

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
ENGENHARIA AMBIENTAL

JOÃO WANDERLEY FREIRE JUNIOR

PÓS-TRATAMENTO FÍSICO QUÍMICO POR MEIO DE FLOTAÇÃO POR
AR DISSOLVIDO DE EFLUENTE DE REATOR ANAERÓBIO COM LEITO
FIXO CONSTITUÍDO DE FIBRAS FLEXÍVEIS

São Carlos

2016

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
ENGENHARIA AMBIENTAL

PÓS-TRATAMENTO FÍSICO QUÍMICO POR MEIO DE FLOTAÇÃO POR
AR DISSOLVIDO DE EFLUENTE DE REATOR ANAERÓBIO COM LEITO
FIXO CONSTITUÍDO DE FIBRAS FLEXÍVEIS

Aluno: João Wanderley Freire Junior
Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio Penalva Reali
Co-orientadora: Eloá Cristina Figueirinha Pelegrino

Monografia apresentada ao curso de
graduação de Engenharia Ambiental da
Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo

São Carlos
2016

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

F866p

Freire Junior, João Wanderley
Pós-tratamento físico químico por meio de flotação
por ar dissolvido de efluente de reator anaeróbio com
leito fixo constituído de fibras flexíveis / João
Wanderley Freire Junior; orientador Marco Antonio
Penalva Reali. São Carlos, 2016.

Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2016.

1. Tratamento de esgoto sanitário. 2.
Pós-Tratamento de efluente UASB. 3. Flotação por Ar
Dissolvido. 4. Floculação. 5. Coagulação. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): **Joao Wanderley Freire Junior**

Data da Defesa: 10/11/2016

Comissão Julgadora:

Marco Antonio Penalva Reali (Orientador(a))

Eloá Cristina Figueirinha Pelegrino

Leila Patrizzi de Carvalho

Resultado:

Aprovado

Aprovado

Aprovado



Prof. Dr. Marcelo Zaiat

Coordenador da Disciplina 1800091- Trabalho de Graduação

Este trabalho é dedicado à minha família pelo exemplo de empenho e superação.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Maria e Wanderley, por todo amor, carinho, compreensão e apoio em todos os momentos. Ao meu irmão, Bruno, por todo o amor e companheirismo sem igual.

Ao Professor Reali e à Eloá, pela orientação, paciência, dedicação e ensinamentos que me proporcionaram.

A todos os companheiros de LATAR, em especial à técnica Teresa, pela atenção e auxílio durante os ensaios e análises.

Aos meus companheiros de graduação e laboratório, Fil e Fejuca, pelo suporte nos ensaios e análises, pelo companheirismo e momentos de descontração.

À minha namorada, Jéssica, por todo o apoio, companheirismo, risadas e pelo empréstimo do notebook para finalizar o TCC, após a recusa do meu notebook em terminar o trabalho.

Aos meus amigos de graduação, por todos esses anos juntos de muitas alegrias e aprendizado, em especial à Nina, Carol e Lost.

Por fim, a todos que de certa forma contribuíram durante todos esses anos para a minha formação.

“Há uma teoria que indica que sempre que qualquer um descobrir exatamente o que, para que e porque o universo está aqui, o mesmo desaparecerá e será substituído imediatamente por algo ainda mais bizarro e inexplicável... Há uma outra teoria que indica que isto já aconteceu.”

Douglas Adams

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo aplicar e avaliar a eficiência da técnica de flotação por ar dissolvido (FAD) como unidade de separação de sólidos ou de tratamento complementar ao reator anaeróbio de leito fixo constituído de fibras flexíveis, utilizando 3 diferentes coagulantes: PAC, cloreto férrico e sulfato de alumínio; além da realização de experimentos sem a aplicação de coagulante. Os ensaios de flotação foram realizados em escala laboratorial por meio dos aparelhos: agitador mecânico e flotateste; e foram divididos em 6 fases. Para todas fixou-se os parâmetros de gradiente de mistura rápida (900 s^{-1}), tempo de mistura rápida (15 s), pressão de saturação (5 bar) e como parâmetros de ensaio iniciais: gradiente de flocação (90 s^{-1}), tempo de flocação (15 min) e fração de recirculação (17%). Na primeira etapa, foi definida a dosagem ótima de coagulante PAC, fixando-se os demais parâmetros analisados. Em seguida, foram definidos o tempo e gradiente de flocação ótimos para a dosagem obtida na etapa anterior. Posteriormente, foram avaliados diferentes percentuais de recirculação, visando determinar o melhor conjunto de parâmetros de flotação para o efluente em estudo. Nas séries 4 e 5, com os parâmetros definidos, avaliou-se a eficiência do processo de flotação com os coagulantes cloreto férrico e sulfato de alumínio, respectivamente. E na etapa final utilizou-se das dosagens ótimas determinadas para cada um dos coagulantes testados, associados aos parâmetros definidos para a condição de flocação e fração de recirculação, de forma a comparar as eficiências de remoção excluindo-se a influência da variabilidade das características da amostra bruta ao longo do tempo. Foram obtidos como parâmetros ótimos as dosagens de 14 mg/L de PAC e 70 mg/L de cloreto férrico e sulfato de alumínio, gradiente de flocação de 110 s^{-1} , tempo de flocação de 15 minutos e percentual de recirculação de 12%. Dentre os coagulantes estudados o que apresentou, em geral, os melhores resultados foi o PAC, obtendo-se a eficiência de remoção de 84 % de turbidez, 73 % de cor, 50 % de DQO, e 45 % de fósforo total. Ademais, em análise à distribuição do tamanho das partículas durante os processos de coagulação, flocação e flotação; o PAC apresentou o melhor desempenho na remoção das partículas coloidais.

ABSTRACT

This main objective of this work is the evaluation of the efficiency of dissolved air flotation as a complementary system to the anaerobic reactor constituted of flexible fibers as fixed support, using 3 different coagulants: aluminum polychloride (PAC), ferric chloride and aluminum sulfate. The flotation tests were performed on a batch scale through the equipments: mechanical stirrer and flotateste; and they were divided into 6 phases. For all the tests were fixed the values of rapid mixing (900 s^{-1}) velocity gradient, rapid mixing time (15 s) and saturation pressure (5 bar). In the first stage, the optimum dose of PAC coagulant was defined. Then, were determined the optimal time and flocculation velocity gradient. Subsequently, different recycle rates were evaluated, in order to determine the best set of parameters for the use of flotation. In the series 4 and 5 was assessed the efficiency of the flotation process clotted by ferric chloride and aluminum sulfate, respectively. After, in the final step, it was used the optimal dosages determined for each coagulants studied associated with the parameters defined for the flocculation condition and the recycle rate. Thus, it were obtained as optimal parameters the doses of 14 mg/L of PAC and 70 mg/L of ferric chloride and aluminum sulfate, flocculation velocity gradient of 110 s^{-1} , flocculation time of 15 minutes and recycle rate of 12%. Among the treatments employed, it could be seen that, in general, the best results was obtained using PAC, reaching 84% removal of turbidity, 73% of apparent color, 50% of COD, and 45% total phosphorus. Furthermore, the analysis of the size distribution of particles over the coagulation process, flocculation and flotation; showed that PAC presented the best performance in the removal of colloidal particles.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| FIGURA 1- CENÁRIO HIPOTÉTICO NO QUAL O TRABALHO ESTÁ INSERIDO | 2 |
| FIGURA 2 - CONFIGURAÇÃO ESQUEMÁTICA DA PARTÍCULA COLOIDAL. FONTE: (DI BERNARDO; DANTAS, 2005) | 6 |
| FIGURA 3 - MECANISMO DE AGREGAÇÃO DAS PARTÍCULAS: A) FORÇAS DE ATRAÇÃO E REPULSÃO ENTRE OS COLOIDES E O MEIO AQUOSO; B) DEESTABILIZAÇÃO DAS CARGAS DOS COLOIDES, POR MEIO DA ADIÇÃO DO COAGULANTE; E C) FORMAÇÃO DE AGLOMERADOS DE PARTÍCULAS POR MEIO DA ADIÇÃO DO AUXILIAR DE COAGULAÇÃO (POLÍMERO POLIELETROLÍTO). | 7 |
| FIGURA 4 - ESPÉCIES DE FERRO DISSOLVIDAS EM FUNÇÃO DO PH. FONTE: (HAARHOFF; EDZWALD, 2012) | 9 |
| FIGURA 5 - ESPÉCIES DE ALUMÍNIO DISSOLVIDAS EM FUNÇÃO DO PH PARA AS TEMPERATURAS DE 20 E 5 °C. FONTE: (HAARHOFF; EDZWALD, 2012)..... | 9 |
| FIGURA 6 - ESPÉCIES DE ALUMÍNIO DISSOLVIDOS PARA PAC, CONSIDERANDO O ALUMÍNIO TOTAL POR 1 MG/L DE COAGULANTE, EM RELAÇÃO AO PH. FONTE: (HAARHOFF; EDZWALD, 2012) | 10 |
| FIGURA 7 - FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO COM PRESSURIZAÇÃO TOTAL DO AFLUENTE. FONTE: (REALI, 1991) | 13 |
| FIGURA 8 - FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO COM PRESSURIZAÇÃO PARCIAL DO AFLUENTE. FONTE: (REALI, 1991) | 14 |
| FIGURA 9 - FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO COM RECIRCULAÇÃO PRESSURIZADA. FONTE: (REALI, 1991) | 14 |
| FIGURA 10 - DIAGRAMA DE BLOCOS ILUSTRATIVOS DO SISTEMA DE FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO COMO PÓS TRATAMENTO DO REATOR ANAERÓBIO, COM DESTAQUE PARA AS ETAPAS ESTUDADAS. | 19 |
| FIGURA 11 - TANQUES DE ALIMENTAÇÃO DO REATOR ANAERÓBIO | 20 |
| FIGURA 12 - TANQUES DE COLETA DO EFLUENTE PARA PÓS-TRATAMENTO | 21 |
| FIGURA 13 - REATORES ANAERÓBIOS UTILIZADOS NA PESQUISA DE PELEGRIANO (2016), COM DESTAQUE PARA O REATOR 2 À ESQUERDA | 21 |
| FIGURA 14 - EQUIPAMENTOS UTILIZADOS DURANTES OS ENSAIOS | 22 |
| FIGURA 15 - ESQUEMA ILUSTRATIVO DO EQUIPAMENTO FLOTATESTE | 23 |
| FIGURA 16 - ALTURA DO PONTO DE COLETA DA COLUNA DE ENSAIO DE FLOCULAÇÃO E FLOTAÇÃO | 27 |
| FIGURA 17 - ROTEIRO DE ENSAIOS DA SÉRIE I | 28 |

| | |
|--|----|
| FIGURA 18 - ROTEIRO DE ENSAIOS DA SÉRIE II | 29 |
| FIGURA 19 - ROTEIRO DE ENSAIOS DA SÉRIE III | 30 |
| FIGURA 20 - ROTEIRO DE ENSAIOS DA SÉRIE IV | 32 |
| FIGURA 21 - ROTEIRO DE ENSAIOS DA SÉRIE V..... | 33 |
| FIGURA 22 - ROTEIRO DE ENSAIOS DA SÉRIE VI | 34 |
| FIGURA 23 - T/T ₀ PARA AS VELOCIDADES DE FLOTAÇÃO ESTUDADAS POR DOSAGEM DE COAGULANTE | 38 |
| FIGURA 24 - C/C ₀ PARA AS VELOCIDADES DE FLOTAÇÃO ESTUDADAS POR DOSAGEM DE COAGULANTE | 38 |
| FIGURA 25 - T/T ₀ PARA AS DOSAGENS DE PAC ESTUDADAS POR VELOCIDADE DE FLOTAÇÃO .. | 39 |
| FIGURA 26 - C/C ₀ PARA AS DOSAGENS DE PAC ESTUDADAS POR VELOCIDADE DE FLOTAÇÃO . | 39 |
| FIGURA 27- DQO REMANESCENTE PARA CADA DOSAGEM DE PAC APLICADA | 42 |
| FIGURA 28 - FÓSFORO TOTAL REMANESCENTE PARA CADA DOSAGEM DE PAC APLICADA | 43 |
| FIGURA 29 - DISTRIBUIÇÃO DE T/T ₀ PARA AS CONDIÇÕES DE FLOCULAÇÃO ESTUDADAS EM RELAÇÃO ÀS VELOCIDADES DE FLOTAÇÃO | 47 |
| FIGURA 30 - DISTRIBUIÇÃO DE C/C ₀ PARA AS CONDIÇÕES DE FLOCULAÇÃO ESTUDADAS EM RELAÇÃO ÀS VELOCIDADES DE FLOTAÇÃO | 48 |
| FIGURA 31 - DISTRIBUIÇÃO DE T/T ₀ PARA A CONDIÇÃO DE GF = 70 s ⁻¹ EM RELAÇÃO ÀS VELOCIDADES DE FLOTAÇÃO | 48 |
| FIGURA 32 - DISTRIBUIÇÃO DE C/C ₀ PARA A CONDIÇÃO DE GF = 70 s ⁻¹ EM RELAÇÃO ÀS VELOCIDADES DE FLOTAÇÃO | 49 |
| FIGURA 33 - DISTRIBUIÇÃO DE T//T ₀ PARA A CONDIÇÃO DE GF = 90 s ⁻¹ EM RELAÇÃO ÀS VELOCIDADES DE FLOTAÇÃO | 50 |
| FIGURA 34 - DISTRIBUIÇÃO DE C/C ₀ PARA A CONDIÇÃO DE GF = 90 s ⁻¹ EM RELAÇÃO ÀS VELOCIDADES DE FLOTAÇÃO | 50 |
| FIGURA 35 - DISTRIBUIÇÃO DE T/T ₀ PARA A CONDIÇÃO DE GF = 110 s ⁻¹ EM RELAÇÃO ÀS VELOCIDADES DE FLOTAÇÃO | 51 |
| FIGURA 36 - DISTRIBUIÇÃO DE C/C ₀ PARA A CONDIÇÃO DE GF = 110 s ⁻¹ EM RELAÇÃO ÀS VELOCIDADES DE FLOTAÇÃO | 51 |
| FIGURA 37 - DISTRIBUIÇÃO DE DQO REMANESCENTE PARA AS CONDIÇÕES DE FLOCULAÇÃO ESTUDADAS | 53 |
| FIGURA 38 - DISTRIBUIÇÃO DE DQO REMANESCENTE APÓS FILTRAÇÃO PARA AS CONDIÇÕES DE FLOCULAÇÃO ESTUDADAS | 53 |

| | |
|---|----|
| FIGURA 39 - DISTRIBUIÇÃO DE FÓSFORO TOTAL REMANESCENTE PARA AS CONDIÇÕES DE FLOCULAÇÃO ESTUDADAS | 55 |
| FIGURA 40 - DISTRIBUIÇÃO DE FÓSFORO TOTAL DISSOLVIDO PARA AS CONDIÇÕES DE FLOCULAÇÃO..... | 55 |
| FIGURA 41 - DISTRIBUIÇÃO DE T/T ₀ POR VELOCIDADE DE FLOTAÇÃO NO INTERVALO DE FRAÇÃO DE RECIRCULAÇÃO ESTUDADO | 59 |
| FIGURA 42 - DISTRIBUIÇÃO DE T/T ₀ POR FRAÇÃO DE RECIRCULAÇÃO NO INTERVALO DE VELOCIDADES DE FLOTAÇÃO ESTUDADAS | 59 |
| FIGURA 43 - DISTRIBUIÇÃO DE C/C ₀ POR VELOCIDADE DE FLOTAÇÃO NO INTERVALO DE FRAÇÃO DE RECIRCULAÇÃO ESTUDADO | 60 |
| FIGURA 44 - DISTRIBUIÇÃO DE C/C ₀ POR FRAÇÃO DE RECIRCULAÇÃO NO INTERVALO DE VELOCIDADES DE FLOTAÇÃO ESTUDADAS | 60 |
| FIGURA 45 - DISTRIBUIÇÃO DE DQO REMANESCENTE POR FRAÇÃO DE RECIRCULAÇÃO | 62 |
| FIGURA 46 - DISTRIBUIÇÃO DE FÓSFORO REMANESCENTE POR FRAÇÃO DE RECIRCULAÇÃO | 63 |
| FIGURA 47 - DISTRIBUIÇÃO DE TURBIDEZ REMANESCENTE EM RELAÇÃO À DOSAGEM DE COAGULANTE POR VELOCIDADE DE FLOTAÇÃO | 67 |
| FIGURA 48 - DISTRIBUIÇÃO DE TURBIDEZ REMANESCENTE EM RELAÇÃO À VELOCIDADE DE FLOTAÇÃO POR DOSAGEM DE CLORETO | 67 |
| FIGURA 49 - DISTRIBUIÇÃO DE COR APARENTE REMANESCENTE EM RELAÇÃO À DOSAGEM DE COAGULANTE POR VELOCIDADE DE FLOTAÇÃO | 68 |
| FIGURA 50 - DISTRIBUIÇÃO DE COR APARENTE REMANESCENTE EM RELAÇÃO À VELOCIDADE DE FLOTAÇÃO POR DOSAGEM DE CLORETO | 68 |
| FIGURA 51 - DISTRIBUIÇÃO DE DQO REMANESCENTE POR DOSAGEM DE CLORETO FÉRRICO | 71 |
| FIGURA 52 - DISTRIBUIÇÃO DO FÓSFORO TOTAL REMANESCENTE POR DOSAGEM DE CLORETO FÉRRICO | 72 |
| FIGURA 53 - DISTRIBUIÇÃO DE T/T ₀ EM RELAÇÃO À DOSAGEM DE SULFATO DE ALUMÍNIO POR VELOCIDADE DE FLOTAÇÃO | 76 |
| FIGURA 54 - DISTRIBUIÇÃO DE T/T ₀ EM RELAÇÃO À VELOCIDADE DE FLOTAÇÃO POR DOSAGEM DE SULFATO DE ALUMÍNIO | 76 |
| FIGURA 55 - DISTRIBUIÇÃO DE C/C ₀ EM RELAÇÃO À DOSAGEM DE SULFATO DE ALUMÍNIO POR VELOCIDADE DE FLOTAÇÃO..... | 77 |
| FIGURA 56 - DISTRIBUIÇÃO DE C/C ₀ EM RELAÇÃO À VELOCIDADE DE FLOTAÇÃO POR DOSAGEM DE SULFATO DE ALUMÍNIO | 77 |

