 e 148 mg.L^{-1} .

O valor médio da DQO no esgoto bruto ($391,17 \text{ mg.L}^{-1}$) verificado para os diversos horários nesta fase 3 da pesquisa, situou-se dentro de faixa considerada para esgoto doméstico, proposta por **METCALF & EDDY (2003)**, que varia entre 250 a 800 mg.L^{-1} de DQO. Quanto aos resultados para a DQO no efluente do reator, verificou-se uma maior estabilidade na concentração, com valores máximos e mínimos de respectivamente, 189 e 95 mg.L^{-1} .

Em adição, verificou-se um valor médio da DQO no efluente calculado em $140,83 \text{ mg.L}^{-1}$, inferior ao resultado médio de 184 mg.L^{-1} , apresentado por **CAMPOS et al (2007)**. Quanto a eficiência do reator na remoção de DQO, verificou-se valor médio da ordem de 64 %, resultado próximo ao verificado pelos autores, cujo valor apresentado foi de 64,8 %.

O fósforo no esgoto bruto apresentou variação entre 3,16 a 11,00 mg.L⁻¹ durante o período, já para o efluente do reator verificou-se variação entre 0,86 a 7,62 mg.L⁻¹. Notadamente a maior concentração deste parâmetro foi no período entre 08:00 e 12:00 hs, já os menores resultados foram verificados durante a madrugada.

Quanto aos valores de ST e SST, do esgoto bruto, verificou-se valores médios de respectivamente 536,33 e 180,83 mg.L⁻¹ no período pesquisado. Já no efluente do reator, as concentrações médias de ST e SST foram menores que o esgoto bruto e respectivamente iguais a 462,33 e 68,00 mg.L⁻¹.

Com relação aos valores de sulfato e sulfeto apresentados na **Figura 5.26**, destaca-se a elevada concentração apresentada para o sulfato ao longo do dia, com média de 48,33 mg.L⁻¹, podendo ser considerado alto de acordo com **METCALF & EDDY (2003)**, que determinam faixa para esgoto doméstico entre 20 e 50 mg.L⁻¹.

A concentração de sulfeto também apresentou valores bastante elevados, com pico de 12,9 mg.L⁻¹ e valor médio de 10,68 mg.L⁻¹, durante o período analisado. Tais valores são superiores ao valor médio de 3,34 mg.L⁻¹ apresentado por **CAMPOS et al. (2007)**, também relativo ao monitoramento de efluente de reatores UASB tratando esgoto doméstico.

Figura 5.26 - Fase 3: DQO, Fósforo, Sólidos Totais, Sólidos Suspensos Totais, Sulfato e Sulfeto para o esgoto bruto e efluente do reator UASB ao longo do dia.

5.3.2 Escolha do Coagulante a ser Empregado

Conforme discriminado na metodologia, item 4.6.3, dentre os critérios a serem considerados na escolha do coagulante a ser empregado nas fases seguintes desta pesquisa, pesou o aspecto operacional relacionado ao controle de odores. Desta maneira, o coagulante a ser utilizado deve ter características químicas que permitam auxiliar no controle de odores da ETE Anhumas, o que elimina a possibilidade de utilização de sais de alumínio.

Dentre os coagulantes estudados, o cloreto férrico foi, portanto, escolhido para as análises seguintes desta pesquisa, devido a sua capacidade de reagir com o sulfeto dissolvido no efluente do reator UASB. Conforme verificado na **Figura 5.26**, apresentada no item anterior, de fato a presença de elevadas concentrações de sulfeto no efluente do reator UASB da ETE Anhumas caracteriza-se como uma dificuldade operacional, principalmente após acessar o canal de entrada do sistema de floculação, que inicialmente era aberto e verificado como principal ponto de emissão de odores na estação.

Com o início da operação, diversas medidas foram tomadas pela operação da ETE Anhumas no sentido de mitigar a emissão de H_2S para a atmosfera, dentre as quais destacam-se: i) fechamento do canal de entrada do sistema de floculação e exaustão do ar contaminado com posterior tratamento através de oxidação com ozônio; ii) Monitoramento do pH do esgoto bruto e eventual correção para mante-lo acima de 7 e iii) Uso de cloreto férrico como coagulante em dosagens sempre superiores a 40 mg $\text{FeCl}_3\cdot\text{L}^{-1}$, para precipitação do sulfeto no efluente.

De fato a aplicação de ferro no efluente minimiza a emissão de gás sulfídrico. De acordo com a **Figura 5.27**, estequiometricamente, quando três moles de sulfeto de hidrogênio reagem com 2 moles de cloreto férrico, rapidamente há a formação de um mol de sulfeto de enxofre, precipitado praticamente insolúvel em pH neutro e de tonalidade escura.

No entanto, a substância formada acaba precipitando o enxofre, impedindo que seja emitida grande quantidade de gás sulfídrico para a atmosfera, minimizando a percepção de odor na ETE Anhumas.

Por outro lado, analisando a reação da **Figura 5.27**, nota-se que, estequiometricamente, para cada 1,00 g de ácido sulfídrico dissolvido no efluente são necessários a adição de 3,17 g de cloreto férrico ou 1,09 g de ferro, para que a reação se complete.

Figura 5.27 - Fase 3: Reação do cloreto férrico (FeCl_3) com o ácido sulfídrico (H_2S)

Desta maneira, existe uma demanda de ferro importante que acaba implicando no conseqüente aumento da dosagem de coagulante. O entendimento e a consideração desta reação no cálculo da dosagem necessária para coagulação de efluentes de reatores anaeróbios é fundamental, devido a sua ocorrência em conjunto com a reação do sal de ferro com a alcalinidade durante a mistura rápida.

Assim, considerando as vantagens e desvantagens ora apresentadas, para a seqüência desta pesquisa resolveu-se utilizar o cloreto férrico como coagulante e, conseqüentemente, de acordo com os resultados apresentados na fase 2, respectiva associação com dosagem fixa de $1,00 \text{ mg.L}^{-1}$ do polímero catiônico C8394.

5.3.3 Ensaio com *Flotateste*

Com a definição do coagulante e polímero a ser empregado, foram realizados os ensaios de coagulação-floculação-flotação, através do emprego de *flotateste*.

Assim, foram fixadas as dosagens de $1,00 \text{ mg.L}^{-1}$ de polímero catiônico C8394 para todos os ensaios, sendo realizada a variação da dosagem de cloreto férrico. Conforme já abordado, os ensaios utilizaram o efluente coletado em seis diferentes horários, sendo determinado para cada horário uma melhor dosagem, de acordo com o critério: i) DQO bruta remanescente menor que 50 mg.L^{-1} ; ii) Fósforo Total remanescente menor que $0,50 \text{ mg.L}^{-1}$ e iii) Menor Dosagem de FeCl_3 aplicada.

Desta maneira, são agora apresentados os resultados dos ensaios feitos com efluente coletado nos horários das 00:00; 04:00; 08:00; 12:00; 16:00 e 20:00 hs.

5.3.3.1 Resultados do ensaio realizado com amostra coletada às 00:00 hs

Na **Figura 5.28**, são apresentados os resultados de turbidez remanescente para as diferentes velocidades de flotação estudadas, com a dosagem de cloreto férrico variando entre 12,07 a $22,81 \text{ mg Fe}^{+3}.\text{L}^{-1}$.

Conforme abordado na metodologia, para a análise de qualidade inicial das amostras adotou-se critério de: i) Turbidez remanescente menor que 6 UNT, para $V_f=16 \text{ cm.min}^{-1}$ e ii) Menor Dosagem aplicada.

Conforme pode ser verificado na **Figura 5.28**, algumas dosagens atingiram o primeiro critério (turb. < 6 UNT), desta maneira, as três menores dosagens, de acordo com os resultados apresentados, foram 12,07, 13,42 e $17,44 \text{ mg Fe}^{+3}.\text{L}^{-1}$.

Para estas dosagens, os resultados das medições de Cor aparente, Turbidez, DQO, Fósforo, ST, SST, Sulfato, Condutividade, pH e Alcalinidade para estas dosagens, correspondente a velocidade de flotação de 16 cm.min⁻¹, são apresentados a seguir, **Figura 5.29 e Figura 5.30**.

Figura 5.28 – Fase 3: Resultados de Turbidez para diferentes velocidades de flotação, ensaio com Amostra Coletada às 00:00 hs

Figura 5.29 – Fase 3: Resultados de Cor aparente, Turbidez, DQO, Fósforo, ST e SST, para Vf= 16 cm.min⁻¹, ensaio com amostra coletada às 00:00 hs

Figura 5.30 – Fase 3: Resultados de Sulfato, Condutividade, pH e Alcalinidade, para Vf= 16 cm.min⁻¹, ensaio com amostra coletada às 00:00 hs

Para a definição da melhor dosagem para este ensaio considerou-se a menor dosagem que atendeu o critério de i) Concentração de DQO < 50 mg.L⁻¹ e ii) Concentração de Fósforo < 0,50 mg.L⁻¹. Portanto, de acordo com a **Figura 5.29**, fica definida a dosagem de 12,07 mg Fe⁺³.L⁻¹ como a melhor dosagem para o ensaio realizado com amostra coletada no horário das 00:00 hs e, consequentemente calcula-se o seguinte valor para RD_mT_(0hs):

$$RD_m T_{(0hs)} = 0,370 \text{ mg de Fe}^{+3} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{UNT}^{-1}$$

5.3.3.2 Resultados do ensaio realizado com amostra coletada às 04:00 hs

Na **Figura 5.31**, são apresentados os resultados de turbidez remanescente para as diferentes velocidades de flotação estudadas, com a dosagem de cloreto férrico variando entre 12,07 a 22,81 mg Fe⁺³.L⁻¹.