| | |
|---|----|
| FIGURA 57 - DISTRIBUIÇÃO DA DQO REMANESCENTE POR DOSAGEM DE SULFATO DE ALUMÍNIO | 79 |
| FIGURA 58 - DISTRIBUIÇÃO DE FÓSFORO TOTAL REMANESCENTE POR DOSAGEM DE SULFATO DE ALUMÍNIO | 81 |
| FIGURA 59 - DISTRIBUIÇÃO DE PARÂMETROS REMANESCENTES PARA CADA COAGULANTE ESTUDADO..... | 84 |
| FIGURA 60 - DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS PARA O COAGULANTE PAC | 85 |
| FIGURA 61 - DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS PARA O COAGULANTE SULFATO DE ALUMÍNIO | 85 |
| FIGURA 62 - DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS PARA O COAGULANTE CLORETO FÉRRICO | 86 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| TABELA 1- ESTIMATIVA DA CONCENTRAÇÃO E DA DISTÂNCIA MÉDIA ENTRE AS MICROBOLHAS DE AR, PRESENTES NO INÍCIO DE UMA UNIDADE FAD, EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO DAS MICROBOLHAS. FONTE: (REALI, 1991) | 16 |
| TABELA 2 - CARACTERÍSTICAS DO ESGOTO SINTÉTICO | 20 |
| TABELA 3 - PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS AFERIDOS, UNIDADES, EQUIPAMENTOS, MÉTODOS E LIMITES DE DETECÇÃO..... | 24 |
| TABELA 4 - ENSAIOS DE FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO PARA O EFLUENTE DO REATOR ANAERÓBIO | 25 |
| TABELA 5 – DOSAGENS DE PAC PARA AVALIAÇÃO DA DOSAGEM ÓTIMA | 28 |
| TABELA 6 - FRAÇÕES DE RECIRCULAÇÃO PARA AVALIAÇÃO DA TAXA ÓTIMA | 30 |
| TABELA 7 – DOSAGENS DE CLORETO FÉRRICO PARA AVALIAÇÃO DA DOSAGEM ÓTIMA | 32 |
| TABELA 8 – DOSAGENS DE SULFATO DE ALUMÍNIO PARA AVALIAÇÃO DA DOSAGEM ÓTIMA | 33 |
| TABELA 9 - RESULTADOS PARA A REMOÇÃO DE TURBIDEZ NA SÉRIE I..... | 36 |
| TABELA 10 - RESULTADOS PARA A REMOÇÃO DE COR APARENTE NA SÉRIE I | 37 |
| TABELA 11 - RESULTADOS DE REMOÇÃO DE DQO OBTIDOS NA SÉRIE I | 41 |
| TABELA 12 - RESULTADOS DE REMOÇÃO DE DQO OBTIDOS NA SÉRIE I | 43 |
| TABELA 13 - RESULTADOS DE TURBIDEZ OBTIDOS NA SÉRIE II | 45 |
| TABELA 14 - RESULTADOS DE COR APARENTE OBTIDOS NA SÉRIE II..... | 46 |
| TABELA 15 - RESULTADOS DE REMOÇÃO DE DQO NA SÉRIE II | 52 |
| TABELA 16- RESULTADOS DE REMOÇÃO DE FÓSFORO TOTAL NA SÉRIE II | 54 |
| TABELA 17 - RESULTADOS DE REMOÇÃO DE TURBIDEZ E COR APARENTE PARA AS CONDIÇÕES DE FLOCULAÇÃO SELECIONADAS..... | 56 |
| TABELA 18 - RESULTADOS DE REMOÇÃO DE TURBIDEZ NA SÉRIE III | 57 |
| TABELA 19 - RESULTADOS DE REMOÇÃO DE COR APARENTE NA SÉRIE III..... | 58 |
| TABELA 20 - RESULTADOS DE REMOÇÃO DE DQO NA SÉRIE III | 61 |
| TABELA 21 - RESULTADOS DE REMOÇÃO DE FÓSFORO TOTAL DISSOLVIDO NA SÉRIE III | 63 |
| TABELA 22 - RESULTADOS DE REMOÇÃO DE TURBIDEZ NA SÉRIE IV | 65 |
| TABELA 23 - RESULTADOS DE REMOÇÃO DE COR APARENTE NA SÉRIE IV | 66 |
| TABELA 24 - RESULTADOS DE REMOÇÃO DE DQO NA SÉRIE IV | 70 |
| TABELA 25 - RESULTADOS DE REMOÇÃO DE FÓSFORO TOTAL NA SÉRIE IV | 72 |
| TABELA 26 - RESULTADOS DE REMOÇÃO DE TURBIDEZ NA SÉRIE V | 74 |
| TABELA 27 - RESULTADOS DE REMOÇÃO DE COR APARENTE NA SÉRIE V | 75 |

| | |
|---|----|
| TABELA 28 - RESULTADOS DE REMOÇÃO DE DQO NA SÉRIE V | 79 |
| TABELA 29 - RESULTADOS DE REMOÇÃO DE FÓSFORO TOTAL NA SÉRIE V | 80 |
| TABELA 30 - VALORES REMANESCENTES OBTIDOS NA SÉRIE VI NO PROCESSO DE COAGULAÇÃO | 82 |
| TABELA 31 - VALORES REMANESCENTES OBTIDOS NA SÉRIE VI | 82 |
| TABELA 32 - RESULTADOS DE REMOÇÃO OBTIDOS NA SÉRIE VI..... | 83 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

| | |
|--|--|
| °C: | Grau Celsius, medida de temperatura; |
| Δb: | Distância média entre as bolhas; |
| µm: | Micrometro, unidade de medida; |
| Al₂(SO₄)₃: | Fórmula química do sulfato de alumínio; |
| Al₂O₃: | Fórmula química do óxido de alumínio; |
| APHA: | American Public Health Association; |
| Bar: | Unidade de pressão, equivalente a 10 ⁵ Pa; |
| C: | Cor Aparente; |
| C₀: | Cor aparente inicial; |
| cm/min: | Centímetros por minuto, unidade de medida da velocidade de flotação; |
| DBO: | Demanda Bioquímica de Oxigênio; |
| DQO: | Demanda Química de Oxigênio; |
| DQO₀: | Demanda Química de Oxigênio inicial; |
| DQO_f: | Demanda Química de Oxigênio filtrada; |
| EESC: | Escola de Engenharia de São Carlos; |
| ETE: | Estação de Tratamento de Esgoto; |
| FAD: | Flotação por Ar Dissolvido; |
| FeCl₃: | Fórmula química do cloreto férrico; |
| g: | Grama, unidade de medida de massa; |
| g ar/m³: | Grama de ar por centímetro cúbico, unidade de medida de densidade; |
| g/cm³: | Grama por centímetro cubico, unidade de medida de densidade; |
| Gf: | Gradiente de floculação; |
| Gmr: | Gradiente de mistura rápida; |
| H₂: | Fórmula química do gás hidrogênio; |
| kPa: | Quilo Pascal, unidade de pressão; |
| L: | Litro, unidade de medida de volume; |
| L/s: | Litro por segundo, unidade de vazão; |
| LATAR: | Laboratório de Tratamento Avançado e Reuso de Águas; |
| mg/L: | Miligramas por Litro, unidade de medida de dosagem de coagulante; |
| min: | Minuto, unidade de medida de tempo; |
| mm: | Milímetro, unidade de medida de distância; |

| | |
|------------------------|---|
| N_b: | Número de bolhas por ml de solução; |
| nm: | Nanômetro, unidade de medida; |
| NTK: | Nitrogênio Total Kjedahl, compreende parcela não oxidada de nitrogênio; |
| NTU: | Unidade Nefelométrica de Turbidez, unidade de medida de turbidez; |
| O₂: | Fórmula química do gás oxigênio; |
| P: | Fósforo Total; |
| P₀: | Fósforo Total inicial; |
| PAC: | Policloreto de alumínio ou cloreto de polialumínio, coagulante; |
| Pf: | Fósforo Total Dissolvido; |
| pH: | Potencial Hidrogeniônico; |
| Psat: | Pressão de Saturação; |
| R: | Fração de recirculação |
| rpm: | Rotações por minuto; |
| s: | Segundo, unidade de tempo; |
| S*: | Quantidade de ar fornecido à flotação; |
| SHS: | Departamento de Hidráulica e Saneamento; |
| SST: | Sólidos Suspensos Totais; |
| T: | Turbidez; |
| T₀ | Turbidez inicial; |
| TAS: | Taxa de Aplicação Superficial; |
| tr: | Tempo de floculação; |
| t_{mr}: | Tempo de mistura rápida; |
| UASB: | Upflow Anaerobic Sludge Blanket, reator biológico anaeróbico de fluxo ascendente e manta de lodo; |
| uH: | Unidade Hazen, unidade de medida de cor; |
| USP: | Universidade de São Paulo; |
| V_f: | Velocidade de flotação; |
| V_{f1}: | Velocidade de flotação 1, correspondente ao valor de 10 cm/min; |
| V_{f2}: | Velocidade de flotação 2, correspondente ao valor de 14 cm/min; |
| V_{f3}: | Velocidade de flotação 3, correspondente ao valor de 18 cm/min; |
| V_{f4}: | Velocidade de flotação 4, correspondente ao valor de 22 cm/min; |

SUMÁRIO

| | | |
|--------|--|----|
| 1. | INTRODUÇÃO | 1 |
| 2. | OBJETIVO..... | 3 |
| 2.1. | Objetivo geral..... | 3 |
| 2.2. | Objetivo específico..... | 3 |
| 3. | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 5 |
| 3.1. | Coagulação..... | 5 |
| 3.1.1. | Mecanismos de coagulação..... | 7 |
| 3.2. | Flocação | 10 |
| 3.3. | Flotação como pós-tratamento | 11 |
| 3.3.1. | Tipos de Flotação | 12 |
| 3.3.2. | Flotação por Ar Dissolvido (FAD)..... | 12 |
| 3.4. | Aplicação da FAD no tratamento de águas residuárias como pós-tratamento de reatores anaeróbios | 16 |
| 4. | MATERIAIS E MÉTODOS | 19 |
| 4.1. | Descrição do sistema de tratamento em estudo..... | 19 |
| 4.2. | Reator Anaeróbio e alimentação do sistema | 19 |
| 4.3. | Equipamentos utilizados | 22 |
| 4.3.1. | Agitador Mecânico..... | 22 |
| 4.3.2. | Flotatest..... | 22 |
| 4.4. | Produtos Químicos | 23 |
| 4.5. | Parâmetros de estudo e métodos de aferição..... | 24 |
| 4.6. | Roteiro de Ensaios..... | 24 |
| 4.6.1. | Coleta | 27 |
| 4.6.2. | Série I- Ensaios de determinação da demanda de PAC para coagulação | 27 |
| 4.6.3. | Série II- Ensaios para verificação da influência das condições de flocação na eficiência da flotação com PAC..... | 28 |
| 4.6.4. | Série III-Ensaios para verificação da influência da fração de recirculação na eficiência da flotação com PAC | 30 |
| 4.6.5. | Série IV- Ensaios de determinação da demanda de cloreto férrico para coagulação..... | 31 |
| 4.6.6. | Série V- Ensaios de determinação da demanda de sulfato de alumínio para coagulação.. | 32 |
| 4.6.7. | Série VI- Ensaios para análises detalhadas | 33 |
| 5. | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 35 |
| 5.1. | Série I – Ensaios de determinação da demanda de PAC para coagulação | 35 |
| 5.1.1. | Turbidez e Cor aparente | 35 |
| 5.1.2. | Demandas Químicas de Oxigênio | 40 |
| 5.1.3. | Fósforo Total | 42 |
| 5.2. | Ensaios para verificação da influência das condições de flocação na eficiência da flotação com PAC | 44 |
| 5.2.1. | Turbidez e Cor aparente | 44 |

| | |
|---|----|
| 5.2.2. Demanda Química de Oxigênio | 52 |
| 5.2.3. Fósforo Total | 54 |
| 5.3. Ensaios para verificação da influência da fração de recirculação na eficiência da flotação com PAC | 56 |
| 5.3.1. Turbidez e Cor aparente | 56 |
| 5.3.2. Demanda Química de Oxigênio | 61 |
| 5.3.3. Fósforo Total | 62 |
| 5.4. Série IV - Ensaios de determinação da demanda de cloreto férrico para coagulação | 64 |
| 5.4.1. Turbidez e Cor aparente | 64 |
| 5.4.2. Demanda Química de Oxigênio | 69 |
| 5.4.3. Fósforo Total | 71 |
| 5.5. Série V - Ensaios de determinação da demanda de sulfato de alumínio para coagulação | 73 |
| 5.5.1. Turbidez e Cor aparente | 73 |
| 5.5.2. Demanda Química de Oxigênio | 78 |
| 5.5.3. Fósforo Total | 80 |
| 5.6. Série VI –Ensaios para análises detalhadas..... | 81 |
| 5.6.1. Distribuição do Tamanho das Partículas (DTB) | 84 |
| 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES..... | 87 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 89 |

1. INTRODUÇÃO

A importância do tratamento de águas domésticas resíduárias conjectura-se em diversos meios como: solo, ar e recursos hídricos. Pois, envolve um dos principais ciclos biogeoquímicos, o da água; sendo este fundamental para manutenção da saúde dos seres vivos e do equilíbrio ecológico.

A falta de tratamento de esgotos domésticos traz grandes prejuízos, uma vez que diminui a qualidade da água de corpos hídricos impossibilitando sua função ecológica e o uso para a sociedade. Logo, ratifica-se a importância da implantação de medidas que visem mitigar os impactos oriundos de ações antrópicas sobre este recurso natural.

Desta forma, uma proposição de tratamento que se utiliza de reator anaeróbio seguido de tratamento físico-químico tem apresentado grandes vantagens em relação às que se utilizam basicamente do processo aeróbio, tais como, menores custos de operação e manutenção, menor consumo de energia elétrica e, geralmente, menor produção de lodo. (CAMPOS et al, 1996). Devido a tais vantagens muitos estudos têm sido realizados com o propósito da avaliação e desenvolvimento desta configuração de tratamento, principalmente com o uso da flotação por ar dissolvido (FAD) como processo de tratamento físico-químico.

O presente trabalho está inserido no cenário hipotético de um sistema de tratamento de esgoto sanitário conforme apresentado de forma simplificada na Figura 1, e, teve como proposta a avaliação do uso da técnica de FAD apenas como etapa de separação de sólidos em suspensão ou como pós-tratamento físico-químico (nesse caso associando coagulação e flocação à FAD) do efluente de um reator anaeróbio de leito fixo constituído de fibras flexíveis, objeto de estudo de PELEGRINO (2016)¹ em sua pesquisa de doutorado (atualmente em fase de solicitação de patente), em um projeto idealizado pelo grupo de pesquisa coordenado pelo Prof. Dr. Marco Antônio Penalva Reali e implantado em escala piloto no LATAR – SHS/EESC/USP.

¹PELEGRINO, E. C. F. Proposição, construção e avaliação do desempenho de um sistema constituído por reator anaeróbico com leito de fibras flexíveis em escala piloto aplicado ao tratamento de esgoto. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

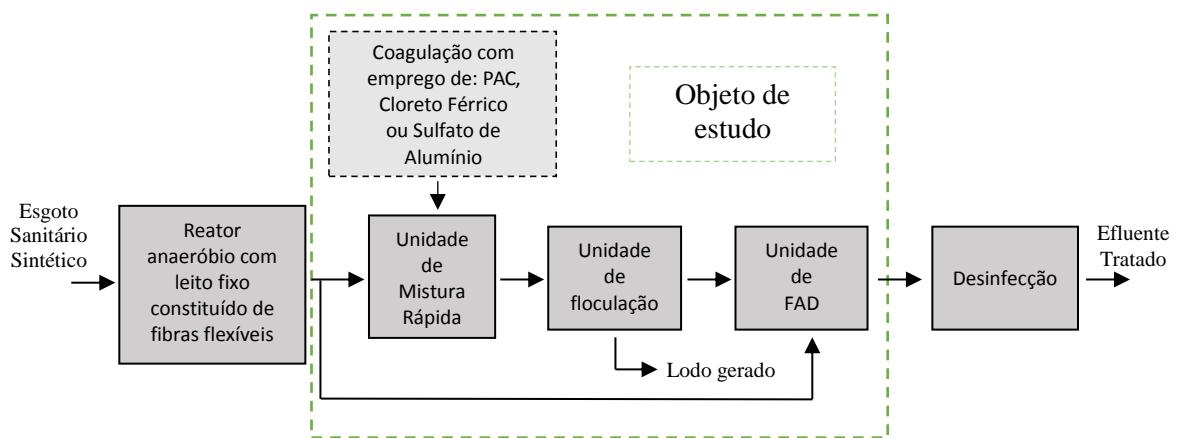


Figura 1- Cenário hipotético no qual o presente estudo, em escala de laboratório, está inserido.

2. OBJETIVO

2.1. Objetivo geral

O presente trabalho teve como objetivo aplicar e avaliar a eficiência da técnica de flotação por ar dissolvido (FAD) como unidade de separação de sólidos ou de tratamento complementar (nesse caso associando-se coagulação e floculação à FAD) do efluente de um reator anaeróbio de leito fixo constituído de fibras flexíveis, alimentado por solução sintética simulando um padrão de águas residuais domésticas.

2.2. Objetivo específico

- Avaliar a eficiência da FAD como unidade de separação de sólidos em suspensão (sem aplicação de coagulantes) presentes no efluente do referido reator anaeróbio de leito fixo constituído de fibras flexíveis
- Avaliar a influência da aplicação de diferentes coagulantes (policloreto de alumínio - PAC, cloreto férrico – FeCl_3 e sulfato de alumínio – $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) na eficiência de remoção de DQO, turbidez, cor e fósforo por flotação.
- Determinar dosagens adequadas (otimizadas) para os coagulantes supracitados, bem como os parâmetros ótimos para as condições de floculação e fração de recirculação na aplicação da flotação por ar dissolvido.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Coagulação

Segundo Reali et al (2001), para uma boa eficiência do processo de flotação é fundamental que se promova a coagulação e flocação das partículas dispersas na água; além da presença de microbolhas de ar com boa distribuição de tamanhos. O processo de coagulação é responsável pela separação de impurezas associadas a partículas coloidais e em suspensão e pode gerar remoção de DBO na faixa de 70 a 75% e de sólidos de 95 a 98% para o esgoto bruto (ODEGAARD², 1979 apud REALI et al, 1991).

As partículas coloidais consistem em sólidos de 1 nm a 1 µm, que possuem propriedades elétricas, o que atrai uma dupla camada de íons de carga oposta que impede a ligação e agregação entre os coloides. Para Di Bernardo e Dantas (2005) as forças de atração entre tais partículas são inferiores às forças de repulsão fazendo com que elas realizem um movimento Browniano que as mantém em suspensão na água.

O processo de coagulação química consiste na desestabilização destas partículas de modo que se torne possível a colisão entre estas, ocorrendo a formação de partículas maiores (METCALF & EDDY, 2003). Por meio da adição do coagulante desestabiliza-se a suspensão coloidal reduzindo-se a barreira repulsiva, sendo que, este processo ocorre de forma muito rápida com duração de apenas poucos segundos.

A coagulação, geralmente realizada com sais de alumínio e ferro, resulta de dois fenômenos: o primeiro, essencialmente químico, consiste nas reações do coagulante com a água e na formação de espécies hidrolisadas com carga positiva e depende da concentração do metal e pH final da mistura; o segundo, fundamentalmente físico, consiste no transporte das espécies hidrolisadas para que haja contato entre as impurezas presentes na água (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

As partículas coloidais que são responsáveis por conferir cor e turbidez às águas, são dotadas de íons negativos, e para a desestabilização é necessário a adição de produtos químicos reduzindo as forças que tendem a manter partículas semelhantes afastadas, para provocar a aglomeração de tais, e posterior remoção por meio dos processos de flotação, sedimentação ou filtração (CARDOSO, 2003).

² ODEGAARD, H. Chemical Floc Formation in Wastewater Treatment – An Introduction. Prog. Wat. Tech., Supl. 1, Pergamon Press, 1979.

De acordo com Tansel (2004) a ação do coagulante facilita a agregação e deposição de partículas, pois este age sobre a superfície de cisalhamento, qual possui grande potencial elétrico, diminuindo as forças elétricas de repulsão que ocorrem devido ao Potencial Zeta, aumentando a quantidade de íons positivos na camada difusa, o que faz com que as forças de atração prevaleçam.

O Potencial Zeta caracteriza-se pelo potencial elétrico entre a superfície da camada compacta dos coloides e a superfície da camada difusa (Figura 2).

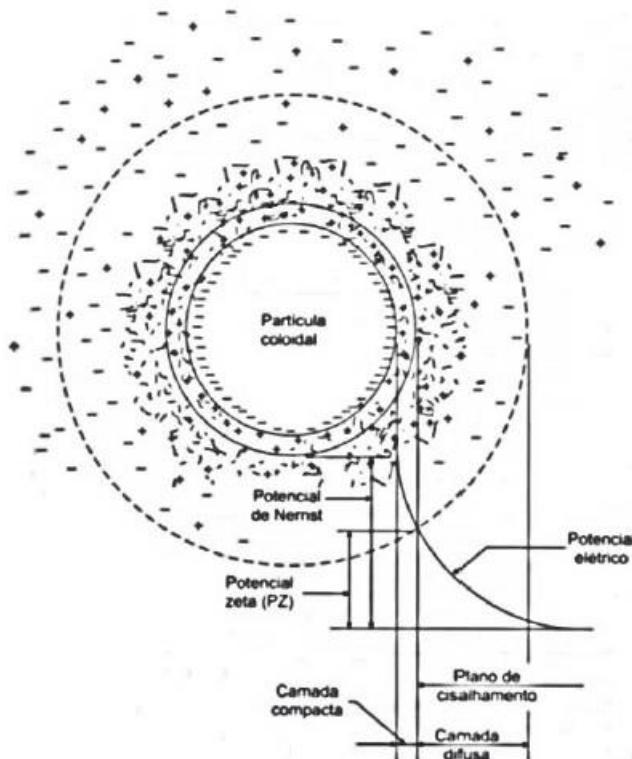


Figura 2 - Configuração esquemática da partícula coloidal. Fonte: (DI BERNARDO; DANTAS, 2005)

Conforme (RICHTER & AZEVEDO NETTO, 1991), as forças de Van der Waals fazem com que as partículas se atraiam formando aglomerados, mas para que isto ocorra é necessário que se realize a redução das forças de repulsão eletromagnéticas, ou seja, o Potencial Zeta, de forma que se torne possível as colisões.