Figura 5.31 – Fase 3: Resultados de Turbidez para diferentes velocidades de flotação, ensaio com Amostra Coletada às 04:00 hs

Conforme abordado na metodologia, para a análise de qualidade inicial das amostras adotou-se critério de: i) Turbidez remanescente menor que 6 UNT, para $V_f=16 \text{ cm.min}^{-1}$ e ii) Menor Dosagem aplicada.

Conforme pode ser verificado na **Figura 5.31**, algumas dosagens atingiram o primeiro critério ($\text{turb.} < 6 \text{ UNT}$), desta maneira, as três menores dosagens, de acordo com os resultados apresentados, foram 12,07, 13,42 e 14,76 $\text{mg Fe}^{+3}.\text{L}^{-1}$.

Assim, para estas dosagens, os resultados das medições de Cor aparente, Turbidez, DQO, Fósforo, ST, SST, Sulfato, Condutividade, pH e Alcalinidade para estas dosagens, correspondente a velocidade de flotação de 16 cm.min^{-1} , são apresentados a seguir, **Figura 5.32** e **Figura 5.33**.

Figura 5.32 – Fase 3: Resultados de cor aparente, Turbidez, DQO, Fósforo, ST e SST, para Vf= 16 cm.min⁻¹, ensaio com amostra coletada às 04:00 hs

Figura 5.33 – Fase 3: Resultados de Sulfato, Condutividade, pH e Alcalinidade, para Vf= 16 cm.min⁻¹, ensaio com amostra coletada às 04:00 hs

Para a definição da melhor dosagem para este ensaio considerou-se a menor dosagem que atendeu o critério de i) Concentração de DQO < 50 mg.L⁻¹ e ii) Concentração de Fósforo < 0,50 mg.L⁻¹. Portanto, de acordo com a **Figura 5.32**, fica definida a dosagem de 14,76 mg Fe⁺³.L⁻¹ como a melhor dosagem para o ensaio realizado com amostra coletada no horário das 04:00 hs e, conseqüentemente calcula-se o seguinte valor para RD_mT_(4hs):

$$RD_m T_{(4hs)} = 0,448 \text{ mg de Fe}^{+3} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{UNT}^{-1}$$

5.3.3.3 Resultados do ensaio realizado com amostra coletada às 08:00 hs

Na **Figura 5.34**, são apresentados os resultados de turbidez remanescente para as diferentes velocidades de flotação estudadas, com a dosagem de cloreto férrico variando entre 12,07 a 22,81 mg Fe⁺³.L⁻¹.

Conforme abordado na metodologia, para a análise de qualidade inicial das amostras adotou-se critério de: i) Turbidez remanescente menor que 6 UNT, para Vf=16 cm.min⁻¹ e ii) Menor Dosagem aplicada.

Conforme pode ser verificado na **Figura 5.34**, algumas dosagens atingiram o primeiro critério (turb. < 6 UNT), desta maneira, as três menores dosagens, de acordo com os resultados apresentados, foram 13,42, 14,76 e 16,10 mg Fe⁺³.L⁻¹.

Assim, para estas dosagens, os resultados das medições de Cor aparente, Turbidez, DQO, Fósforo, ST, SST, Sulfato, Condutividade, pH e Alcalinidade para estas dosagens, correspondente a velocidade de flotação de 16 cm.min⁻¹, são apresentados a seguir, **Figura 5.35 e Figura 5.36**.

Figura 5.34 – Fase 3: Resultados de Turbidez para diferentes velocidades de flotação, ensaio com Amostra Coletada às 08:00 hs

Figura 5.35 – Fase 3: Resultados de cor aparente, Turbidez, DQO, Fósforo, ST e SST, para Vf= 16 cm.min⁻¹, ensaio com amostra coletada às 08:00 hs

Figura 5.36 – Fase 3: Resultados de Sulfato, Condutividade, pH e Alcalinidade, para Vf= 16 cm.min⁻¹, ensaio com amostra coletada às 08:00 hs

Para a definição da melhor dosagem para este ensaio considerou-se a menor dosagem que atendeu o critério de i) Concentração de DQO < 50 mg.L⁻¹ e ii) Concentração de Fósforo < 0,50 mg.L⁻¹. Portanto, de acordo com a **Figura 5.35**, fica definida a dosagem de 14,76 mg Fe⁺³.L⁻¹ como a melhor dosagem para o ensaio realizado com amostra coletada no horário das 08:00 hs e, conseqüentemente calcula-se o seguinte valor para RD_mT_(8hs):

$$RD_m T_{(8hs)} = 0,250 \text{ mg de Fe}^{+3} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{UNT}^{-1}$$

5.3.3.4 Resultados do ensaio realizado com amostra coletada às 12:00 hs

Na **Figura 5.37**, são apresentados os resultados de turbidez remanescente para as diferentes velocidades de flotação estudadas, com a dosagem de cloreto férrico variando entre 13,42 a 22,81 mg Fe⁺³.L⁻¹.

Conforme abordado na metodologia, para a análise de qualidade inicial das amostras adotou-se critério de: i) Turbidez remanescente menor que 6 UNT, para Vf=16 cm.min⁻¹ e ii) Menor Dosagem aplicada.

Conforme pode ser verificado na **Figura 5.37**, algumas dosagens atingiram o primeiro critério (turb. < 6 UNT), desta maneira, as três menores dosagens, de acordo com os resultados apresentados, foram 13,42, 14,76 e 17,44 mg Fe⁺³.L⁻¹.

Assim, para estas dosagens, os resultados das medições de Cor aparente, Turbidez, DQO, Fósforo, ST, SST, Sulfato, Condutividade, pH e Alcalinidade para estas dosagens, correspondente a velocidade de flotação de 16 cm.min⁻¹, são apresentados a seguir, **Figura 5.38 e Figura 5.39**.

Figura 5.37 – Fase 3: Resultados de Turbidez para diferentes velocidades de flotação, ensaio com Amostra Coletada às 12:00 hs

Figura 5.38 – Fase 3: Resultados de cor aparente, Turbidez, DQO, Fósforo, ST e SST, para Vf= 16 cm.min⁻¹, ensaio com amostra coletada às 12:00 hs

Figura 5.39 – Fase 3: Resultados de Sulfato, Condutividade, pH e Alcalinidade, para Vf= 16 cm.min⁻¹, ensaio com amostra coletada às 12:00 hs

Para a definição da melhor dosagem para este ensaio considerou-se a menor dosagem que atendeu o critério de i) Concentração de DQO < 50 mg.L⁻¹ e ii) Concentração de Fósforo < 0,50 mg.L⁻¹. Portanto, de acordo com a **Figura 5.38**, fica definida a dosagem de 13,42 mg Fe⁺³.L⁻¹ como a melhor dosagem para o ensaio realizado com amostra coletada no horário das 12:00 hs e, conseqüentemente calcula-se o seguinte valor para RD_mT_(12hs):

$$RD_m T_{(12hs)} = 0,237 \text{ mg de Fe}^{+3} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{UNT}^{-1}$$

5.3.3.5 Resultados do ensaio realizado com amostra coletada às 16:00 hs

Na **Figura 5.40**, são apresentados os resultados de turbidez remanescente para as diferentes velocidades de flotação estudadas, com a dosagem de cloreto férrico variando entre 17,44 a 28,17 mg Fe⁺³.L⁻¹.

Conforme abordado na metodologia, para a análise de qualidade inicial das amostras adotou-se critério de: i) Turbidez remanescente menor que 6 UNT, para Vf=16 cm.min⁻¹ e ii) Menor Dosagem aplicada.

Conforme pode ser verificado na **Figura 5.40**, algumas dosagens atingiram o primeiro critério (turb. < 6 UNT), desta maneira, as três menores dosagens, de acordo com os resultados apresentados, foram 17,44, 18,78 e 20,12 mg Fe⁺³.L⁻¹.

Assim, para estas dosagens, os resultados das medições de Cor aparente, Turbidez, DQO, Fósforo, ST, SST, Sulfato, Condutividade, pH e Alcalinidade para estas dosagens, correspondente a velocidade de flotação de 16 cm.min⁻¹, são apresentados a seguir, **Figura 5.41** e **Figura 5.42**.

Dosagem		Turbidez (NTU)				pH Coag.
		Velocidade de Flotação (cm/min)				
mgSoluçãoFeCl ₃ .L ⁻¹	(mgFeCl ₃ /L)	8,00	12,00	16,00	20,00	
130,00	17,44	1,08	1,78	5,90	4,22	6,08
140,00	18,78	0,85	0,98	4,88	5,38	6,04
150,00	20,12	1,00	1,03	1,73	3,45	5,98
160,00	21,47	0,86	1,01	3,14	2,79	5,89
170,00	22,81	1,01	1,55	4,21	8,64	5,91
180,00	24,15	0,85	1,28	2,24	2,04	5,82
190,00	25,49	0,75	1,41	2,60	2,73	5,63
200,00	26,83	0,54	0,79	0,84	2,13	5,52
210,00	28,17	3,48	3,34	3,39	3,45	5,64

Condições do ensaio:

Gmr=800 s-1; Tmr=15 s; Gfloc= 90 s-1; Tfloc= 20 min; R=17 %; Psat= 5,0 ± 0,2 Bar; Temp. = 20 ± 2° C.

Dados da Coleta:

Data: 23.04.2009

Horário: 16:00 hs.

Dados Solução Cloreto Férrico:

C= 39 %

Dosagem fixa de Polímero Catiônico (C8394):

D = 1,00 mg. L⁻¹

Características Efluente:

Temp.=20°C; pH=7,19; Cor aparente= 546 mgPt.L-1; Condutividade=755 µS.cm-1; Turb.=39 UNT; DQO=118 mg.L-1; Fósforo=6,71 mg.L-1; Sulfeto=5,9 mg.L-1; Alcalinidade Total=228 mgCaCO₃.L-1; ST=342 mg.L-1; SST=24 mg.L-1 e Sulfato=5 mg.L-1.

Figura 5.40 – Fase 3: Resultados de Turbidez para diferentes velocidades de flotação, ensaio com Amostra Coletada às 16:00 hs

Figura 5.41 – Fase 3: Resultados de cor aparente, Turbidez, DQO, Fósforo, ST e SST, para Vf= 16 cm.min⁻¹, ensaio com amostra coletada às 16:00 hs

Figura 5.42 – Fase 3: Resultados de Sulfato, Condutividade, pH e Alcalinidade, para Vf= 16 cm.min⁻¹, ensaio com amostra coletada às 16:00 hs

Para a definição da melhor dosagem para este ensaio considerou-se a menor dosagem que atendeu o critério de i) Concentração de DQO < 50 mg.L⁻¹ e ii) Concentração de Fósforo < 0,50 mg.L⁻¹. Portanto, de acordo com a **Figura 5.41**, fica definida a dosagem de 17,44 mg Fe⁺³.L⁻¹ como a melhor dosagem para o ensaio realizado com amostra coletada no horário das 16:00 hs e, conseqüentemente calcula-se o seguinte valor para RD_mT_(16hs):

$$RD_{mT(16hs)} = 0,448 \text{ mg de Fe}^{+3} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{UNT}^{-1}$$

5.3.3.6 Resultados do ensaio realizado com amostra coletada às 20:00 hs

Na **Figura 5.43**, são apresentados os resultados de turbidez remanescente para as diferentes velocidades de flotação estudadas, com a dosagem de cloreto férrico variando entre 18,78 a 28,17 mg Fe⁺³.L⁻¹.

Conforme abordado na metodologia, para a análise de qualidade inicial das amostras adotou-se critério de: i) Turbidez remanescente menor que 6 UNT, para Vf=16 cm.min⁻¹ e ii) Menor Dosagem aplicada.

Conforme pode ser verificado na **Figura 5.43**, algumas dosagens atingiram o primeiro critério (turb. < 6 UNT), desta maneira, as três menores dosagens, de acordo com os resultados apresentados, foram 20,12, 24,15 e 25,49 mg Fe⁺³.L⁻¹.

Assim, para estas dosagens, os resultados das medições de Cor aparente, Turbidez, DQO, Fósforo, ST, SST, Sulfato, Condutividade, pH e Alcalinidade para estas dosagens, correspondente a velocidade de flotação de 16 cm.min⁻¹, são apresentados a seguir, **Figura 5.44** e **Figura 5.45**.

Dosagem		Turbidez (NTU)				pH Coag.
		Velocidade de Flotação (cm/min)				
mgSoluçãoFeCl ₃ .L ⁻¹	(mgFeCl ₃ /L)	8,00	12,00	16,00	20,00	
140,00	18,78	3,02	4,51	6,61	13,25	6,40
150,00	20,12	1,65	1,71	4,34	6,55	6,40
160,00	21,47	1,47	2,29	11,84	8,62	6,10
170,00	22,81	1,81	2,23	8,11	9,43	6,01
180,00	24,15	0,99	0,93	3,05	3,81	5,80
190,00	25,49	1,03	1,22	3,29	2,89	5,80
200,00	26,83	1,05	1,02	1,72	2,07	5,60
210,00	28,17	1,17	1,37	1,30	5,23	5,40

Condições do ensaio:

Gmr=800 s⁻¹; Tmr=15 s; Gfloc= 90 s⁻¹; Tfloc= 20 min; R=17 %; Psat= 5,0 ± 0,2 Bar; Temp. = 25 ± 2° C.

Dados da Coleta:

Data: 08.05.2009

Horário: 20:00 hs.

Dados Solução Cloreto Férrico:

C= 39 %

Dosagem fixa de Polímero Catiônico (C8394):

D = 1,00 mg. L⁻¹

Características Efluente:

Temp.=25°C; pH=7,20; Cor aparente= 704 mgPt.L⁻¹; Condutividade=750 µS.cm⁻¹; Turb.=43,5 UNT; DQO=179 mg.L⁻¹; Fósforo=6,5 mg.L⁻¹; Sulfeto=11 mg.L⁻¹; Alcalinidade Total=228 mgCaCO₃.L⁻¹; ST=402 mg.L⁻¹; SST=90 mg.L⁻¹ e Sulfato=9 mg.L⁻¹.

Figura 5.43 – Fase 3: Resultados de Turbidez para diferentes velocidades de flotação, ensaio com Amostra Coletada às 20:00 hs

Figura 5.44 – Fase 3: Resultados de cor aparente, Turbidez, DQO, Fósforo, ST e SST, para Vf= 16 cm.min⁻¹, ensaio com amostra coletada às 20:00 hs

Figura 5.45 – Fase 3: Resultados de Sulfato, Condutividade, pH e Alcalinidade, para Vf= 16 cm.min⁻¹, ensaio com amostra coletada às 20:00 hs

Para a definição da melhor dosagem para este ensaio considerou-se a menor dosagem que atendeu o critério de i) Concentração de DQO < 50 mg.L⁻¹ e ii) Concentração de Fósforo < 0,50 mg.L⁻¹. Portanto, de acordo com a **Figura 5.44**, fica definida a dosagem de 25,49 mg Fe⁺³.L⁻¹ como a melhor dosagem para o ensaio realizado com amostra coletada no horário das 20:00 hs e, conseqüentemente calcula-se o seguinte valor para RD_mT_(20hs):

$$RD_m T_{(20hs)} = 0,586 \text{ mg de Fe}^{+3} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{UNT}^{-1}$$

5.3.4 Resumo da Fase 3

Após o término da fase 3 desta pesquisa, foi possível estabelecer para cada um dos horários estudados a melhor dosagem de cloreto férrico e o respectivo valor para RD_mT . Assim, na **Tabela 5.8** é apresentado um resumo dos resultados da fase 3, os quais serviram de base para os cenários a serem estudados na fase seguinte desta pesquisa.

Tabela 5.8 – Resumo dos Resultados e Relações para as Melhores Dosagens da Fase 3

Horário	Efluente UASB			ENSAIO COM FLOTATESTES - $V_f=16$ cm/min							
	Turb.	DQO	Fósforo	Melhor Dosagem	RD_mT	Turbidez (UNT)		DQO (mg/L)		Fósforo (mg/L)	
	(UNT)	(mg.L ⁻¹)	(mg.L ⁻¹)	(mg Fe ⁺³ .L ⁻¹)	mg Fe ⁺³ .L ⁻¹ .UNT ⁻¹	Residual	Ef. (%) *	Residual	Ef. (%) *	Residual	Ef. (%) *
00:00hs	32,70	139,00	0,86	12,07	0,370	5,60	82,87	33,00	76,26	0,37	56,98
04:00hs	33,00	125,00	7,62	14,76	0,448	4,97	84,94	43,00	65,60	0,18	97,64
08:00hs	59,00	95,00	6,95	14,76	0,250	3,57	93,95	26,00	83,75	0,44	93,58
12:00hs	56,60	189,00	6,90	13,42	0,237	5,27	90,69	29,00	84,66	0,36	94,78
16:00hs	39,00	118,00	6,71	17,44	0,448	5,90	84,87	42,00	64,41	0,21	96,87
20:00hs	43,50	179,00	6,50	25,51	0,586	3,29	92,44	45,00	74,86	0,15	97,69

* Eficiência calculada em relação a característica do efluente do reator UASB.

Data Ensaios: 15 e 16.06.2009.

5.4 RESULTADOS DA FASE 4

Analisando os resultados da fase 3 desta pesquisa, verificou-se que as dosagens determinadas na fase anterior variaram entre 12,07 a 25,51 mg Fe⁺³.L⁻¹. Não obstante, notou-se que os valores calculados da RD_mT variaram numa ampla faixa, entre 0,237 e 0,586 mg de Fe⁺³.L⁻¹.UNT⁻¹ (**Tabela 5.8**).

No entanto, foi observado fato interessante ao se dividir os resultados em dois grupos distintos, de acordo com valor de turbidez no efluente maior ou menor do que 50 UNT (**Tabela 5.9**).

Tabela 5.9 – Divisão dos resultados da fase 3 em dois grupos de acordo com a turbidez

Horário	Efluente UASB			ENSAIO COM FLOTATESTES - Vf=16 cm/min							
	Turb.	DQO	Fósforo	Melhor Dosagem	RD _m T	Turbidez (UNT)		DQO (mg/L)		Fósforo (mg/L)	
	(UNT)	(mg.L ⁻¹)	(mg.L ⁻¹)	(mg Fe ⁺³ .L ⁻¹)	mg Fe ⁺³ .L ⁻¹ .UNT ⁻¹	Residual	Ef. (%) *	Residual	Ef. (%) *	Residual	Ef. (%) *
00:00hs	32,70	139,00	0,86	12,07	0,370	5,60	82,87	33,00	76,26	0,37	56,98
04:00hs	33,00	125,00	7,62	14,76	0,448	4,97	84,94	43,00	65,60	0,18	97,64
08:00hs	59,00	95,00	6,95	14,76	0,250	3,57	93,95	26,00	83,75	0,44	93,58
12:00hs	56,60	189,00	6,90	13,42	0,237	5,27	90,69	29,00	84,66	0,36	94,78
16:00hs	39,00	118,00	6,71	17,44	0,448	5,90	84,87	42,00	64,41	0,21	96,87
20:00hs	43,50	179,00	6,50	25,51	0,586	3,29	92,44	45,00	74,86	0,15	97,69

* Eficiência calculada em relação a característica do efluente do reator UASB.