Para que a coagulação ocorra de forma a desestabilizar a maior quantidade possível de partículas é fundamental a realização de uma distribuição ampla e uniforme do coagulante. Logo, a unidade de mistura rápida tem como função a aplicação de grande turbulência no líquido, para que o coagulante entre em contato com a água residual de forma mais dispersa e rápida possível.

Na Figura 3 é apresentado um esquema ilustrado do mecanismo de agregação das partículas.

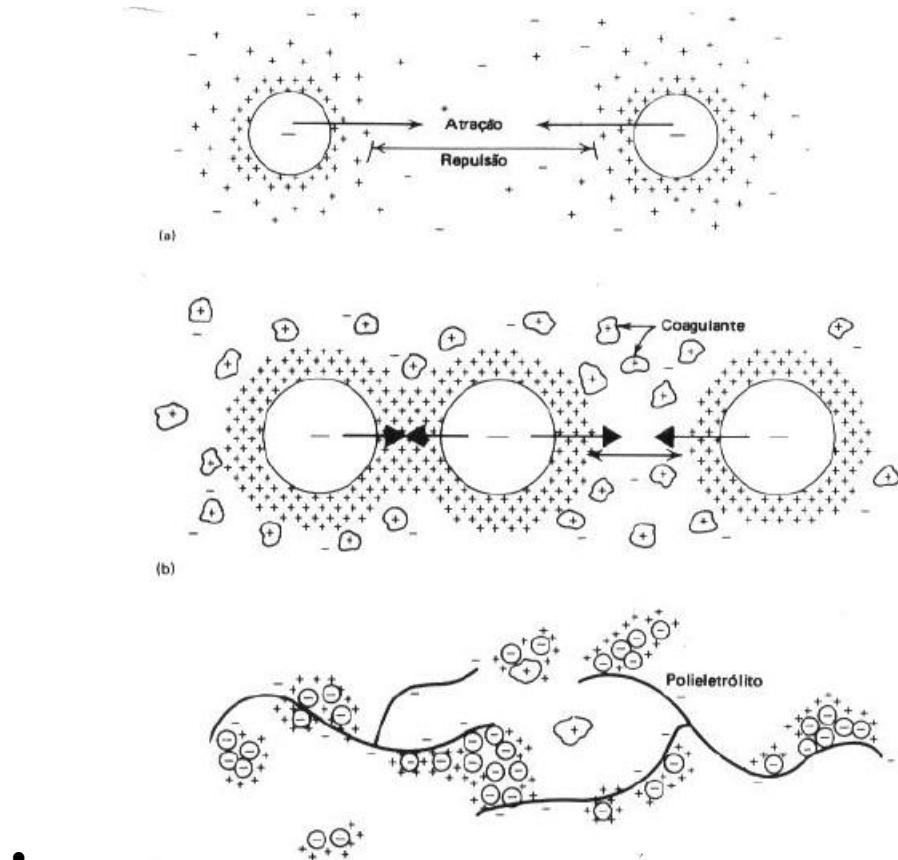


Figura 3 - Mecanismo de agregação das partículas: a) Forças de atração e repulsão entre os coloides e o meio aquoso; b) desestabilização das cargas dos coloides, por meio da adição do coagulante; e c) formação de aglomerados de partículas por meio da adição do auxiliar de coagulação (polímero polieletrólico).

Fonte: (SANTOS FILHO³, 1973 apud SCHOENHALS, 2006)

3.1.1. Mecanismos de coagulação

O processo de coagulação pode ocorrer por meio de quatro diferentes mecanismos, sendo eles: compressão da camada difusa, adsorção e neutralização de cargas, varredura e adsorção e formação de ponte.

3.1.1.1. Compressão da camada difusa

Com a adição de eletrólitos indiferentes em um sistema coloidal, há o acréscimo de íons na camada difusa com aumento da densidade de cargas, que para manter-se eletricamente nula reduz de volume. Desta forma, acontece a diminuição do potencial elétrico e da força de repulsão entre os coloides, o que permite que as forças de Van der Waals prevaleçam.

Dos quatro mecanismos de coagulação, este é o único a não ocorrer no tratamento de águas residuárias.

³ SANTOS FILHO, F. Tecnologia de tratamento de água para a indústria. Nobel. São Paulo, 1973.

3.1.1.2. Adsorção e neutralização de carga

Nesse mecanismo os íons positivos oriundos das interações entre coagulante, solvente e coloide são adsorvidos na superfície dos coloides neutralizando as cargas negativas das partículas coloidais, e desestabilizando-as. Isto ocorre devido à forte tendência de agregação dos polieletrólitos nas interfaces, como os sais de Fe^{3+} e Al^{3+} , que formam elementos hidrolisados polinucleares ($\text{Me}_q(\text{OH})_{nq+}$) facilmente adsorvidos na interface partícula água. (PENETRA, 1998)

3.1.1.3. Varredura

No mecanismo de varredura utiliza-se de grandes dosagens de coagulante acarretando na rápida precipitação de hidróxidos de metais, como $\text{Al}(\text{OH})_3$ e $\text{Fe}(\text{OH})_3$, por exemplo. Esta reação faz com que os coloides sejam emaranhados nas substâncias precipitadas e gera flocos maiores, usualmente melhores para remoção por sedimentação.

3.1.1.4. Adsorção e formação de pontes

A adsorção e formação de pontes decorre da adição de compostos orgânicos de grande cadeia molecular (polímeros), que possuem sítios ionizáveis que interagem com as partículas coloidais. Os polímeros servem de pontes entre as partículas às quais estão aderidos e outras partículas (DI BERNARDO, 2005).

De acordo com (REALI et al, 2001) os polímeros podem ser:

- catiônicos: possuem sítios ionizáveis positivos;
- aniônicos: possuem sítios ionizáveis negativos;
- não iônicos: não possuem sítios ionizáveis;
- anfolíticos: possuem sítios ionizáveis positivos e negativos.

Para se obter ótimas condições de coagulação é necessário a aplicação de dosagens de coagulante em condições favoráveis de pH, e que determinem baixos resíduos dissolvidos. Assim como boa eficiência de remoção para parâmetros como, turbidez, cor e matéria orgânica.

A seguir, são apresentadas as condições de coagulação em função do pH para cada coagulante estudado neste trabalho (Cloreto Férrico, Sulfato de Alumínio e Policloreto de Alumínio).

Na Figura 4 estão apresentadas as frações das espécies de ferro dissolvidas em função do pH, para a condição de temperatura a 25 °C.

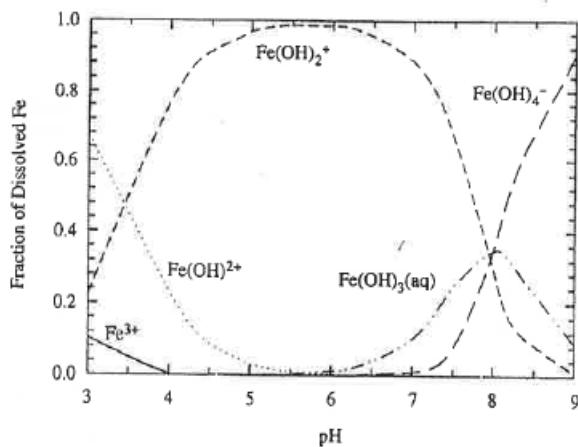


Figura 4 - Espécies de ferro dissolvidas em função do pH. Fonte: (HAARHOFF; EDZWALD, 2012)

A forma dissolvida disponível no início da coagulação para reagir com os contaminantes depende do pH de coagulação, isto é, o pH durante a mistura rápida após a adição do coagulante (HAARHOFF; EDZWALD, 2012). É possível observar que a coagulação utilizando cloreto férrico apresenta boas condições em pH inferior a 7,5. Porém, para maximizar a fração de íons positivos o pH deve estar entre 5,0 e 6,5.

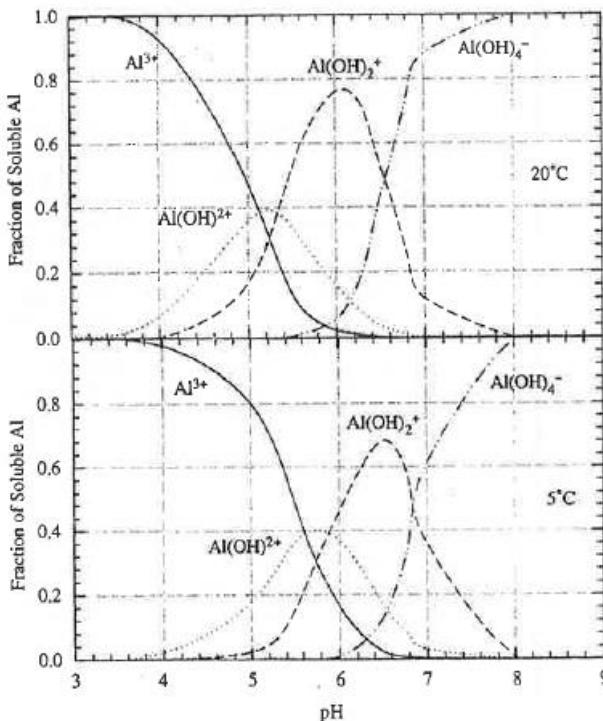


Figura 5 - Espécies de alumínio dissolvidas em função do pH para as temperaturas de 20 e 5 °C.
Fonte: (HAARHOFF; EDZWALD, 2012)

A Figura 5 mostra que a coagulação utilizando sulfato de alumínio apresenta boas condições com pH entre 6 e 7, visando maximizar a precipitação de hidróxido de alumínio e

minimizar o residual de alumínio dissolvido. Mais especificamente para o caso de 20 °C deve-se utilizar o pH de coagulação entre 6,0 e 6,5 para uma ótima eficiência.

Na Figura 6, a seguir, são apresentadas as espécies de alumínio dissolvidos para o policloreto de alumínio (PAC), considerando o alumínio total por 1 mg/L de coagulante, para as temperaturas de 5 e 20 °C.

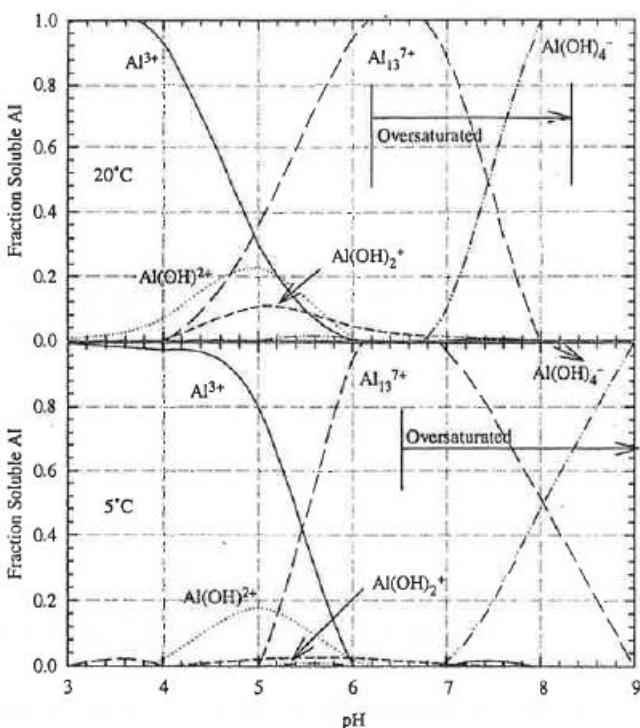


Figura 6 - Espécies de alumínio dissolvidos para PAC, considerando o alumínio total por 1 mg/L de coagulante, em relação ao pH. Fonte: (HAARHOFF; EDZWALD, 2012)

Para o PAC é possível a obtenção de um bom processo de coagulação para pH na faixa de 6,0 a 7,5, dependendo da temperatura do efluente; entretanto as condições ótimas para temperatura a 20 °C apresentam-se com pH por volta de 6,5.

3.2. Floculação

Após a desestabilização das impurezas presentes na água, é necessária a formação de flocos, geralmente obtidos por meio do uso de floculadores mecânicos ou hidráulicos, com a aplicação de um baixo gradiente de velocidade para um determinado tempo de detenção. A agitação lenta permite que ocorram choques entre as partículas, que se aglomeram e formam partículas maiores (flocos), de forma que os gradientes devem ser limitados para que não

ultrapassem a resistência do cisalhamento das partículas. (LEME⁴, 1979 apud CARDOSO, 2003).

Durante as etapas de coagulação, floculação e flotação ocorre a formação de flocos, sendo o início durante o processo de coagulação com a formação de flocos primários. Após a desestabilização dos coloides a água residual segue para os floculadores, onde há a agregação das impurezas em flocos maiores, nos quais haverá a adsorção das partículas dissolvidas e coloidais. É possível classificar o processo de floculação em três diferentes mecanismos, sendo eles: floculação pericinética, floculação ortocinética e floculação por sedimentação diferencial.

Na floculação pericinética ou movimento browniano, as partículas coloidais encontram-se em um movimento aleatório ocasionado devido à agitação das moléculas de água, neste mecanismo a energia propulsora da floculação é a energia térmica do fluido.

A floculação ortocinética acontece devido à incidência de um gradiente de velocidade sobre o líquido em tratamento, as partículas se chocamumas com as outras por meio do movimento do fluido em que o gradiente está sendo aplicado.

Já na floculação por sedimentação diferencial, as partículas coloidais chocam-se umas com as outras devido a estas possuírem velocidades contrastantes causadas pela diferença de tamanho das partículas. A agregação ocorre quando as partículas maiores, geralmente mais rápidas, chocam-se com as partículas menores, mais lentas (HUNT, 1980).

Após a etapa de floculação o efluente segue para o processo de separação dos flocos em suspensão formados anteriormente, o que pode ocorrer por meio da sedimentação, flotação ou filtração.

3.3. Flotação como pós-tratamento

A flotação é um processo que envolve três fases: líquida, sólida e gasosa. É utilizado para separar partículas suspensas ou materiais graxos e oleosos de uma fase líquida. A separação é produzida pela introdução de bolhas de gás, geralmente o ar, que em contato com as partículas resultam em um agregado, cuja densidade é menor que a do líquido, e dessa forma ascende à superfície do mesmo. As principais vantagens do uso da flotação no tratamento de águas residuais em relação à sedimentação consistem em que partículas muito pequenas ou leves, com baixas velocidades de sedimentação, podem ser removidas de forma mais efetiva e em um período menor de tempo. Após as partículas atingirem a superfície, estas podem ser coletadas por um processo de raspagem superficial (METCALF & EDDY, 2003).

⁴ LEME, F. P. Teoria e técnicas de tratamento de água. São Paulo, CETESB, 1979.

A flotação remove sólidos em suspensão e, ao ser combinada com agentes coagulantes, é capaz de remover nutrientes, principalmente o fósforo, e parcela da matéria orgânica dissolvida. Além disso, a flotação proporciona a redução dos teores de gases odoríferos e eleva o nível de oxigênio dissolvido, o que resulta num efluente de melhor qualidade (REALI et al, 2001).

3.3.1. Tipos de Flotação

Os processos de flotação podem ser classificados de acordo com as diferenças no método de produção das bolhas de gás:

A eletroflotação é um processo no qual obtém-se bolhas de ar utilizando-se da passagem de corrente contínua entre dois eletrodos dentro da câmara de flotação, para provocar a eletrólise da água e gerar bolhas de O₂ e H₂, produzindo bolhas de diâmetro menor do que os demais tipos de flotação.

Na flotação por ar disperso, a formação de bolhas de ar é feita por agitação do líquido por meio de turbinas e rotores, à pressão atmosférica. As bolhas produzidas neste tipo de flotação são relativamente maiores e possuem diâmetros superiores a 1 mm, de forma que para a obtenção de bolhas com diâmetros menores pode-se utilizar de placas porosas para a introdução do gás.

Na flotação por ar dissolvido, as bolhas são produzidas pela supersaturação de um líquido com o ar, que pode ser efetuada a vácuo ou à pressão. O ar então é precipitado na forma de pequenas bolhas, e com pouca agitação do líquido. No caso da flocação a vácuo por ar dissolvido, o líquido é saturado com ar à pressão atmosférica e, em seguida, é introduzido em uma câmara de flotação submetida a vácuo, quando são formadas as bolhas de ar. Na flotação por ar dissolvido por pressurização, o ar é injetado na entrada de uma câmara de saturação enquanto o líquido se encontra sob pressão. No interior dessa câmara ocorre a dissolução de ar na massa líquida pressurizada, e então o líquido é encaminhado para a câmara de flotação sob pressão atmosférica. A redução brusca de pressão provoca o desprendimento do ar na forma de microbolhas, que aderem às partículas em suspensão, emergindo à superfície. (REALI et al, 2001)

3.3.2. Flotação por Ar Dissolvido (FAD)

A flotação por ar dissolvido (FAD), em relação ao demais apresentados previamente, permite maior flexibilidade ao processo, de modo que a faixa de pressão a ser utilizada é maior. O que possibilita um controle mais eficiente da quantidade de ar precipitado

que, aliado ao pequeno tamanho das bolhas, constitui a principal vantagem no tratamento de efluentes. Esta técnica é utilizada em sistemas de tratamento de águas residuárias em diversas áreas da indústria, como: papel e celulose, petrolífera, de tintas, de óleos vegetais e alimentícias em geral. Além de ser empregada, de forma bem-sucedida, na clarificação de águas de abastecimento, em substituição ao uso de decantadores (REALI, 1991; CARVALHO, 2003).

De acordo com Reali (1991), o uso da FAD apresenta vantagens em relação à sedimentação, tais como:

- Possibilidade de arraste de parcela de substâncias voláteis que por acaso estejam presentes na água;
- Possibilidade de oxidação de íons metálicos dissolvidos na água, como por exemplo, o ferro;
- Produção de lodo com elevado teor de sólidos na superfície do flotador, atingindo até 12%, dependendo do tipo de dispositivo de coleta utilizado e das características da dispersão;
- Constitui processo de alta taxa, o que resulta em unidades compactas e versáteis, que possibilitam bom nível de controle operacional por meio do monitoramento da quantidade de ar fornecida ao processo;
- Emprega dosagens de coagulantes inferiores em relação às utilizadas na sedimentação, com a obtenção de eficiência de remoção semelhante.

A Flotação por Ar Dissolvido pode ser classificada em diferentes tipos, de acordo com o método de pressurização empregado:

- Pressurização total do afluente: o volume total do afluente é saturado com ar em altas pressões. (Figura 7)

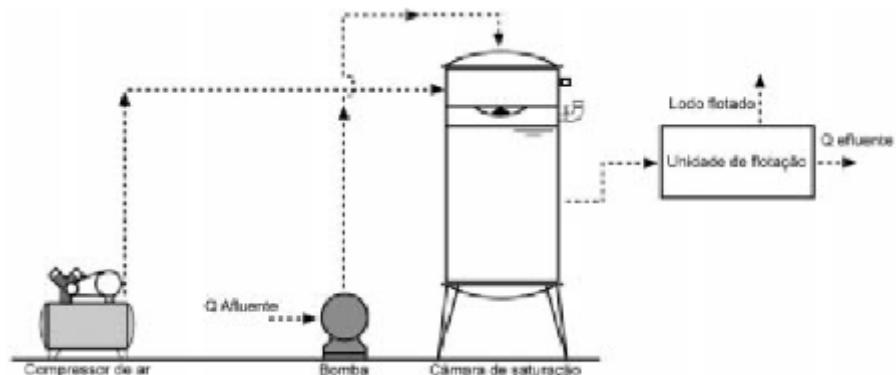


Figura 7 - Flotação por Ar Dissolvido com pressurização total do afluente. Fonte: (REALI, 1991)

- Pressurização parcial do efluente: uma parcela do volume afluente é saturada com ar sob altas pressões, enquanto a fração restante é encaminhada diretamente à câmara de flotação. (Figura 8)

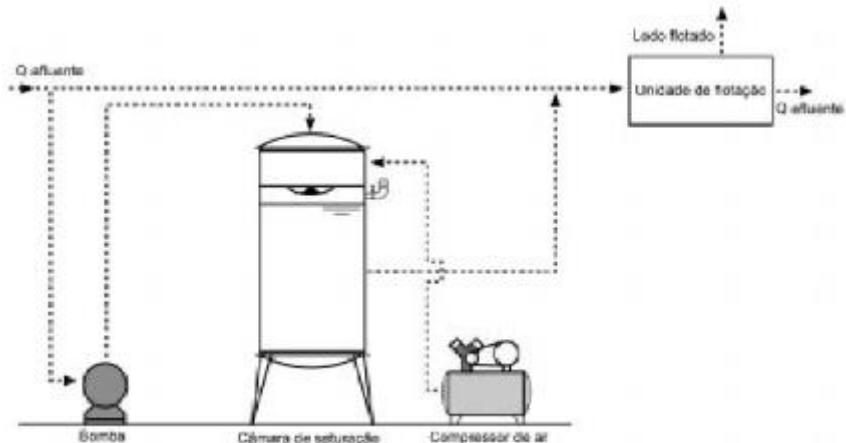


Figura 8 - Flotação por Ar Dissolvido com pressurização parcial do afluente. Fonte: (REALI, 1991)

- Recirculação pressurizada: uma parcela do volume efluente já clarificado é saturado com ar em altas pressões, sendo recirculado para a câmara de flotação e misturado ao volume total de afluente. (Figura 9)

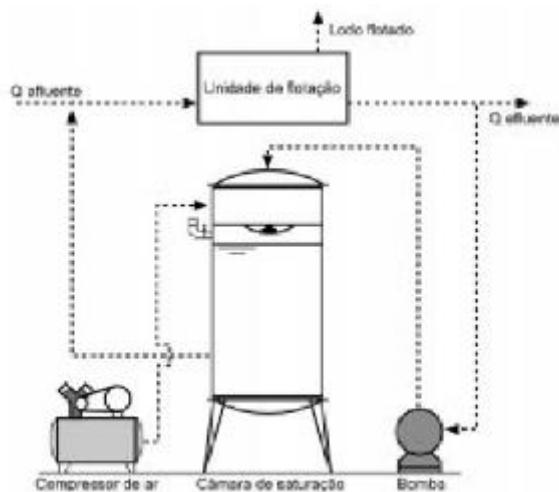


Figura 9 - Flotação por Ar Dissolvido com recirculação pressurizada. Fonte: (REALI, 1991)

Ressalta-se que dentre os métodos apresentados o mais utilizado na clarificação de águas para abastecimento trata-se da recirculação pressurizada. Visto que, é o mais indicado

quando partículas frágeis estão presentes no afluente, como no caso dos flocos formado por coagulação prévia das partículas a serem flotadas. (REALI, 1991)

Segundo KITCHENER⁵ (1984 apud REALI, 1991), é comprovado experimentalmente que, é necessário que a fase sólida forme um ângulo de contato diferente de zero com a fase gasosa em um meio líquido, caso contrário as partículas não são flotáveis. Ademais, o autor completa que a flotabilidade de um sólido depende do seu grau de hidrofobicidade, responsável pelo estabelecimento de um ângulo de contato finito.

GOCHIN & SOLARI⁶ (1983 apud PENETRA, 1998) estudaram o papel do grau de hidrofobicidade das partículas e dos flocos na eficiência do processo de FAD, utilizando partículas e focos de quartzo em meio líquido. De acordo com os autores, as condições hidrodinâmicas do sistema e o grau de hidrofobicidade das partículas controlam a capacidade de aderências das bolas às estas. Além disso, estes concluíram que as partículas e os flocos de quartzo que eram hidrofílicos não puderam ser flotados pela FAD, o que demonstra a necessidade da hidrofobicidade e a importância da agregação do ponto de vista da cinética do processo.

Aliado ao fator de aderência, outro aspecto importante para a boa eficiência da FAD é o tamanho das microbolhas de ar inseridas no flotador. Pois, quanto menor o diâmetro destas, maior a probabilidade de colisão com os flocos em suspensão, de forma que o ângulo de contato seja diferente de zero, e mais forte a aderência entre a bolha e o floco devido à menor velocidade de ascensão. Logo, quanto menor o diâmetro das microbolhas, mais efetivo será o processo de FAD.

Reali et al, (2001) analisa que a faixa recomendada de tamanho de microbolhas está situada entre 10 e 100 mm, sendo desejável que a maior parte esteja em torno de 50 mm ou menos. De acordo com o autor é importante que a "nuvem" de microbolhas de ar produzida na entrada das unidades FAD seja uniformemente distribuída, permitindo que essas microbolhas exerçam seu papel com o máximo de eficiência.

Na Tabela 1, a seguir, são apresentados números de concentração de microbolhas por mL de suspensão no interior da zona de reação -N_b, tais valores foram calculados utilizando-se do modelo do processo de flotação proposto por REALI (1991).

⁵ KITCHENER, J. A. **The Froth Flotation Process: Past, Present and future, In: Nato Advanced Institute on the Scientific Basis of Flotation.** 1982. Cambridge, England. Proceedings. Ed. By K. J. Ives. The Hague, Martin US. 1984. p. 3-51(Nato Asi Series).

⁶ GOCHIN, R. J.; SOLARI, J. **The Role of Hydrophobicity in Dissolved Air Flotation.** Water Research. V.17, n.6. 1983. New York, USA. p. 651-657.

Tabela 1- Estimativa da concentração e da distância média entre as microbolhas de ar, presentes no início de uma unidade FAD, em função do diâmetro das microbolhas. Fonte: (REALI, 1991).

| Diâmetro das microbolhas (mm) | Concentração (N_b): nº de bolhas por ml de suspensão | Distâncias media (Δb) entre as microbolhas (mm) |
|--------------------------------------|--|---|
| 0,01 | 18.000.000 | 0,04 |
| 0,03 | 670.000 | 0,12 |
| 0,05 | 150.000 | 0,20 |
| 0,07 | 50.000 | 0,28 |
| 0,10 | 18.000 | 0,40 |

Notas: Sistema FAD com as seguintes características: pressão de saturação de 450 kPa; 95% de eficiência no sistema de saturação; 15% de recirculação pressurizada; temperatura do líquido igual a 20 °C.

3.4. Aplicação da FAD no tratamento de águas residuárias como pós-tratamento de reatores anaeróbios

Reatores anaeróbios são capazes de serem operados com tempos de retenção de sólidos elevados e baixíssimos tempos de detenção hidráulica, isso confere a estes um enorme potencial no tratamento de águas residuárias de baixa concentração. Aliado a isso, o baixo custo, simplicidade operacional e o clima brasileiro, predominantemente de elevadas temperaturas durante boa parte do ano, contribuem para que o tratamento de aguas residuárias por meio de reatores anaeróbios ganhe posição de destaque no cenário nacional, principalmente o UASB. (CHERNICHARO et al, 2001). Porém, uma desvantagem destes é a usual necessidade de alguma forma de tratamento adicional, principalmente pela concentração residual de matéria orgânica, sólidos suspensos totais, nitrogênio e fósforo total.

Neste cenário o processo de FAD aparece como uma alternativa interessante de pós tratamento, pois apresenta uma boa resposta na remoção de sólidos suspensos e com o auxílio do emprego de coagulantes remove nutrientes, como fósforo e parte da matéria orgânica presente nas águas residuárias.

PENETRA, 1998 estudou o uso de FAD no pós-tratamento de efluente de reator anaeróbio de manta de lodo (UASB), tratando esgoto sanitário. Foram realizados estudos em escala laboratorial e escala piloto, empregando diferentes dosagens de cloreto férrico e polímero catiônico, separadamente, como coagulantes no processo. Nos ensaios em escala de laboratório analisou-se as condições de flocação e influência da quantidade de ar fornecido à flotação. As melhores eficiências de remoção foram obtidas para as condições de dosagem de 65 mg/L de cloreto férrico, tempo de 15 min, gradiente médio de velocidade de flocação de 80 s^{-1} e com 19 g de ar por m^3 ; obtendo-se remoção de 89% de DQO, 96% de fosfato total, 96 % de sólidos suspensos totais, 98% de turbidez, 91% de cor aparente e 47% de NTK. Já para a instalação piloto de FAD, realizou-se ensaios para a análise da taxa de aplicação superficial, o

sistema apresentou remoções de 93,6 % de DQO, 87,1% de SST, 90% de sulfetos e 30 % de NTK. Em relação à eficiência global, considerando o sistema UASB e FAD, foram observadas remoções de 97,7 % de DQO, 98% de SST, 99,5 % de turbidez, 97,8% de cor aparente e de 59% de NTK.

PELEGRINO, 2011 avaliou a eficiência de remoção de carga orgânica, fósforo e sólidos em suspensão empregando a FAD com uso de tanino como coagulante, associado ou não com polímeros sintético, como tratamento complementar de efluente de reatores UASB da ETE Monjolinho na cidade de São Carlos/SP. O estudo teve como proposta a análise da eficiência do processo de flotação com o uso do coagulante tanino, obtendo uma dosagem ótima dentro da faixa estudada, assim como a obtenção e verificação do melhor tipo (não-aniônico, aniônico e catiônico) e dosagem de polímero sintético a ser associado na aplicação do coagulante tanino. Os ensaios foram realizados em escala laboratorial, nos quais fixou-se os valores de gradiente de velocidade de mistura rápida (800 s^{-1}) aliado ao tempo de detenção de 20s e gradiente de flocação (90 s^{-1}) com tempo de detenção de 15 min. Após uma análise prévia da efetividade do coagulante empregado e definição de uma faixa de dosagens (65 a 105 mg/L) a serem avaliadas, associadas à diferentes dosagens dos polímeros supracitados; a autora concluiu como mais eficazes para o tratamento por flotação o polímero não-iônico e o polímero catiônico. Os melhores resultados de eficiência de remoção foram obtidos para o conjunto com dosagem de tanino de 65 mg/L e 2,0 mg/L de polímero catiônico, obtendo-se remoções de 95,2 % de turbidez, 82,1 % de cor aparente, 49,2 % de fósforo total, 80,7 % de DQO e 87,9 % de SST.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Descrição do sistema de tratamento em estudo

O sistema de tratamento objeto deste trabalho foi montado nas instalações do Laboratório de Tratamento Avançado e Reuso de Águas (LATAR), do Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC-USP, e consistiu de reator anaeróbico (em escala piloto, com escoamento contínuo) seguido de unidade FAD em escala de laboratório (Flotatest). Sendo a segunda etapa o objeto de estudo deste trabalho, conforme apresentado na Figura 10.

Com uso de tais unidades, dois cenários foram investigados: i) um primeiro cenário em que foi investigada a eficiência da FAD atuando apenas como unidade de separação de sólidos suspensos presentes no efluente do reator anaeróbio (sem aplicação de coagulantes), e; ii) um segundo cenário em que a foram agregadas à FAD etapas de coagulação (com aplicação de três diferentes coagulantes) e de floculação, com vistas não só à separação de sólidos suspensos, mas também à remoção de material coloidal e dissolvido (fósforo) presentes no efluente do reator anaeróbico, constituindo assim um sistema de pós-tratamento do efluente em questão.

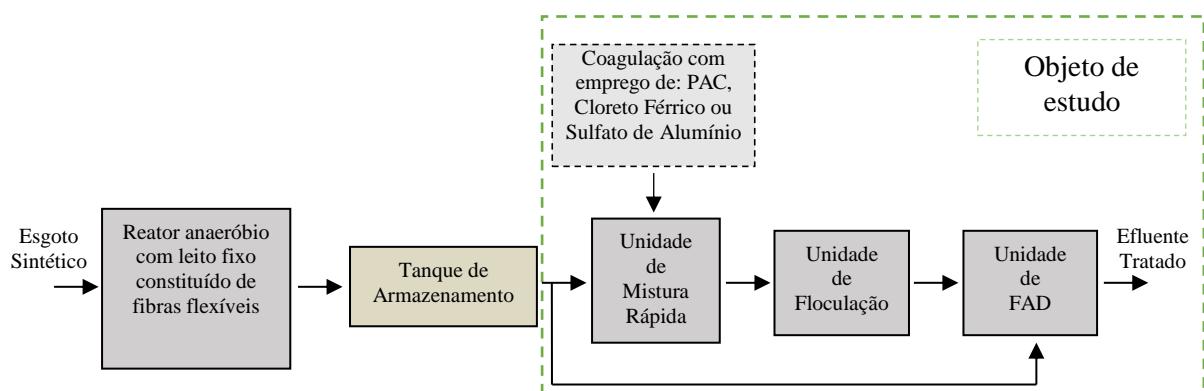


Figura 10 - Diagrama de blocos ilustrativos do sistema de flotação por ar dissolvido como pós tratamento do reator anaeróbio, com destaque para as etapas estudadas.

4.2. Reator Anaeróbio e alimentação do sistema

A alimentação do sistema foi realizada por meio de dois tanques, um de 500 L e outro de 1000 L, equipados de agitadores mecânicos para constante homogeneização do afluente utilizado; que consistia de uma solução sintética preparada com o objetivo de simular um padrão de águas residuais domésticas e foi adaptado de HO (2007). A Figura 11 demonstra os tanques de alimentação, enquanto na Tabela 2 são apresentadas as características do afluente sintético utilizado na alimentação do reator anaeróbio.



Figura 11 - Tanques de Alimentação do Reator Anaeróbio

Tabela 2 - Características do Esgoto Sintético

| Solução | Dosagem (mg/L) |
|----------------------|-----------------------|
| Amido solúvel | 236 |
| Acetato de sódio | 145 |
| Extrato de levedura | 36 |
| Leite em pó | 490 |
| Cloreto de amônio | 107 |
| Ureia | 78 |
| Fosfato de diamônio | 77 |
| Bicarbonato de sódio | 600 |

Após a homogeneização o afluente sintético era conduzido aos reatores anaeróbios com fluxo ascendente, por meio de bombas dosadoras. Tais reatores foram objeto de estudo de PELEGRINO (2016)⁷ em sua pesquisa de doutorado, em um projeto idealizado pelo grupo de pesquisa coordenado pelo Prof. Dr. Marco Antônio Penalva Reali e implantado em escala piloto no LATAR – SHS/EESC/USP. Em seu estudo, PELEGRINO (2016) utilizou de 6 reatores anaeróbios com meio suporte constituído de fibras flexíveis móveis, sendo metade destes operados em condição estática e os demais em constante rotação; para a realização desta pesquisa, o efluente destes era armazenado em tanques de coleta, conforme Figura 12, e após a coleta era realizada a clarificação do efluente com uso de FAD. Foi utilizado para este trabalho apenas o efluente do reator número 2, indicado na Figura 13, considerado o mais estável dos reatores analisados.

⁷ PELEGRINO, E. C. F. Proposição, construção e avaliação do desempenho de um sistema constituído por reator anaeróbico com leito de fibras flexíveis em escala piloto aplicado ao tratamento de esgoto. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.



Figura 12 - Tanques de coleta do efluente para pós-tratamento

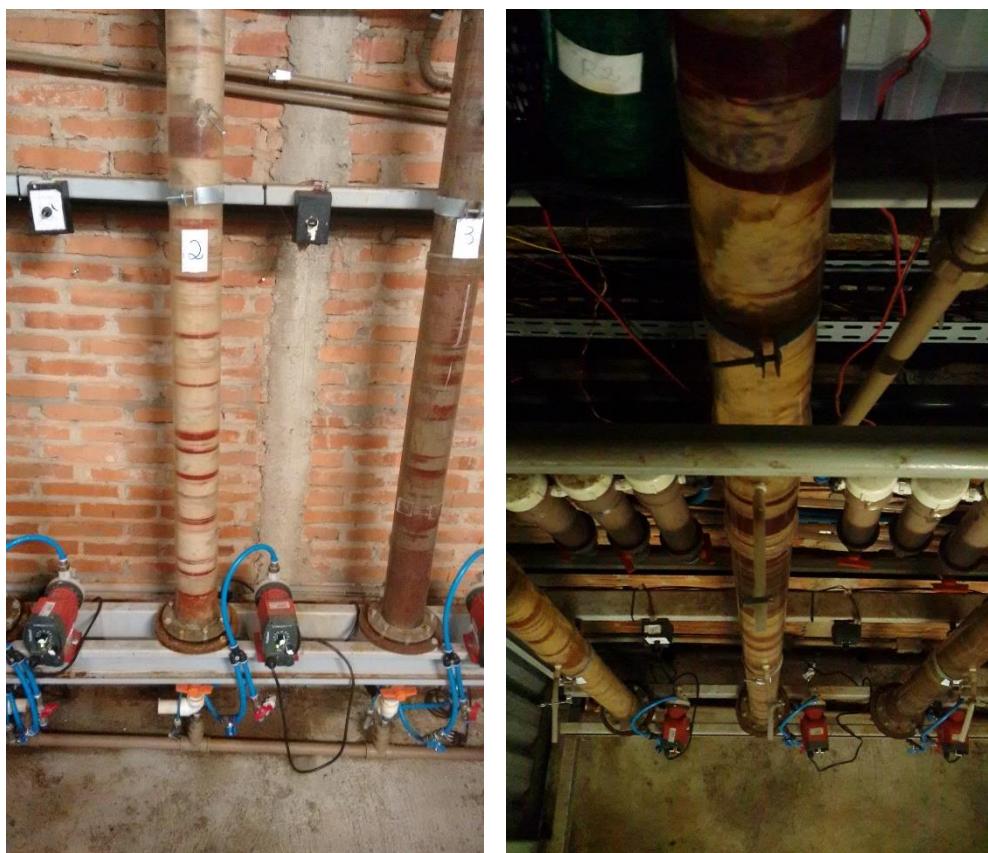


Figura 13 - Reatores anaeróbios utilizados na pesquisa de PELEGRINO (2016), com destaque para o reator 2 à esquerda

4.3. Equipamentos utilizados

4.3.1. Agitador Mecânico

Para a investigação da FAD atuando como pós-tratamento físico-químico do efluente do reator anaeróbio (com aplicação de coagulantes), empregou-se como unidade de mistura rápida o equipamento Agitador Mecânico mostrado na Figura 14-a. Esse equipamento possui 6 jarros de acrílico de volume aproximado de 2,3 L cada e agitadores mecânicos, para cada um dos vasos, com rotação

4.3.2. Flotateste

Para os ensaios em que foi investigada o emprego da FAD apenas como unidade de separação de sólidos suspensos associada ao reator anaeróbio (sem aplicação de coagulantes), foram utilizadas apenas as colunas de flotação (sem os agitadores para floculação) e a câmara de saturação do equipamento de Flotateste (ver Figura 14-b).

Para a investigação da FAD atuando como pós-tratamento físico-químico do efluente do reator anaeróbio (com aplicação de coagulantes), as etapas de floculação e flotação foram realizadas no equipamento Flotateste (Figura 14-b), composto de colunas cilíndricas com agitadores mecânicos de ajuste individual da rotação, para controle do gradiente de floculação utilizado em cada um dos ensaios. Já para a flotação, as colunas independentes entre si são interligadas à uma câmara de saturação dotada de manômetro, válvula de segurança e fornecimento de ar comprimido por meio de um compressor. A água para saturação é proveniente do abastecimento público e sua entrada nas colunas de flotação, após saturada, é controlada por meio de registros tipo agulha na base de cada coluna.



a) Agitador mecânico de bancada



b) Equipamento Flotateste

Figura 14 - Equipamentos utilizados durante os ensaios

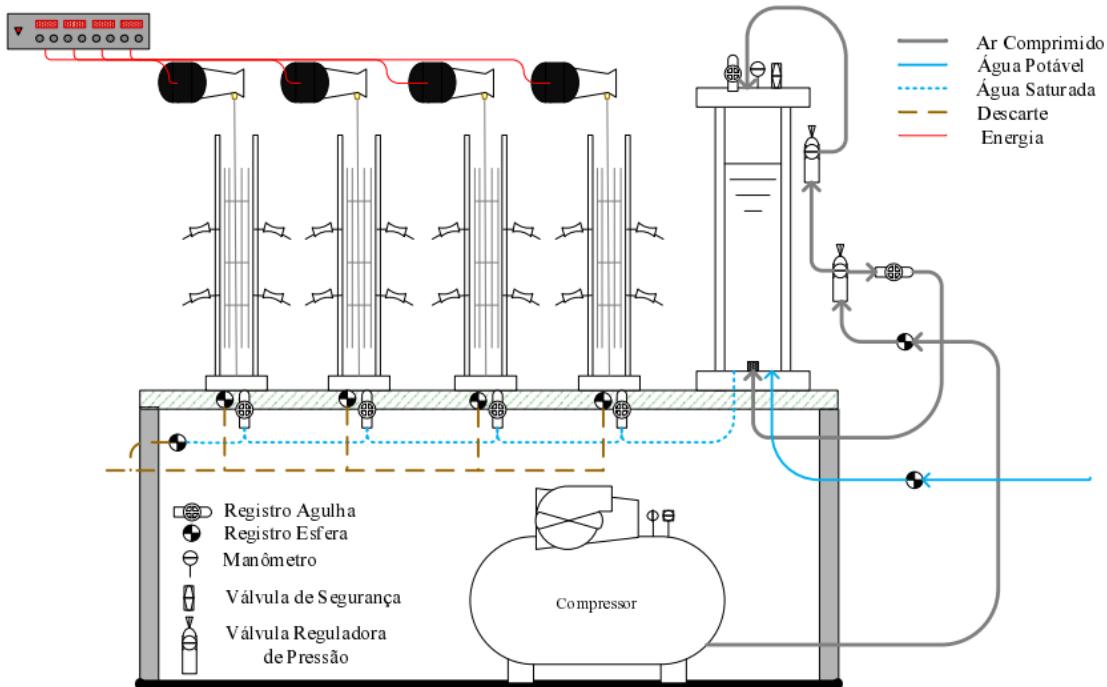


Figura 15 - Esquema ilustrativo do equipamento flotateste
Fonte: (SACCHI, 2015).