Legenda:

Ensaios cuja turbidez no efluente foi maior que 50 UNT;

Ensaios cuja turbidez no efluente foi menor que 50 UNT.

Data Ensaios: 15 e 16.06.2009.

Analisando a **Tabela 5.9**, verifica-se que os valores de RD_mT calculados, para os ensaios em que a turbidez no efluente do reator UASB foi superior a 50 UNT, situaram em faixa mais estreita, entre 0,237 e 0,250 mg de Fe⁺³.L⁻¹.UNT⁻¹. Não obstante, para os ensaios cuja turbidez no efluente foi menor que 50 UNT, também pode ser observado uma faixa mais estreita de valores calculados para RD_mT, entre 0,370 e 0,586 mg de Fe⁺³.L⁻¹.UNT⁻¹.

A nítida divisão em dois grupos de resultados calculados da RD_mT, de acordo com a turbidez no efluente maior ou menor que 50 UNT, permitiu chegar a algumas inferências quanto a aplicação da **equação 4.3** a ser utilizada no 3º cenário desta fase 4, sendo:

- A aplicação da média aritmética entre todos os valores de RD_mT calculados poderia implicar em dosagens acima das necessárias, quando a turbidez no efluente atingisse valores superiores a 50 UNT, visto que nesta situação verificou-se os menores valores calculados da RD_mT;
- De forma inversa, quando a turbidez no efluente atingisse valores menores que 50 UNT, a aplicação da **equação 4.3** poderia implicar em dosagens insuficientes, visto que nesta situação foram verificados os maiores valores da RD_mT na fase 3.

Devido a estas suspeitas, decidiu-se incluir um quarto cenário de dosagens a ser observado durante esta fase 4, sendo portanto estabelecidos os quatro cenários a seguir apresentados:

- 1° Cenário: Conforme definido na metodologia, neste cenário foi fixada a maior dosagem dentre as estabelecidas na fase 3, associada a 1,00 mg.L⁻¹ de polímero catiônico C8394. Desta maneira, conforme verificado na **Tabela 5.8**, foi fixada a dosagem de **25,51 mg Fe⁺³.L⁻¹**, para todos os horários estudados;
- 2° Cenário: De forma inversa, neste segundo cenário foi fixada a menor dosagem dentre as estabelecidas na fase 3, também associada a 1,00 mg.L⁻¹ de polímero catiônico C8394. Portanto, conforme **Tabela 5.8**, a dosagem de **12,07 mg Fe⁺³.L⁻¹** foi fixada para todos os horários estudados;
- 3° Cenário: No terceiro cenário foi realizado o cálculo da RD_{mT(média)}, conforme explicado na metodologia (**equação 4.2**), o que resultou no valor de 0,390 mg de Fe⁺³.L⁻¹.UNT⁻¹. Assim, para este cenário a Dosagem de Coagulante Aplicada (DCA) obedeceu a **equação 5.1**, apresentada a seguir:

DCA (mgFe⁺³.L⁻¹) = Turb. UASB (UNT) x 0,390 (mgFe⁺³.L⁻¹.UNT⁻¹)	(equação 5.1)
--	----------------------

- 4° Cenário: No quarto cenário foram calculados dois valores para RD_{mT(média)}, sendo um para os valores de RD_{mT} obtidos nos ensaios em que a turbidez no efluente anaeróbio foi menor que 50 UNT, e outra utilizando os valores de RD_{mT} obtidos nos ensaios cuja turbidez foi maior que 50 UNT. Assim, utilizando novamente a **equação 4.2**, chegou-se aos valores de RD_{mT(média<50)} e RD_{mT(média≥50)}, sendo 0,463 e 0,244 mg de Fe⁺³.L⁻¹.UNT⁻¹, respectivamente. Assim, a Dosagem de Coagulante Aplicada (DCA) no quarto cenário foi de acordo com a **equação 5.2** e **equação 5.3**, apresentadas a seguir:

Assim, se a turbidez no efluente foi menor que 50 UNT, utilizou-se:

$$\text{DCA (mgFe}^{+3}\text{.L}^{-1}\text{)} = \text{Turb. UASB (UNT)} \times \mathbf{0,463 \text{ (mgFe}^{+3}\text{.L}^{-1}\text{.UNT}^{-1}\text{)}} \quad \text{(equação 5.2)}$$

Se a turbidez no efluente foi maior ou igual a 50 UNT, utilizou-se:

$$\text{DCA (mgFe}^{+3}\text{.L}^{-1}\text{)} = \text{Turb. UASB (UNT)} \times \mathbf{0,244 \text{ (mgFe}^{+3}\text{.L}^{-1}\text{.UNT}^{-1}\text{)}} \quad \text{(equação 5.3)}$$

Definidos os cenários, a seguir são apresentados os resultados desta fase final da pesquisa, através dos seguintes itens: caracterização do efluente do reator UASB e aplicação dos cenários de dosagens durante 24 horas.

5.4.1 Caracterização do Efluente do Reator UASB

Nesta fase final da pesquisa foram realizadas doze coletas num intervalo de 24 horas, a fim de se aplicar os cenários de dosagens estabelecidos. As características do efluente em cada um dos horários considerados são agora apresentadas através da **Tabela 5.10**.

Tabela 5.10 – Fase 4: Características do Efluente do Reator UASB ao longo do dia

Variáveis	Unidade	Horário (horas)											
		0:00	2:00	4:00	6:00	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00	22:00
Temperatura	°C	18,00	17,00	18,00	18,00	22,00	23,00	25,00	26,00	24,00	24,00	22,00	20,00
pH	UpH	7,15	7,12	7,21	7,12	7,10	7,29	6,59	7,17	7,30	7,29	7,17	7,22
Turbidez	UNT	52,90	49,20	46,60	42,90	61,00	102,00	45,50	85,40	67,00	60,90	72,60	60,70
Alcalinidade Total	mg CaCO ₃ /L	244,00	241,00	243,00	243,00	234,00	231,00	236,00	252,00	240,00	241,00	240,00	247,00
DQO bruta	mg/L	207,00	175,00	171,00	161,00	155,00	186,00	223,00	228,00	247,00	217,00	185,00	205,00
DQO solúvel	mg/L	104,00	93,00	89,00	114,00	100,00	80,00	91,00	92,00	95,00	91,00	99,00	102,00
Fósforo Total	mg/L	7,60	6,60	6,40	7,40	6,70	8,20	7,80	9,80	10,00	9,40	9,10	8,50
Sólidos Totais	mg/L	438,00	384,00	364,00	376,00	598,00	652,00	674,00	780,00	722,00	688,00	462,00	458,00
Sól. Susp. Totais	mg/L	100,00	64,00	60,00	46,00	64,00	90,00	124,00	262,00	116,00	138,00	100,00	98,00
Sulfeto	mg/L	15,10	15,30	15,50	15,20	13,30	11,40	9,40	10,60	12,80	14,20	15,30	14,80

Data Coletas: 15 e 16.06.2009.

Conforme a **Figura 5.46**, com relação à temperatura, verificou-se uma variação ao longo do dia pesquisa de 17 a 26 °C, com temperatura média de 21,4 °C, calculada para o período. Já com relação ao pH, ao longo do dia os valores variaram entre 6,59 a 7,30, com valores mínimos e máximos verificados nos horários das 12:00 e 16:00 horas, respectivamente.

Figura 5.46 – Fase 4: Resultados de Temperatura e pH no efluente do reator UASB ao longo de 24 horas.

Com relação aos valores de turbidez no efluente do reator no evento dos ensaios da fase 4, verifica-se através da **Figura 5.47** que a turbidez variou entre 42,9 a 102 UNT durante as 24 horas monitoradas, sendo valor médio de 62,3 UNT calculado para o período. Tais valores confirmam a característica de baixa turbidez do efluente do reator, também obtidas nas fases anteriores desta pesquisa. De fato, comparando com os resultados apresentados por **CAMPOS et al. (2007)**, nota-se que o valor médio de turbidez apresentado pelos autores foi superior ao obtido e igual a 189 UNT.

Figura 5.47 – Fase 4: Resultados de Turbidez no efluente do reator UASB ao longo de 24 horas.

A alcalinidade total no efluente do reator UASB apresentou-se estável durante as 24 horas monitoradas, com valores sempre superiores a $231 \text{ mg de CaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$ (**Figura 5.48**). Esta característica fortalece os resultados dos ensaios das fases anteriores e confirma a boa característica do efluente quanto a esta variável para o pós tratamento físico-químico com eletrólitos a base de ferro e alumínio.

Figura 5.48 – Fase 4: Resultados de Alcalinidade no efluente do reator UASB ao longo de 24 horas.

Com relação aos valores de DQO, conforme **Figura 5.49**, nota-se que os valores de DQO bruta situaram-se entre 155 a 247 mg.L^{-1} , nos horários de 08:00 e 16:00 hs, respectivamente. O valor médio calculado foi de 197 mg.L^{-1} para o período monitorado, com coletas a cada duas horas. Este resultado médio situou-se próximo ao apresentado por **CAMPOS et al. (2007)**, onde os autores indicaram valor de 184 mg.L^{-1} no monitoramento da DQO bruta de três reatores UASB. Quanto à fração solúvel da DQO, para o período analisado, verificou-se maior evidência no período da manhã, onde a DQO bruta apresentou resultados menores, mas a DQO solúvel manteve-se sempre acima de 89 mg.L^{-1} . No período após às 12:00 horas, foi verificado uma redução da fração solúvel da DQO nas amostras, podendo-se inferir através da projeção dos gráficos um aumento na fração insolúvel na composição da DQO.

Figura 5.49 – Fase 4: Resultados de DQO bruta e DQO solúvel no efluente do reator UASB ao longo de 24 horas

Os valores de fósforo no efluente ao longo das 24 horas monitoradas situaram-se sempre acima de 6,40, com pico de concentração determinado no horário das 16:00 hs, cujo valor foi de 10,00 mg.L⁻¹ (**Figura 5.50**). O valor médio de fósforo no efluente calculado para o período foi de 8,13 mg.L⁻¹, podendo ser considerado elevado quando

comparado ao valor médio de $4,84 \text{ mg.L}^{-1}$, apresentado por **CAMPOS et al. (2007)** no monitoramento de efluente de reator UASB tratando esgoto doméstico.

Figura 5.50 – Fase 4: Resultados de Fósforo no efluente do reator UASB ao longo de 24 horas

Quanto a concentração de ST e SST no efluente do reator ao longo das 24 horas, verificou-se os maiores resultados no período entre 12:00 e 18:00 hs. Não obstante, os menores resultados para ambas variáveis foram verificados no período da madrugada entre 00:00 e 06:00 hs, conforme **Figura 5.51**. O valor médio de 105 mg.L^{-1} de SST calculado durante o período pesquisado foi superior ao apresentado por **CAMPOS et al. (2007)**, onde os autores determinaram valor médio de 78 mg.L^{-1} no efluente dos reatores monitorados.

Figura 5.51 – Fase 4: Resultados de Sólidos Totais (ST) e Sólidos Suspensos Totais (SST) no efluente do reator UASB ao longo de 24 horas

Por fim, através da **Figura 5.52**, são apresentados novamente os resultados da concentração de sulfeto no efluente do reator UASB ao longo das 24 hs monitoradas nesta fase 4. Os resultados confirmam a tendência de elevadas concentrações desta substância no efluente do reator UASB da ETE Anhumas. De acordo com o gráfico,

pode-se verificar que a concentração de sulfeto foi sempre superior a $9,40 \text{ mg.L}^{-1}$, atingindo em diversos horários do dia valores superiores a 15 mg.L^{-1} . O valor médio para o período foi calculado em $13,58 \text{ mg.L}^{-1}$, também superior ao valor médio de $3,34 \text{ mg.L}^{-1}$ calculado por CAMPOS et al. (2007).

Figura 5.52 – Fase 4: Resultados de Sulfeto no efluente do reator UASB ao longo de 24 horas

5.4.2 Aplicação dos Cenários de Dosagens Durante 24 horas

Depois de verificadas as características do efluente, são agora apresentados os resultados dos ensaios de aplicação dos cenários de dosagens de coagulante e polímero, abordados anteriormente. Na **Figura 5.53** e **Tabela 5.11**, pode-se verificar os resultados de turbidez remanescente para as quatro velocidades de flotação estudadas, durante o período de 24 horas.

Figura 5.53 – Fase 4: Resultados de turbidez remanescente para os 4 cenários de dosagens durante período de 24 horas

Avaliando os resultados apresentados na **Figura 5.53**, pode-se verificar que os cenários 1, 2 e 4 apresentaram resultados satisfatórios para remoção de turbidez na maioria dos horários estudados, apresentando turbidez inferior a 15 UNT nas velocidades de flotação inferiores a $16 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ ($TAS < 230,4 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) e inferiores a 20 UNT na velocidade de flotação de $20 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ ($TAS < 288 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$).

Com relação ao 3º Cenário estudado foi observado mal comportamento para valores de turbidez elevadas, o que resultou em dosagens muito altas quando da utilização da **equação 5.1** proposta, cujo valor para $RD_m T_{(média)}$ foi de 0,390. Tal fato culminou em

maus resultados nos horários das 10:00 e 14:00 hs, onde os resultados de turbidez afluente verificados foram de 102 e 85,4 UNT, respectivamente.

Tabela 5.11 – Fase 4: Resumo dos resultados dos ensaios

Horário	Efluente UASB		Cenário	Dosagem (mgFe/L)	Amostra Flotatestes - Turbidez (UNT)				Coagulação pH
	Turbidez (UNT)	pH			Vf=8 cm/min	Vf=12 cm/min	Vf=16 cm/min	Vf=20 cm/min	
0	52,9	7,15	1	25,5	2,37	2,61	5,47	12,35	5,77
			2	12,1	8,92	10,01	11,97	16,32	6,28
			3	20,6	2,03	3,73	6,64	12,10	5,99
			4	12,9	6,93	7,90	12,45	14,91	6,25
2	49,2	7,12	1	25,5	1,93	4,26	7,11	15,58	5,80
			2	12,1	5,97	6,37	11,77	12,90	6,30
			3	19,2	2,06	2,44	5,58	12,84	6,07
			4	22,8	2,52	1,84	2,38	5,04	5,80
4	46,6	7,21	1	25,5	1,67	1,61	5,46	6,77	5,80
			2	12,1	8,79	9,49	12,07	20,90	6,30
			3	18,2	2,97	3,13	4,35	8,28	6,09
			4	21,5	0,98	1,89	3,99	7,19	5,88
6	42,9	7,12	1	25,5	1,14	1,81	4,55	7,25	5,81
			2	12,1	8,04	8,42	10,05	13,58	6,29
			3	16,7	3,38	4,24	5,14	8,85	6,16
			4	19,8	1,82	2,27	2,74	5,21	6,08
8	61	7,1	1	25,5	8,77	8,81	8,86	9,61	5,16
			2	12,1	6,56	8,27	10,17	14,24	6,21
			3	23,8	2,18	3,98	8,09	11,42	5,60
			4	14,9	3,58	4,93	7,11	13,60	6,16
10	102	7,29	1	25,5	2,03	2,14	2,30	3,61	5,55
			2	12,1	2,95	4,08	6,79	6,26	6,15
			3	39,7	163,00	172,00	187,00	211,00	3,10
			4	24,8	1,98	1,68	2,07	2,06	5,60
12	45,5	6,59	1	25,5	2,12	1,47	1,48	1,63	5,16
			2	12,1	2,78	3,10	4,06	5,46	6,17
			3	17,7	0,95	2,01	4,11	8,71	5,90
			4	21,0	0,90	1,08	1,45	4,24	5,67
14	85,4	7,17	1	25,5	1,77	1,98	1,76	1,84	5,16
			2	12,1	1,39	2,18	3,30	7,41	6,12
			3	33,3	56,70	64,70	63,10	80,30	3,30
			4	20,8	0,79	1,07	1,54	2,10	5,60
16	67	7,3	1	25,5	1,14	1,22	2,28	3,57	5,43
			2	12,1	4,85	6,01	8,96	11,54	6,17
			3	26,1	1,57	1,42	2,05	5,15	5,33
			4	16,3	1,43	2,07	5,09	11,72	6,01
18	60,9	7,29	1	25,5	1,24	3,43	7,13	17,55	5,70
			2	12,1	6,96	9,16	11,84	17,88	6,28
			3	23,7	1,56	3,22	4,58	9,10	5,78
			4	14,8	3,01	3,94	4,75	8,64	6,14
20	72,6	7,17	1	25,5	1,44	3,14	6,19	7,93	5,76
			2	12,1	7,12	8,21	9,88	13,30	6,27
			3	28,3	1,52	1,63	1,80	3,83	5,50
			4	17,7	2,16	2,87	5,84	8,45	6,03
22	60,7	7,22	1	25,5	1,46	2,27	4,57	10,09	5,68
			2	12,1	5,74	6,60	9,04	11,48	6,24
			3	23,6	1,40	3,27	5,13	19,51	5,75
			4	14,8	2,93	3,82	6,92	12,33	6,12

Os resultados verificados para os cenários de dosagens 1, 2 e 4 demonstraram bom comportamento quanto a remoção de turbidez. No entanto, para se realizar uma melhor inferência quanto a remoção de sólidos em suspensão pelo sistema de FAD para os três melhores cenários verificados, foi realizado uma correlação entre os resultados de turbidez e SST, para 44 amostras obtidas relativas a velocidade de flotação de 16 cm.min⁻¹ (TAS =230,4 m³.m⁻².d⁻¹), em ensaios com *flotatestes* realizados nesta pesquisa. Assim, na **Figura 5.54** é apresentado a correlação obtida entre turbidez (UNT) e SST (mg.L⁻¹) para o efluente da FAD, no pós-tratamento do reator UASB da ETE Anhumas.

Figura 5.54 – Fase 4: Correlação Turbidez X SST para efluente FAD coletado na Vf = 16 cm.min⁻¹ (TAS = 230,4 m³.m⁻².d⁻¹).

O resultado do coeficiente de determinação (R^2) próximo de 1, indica boa correlação entre os parâmetros, sendo calculado que 94,64 % da variância dos dados observados pode ser explicada pelo modelo.

Na **Figura 5.55**, é apresentado gráfico contendo a variação da vazão na entrada do sistema de floculação da ETE anhumas, calha Parshall ilustrada na **Figura 4.8** (item 4.1.2), no evento dos ensaios desta fase 4 (15 e 16.06.2009).

Figura 5.55 – Fase 4: Hidrograma de vazões afluente ao sistema de FAD da ETE Anhumas na data dos ensaios (15 e 16.06.2009).