4.4. Produtos Químicos

Para a investigação da FAD atuando como pós-tratamento físico-químico do efluente do reator anaeróbio (com aplicação de coagulantes) foram testados os coagulantes Policloreto de Alumínio, Cloreto Férrico e Sulfato de Alumínio, cujas características estão descritas a seguir:

- Policloreto de Alumínio (PAC): Teor ativo de 10,66 % Al_2O_3 e densidade de 1,252 g/cm³. Para o uso do coagulante durante os ensaios foi preparada uma solução com concentração de 10 g/L do produto comercial líquido.
- Cloreto Férrico ($\text{FeCl}_3 \cdot 6 \text{ H}_2\text{O}$): Teor de pureza de 97,0 a 102% e peso molecular de 270,30 g/mol. Para o uso do coagulante durante os ensaios foi preparada uma solução com concentração de 20 g/L do produto comercial.
- Sulfato de Alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 16 \text{ H}_2\text{O}$): Teor de Sulfato de Alumínio hidratado de 101,5%. Para o uso do coagulante durante os ensaios, foi preparada uma solução com concentração de 20 g/L do produto comercial.

4.5. Parâmetros de estudo e métodos de aferição

Na Tabela 3 são apresentados os parâmetros definidos para a averiguação da eficiência de tratabilidade obtida nos ensaios realizados, assim como o equipamento e métodos empregados. Ressaltando-se que todos os equipamentos apresentados foram utilizados na infraestrutura analítica do Laboratório de Tratamento Avançado e Reuso de Águas (LATAR), do Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC-USP. Ainda, os métodos foram aplicados conforme descritos em APHA (2012) - Standard Methods for Examination of Water and Wastewater.

Tabela 3 - Parâmetros físico-químicos aferidos, unidades, equipamentos, métodos e limites de detecção

| Parâmetro | Unidade | Equipamento | Método | Limite de Detecção do Método (LDM) |
|--|------------------------|--|---------------------------------|------------------------------------|
| pH | Adimensional | pHmetro (potenciômetro), modelo 230 – Orion | Eletrométrico | 0,01 |
| Turbidez | uT (NTU) | Turbidímetro Hach 2100P | Nefelométrico | 0,1 |
| Cor Aparente | uH | Filtração em 0,45 µm e Especrofotômetro visível Hach DR/2800 | Espectrofotométrico | 1 |
| Cor Verdadeira | uH | Especrofotômetro visível Hach DR/2800 | Espectrofotométrico | 1 |
| DQO | mgO ₂ /L | Especrofotômetro visível Hach DR/2800 | Espectrofotométrico | 10 |
| DQO filtrada | mgO ₂ /L | Especrofotômetro visível Hach DR/2800 | Espectrofotométrico | 10 |
| Fósforo Total | mgP-PO ₄ /L | Especrofotômetro visível Hach DR/5000 | Espectrofotométrico | 0,001 |
| Fósforo Total dissolvido | mgP-PO ₄ /L | Especrofotômetro visível Hach DR/5000 | Espectrofotométrico | 0,001 |
| Distribuição do tamanho das partículas | % | Malvern – Zetasizer Nano ZS90 | Método descrito pelo fabricante | 0,3 nm < LDM < 10 µm |

4.6. Roteiro de Ensaios

Os ensaios de flotação por ar dissolvido como pós tratamento do efluente de reator anaeróbio com meio suporte fixo constituído de fibras flexíveis foram realizados em 6 séries apresentadas na

Tabela 4 e descritos nos subitens 4.6.2. a 4.6.7. Sendo apresentadas as condições utilizadas nas séries de ensaios e os seus respectivos procedimentos.

Durante as baterias de ensaios realizadas para avaliação do coagulante cloreto férrico, foi testado também a dosagem nula desse coagulante. Esses testes (com dosagem nula de coagulante) serviram como simulação do cenário em que se teria a FAD atuando apenas como unidade de separação dos sólidos suspensos presentes no efluente do reator anaeróbio, pois não houve aplicação de coagulante e, portanto, não houve etapas de coagulação e floculação.

Tabela 4 - Ensaios de flotação por ar dissolvido para o efluente do reator anaeróbio

| Ensaio de Tratabilidade | |
|-------------------------|--|
| Série I | Ensaios de determinação da demanda de PAC para coagulação |
| Série II | Ensaios para verificação da influência das condições de floculação na eficiência da flotação com PAC |
| Série III | Ensaios para verificação da influência da fração de recirculação na eficiência da floculação com PAC |
| Série IV | Ensaios de determinação da demanda de cloreto férrico para coagulação |
| Série V | Ensaios de determinação da demanda de sulfato de alumínio para coagulação |
| Série VI | Ensaios para análises detalhadas |

Para a realização dos ensaios transferia-se com o auxílio de uma proveta graduada o volume de 2L do efluente coletado para cada jarro do agitador mecânico. Iniciava-se o processo de mistura rápida, adicionando concomitantemente o coagulante. Após o tempo de mistura, parte do conteúdo dos jarros era transferido para as colunas do flotateste, onde era realizada a floculação. O volume transferido ao flotateste deve ser calculado considerando o percentual de recirculação desejado, e é obtido conforme apresentado na Equação 1. Somados, o volume de líquido a ser tratado e o volume de recirculação adicionado após o processo de floculação, reuniam o total de 2 L para cada coluna. Para a flotação, retirava-se as paletas rotativas utilizadas no processo anterior e liberava-se a entrada da água saturada na base das colunas. Ao final procedia-se com as coletas no tempo indicado, de acordo com cada velocidade de flotação definida.

Equação 1:

$$V + R = 2L$$

Equação 1- Volume adicionado por coluna para floculação

Onde:

V : volume a ser adicionado

R : percentual de volume para recirculação

Logo, para R = 17 %, têm-se:

$$V + 0,17V = 2L$$

$$V = \frac{2}{1,17} = 1,71L$$

Nota-se que, como na recirculação utilizou-se água já clarificada pressurizada, ocorre uma diluição da amostra tratada. Desta forma, necessita-se de uma correção dos dados obtidos para os parâmetros de controle para que se obtenha os valores reais, a qual é apresentada a seguir na Equação 2:

$$L_{real} = \frac{L_{mistura} \times \left(\frac{V_{amostra} + V_{recirculação}}{V_{amostra bruta}} \right)}{V_{amostra bruta}}$$

Equação 2 - Valor corrigido considerando a diluição da amostra

Onde:

L_{real} : valor corrigido

$L_{mistura}$: valor do parâmetro lido referente à mistura

$V_{amostra bruta}$: volume da amostra bruta

$V_{recirculação}$: volume de água recirculada

Ressalta-se que para os resultados de remoção obtidos neste trabalho e apresentados ao longo do Capítulo 5 (Resultados e Discussão) foram realizadas as devidas correções para os valores reais observados.

A título de elucidação, para o cálculo dos tempos de coleta de cada velocidade de flotação estudada (22; 18; 14 e 10 cm/min), foi observada a altura entre o ponto de coleta e a base da coluna do Flotatest (Figura 16), uma vez que a flotação está relacionada com a velocidade de ascensão das partículas, tendo como ponto de referência a parte inferior da coluna de ensaio. Foi obtida a altura de 28,5 cm para o cálculo dos tempos de coleta, sendo este apresentado a seguir na

Equação 3:

$$Tc = \frac{h}{Vft}$$

Equação 3 - Tempo de coleta das amostras

Onde:

Tc = tempo de coleta;

h = altura do ponto de coleta em relação à base da coluna

Vft = velocidade de flotação para a qual se realizará a coleta



Figura 16 - Altura do ponto de coleta da coluna de ensaio de floculação e flotação

4.6.1. Coleta

As coletas do efluente do reator anaeróbio eram efetuadas previamente à realização de cada série de ensaios. Realizava-se a homogeneização do efluente contido no tanque de armazenamento com o auxílio de um bastão, e então, transferia-se cerca de 30 L para galões; que em seguida eram armazenados em um recipiente próximo à bancada de ensaio para utilização.

4.6.2. Série I - Ensaios de determinação da demanda de PAC para coagulação

O objetivo desta primeira etapa foi encontrar a dosagem ótima de coagulante PAC para o pós-tratamento do efluente gerado no reator anaeróbio, por meio do processo de flotação por ar dissolvido. O roteiro de ensaios desta série está representado na Figura 17.

As condições utilizadas nos ensaios foram:

- Coagulante: PAC (dosagens variadas referentes ao princípio ativo Al_2O_3 , conforme Tabela 5);
- Mistura rápida
 - Tempo de Mistura Rápida (Tmr): 15 s;
 - Gradiente de Mistura Rápida (Gmr) = 900 s^{-1} ;
- Floculação:
 - Tempo de Floculação (Tf) = 15 min;

- Gradiente de Floculação (G_f) = 90 s^{-1} ;
- Flotação:
 - Velocidades de Flotação (V_{ft}): $V_{ft1} = 22 \text{ cm/min}$, $V_{ft2} = 18 \text{ cm/min}$, $V_{ft3} = 14 \text{ cm/min}$ e $V_{ft4} = 10 \text{ cm/min}$;
 - Percentual de Recirculação ($R = 17\%$);
 - Pressão de Saturação (P_{Sat}) = 5 bar;
- Parâmetros de controle:
 - água bruta (efluente do reator anaeróbio): turbidez (T), cor aparente (C), DQO (D), DQO filtrada (Df), fósforo total (P) e fósforo total filtrado (Pf);
 - água coagulada: pH de coagulação e temperatura;
 - água após a flotação: turbidez (T), cor aparente (C), DQO (D), DQO filtrada (Df), fósforo total (P) e fósforo total filtrado (Pf).

As dosagens definidas para a avaliação são mostradas na Tabela 5

Tabela 5 – Dosagens de PAC para avaliação da dosagem ótima

| <i>Coagulante</i> | Dosagem (mg/L) | | | | | | | | | |
|-------------------|-----------------------|---|----|----|----|----|----|----|----|----|
| PAC | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 |

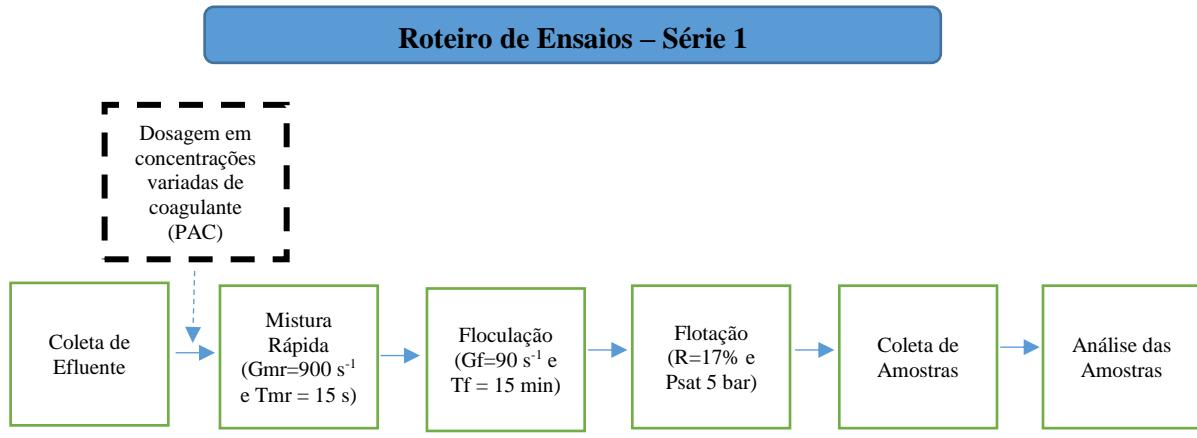


Figura 17 - Roteiro de Ensaios da Série I

4.6.3. Série II - Ensaios para verificação da influência das condições de floculação na eficiência da flotação com PAC

A partir da dosagem ótima encontrada para as condições da Série I, foram realizados ensaios para a verificação da influência das condições de floculação na eficiência da flotação por ar dissolvido. O roteiro de ensaios desta série está representado na Figura 18.

As condições utilizadas nos ensaios foram:

- Coagulante: PAC (14 mg/L, dosagem referente ao princípio ativo Al_2O_3);
- Mistura rápida: $T_{mr} = 15\text{s}$, $G_{mr} = 900 \text{ s}^{-1}$;
- Floculação:
 - Tempo de floculação (T_f): $T_{f1} = 10\text{ min}$, $T_{f2} = 15\text{ min}$, $T_{f3} = 20\text{ min}$ e $T_{f4} = 25\text{ min}$;
 - Gradiente de floculação (G_f): $G_{f1} = 70 \text{ s}^{-1}$, $G_{f2} = 90 \text{ s}^{-1}$, $G_{f3} = 110 \text{ s}^{-1}$
- Flotação:
 - Velocidades de flotação: $V_{ft1} = 22 \text{ cm/min}$, $V_{ft2} = 18 \text{ cm/min}$, $V_{ft3} = 14 \text{ cm/min}$, $V_{ft4} = 10 \text{ cm/min}$;
 - $R = 17\%$;
 - $PSat = 5 \text{ bar}$;
- Parâmetros de controle:
 - água bruta (efluente do reator anaeróbio): turbidez (T), cor aparente (C), DQO (D), DQO filtrada (Df), fósforo total (P) e fósforo total filtrado (Pf);
 - água após a flotação: turbidez (T), cor aparente (C), DQO (D), DQO filtrada (Df), fósforo total (P) e fósforo total filtrado (Pf).

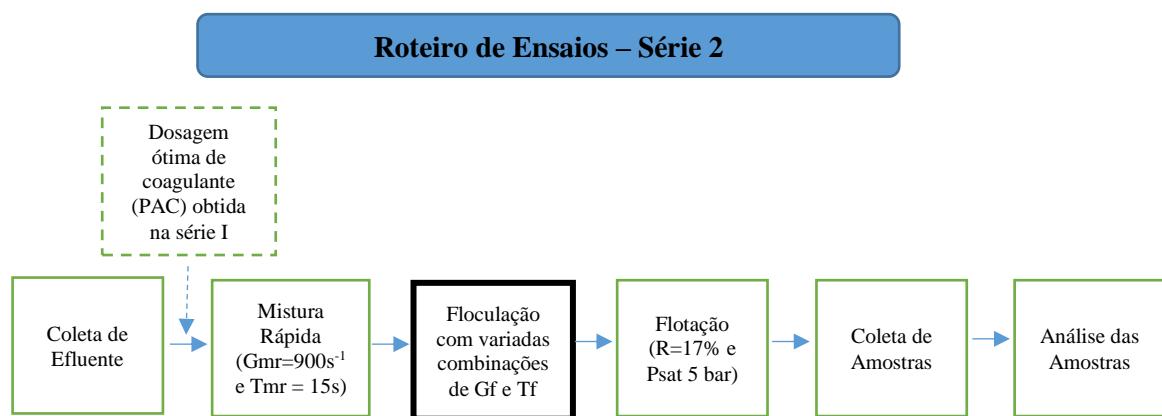


Figura 18 - Roteiro de ensaios da Série II

4.6.4. Série III - Ensaios para verificação da influência da fração de recirculação na eficiência da flotação com PAC

Após a definição do gradiente e tempo de floculação ideais na Série II, foram realizados ensaios para a verificação da influência da fração de recirculação na eficiência da flotação por ar dissolvido. O roteiro de ensaios desta série está representado na Figura 19.

As condições utilizadas nos ensaios foram:

- Coagulante: PAC (14 mg/L, dosagem referente ao princípio ativo Al₂O₃);
- Mistura rápida: Tmr = 15s, Gmr = 900 s⁻¹;
- Floculação: Tf = 15 min e Gf = 110 s⁻¹;
- Flotação:
 - Velocidades de flotação: Vft1 = 22 cm/min, Vft2 = 18 cm/min, Vft3 = 14 cm/min, Vft4 = 10 cm/min;
 - PSat = 5 bar;
- Parâmetros de controle:
 - água bruta (efluente do reator anaeróbio): turbidez (T), cor aparente (C), DQO (D), DQO filtrada (Df), fósforo total (P) e fósforo total filtrado (Pf);
 - água após a flotação: turbidez (T), cor aparente (C), DQO (D), DQO filtrada (Df), fósforo total (P) e fósforo total filtrado (Pf).

As frações de recirculação definidas para a avaliação são mostradas na Tabela 6.

Tabela 6 - Frações de recirculação para avaliação da taxa ótima

| Parâmetro | Percentual (%) | | | | | | |
|------------------------|-----------------------|----|----|----|----|----|----|
| Fração de Recirculação | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 |

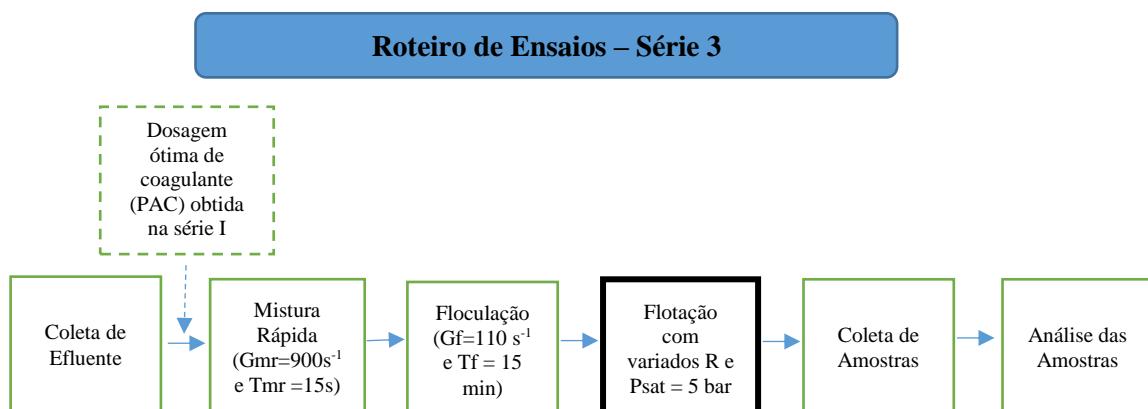


Figura 19 - Roteiro de Ensaios da Série III

Em seguida, a partir da definição do melhor percentual de recirculação, foi possível calcular a massa de ar fornecida por unidade de volume de líquido afluente (A/V), utilizando a Equação 4, representada a seguir:

$$A/V = S_{ar} \times d_{a,s} \times \left[f \times \left(\frac{p + 101,3}{101,3} \right) - 1 \right] \times \frac{R}{1 + R}$$

Equação 4 - Formulação tradicional de massa de ar fornecida por unidade de volume de líquido afluente (A/V)

Onde:

Temperatura do líquido afluente = 25 °C +/- 1 °C

A/V = razão ar para água (g de ar/m³ de água)

S_{ar} = solubilidade do ar na água (17,5 ml/L)

d_{a,s} = densidade do ar saturado (1,17 kg/m³)

f = fator de eficiência da câmara de saturação (1,0 para flotatestes)

p = pressão relativa (500 kPa)

R = taxa de reciclo

4.6.5. Série IV - Ensaios de determinação da demanda de cloreto férrico para coagulação

Com os parâmetros ideais encontrados nas Séries II e III, foram realizados ensaios para a verificação da influência do cloreto férrico como coagulante na eficiência da flotação por ar dissolvido. O roteiro de ensaios desta série está representado na Figura 20.