Desta maneira, de posse dos gráficos apresentados na **Figura 5.54** e **Figura 5.55**, é possível avaliar de forma mais precisa os resultados dos ensaios desta fase 4 obtidos pelos cenários 1, 2 e 4.

Analisando a **Figura 5.56**, verifica-se que para $V_f=8 \text{ cm.min}^{-1}$ ($TAS=115,2 \text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$), puderam ser calculadas as seguintes cargas de SST remanescentes no efluente da FAD: 258,51 Kg de SST. d^{-1} (cenário 1), 480,09 Kg de SST. d^{-1} (cenário 2), 1755,92 Kg de SST. d^{-1} (cenário 3) e 269,67 Kg de SST. d^{-1} (cenário 4).

Condições do ensaio:

Gmr=800 s⁻¹; Tmr=15 s; Gfloc= 90 s⁻¹; Tfloc= 20 min; R=17 %; Psat= 5,0 ± 0,2 Bar; Temp. = 21 ± 5° C.

Dados da Coleta:

Data: 15.06.2009 - Horários: 08; 12; 16; 18; 20 e 22 hs.

Data: 16.06.2009 - Horários: 00; 02; 04; e 06 hs.

Dados Solução Cloreto Férrico:

C= 39 %

Dosagem fixa de Polímero Catiônico (C8394):

D = 1,00 mg. L⁻¹

Características Efluente:

Ver Tabela 5.10.

Figura 5.56 – Fase 4: Comparação entre os cenários de dosagens estudados quanto a remoção de lodo.

Ainda de acordo com a **Figura 5.56**, para Vf=12 cm.min⁻¹ (TAS=172,8 m³.m⁻².d⁻¹), verificou-se um acréscimo sutil nos valores calculados para as cargas de SST remanescentes no efluente da FAD, para todos os cenários, sendo eles: 300,66 Kg de SST.d⁻¹ (cenário 1), 553,21 Kg de SST.d⁻¹ (cenário 2), 2936,29 Kg de SST.d⁻¹ (cenário 3) e 306,16 Kg de SST.d⁻¹ (cenário 4).

De forma análoga, para $V_f=16 \text{ cm.min}^{-1}$ ($TAS=230,4 \text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$), verificou-se também um acréscimo nos valores calculados para as cargas de SST remanescentes no efluente da FAD, para todos os cenários: 413,91 Kg de SST. d^{-1} (cenário 1), 709,22 Kg de SST. d^{-1} (cenário 2), 2114,89 Kg de SST. d^{-1} (cenário 3) e 427,27 Kg de SST. d^{-1} (cenário 4).

Não obstante, conforme **Figura 5.56**, também para $V_f = 20 \text{ cm.min}^{-1}$ ($TAS = 288 \text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$), verificou-se novamente acréscimo nos valores calculados para as cargas de SST remanescentes no efluente da FAD, para todos os cenários, sendo verificado os maiores valores, sendo eles: 637,11 Kg de SST. d^{-1} (cenário 1), 936,8 Kg de SST. d^{-1} (cenário 2), 2705,66 Kg de SST. d^{-1} (cenário 3) e 656,20 Kg de SST. d^{-1} (cenário 4).

Novamente fica evidente o resultado insatisfatório obtido com a aplicação da $RD_m T_{(média)}$ nesta fase 4 (cenário 3). De fato, a aplicação da **equação 5.1**, implicou em menor remoção de lodo biológico (em termos de SST) que todos os outros cenários avaliados, inclusive o cenário 2, que aplicou dosagem fixa de apenas $12,07 \text{ mg Fe}^{+3}.\text{L}^{-1}$ ($35 \text{ mg FeCl}_3.\text{L}^{-1}$) para todos os horários.

Em adição, analisando novamente a **Figura 5.56**, verifica-se que o cenário 2 apresentou bons resultados quando considerado apenas a remoção de lodo biológico proveniente do reator UASB (em termos de SST), com valores que se aproximaram dos obtidos nos cenários 1 e 4.

Com relação a aplicação de dosagem fixa de $25,5 \text{ mg Fe}^{+3}.\text{L}^{-1}$ ($74 \text{ mg FeCl}_3.\text{L}^{-1}$) para todos os horários, verificou-se as maiores remoções de lodo biológico (em termos de SST) para todas velocidades de flotação. No entanto, foi verificado também para este cenário as maiores produções de lodo químico (em relação a massa estequiométrica de hidróxidos complexados pelo Fe^{+3}), sendo para $V_f=8 \text{ cm.min}^{-1}$ (2550,77 Kg de SST. d^{-1}), $V_f=12 \text{ cm.min}^{-1}$ (2535,39 Kg de SST. d^{-1}), $V_f=16 \text{ cm.min}^{-1}$ (2492,10 Kg de SST. d^{-1}) e $V_f=20 \text{ cm.min}^{-1}$ (2411,02 Kg de SST. d^{-1}).

Também conforme a **Figura 5.56**, a aplicação do cenário 4, através da **equação 5.2** (turbidez afluente < 50 UNT) e da **equação 5.3** (turbidez afluente ≥ 50 UNT), resultou em boa remoção de lodo biológico (em termos de SST), com valores próximos aos apresentados para o cenário 1 e superiores aos calculados para os cenários 2 e 3. Ainda em relação ao cenário 4, notou-se menor produção calculada de lodo químico comparada aos cenários 1 e 3, sendo obtidos valores para $V_f=8 \text{ cm.min}^{-1}$ (1792,10 Kg de SST.d⁻¹), $V_f=12 \text{ cm.min}^{-1}$ (1824,73 Kg de SST.d⁻¹), $V_f=16 \text{ cm.min}^{-1}$ (1792,10 Kg de SST.d⁻¹) e $V_f=20 \text{ cm.min}^{-1}$ (1728,58 Kg de SST.d⁻¹).

Quanto a economia de consumo de cloreto férrico, verifica-se através da **Figura 5.57**, os consumos diários calculados para os ensaios desta fase.

Figura 5.57 – Fase 4: Comparação dos consumos de FeCl₃ (anidro) calculados para os cenários estudados

Considerando o quesito economia de consumo de coagulante, a fixação da menor dosagem dentre as melhores obtidas na fase 3 (35 mg $\text{FeCl}_3 \cdot \text{L}^{-1}$, cenário 2) implicou em menor consumo de cloreto férrico ao longo do dia, calculado em 1624,98 Kg de $\text{FeCl}_3 \cdot \text{d}^{-1}$. Ainda em relação a **Figura 5.57**, nota-se que o cenário 3 implicou em elevado consumo diário de cloreto férrico, assim como também pode ser verificado para o cenário 1, com valores de 3423,93 e 3433,05 Kg de $\text{FeCl}_3 \cdot \text{d}^{-1}$, respectivamente.

Conforme a **Figura 5.57**, quanto ao cenário 4, verificou-se o consumo diário de 2477,52 Kg de $\text{FeCl}_3 \cdot \text{d}^{-1}$. Desta maneira, a aplicação do cenário 4 resultou novamente em valor intermediário, entre os calculados para o cenário 1 e 2, ou seja, entre a maior e a menor dosagem determinada na fase 3 desta pesquisa. De fator, conforme a **Figura 5.58**, nota-se que as dosagens calculadas pelas equações utilizadas no quarto cenário (**equação 5.2** e **equação 5.3**) resultou em dosagens intermediárias.

Figura 5.58 – Fase 4: Variação das dosagens aplicadas nos quatro cenários estudados

Os resultados do pH de coagulação para os quatro cenários estudados são apresentados na **Figura 5.59**. De acordo com este gráfico e com a Tabela , pode-se verificar que os melhores resultados observados (cenários 1, 2 e 4) ocorreram numa estreita faixa de pH de coagulação, entre 5,00 e 6,50. Ainda, verifica-se que, o pH de coagulação para o 4° cenário variou entre 5,60 a 6,25. Considerando a estabilidade da alcalinidade nos ensaios das fases anteriores e, considerando o quarto cenário como o melhor avaliado nesta fase 4 da pesquisa, pode-se inferir que a faixa de pH entre 5,60 a 6,25 aparenta ser uma boa faixa operacional para a coagulação da ETE Anhumas.

Figura 5.59 – Fase 4: Variação do pH de coagulação para os quatro cenários de dosagens estudados

5.5 RESUMO DAS DISCUSSÕES

Com relação a avaliação de diferentes tipos e dosagens de coagulantes, através de ensaios com *flotatestes*, para as condições de $G_{mr}=800\text{ s}^{-1}$; $T_{mr}=15\text{ s}$; $G_{floc}=90\text{ s}^{-1}$; $T_{floc}=20\text{ min}$; $P_{sat}=5\text{ Bar}$ e $R=17\%$, $V_f=16\text{ cm.min}^{-1}$, pode-se concluir que:

- Na coagulação do efluente anaeróbio utilizando sulfato de alumínio, a aplicação de $11,77\text{ mg de Al}_2\text{O}_3.\text{L}^{-1}$, sem adição de polímeros, foi considerada a melhor dosagem atingindo remoções de SST, DQO e fósforo da ordem de 76,5 % (residual de 16 mg.L^{-1}); 67,6 % (residual de 46 mg.L^{-1}) e 63,9 % (residual de $1,05\text{ mg.L}^{-1}$), respectivamente;
- Para a coagulação do efluente anaeróbio utilizando cloreto de polialumínio (PAC), a aplicação de $8,45\text{ mg de Al}_2\text{O}_3.\text{L}^{-1}$, sem adição de polímeros, foi considerada a melhor dosagem atingindo remoções de SST, DQO e fósforo da ordem de 62,5 % (residual de 12 mg.L^{-1}); 75 % (residual de 33 mg.L^{-1}) e 82,7 % (residual de $0,64\text{ mg.L}^{-1}$), respectivamente;
- Na coagulação do efluente anaeróbio utilizando cloreto férrico, a aplicação de $24,38\text{ mgFe}^{+3}.\text{L}^{-1}$, sem a adição de polímeros, foi considerada a melhor dosagem atingindo remoções de SST, DQO e fósforo da ordem de 60 % (residual de 32 mg.L^{-1}); 55,9 % (residual de 63 mg.L^{-1}) e 90,3 % (residual de $0,31\text{ mg.L}^{-1}$), respectivamente.

No que se refere à avaliação de diferentes tipos e dosagens de polímeros associado à dosagem fixa de diferentes coagulantes, através de ensaios com *flotatestes*, para as condições de $G_{mr}=800\text{ s}^{-1}$; $T_{mr}=15\text{ s}$; $G_{floc}=90\text{ s}^{-1}$; $T_{floc}=20\text{ min}$; $P_{sat}=5\text{ Bar}$ e $R=17\%$, $V_f=16\text{ cm.min}^{-1}$, pode-se concluir que:

- O polímero catiônico C8394 foi o que obteve melhores resultados, para ambos coagulantes estudados;
- Para a dosagem fixa de $11,77\text{ mg de Al}_2\text{O}_3.\text{L}^{-1}$ de sulfato de alumínio, a aplicação de $0,50\text{ mg.L}^{-1}$ de polímero catiônico foi considerada a melhor dosagem atingindo remoções de SST, DQO e fósforo da ordem de 94,4 % (residual de 8 mg.L^{-1}); 88,6 % (residual de 31 mg.L^{-1}) e 70,4 % (residual de $1,14\text{ mg.L}^{-1}$), respectivamente;

-
- Para a dosagem fixa de $8,45 \text{ mg de Al}_2\text{O}_3.\text{L}^{-1}$ de PAC, a aplicação de $0,50 \text{ mg.L}^{-1}$ de polímero catiônico foi considerada a melhor dosagem atingindo remoções de SST, DQO e fósforo da ordem de 94,7 % (residual de 4 mg.L^{-1}); 62,3 % (residual de 75 mg.L^{-1}) e 88,8 % (residual de $0,38 \text{ mg.L}^{-1}$), respectivamente;
 - Para a dosagem fixa de $24,38 \text{ mgFe}^{+3}.\text{L}^{-1}$ de cloreto férrico, a aplicação de $1,00 \text{ mg.L}^{-1}$ de polímero catiônico foi considerada a melhor dosagem atingindo remoções de SST, DQO e fósforo da ordem de 77,3 % (residual de 20 mg.L^{-1}); 61,6 % (residual de 63 mg.L^{-1}) e 91,6 % (residual de $0,22 \text{ mg.L}^{-1}$), respectivamente.

Quanto aos ensaios de variação da dosagem do melhor coagulante definido, associado ao melhor tipo e dosagem de polímero fixado, aplicado no efluente de reator UASB coletado em seis diferentes horários do dia, através de ensaios com *flotateste* para as condições de $G_{mr}=800 \text{ s}^{-1}$; $T_{mr}=15 \text{ s}$; $G_{floc}=90 \text{ s}^{-1}$; $T_{floc}=20 \text{ min}$; $P_{sat}=5 \text{ Bar}$ e $R=17 \%$; pode-se concluir que:

- O cloreto férrico se demonstrou interessante no quesito operacional por sua habilidade de precipitar o sulfeto de hidrogênio e evitar a geração de odores na ETE, sendo escolhido para os ensaios subseqüentes da pesquisa;
- A aplicação de dosagem variada de $12,07$ a $25,51 \text{ mgFe}^{+3}.\text{L}^{-1}$ de cloreto férrico, associado a $1,00 \text{ mg.L}^{-1}$ de polímero catiônico, garantiu no efluente da FAD resultados de DQO menor que 50 mg.L^{-1} e fósforo menor que $0,50 \text{ mg.L}^{-1}$, para $V_f=16 \text{ cm.min}^{-1}$.

Com relação à aplicação de razão entre a massa de íon metálico aplicada do respectivo coagulante e o valor da turbidez do efluente anaeróbio antes da flotação (RD_{mT}), para ensaios com *flotateste* nas condições de $G_{mr}=800 \text{ s}^{-1}$; $T_{mr}=15 \text{ s}$; $G_{floc}=90 \text{ s}^{-1}$; $T_{floc}=20 \text{ min}$; $P_{sat}=5 \text{ Bar}$ e $R=17 \%$ e $V_f = 8$ a 20 cm.min^{-1} , pode-se inferir que:

- A aplicação de RD_{mT} utilizando os resultados obtidos para quaisquer valores de turbidez afluente ao sistema de FAD no pós-tratamento de efluentes de reatores UASB (cenário 3) não apresentou bons resultados em termos de remoção de turbidez nos horários de maior concentração afluente, devido a dosagem

excessiva calculada pela equação $D = T \times 0,39$, sendo “D” a dosagem de Fe^{+3} (em mg.L^{-1}) e “T” a turbidez afluente aos sistema de FAD (em UNT);

- A aplicação de dosagem fixa de $12,07 \text{ mgFe}^{+3}.\text{L}^{-1}$ ao longo de 24 horas (cenário 2), garantiu ao efluente turbidez inferior a 21 UNT, para turbidez afluente variando entre 42,9 e 102 UNT, sendo calculada remoção diária de lodo biológico da ordem de 4814,38 a 5174,87 Kg de SST.d⁻¹ e consumo diário de cloreto férrico de 1624,98 Kg de FeCl_3 (anidro).d⁻¹;
- A aplicação de dosagem fixa de $25,5 \text{ mgFe}^{+3}.\text{L}^{-1}$ ao longo de 24 horas (cenário 1), garantiu ao efluente turbidez inferior a 18 UNT, para turbidez afluente variando entre 42,9 e 102 UNT, sendo calculada remoção diária de lodo biológico da ordem de 5145,64 a 5384,49 Kg de SST.d⁻¹ e consumo diário de cloreto férrico de 3433,05 Kg de FeCl_3 (anidro).d⁻¹;
- A utilização de duas equações para cálculo das dosagens de Fe^{+3} a serem aplicadas ao longo de 24 horas, de acordo com a turbidez menor ou maior que 50 UNT presente no efluente anaeróbio (cenário 4), garantiu ao efluente da FAD turbidez menor que 16 UNT, sendo calculada remoção diária de lodo biológico da ordem de 5072,69 a 5353,94 Kg de SST.d⁻¹ e consumo diário de cloreto férrico de 2477,52 Kg de FeCl_3 (anidro).d⁻¹;
- A aplicação do quarto cenário de dosagens resultou na aplicação de coagulante na faixa entre 12,9 a 24,8 $\text{mgFe}^{+3}.\text{L}^{-1}$, que situou em faixa intermediária entre as dosagens mínima ($12,07 \text{ mgFe}^{+3}.\text{L}^{-1}$) e máxima ($25,5 \text{ mgFe}^{+3}.\text{L}^{-1}$) estabelecidas na fase 3 e fixadas nos respectivos cenários 2 e 1 da fase 4;
- O cenário 4 garantiu boa estabilidade e economia no consumo de coagulante da ordem de 27,8 %, comparado ao cenário de dosagem fixa de $25,51 \text{ mgFe}^{+3}.\text{L}^{-1}$ ($74 \text{ mg de FeCl}_3 \text{ anidro} .\text{L}^{-1}$);
- Em adição, conclui-se que bons resultados relativos a remoção de SST e turbidez podem ser observados em ampla faixa de dosagem de cloreto férrico, entre 35 a 74 $\text{mg de FeCl}_3 \text{ anidro} .\text{L}^{-1}$, e de pH, entre 5,2 a 6,3, para as condições de ensaio e características do efluente verificadas na fase 4 desta pesquisa.

6 CONCLUSÕES

Nos ensaios onde se verificaram baixos valores de turbidez no efluente anaeróbio, foram encontrados resultados para a RD_mT em faixa mais elevada (entre 0,37 a 0,58 mg de $Fe^{+3}.L^{-1}.UNT^{-1}$). Já nos ensaios em que se verificou maiores valores da turbidez do efluente anaeróbio, encontrou-se menores resultados para a RD_mT (0,23 e 0,25 mg de $Fe^{+3}.L^{-1}.UNT^{-1}$).

Conclui-se quanto a este comportamento que pode existir uma tendência a utilização de menores razões entre dosagem de cloreto férrico e o parâmetro de controle, no caso a turbidez, quando do evento de efluentes mais concentrados.

Tal comportamento pôde ser verificado dentro de certas limitações durante a quarta fase deste trabalho, onde se verificou os melhores resultados quando da aplicação de cenário que considerou o emprego de critérios de dosagens distintos em função da maior ou menor concentração, em termos de turbidez, afluente.

De fato, não se pode afirmar com clareza a existência de tendência de dosagens proporcionalmente menores de cloreto férrico para efluentes mais concentrados, também devido ao fato de que o uso da turbidez como parâmetro de explicação da qualidade do efluente anaeróbio não apresentou a sensibilidade esperada. Tal fato pode ser verificado através da **Figura 6.1**. Nota-se que ao se realizar correlações entre a turbidez e os resultados obtidos de DQObruta, DQOsolúvel e DQOparticulada, no efluente anaeróbio, não foram obtidos bons ajustes segundo os valores encontrados de R^2 .