As condições utilizadas nos ensaios foram:

- Coagulante: Cloreto Férrico (dosagens variadas referentes ao produto comercial);
- Mistura rápida: Tmr = 15 s, Gmr = 900 s⁻¹;
- Floculação: Tf = 15 min, Gf = 110 s⁻¹ (valores ótimos da Série II)
- Flotação:
 - Velocidades de Flotação: Vft1 = 22 cm/min, Vft2 = 18 cm/min, Vft3 = 14 cm/min, Vft4 = 10 cm/min;
 - Psat = 5 bar;
 - R = 12% (Valor ótimo da série III);
- Parâmetros de controle:

- água bruta (efluente do reator anaeróbio): turbidez (T), cor aparente (C), DQO (D), DQO filtrada (Df), fósforo total (P) e fósforo total filtrado (Pf);
- água após a flotação: turbidez (T), cor aparente (C), DQO (D), DQO filtrada (Df), fósforo total (P) e fósforo total filtrado (Pf).

As dosagens definidas para a avaliação são mostradas na Tabela 7

Tabela 7 – Dosagens de cloreto férrico para avaliação da dosagem ótima

| Coagulante | Dosagem (mg/L) | | | | | | |
|-------------------|-----------------------|----|----|----|----|----|----|
| Cloreto Férrico | 0 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 |

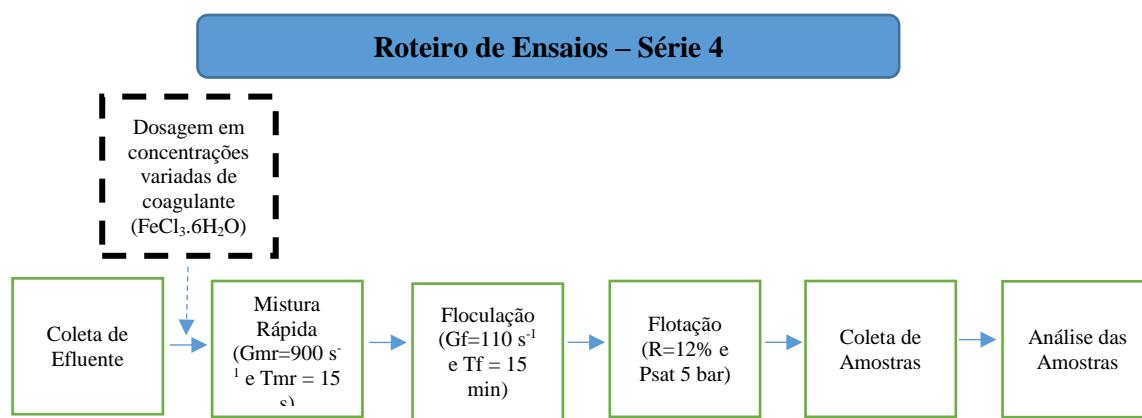


Figura 20 - Roteiro de Ensaios da Série IV

4.6.6. Série V - Ensaios de determinação da demanda de sulfato de alumínio para coagulação

A Série V foi executada de maneira análoga à Série IV, com ensaios realizados para a verificação da influência do sulfato de alumínio como coagulante na eficiência da flotação por ar dissolvido para as condições estudadas. O roteiro de ensaios desta série está representado na Figura 21.

As condições utilizadas nos ensaios foram:

- Coagulante: Sulfato de Alumínio (dosagens variadas referentes ao produto comercial);
- Mistura rápida: $T_{mr} = 15$ s, $G_{mr} = 900$ s^{-1} ;
- Floculação: $T_f = 15$ min, $G_f = 110$ s^{-1} (valores ótimos da Série II)
- Flotação:
 - Velocidades de Flotação: $V_{ft1} = 22$ cm/min, $V_{ft2} = 18$ cm/min, $V_{ft3} = 14$ cm/min, $V_{ft4} = 10$ cm/min;
 - $P_{sat} = 5$ bar;

- $R = 12\%$ (Valor ótimo da série III).
- Parâmetros de controle:
 - água bruta (efluente do reator anaeróbio): turbidez (T), cor aparente (C), DQO (D), DQO filtrada (Df), fósforo total (P) e fósforo total filtrado (Pf);
 - água após a flotação: turbidez (T), cor aparente (C), DQO (D), DQO filtrada (Df), fósforo total (P) e fósforo total filtrado (Pf).

As dosagens definidas para a avaliação são mostradas na Tabela 8.

Tabela 8 – Dosagens de sulfato de alumínio para avaliação da dosagem ótima

| <i>Coagulante</i> | <i>Dosagem (mg/L)</i> | | | | | | |
|---------------------|-----------------------|----|----|----|----|----|----|
| Sulfato de Alumínio | 0 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 |

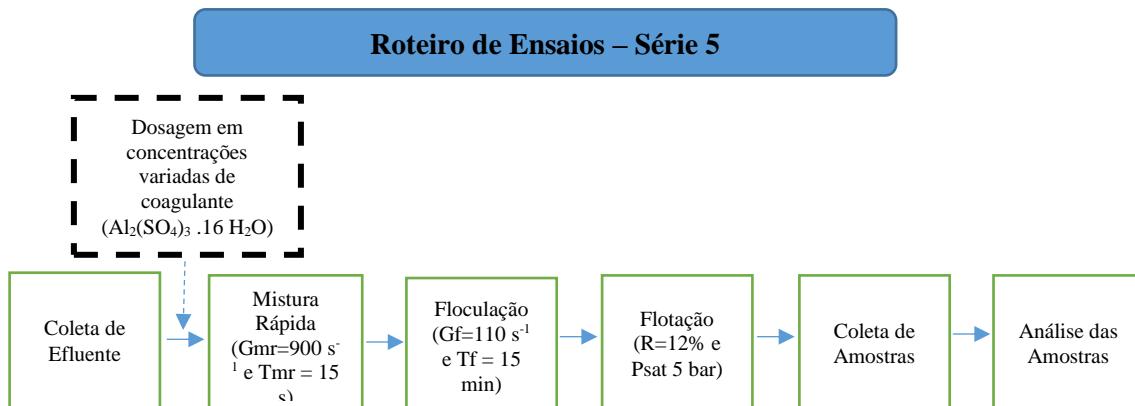


Figura 21 - Roteiro de ensaios da Série V

4.6.7. Série VI –Ensaios para análises detalhadas

Para a Série VI, os parâmetros ótimos definidos, juntamente com as dosagens dos três coagulantes estudados serão repetidos com detalhamento dos parâmetros investigados. O roteiro de ensaios desta série está representado na Figura 22.

As condições utilizadas nos ensaios foram:

- Coagulantes:
 - PAC (14 mg/L, dosagem referente ao princípio ativo Al₂O₃)
 - Cloreto Férrego (70mg/L, dosagem referente ao produto comercial)
 - Sulfato de Alumínio (70mg/L, dosagem referente ao produto comercial);
- Mistura rápida: $T_{mr} = 15$ s, $G_{mr} = 900$ s^{-1} ;
- Floculação: $T_f = 15$ min, $G_f = 110$ s^{-1} (valores ótimos da Série II)
- Flotação: $V_{ft} = 14$ cm/min;
- Parâmetros de controle:

- água bruta (efluente do reator anaeróbio): turbidez, cor aparente e verdadeira fósforo total, DQO, DQO filtrada e distribuição do tamanho das partículas;
- água coagulada: pH de coagulação, turbidez e distribuição do tamanho das partículas;
- água após a flotação: turbidez, cor aparente, fósforo total, DQO, DQO filtrada, SST e distribuição do tamanho das partículas.

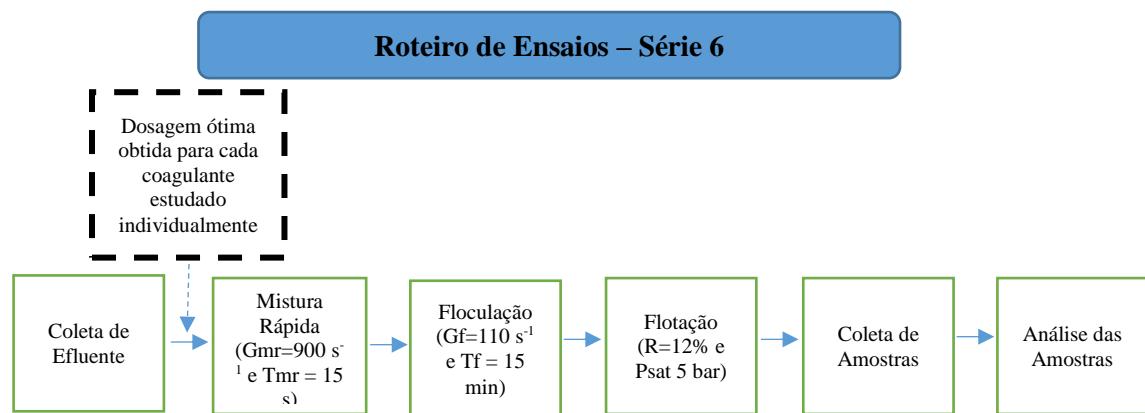


Figura 22 - Roteiro de Ensaios da Série VI

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são expostos e discutidos os resultados obtidos em cada etapa da pesquisa, relatados por série e parâmetro de controle e apresentados por meio das tabelas e gráficos que constam neste item.

5.1. Série I – Ensaios de determinação da demanda de PAC para coagulação

Na Série I objetivou-se encontrar a dosagem ótima de coagulante PAC para o pós-tratamento do efluente gerado no reator anaeróbio utilizando o processo de flotação por ar dissolvido.

5.1.1. Turbidez e Cor aparente

Os resultados de remoção obtidos para os parâmetros de turbidez e cor aparente na Série I estão expostos na Tabela 9 e Tabela 10, a seguir.

Tabela 9 - Resultados para a remoção de Turbidez na Série I

| Turbidez da Amostra Bruta (uT) | | 21,6 | | | | | | | | |
|--------------------------------|--------------|------------------|---|-------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|
| mg/L | Dosagens PAC | pH de coagulação | Valores obtidos para as amostras flotadas | | | | | | | |
| | | | Vf1 = 22 cm/min | | Vf2 = 18 cm/min | | Vf3 = 14 cm/min | | Vf4 = 10 cm/min | |
| | | | Turbidez (uT) | Remoção (%) | Turbidez (uT) | Remoção (%) | Turbidez (uT) | Remoção (%) | Turbidez (uT) | Remoção (%) |
| Série 1 | 6 | 7,11 | 7,5 | 65% | 7,3 | 66% | 7,26 | 66% | 7,3 | 66% |
| | 8 | 7,10 | 6,3 | 71% | 6,1 | 72% | 5,9 | 73% | 5,5 | 75% |
| | 10 | 7,14 | 6,4 | 70% | 5,3 | 75% | 5,8 | 73% | 4,9 | 77% |
| | 12 | 7,14 | 5,5 | 75% | 5,2 | 76% | 5,0 | 77% | 5,1 | 76% |
| | 14 | 7,11 | 5,9 | 73% | 4,7 | 78% | 4,4 | 80% | 4,1 | 81% |
| | 16 | 7,10 | 5,3 | 75% | 4,5 | 79% | 4,2 | 81% | 4,0 | 81% |
| | 18 | 7,12 | 5,5 | 75% | 4,6 | 79% | 3,9 | 82% | 4,1 | 81% |
| | 20 | 7,10 | 9,0 | 58% | 5,7 | 74% | 4,3 | 80% | 4 | 81% |
| | 22 | 7,07 | 13 | 40% | 8,2 | 62% | 5,6 | 74% | 4,9 | 77% |
| | 24 | 7,04 | 15,6 | 28% | 10,6 | 51% | 7,1 | 67% | 6,0 | 72% |

Tabela 10 - Resultados para a remoção de cor aparente na Série I

| | | | Cor da Amostra Bruta (uH) 432 | | | | | | | |
|---------|--------------|------------------|---|-------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|
| Série 1 | Dosagens PAC | pH de coagulação | Valores obtidos para as amostras flotadas | | | | | | | |
| | | | Vf1 = 22 cm/min | | Vf2 = 18 cm/min | | Vf3 = 14 cm/min | | Vf4 = 10 cm/min | |
| | | | Cor (uH) | Remoção (%) | Cor (uH) | Remoção (%) | Cor (uH) | Remoção (%) | Cor (uH) | Remoção (%) |
| Série 1 | 6 | 7,11 | 201 | 53% | 194 | 55% | 186 | 57% | 192 | 56% |
| | 8 | 7,10 | 148 | 66% | 144 | 67% | 146 | 66% | 137 | 68% |
| | 10 | 7,14 | 161 | 63% | 152 | 65% | 155 | 64% | 110 | 75% |
| | 12 | 7,14 | 153 | 65% | 139 | 68% | 147 | 66% | 121 | 72% |
| | 14 | 7,11 | 153 | 65% | 122 | 72% | 129 | 70% | 112 | 74% |
| | 16 | 7,10 | 149 | 66% | 117 | 73% | 112 | 74% | 108 | 75% |
| | 18 | 7,12 | 140 | 68% | 119 | 72% | 109 | 75% | 100 | 77% |
| | 20 | 7,10 | 244 | 44% | 143 | 67% | 112 | 74% | 105 | 76% |
| | 22 | 7,07 | 309 | 28% | 199 | 54% | 142 | 67% | 117 | 73% |
| | 24 | 7,04 | 367 | 15% | 253 | 41% | 183 | 58% | 135 | 69% |

Nas Figuras 23 e 24 são apresentados os valores de turbidez e cor aparente remanescentes, respectivamente, para cada dosagem de PAC estudada. Enquanto na Figura 25 e Figura 26 encontram-se a variação da turbidez e cor aparente remanescentes para cada dosagem em relação às velocidades de flotação analisadas.

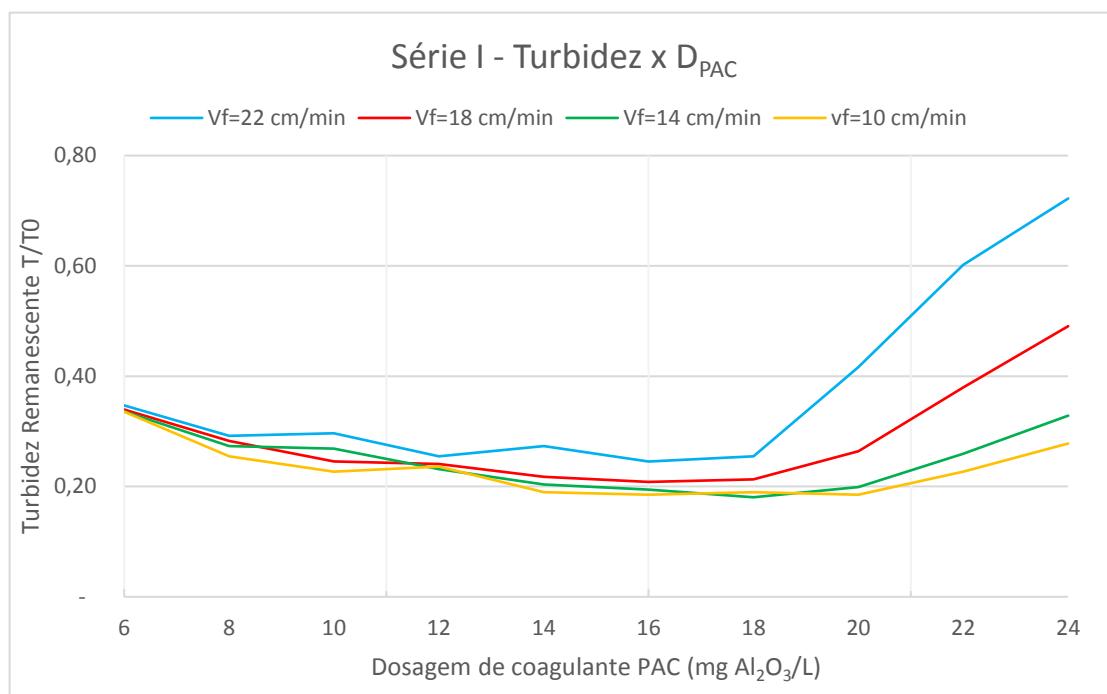


Figura 23 - T/T0 para as velocidades de flotação estudadas por dosagem de coagulante

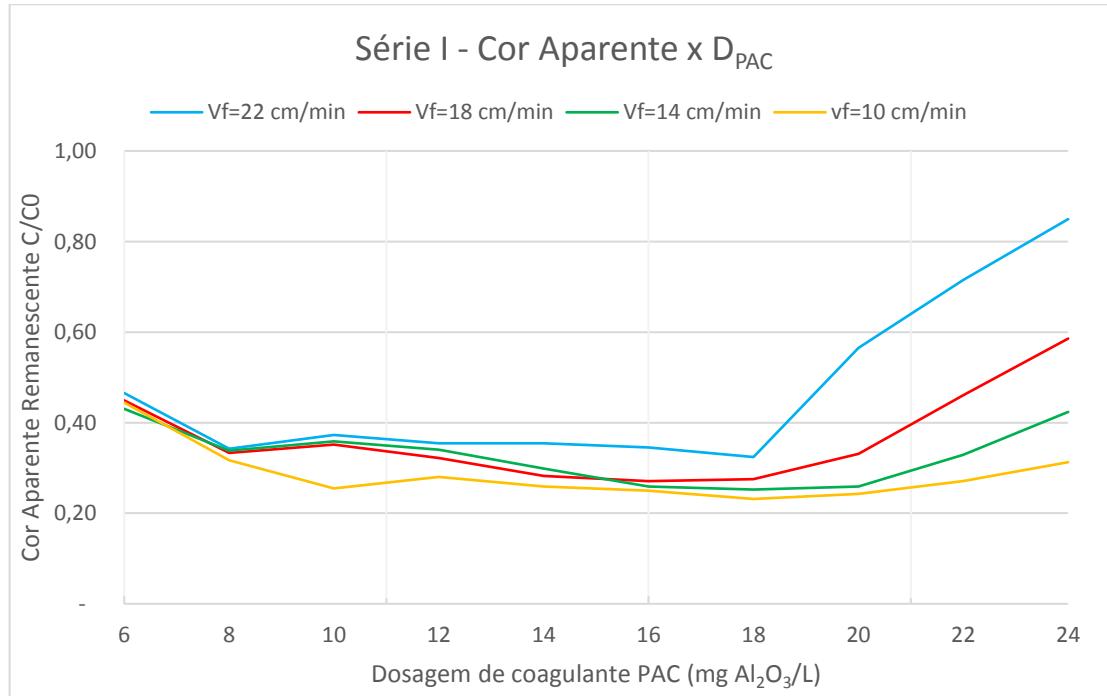


Figura 24 - C/C0 para as velocidades de flotação estudadas por dosagem de coagulante