Figura 6.1 – Correlações entre a Turbidez no Efluente Anaeróbio e as concentrações de DQObruta, DQOsolúvel e DQOparticulada.

Em adição, conforme a **Figura 6.2**, verifica-se esta situação de forma mais clara, através da observação do comportamento ao longo de 24 horas das curvas de turbidez, DQObruta, DQOsolúvel e DQOparticulada aferidas para o efluente anaeróbio. Notadamente, verifica-se que devido a estabilidade dos valores da DQOsolúvel, a variação da DQObruta se dá principalmente em função da variação da DQOparticulada. No entanto, claramente percebe-se a discrepância entre as curvas de turbidez e de DQOparticulada, comprovando a limitação do uso deste parâmetro para estimar a concentração do efluente anaeróbio em termos de DQO.

Figura 6.2 – Resultados de Turbidez, DQObruta, DQOsolúvel e DQOparticulada no efluente anaeróbio ao longo de 24 horas.

7 RECOMENDAÇÕES

Após o monitoramento realizado na fase 4 desta pesquisa, pode ser verificado que há uma grande concentração de sulfeto dissolvido no efluente do reator UASB da ETE Anhumas. De acordo com os resultados apresentados, concentrações sempre superiores a $10,00 \text{ mg.L}^{-1}$ foram verificadas para os diferentes horários do dia. As variáveis que influenciam a elevada concentração de H_2S observada no efluente são diversas, podendo-se destacar a concepção do projeto do reator e a concentração de sulfato presente no esgoto bruto.

Com relação a influência da concepção de projeto do reator, suspeita-se que o confinamento dos gases na interface entre a lâmina d'água e a laje de concreto do reator UASB possa influenciar na taxa de transferência do gás sulfídrico para o meio líquido, devido ao aumento gradativo da pressão, conforme postulado pela lei de Henry.

Já a concentração elevada do sulfato no esgoto bruto certamente tem influenciado nos elevados valores de H_2S no efluente anaeróbico. Assim recomenda-se que seja investigada possíveis origens para a presença desta substância no esgoto bruto de Campinas/SP, visto que valores elevados de sulfato também foram observados por **Campos et al (2007)**, para a ETE Piçarrão, também situada em campinas, o que permite inferir que o problema não está inerente apenas a bacia de contribuição da ETE Anhumas, cenário desta pesquisa.

Outro aspecto pouco investigado e que merece maior compreensão está relacionado com a aplicação de sais de ferro em efluentes de reatores anaeróbios e suas respectivas demandas para precipitação do sulfeto de hidrogênio (H_2S). A reação estequiométrica entre o sulfeto de hidrogênio e o cloreto férrico obedece a uma razão molar de 3:2 ($\text{H}_2\text{S}:\text{FeCl}_3$), o que implica em demanda importante do coagulante antes da complexação com a alcalinidade.

Finalmente, com relação a escolha da turbidez como parâmetro de controle da dosagem de coagulantes, recomenda-se que seja melhor avaliado o emprego desta técnica, visto as limitações observadas na correlação com a DQObruta ou particulada. Desta maneira recomenda-se que seja associado algum outro parâmetro de controle junto a turbidez, pois notadamente este parâmetro sozinho não apresentou a capacidade sensorial esperada na aferição da matéria orgânica.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- **BRATBY (1982).** “*Treatment of Raw Wastewater Overflows by Dissolved Air Flotation*”. Journal WPCF, v.54, n.12, p.1558-65, Dec;
- **CAMPOS et al. (1996).** CAMPOS, J. R.; REALI, M. A. P.; DOMBROSKI, S. A. G.; MARCHETTO, M. & LIMA, M. R. A. “*Tratamento físico-químico por flotação de efluentes de reatores anaeróbios*”. XXV Congresso de Ingeniería Sanitária y Ambiental, México; 1996;
- **CAMPOS et. al. (2007).** J.R. CAMPOS; M.A.P. REALI; R. ROSSETTO; J. SAMPAIO. “*A wastewater treatment plant composed of UASB reactors, activated sludge with DAF and UV disinfection, in series*”. Water Science and Technology (2007). Disponível em: <<http://www.iwaponline.com/wpt/004/wpt0040008.htm>>. Acesso em: 29 junho. 2009, 22:47hs;
- **CARVALHO, M. E. (2003).** “*Flotação de alta taxa aplicada ao pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios*”. São Carlos, 2003. 131 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo;
- **CONAMA 357/2005.** “*Resolução n° 357 do Conselho Nacional de Meio Ambiente*”. Ministério do Meio Ambiente (2005). Disponível em <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiano1.cfm?codlegitipo=3&ano=2005>>. Acesso em: 29 junho. 2009, 23:09hs;
- **JENKINS & HERMANOWICZ (1991).** “*Principles of chemical phosphate removal, in Phosphorus and nitrogen removal from municipal wastewater.*” Second Edition. R.I. Sedlak, ed. Chelsea, MI, Lewis Publishers, 1991;
- **MARCHIORETTO, M. M. (1999).** “*Ozonização seguida de coagulação / floculação e flotação como pós-tratamento do efluente de reator anaeróbio com chicanas tratando esgoto sanitário*”. São Carlos, 1999. 190 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo;
- **METCALF & EDDY (2003).** “*Wastewater Engineering Treatment & Reuse*”. Fourth Edition; Columbus-OH, EUA; McGraw-Hill, 2003;
- **OLIVEIRA, A. L. (2007).** “*Floto-filtração como pós-tratamento do efluente de reator anaeróbio tratando esgoto sanitário*”. São Carlos, 2007. 209 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil; 2007;

-
- **PENETRA R. G. (1998).** *“Pós-tratamento físico-químico por flotação de efluentes de reatores anaeróbios de manta de lodo (UASB)”*. São Carlos, 1998. 398 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil; 1998;
 - **PENATRA et al. (1999) (a).** PENETRA, R.G.; REALI, M.A.P. & CAMPOS, J.R. (1999b). *“Influência da quantidade de ar dissolvido na flotação de efluentes de reatores anaeróbios UASB”*. In: XX Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro, Brasil, 10 a 14 de maio;
 - **PENETRA et al. (1999) (b).** PENETRA, R.G.; REALI, M.A.P.; FORESTI, E. & CAMPOS, J.R. *“Post treatment of effluents from anaerobic reactor treating domestic sewage by dissolved-air flotation”*. Water Science and Technology, 40(08), 137-143;
 - **PENETRA, R. G. (2003).** *“Flotação Aplicada ao Pós-tratamento do Efluente de Reator Anaeróbio de Leito Expandido Tratando Esgoto Sanitário”*. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo;
 - **PORTO, T. G. (2001).** *“Tratamento Avançado de Esgoto Sanitário em Sistema Seqüencial Composto por Processo Biológico Anaeróbio, Flotação, Filtração em Areia e em Membranas”*. São Carlos, 2001, 144 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo;
 - **PROSAB (1999).** AISSE, M.M.; JÜRGENSEN, D.; REALI, M.A.P.; PENETRA, R.G.; FLORENCIO, L.; SOBRINHO, P.A. *“Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios, Capítulo 6: Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios por sistemas de flotação”*. Disponível em < http://www.finep.gov.br/prosab/pos_tratamento.htm>. Acesso em: 29 junho. 2009, 23:06hs;
 - **REALI, M. A. P. (1991).** *“Concepção e Avaliação de um Sistema Compacto para Tratamento de Águas de Abastecimento utilizando o Processo de Flotação por Ar Dissolvido e Filtração com Taxa Declinante”*. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil; 1991;
 - **REALI et al. (2001) (a).** REALI, M.A.P.; CAMPOS, J.R. & PENETRA, R.G. *“Sewage treatment by anaerobic biological process associated with dissolved air flotation”*. Water Science and Technology, 43(08), 91-98.
 - **REALI et al. (2001) (b).** REALI, M.A.P.; PENETRA, R.G. & CARVALHO, M.E. (2001). *“Flotation technique with coagulant and polymer application applied to*

the post-treatment of effluents from anaerobic reactor treating sewage". Water Science and Technology, 44(04), 213-219;

- **REALI et al. (2007).** REALI, M.A.P.; PENETRA, R.G.; CAMPOS, J.R. *"Dissolved-air flotation associated with na anaerobic reactor, as applied to sewage treatment"*. Int. J. Enviroment and Pollution, vol. 30, n°. 2, 2007;
- **RICHTER & NETO (1991).** CARLOS A. RICHTER & JOSÉ M. DE AZEVEDO NETO. *"Tratamento de Água, Tecnologia Atualizada"*. Ed. Edgard Blücher Ltda., 1ª Edição. São Paulo (1991).
- **SANASA (2008).** *"Sítio oficial da empresa"*. Disponível em: <<http://www.sanasa.com.br>>. Acesso em: 29 jan. 2008, 14:20:30;
- **SANTOS, S.P. (1997).** *"Estudo de uma unidade de flotação por ar dissolvido com escoamento vertical entre placas, aplicada a remoção de algas em águas para abastecimento"*. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo;
- **SANTOS, E.R.D.. (2008).** *"Emprego de polímeros em unidade piloto de floto-filtração como pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios de leito expansível tratando esgoto sanitário"*. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo;
- **SANTOS, H.R. (2006).** *"Coagulação e precipitação de efluente de reator anaeróbio e de efluente de lodos ativados precedido de reator UASB, com separação por sedimentação ou FAD"*. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo;
- **SARTORI, L. (1998).** *"Influência do uso de polímeros sintéticos no desempenho da flotação por ar dissolvido aplicada no pós-tratamento de águas para abastecimento"*. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.