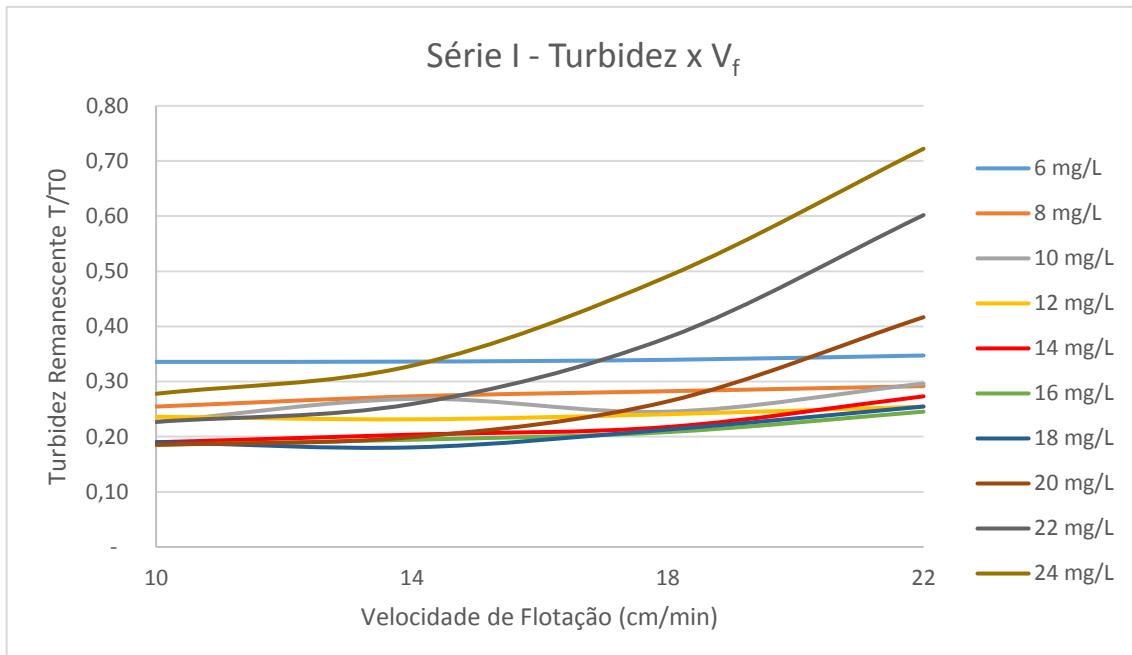


Figura 25 - T/T0 para as dosagens de PAC estudadas por velocidade de flotação

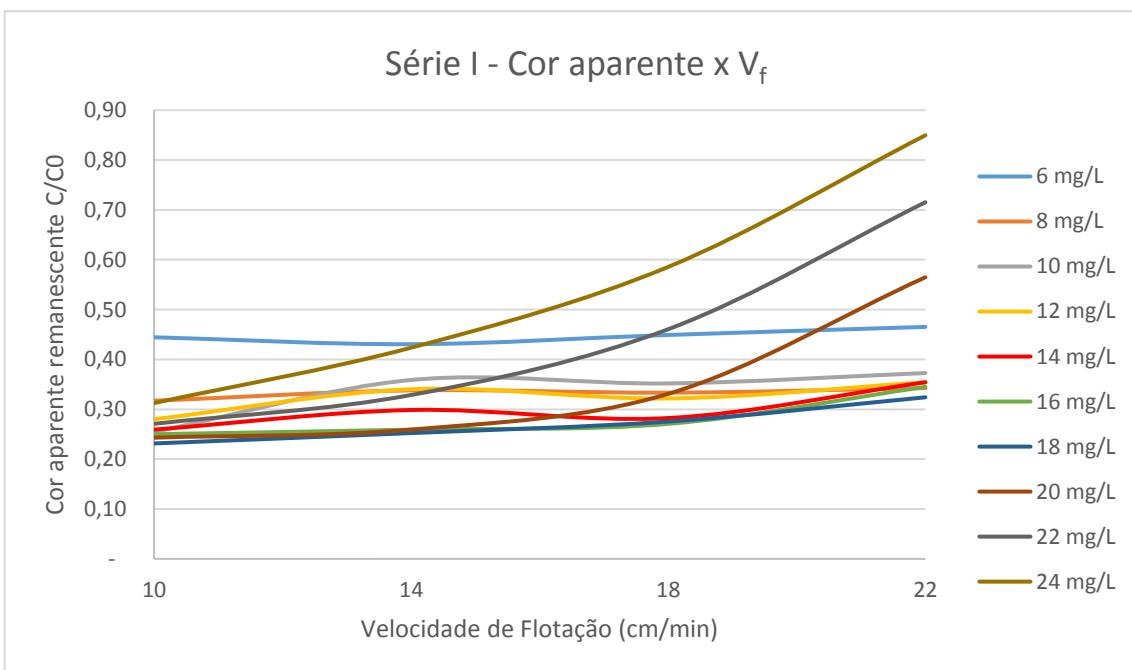


Figura 26 - C/C0 para as dosagens de PAC estudadas por velocidade de flotação

Considerando os dados de remoção e turbidez remanescente obtidos nos ensaios realizados, nota-se que para as menores velocidades de flotação estudadas (10 e 14 cm/min) a remoção de turbidez tende a sofrer menor influência da variação da dosagem quando comparadas às velocidades maiores. Isto deve-se ao fato de que no caso das primeiras o tempo de contato entre o esgoto analisado e as microbolhas de ar é maior, fato este que promove uma

remoção mais eficiente. Já em relação às dosagens, observa-se que para dosagens elevadas, acima de 18 mg/L, há uma notória queda na eficiência de remoção de ambos os parâmetros. Em geral, dosagens mais elevadas tendem a formar flocos maiores e para o caso das dosagens acima de 18 mg/L isto resultou na queda da eficiência supramencionada. Cabe salientar que o processo de flotação se caracteriza por ser mais suscetível à superdosagens do que outros processos de separação.

É importante ressaltar que os valores de pH de coagulação obtidos durante os ensaios mantiveram-se na faixa apropriada, variando entre 7,04 e 7,11. Segundo (HAARHOFF & EDZWALD, 2012) é possível a obtenção de um bom processo de coagulação com o uso do PAC em uma faixa de pH de 5,0 a 8,0, dependendo da temperatura do efluente; entretanto as condições ótimas apresentam-se com pH entre 6,5 e 7,5.

Como é possível observar na Tabela 9 e Tabela 10 o uso do PAC como coagulante obteve melhores resultados na remoção de turbidez em relação à cor aparente. Ainda assim, em apreciação aos valores aferidos nota-se que foi possível obter resultados satisfatórios para ambos os parâmetros, em alguns casos ultrapassando os 80% de remoção. A análise da Figura 25 e da Figura 26, mostra que as dosagens que apresentaram melhores eficiências de remoção, além de menor variabilidade em relação às velocidades de flotação estudadas, encontram-se na faixa entre 14 e 18 mg/L. O destaque para a menor variabilidade torna-se necessário devido ao fato de que quanto maior a velocidade de flotação, maior poderá ser a taxa de aplicação superficial em uma unidade de flotação de escala real para que se obtenha uma determinada eficiência de remoção, diminuindo desta forma o tamanho da unidade.

5.1.2. Demanda Química de Oxigênio

Na Tabela 11 são apontados os resultados obtidos para os parâmetros de DQO e DQO Filtrada, após a realização dos ensaios de flotação.

Tabela 11 - Resultados de remoção de DQO obtidos na Série I

| DQO da Amostra Bruta (mgO ₂ /L) | | 290,43 | | | | |
|---|--------------|------------------|---|-------------|------------------------------------|-------------|
| DQO Filtrada da Amostra Bruta após passagem em membrana # 0,45 μm (mgO ₂ /L) | | 211,64 | | | | |
| Série 1 | Dosagens PAC | pH de coagulação | Valores obtidos para as amostras flotadas | | | |
| | | | Vf= 14 cm/min | | | |
| | mg/L | | DQO (mgO ₂ /L) | Remoção (%) | DQO Filtrada (mgO ₂ /L) | Remoção (%) |
| 6 | 7,11 | 141,38 | 51% | 105,69 | 50% | |
| 8 | 7,10 | 144,46 | 50% | 104,73 | 51% | |
| 10 | 7,14 | 136,77 | 53% | 105,31 | 50% | |
| 12 | 7,14 | 133,31 | 54% | 100,69 | 52% | |
| 14 | 7,11 | 141,00 | 51% | 103,58 | 51% | |
| 16 | 7,10 | 133,31 | 54% | 103,19 | 51% | |
| 18 | 7,12 | 133,69 | 54% | 103,77 | 51% | |
| 20 | 7,10 | 135,62 | 53% | 104,73 | 51% | |
| 22 | 7,07 | 134,85 | 54% | 103,58 | 51% | |
| 24 | 7,04 | 133,69 | 54% | 104,15 | 51% | |

Na Figura 27 estão apresentadas as distribuições de DQO remanescente ao longo da faixa dosagens de PAC aplicada, para a DQO e DQO Filtrada.

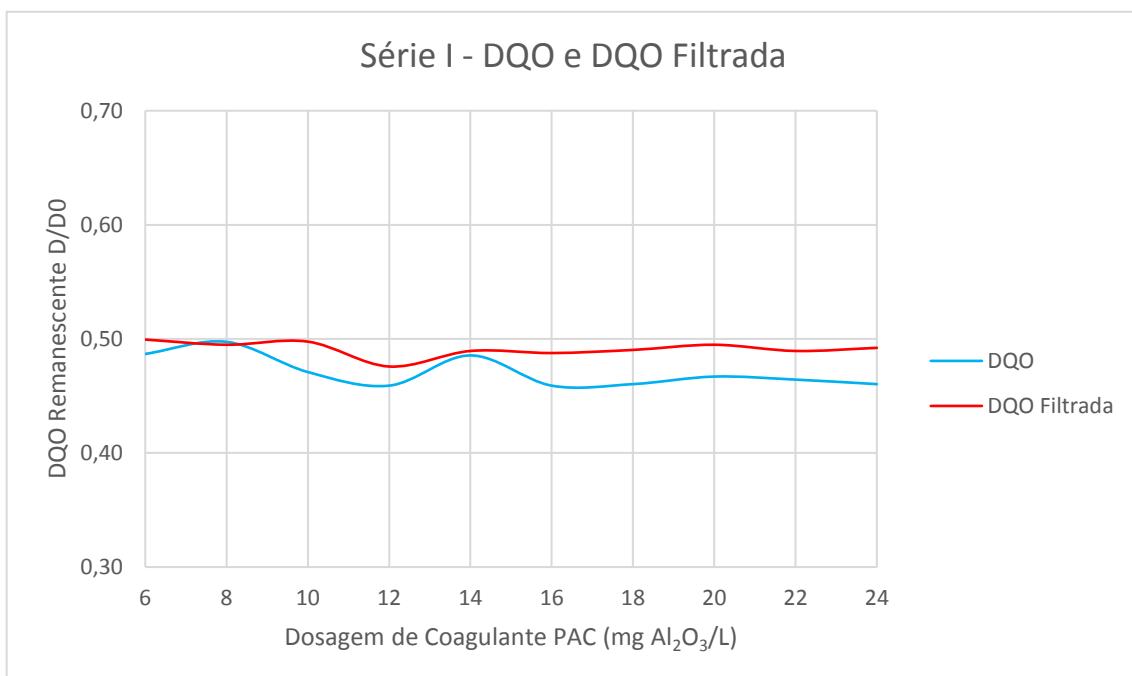


Figura 27- DQO remanescente para cada dosagem de PAC aplicada

Observa-se que a remoção de DQO não apresentou grandes variações para as dosagens de PAC aplicadas, em ambos os parâmetros, apresentando eficiência pouco superior a 50 % em praticamente todos os ensaios, conforme Tabela 11. Na Figura 27 é possível observar esta baixa variação, assim como a curva de DQO Filtrada, a qual representa a parcela de matéria orgânica dissolvida na água, a qual não é passível de remoção por coagulação seguida de floculação, flotação e filtração em papel de filtro (#0,45 µm). Observa-se que, para todas as dosagens estudadas, verificou-se pouca diferença entre os valores de eficiência de remoção de DQO Bruta e de DQO Filtrada. Para toda a faixa de dosagens de PAC investigadas verificou-se valores de eficiência na remoção de DQO (após a FAD) de aproximadamente 50%, e da DQO após a FAD seguida de filtração na faixa de 47 a 50%.

5.1.3. Fósforo Total

Na Tabela 12 são apontados os resultados obtidos para os parâmetros de Fósforo Total e Fósforo Total Dissolvido, após a realização dos ensaios de flotação.

Tabela 12 - Resultados de remoção de DQO obtidos na Série I

| | | | | | |
|---|--|--|------------------------|--|------------------------|
| Fósforo Total da Amostra Bruta (mg/L) | 22,16 | | | | |
| Fósforo Total Dissolvido da Amostra Bruta (mg/L) | 16,86 | | | | |
| Dosagens PAC Série 1 | pH de coagulação mg/L | Valores obtidos para as amostras flotadas | | | |
| | | Vf= 14 cm/min | | | |
| | | Fósforo Total (mg/L) | Remoção (%) | Fósforo Total Dissolvido (mg/L) | Remoção (%) |
| | | 6 | 7,11 | 14,20 | 36% |
| | | 8 | 7,10 | 13,48 | 39% |
| | | 10 | 7,14 | 12,88 | 42% |
| | | 12 | 7,14 | 11,96 | 46% |
| | | 14 | 7,11 | 11,17 | 50% |
| | | 16 | 7,10 | 10,94 | 51% |
| | | 18 | 7,12 | 10,52 | 53% |
| | | 20 | 7,10 | 9,86 | 56% |
| | | 22 | 7,07 | 9,98 | 55% |
| | | 24 | 7,04 | 10,56 | 52% |

Na Figura 28 estão apresentadas as distribuições de Fósforo remanescente ao longo da faixa de dosagens de PAC aplicada, para a fósforo total e fósforo total dissolvido.

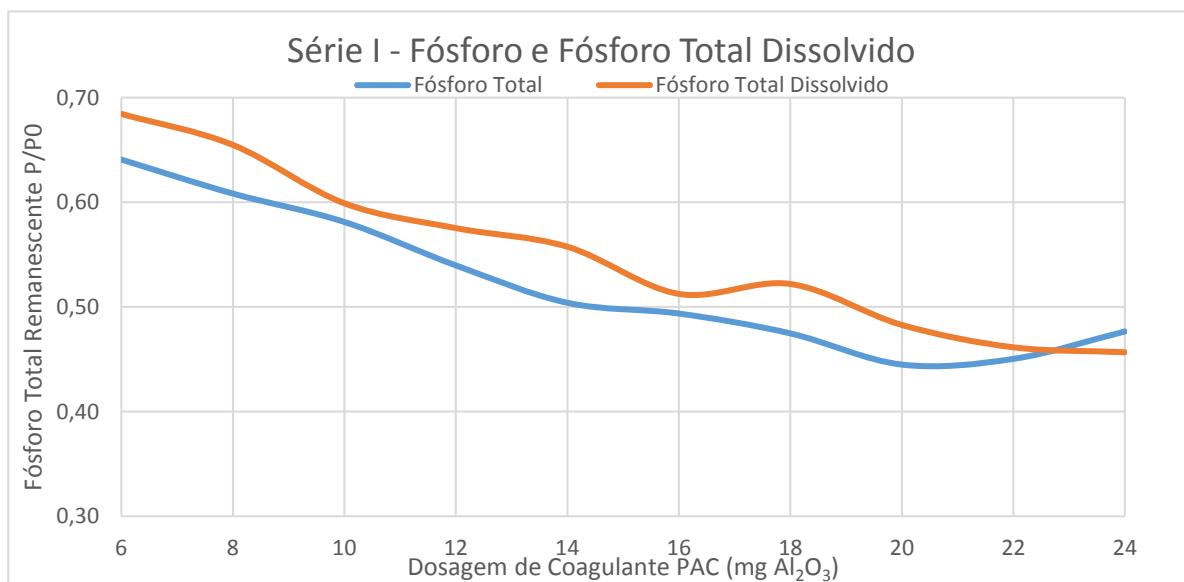


Figura 28 - Fósforo Total Remanescente para cada dosagem de PAC aplicada

Em análise às curvas na Figura 28, conforme aumenta-se a dosagem de PAC há uma queda do fósforo total remanescente, esta tendência prevalece até a dosagem de 22 mg/L do coagulante para ambas as curvas. Pode-se destacar a dosagem de 14 mg/L, pois a partir deste ponto a remoção de fósforo total ultrapassa os 50 % de eficiência, mantendo-se superior para as demais dosagens com ápice de remoção de 56% para a dosagem de 20 mg/L.

Considerando os dados expostos para todos os parâmetros estudados adotou-se como ótima a dosagem de 14 mg/L de teor ativo do coagulante PAC, visto que esta apresenta em média resultados superiores às dosagens inferiores, e os ganhos em eficiência de remoção para as dosagens superiores não são tão significativos a ponto de justificarem o gasto com maior dosagem.

5.2. Ensaios para verificação da influência das condições de flocação na eficiência da flotação com PAC

A partir da dosagem ótima de PAC de 14 mg/L obtida na primeira etapa, partiu-se para a definição do melhor conjunto de gradiente e tempo de flocação com o objetivo de otimizar as condições de flocação.

5.2.1. Turbidez e Cor aparente

Os resultados de remoção obtidos para os parâmetros de turbidez e cor aparente na Série II estão expostos nas Tabelas 13 e 14, a seguir:

Tabela 13 - Resultados de Turbidez obtidos na Série II

| Turbidez da Amostra Bruta (uT) | | 23,3 | | | | | | | | | |
|--------------------------------|---------------------|--|---------------------------|---|-------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|
| | Dosagem PAC mg/L | Gradiente de Floculação (s ⁻¹) | Tempo de Floculação (min) | Valores obtidos para as amostras flotadas | | | | | | | |
| | | | | Vf1 = 22 cm/min | | Vf2 = 18 cm/min | | Vf3 = 14 cm/min | | Vf4 = 10 cm/min | |
| | | | | Turbidez (uT) | Remoção (%) | Turbidez (uT) | Remoção (%) | Turbidez (uT) | Remoção (%) | Turbidez (uT) | Remoção (%) |
| Série 2 | 14 | 70 | 10 | 6,1 | 74% | 5,3 | 77% | 5,5 | 76% | 5,5 | 76% |
| | | | 15 | 5,8 | 75% | 5,3 | 77% | 5,0 | 79% | 4,2 | 82% |
| | | | 20 | 5,1 | 78% | 4,8 | 79% | 4,5 | 81% | 5,0 | 79% |
| | | | 25 | 5,2 | 78% | 4,5 | 81% | 4,5 | 81% | 4,8 | 79% |
| | 90 | 90 | 10 | 5,9 | 75% | 5,2 | 78% | 5,4 | 77% | 5,3 | 77% |
| | | | 15 | 5,1 | 78% | 5,2 | 78% | 5,8 | 75% | 5,1 | 78% |
| | | | 20 | 5,0 | 79% | 4,8 | 79% | 4,6 | 80% | 4,7 | 80% |
| | | | 25 | 4,8 | 79% | 4,9 | 79% | 4,7 | 80% | 4,7 | 80% |
| | 110 | 110 | 10 | 5,6 | 76% | 5,3 | 77% | 5,4 | 77% | 5,0 | 79% |
| | | | 15 | 5,0 | 79% | 5,0 | 79% | 4,5 | 81% | 4,3 | 82% |
| | | | 20 | 6,1 | 74% | 4,5 | 81% | 4,5 | 81% | 4,6 | 80% |
| | | | 25 | 4,6 | 80% | 4,8 | 79% | 4,4 | 81% | 4,5 | 81% |

Tabela 14 - Resultados de Cor aparente obtidos na Série II

| Cor Aparente da Amostra Bruta (uH) | | | 481 | | | | | | | | |
|---------------------------------------|----------------|---|---------------------------------|---|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
| | Dosagem PAC | Gradiente de Floculação (s ⁻¹) | Tempo de Floculação (min) | Valores obtidos para as amostras flotadas | | | | | | | |
| | | | | Vf1 = 22 cm/min | | Vf2 = 18 cm/min | | Vf3 = 14 cm/min | | Vf4 = 10 cm/min | |
| | mg/L | | | Cor (uH) | Remoção (%) | Cor (uH) | Remoção (%) | Cor (uH) | Remoção (%) | Cor (uH) | Remoção (%) |
| Série 2 | 70 | | 10 | 157 | 67% | 149 | 69% | 144 | 70% | 144 | 70% |
| | | | 15 | 155 | 68% | 151 | 69% | 141 | 71% | 136 | 72% |
| | | | 20 | 142 | 70% | 138 | 71% | 123 | 74% | 125 | 74% |
| | | | 25 | 156 | 68% | 128 | 73% | 128 | 73% | 127 | 74% |
| | 90 | | 10 | 149 | 69% | 147 | 69% | 145 | 70% | 146 | 70% |
| | | | 15 | 147 | 69% | 141 | 71% | 135 | 72% | 125 | 74% |
| | | | 20 | 144 | 70% | 140 | 71% | 130 | 73% | 127 | 74% |
| | | | 25 | 142 | 70% | 135 | 72% | 129 | 73% | 123 | 74% |
| | 110 | | 10 | 157 | 67% | 147 | 69% | 146 | 70% | 143 | 70% |
| | | | 15 | 135 | 72% | 128 | 73% | 125 | 74% | 127 | 74% |
| | | | 20 | 163 | 66% | 128 | 73% | 125 | 74% | 124 | 74% |
| | | | 25 | 131 | 73% | 132 | 73% | 119 | 75% | 4,5 | 74% |

Com os resultados indicados nas Tabelas 13 e 14, observa-se que a remoção de turbidez nos ensaios obteve eficiência de aproximadamente 80%, enquanto a remoção de cor esteve próxima de 70 %. Das variações apresentadas entre os valores obtidos para os diferentes gradientes de flocação, nota-se que os menores tempos de flocação determinaram as menores eficiências. Diante disto, é possível afirmar que a influência do tempo de flocação teve maior impacto do que a exercido pelo gradiente nos ensaios realizados.

A seguir são apresentadas as curvas de turbidez e cor remanescente para cada um dos conjuntos “Gradiente + Tempo de Flocação” e para maior elucidação estes serão apresentados primeiramente de forma geral para ambos os parâmetros e em seguida separados por gradiente de flocação.

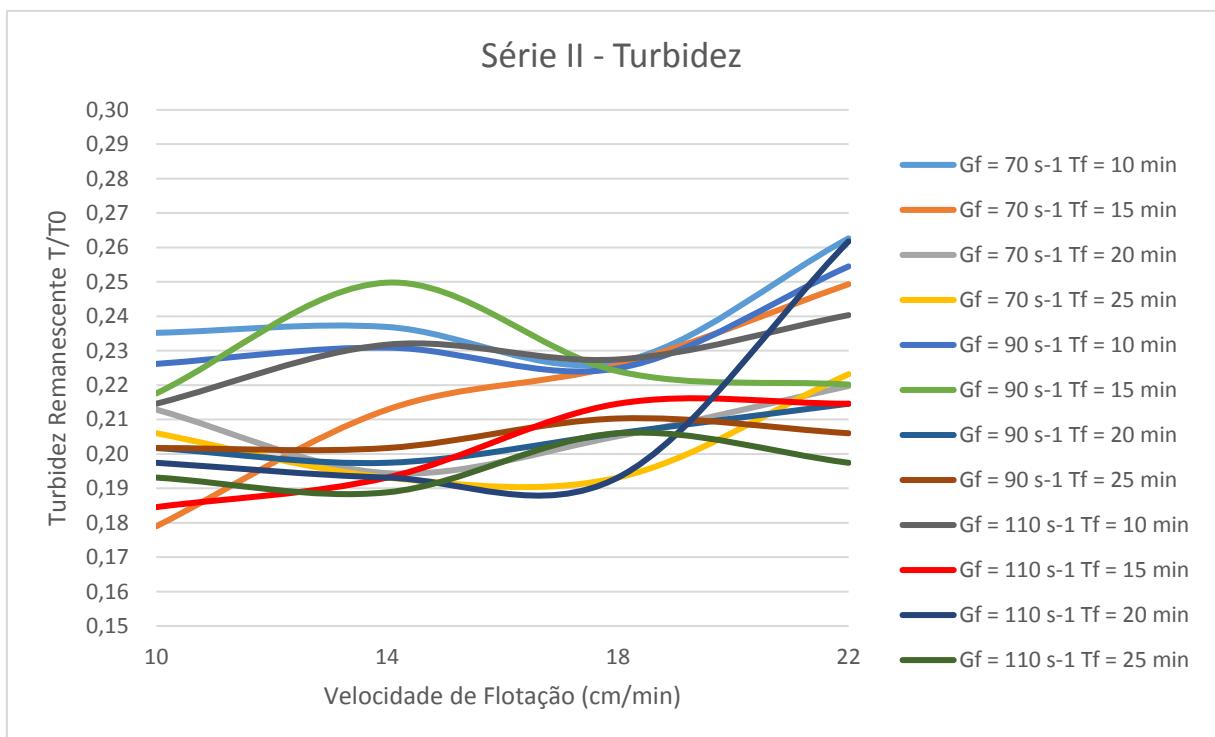


Figura 29 - Distribuição de T/T_0 para as condições de flocação estudadas em relação às velocidades de flotação

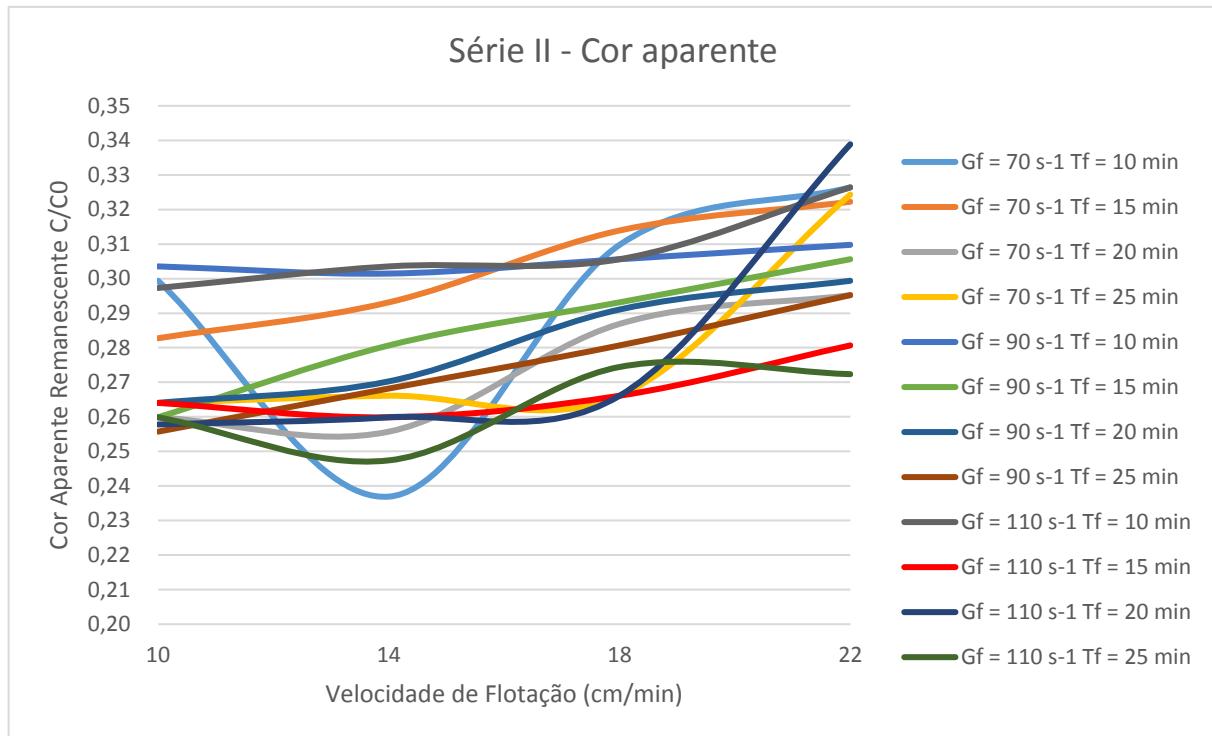


Figura 30 - Distribuição de C/C₀ para as condições de floculação estudadas em relação às velocidades de flotação

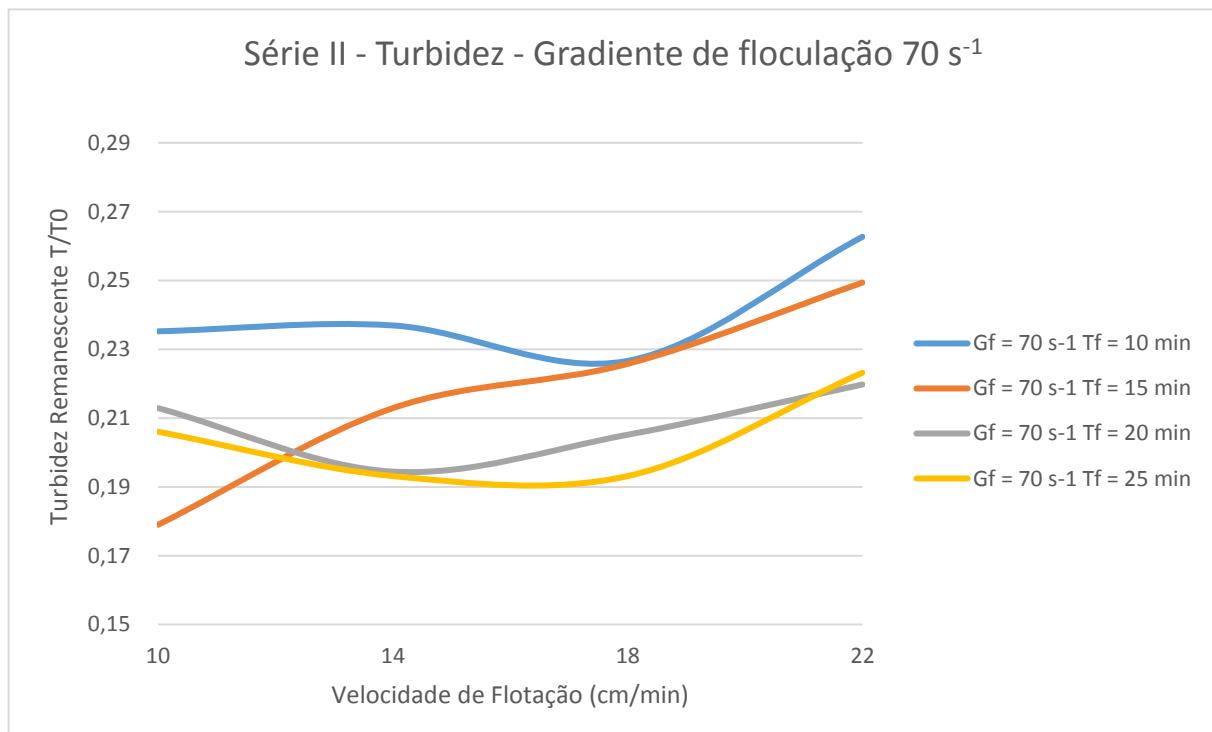


Figura 31 - Distribuição de T/T₀ para a condição de Gf = 70 s⁻¹ em relação às velocidades de flotação

Série II - Cor aparente - Gradiente de floculação 70 s^{-1}

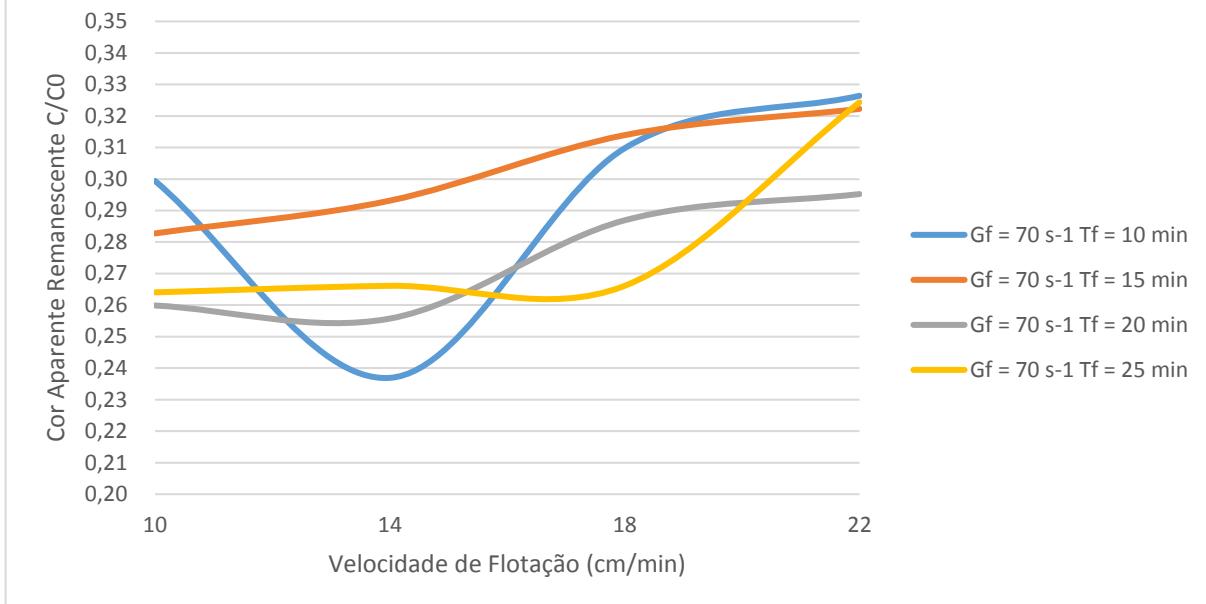


Figura 32 - Distribuição de C/C_0 para a condição de $G_f = 70\text{ s}^{-1}$ em relação às velocidades de flotação

Para as Figuras 31 e 32, com exceção da velocidade de flotação de 10 cm/min para turbidez e a de 14 cm/min para cor, as demais velocidades seguiram com os maiores tempos determinando maiores eficiências. Outro fator que se observa é o fato de que para ambos os parâmetros o conjunto que apresenta a menor variação na eficiência de remoção é composto pelo gradiente de 70 s^{-1} e o tempo de floculação de 20 minutos.

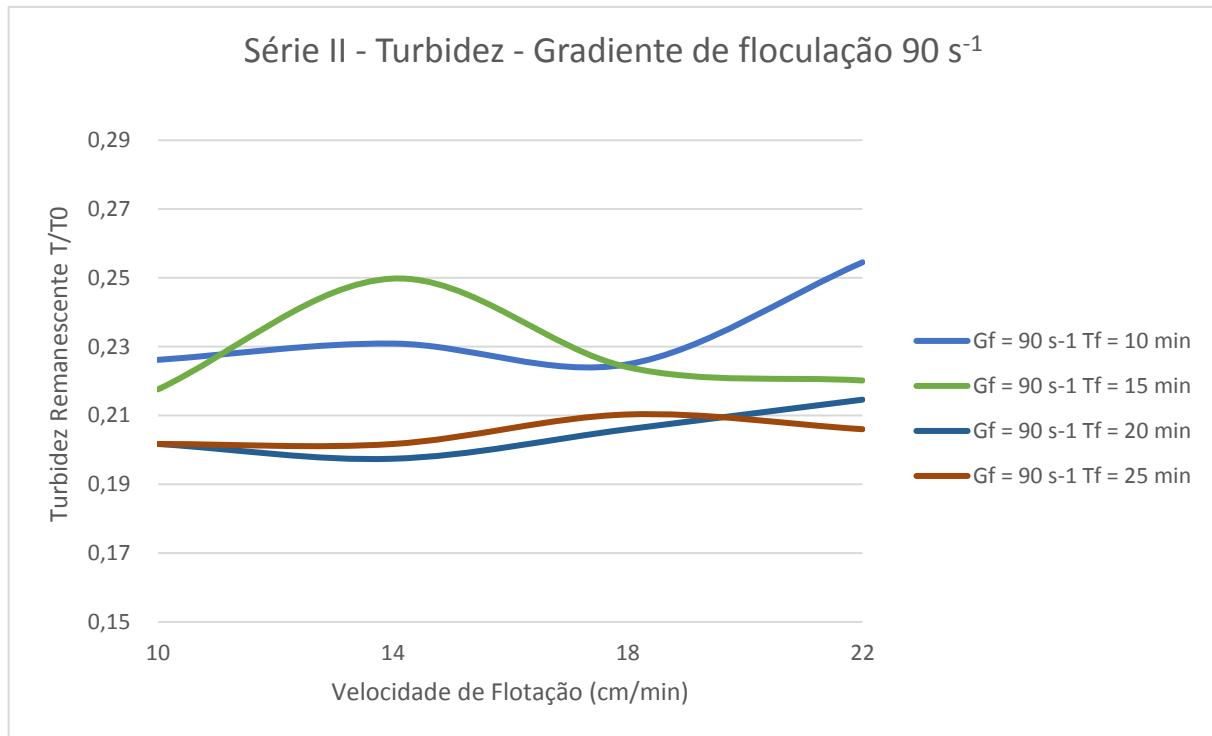


Figura 33 - Distribuição de T/T_0 para a condição de $\text{Gf} = 90\text{ s}^{-1}$ em relação às velocidades de flotação

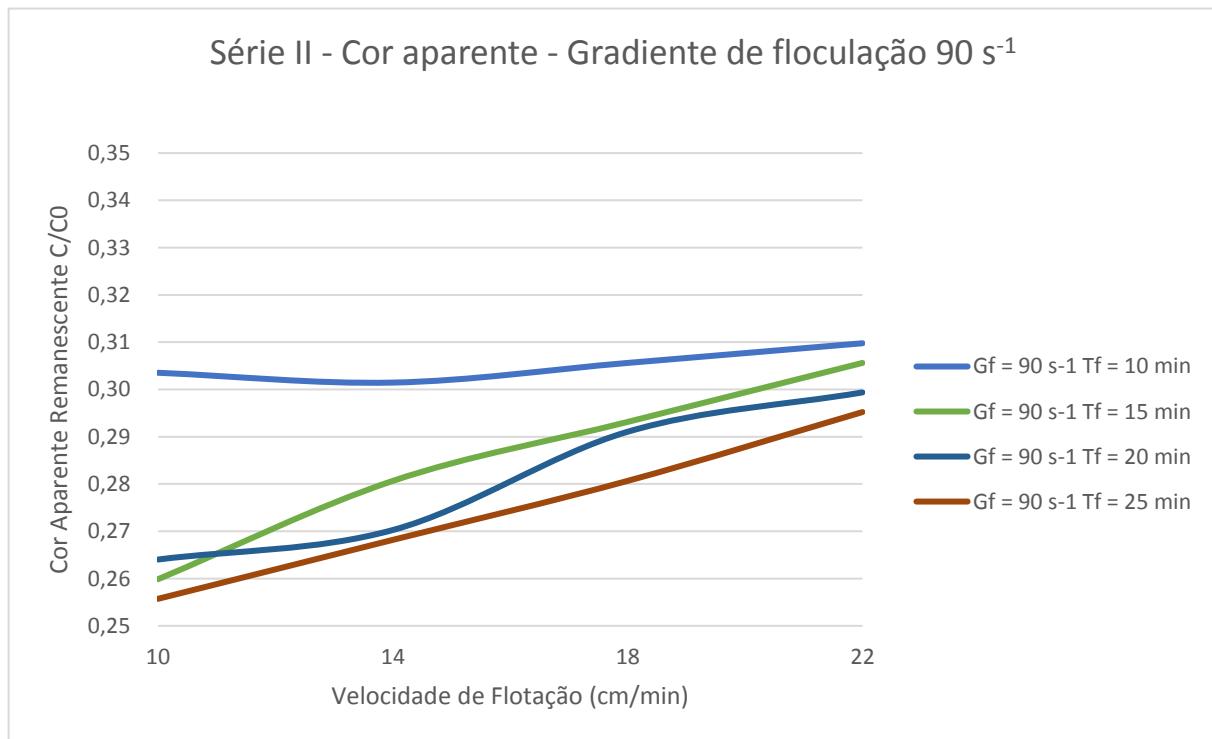


Figura 34 - Distribuição de C/C_0 para a condição de $\text{Gf} = 90\text{ s}^{-1}$ em relação às velocidades de flotação

Considerando as Figuras 33 e 34, para o gradiente de 90 s^{-1} , novamente as melhores eficiências apresentam-se nos maiores tempos (20 e 25 min), ao analisar os valores absolutos de remoção de turbidez para cada velocidade de flotação (22, 18, 14, 10 cm/min),

respectivamente, temos para $G_f = 90 \text{ s}^{-1}$ e $T_f = 20 \text{ min}$: 79%, 79%, 80% e 80%; sendo os mesmos percentuais encontrados para $G_f = 90 \text{ s}^{-1}$ e $T_f = 25 \text{ min}$. Já em relação à remoção de cor, temos para $G_f = 90 \text{ s}^{-1}$ e $T_f = 20 \text{ min}$: 70%, 71%, 73% e 74%; e para $G_f = 90 \text{ s}^{-1}$ e $T_f = 25 \text{ min}$: 70%, 72%, 73% e 74%. Desta forma, não há diferenças significativas entre ambos conjuntos e então seleciona-se o conjunto de menor tempo: gradiente de 90 s^{-1} e tempo de flocação de 20 minutos.

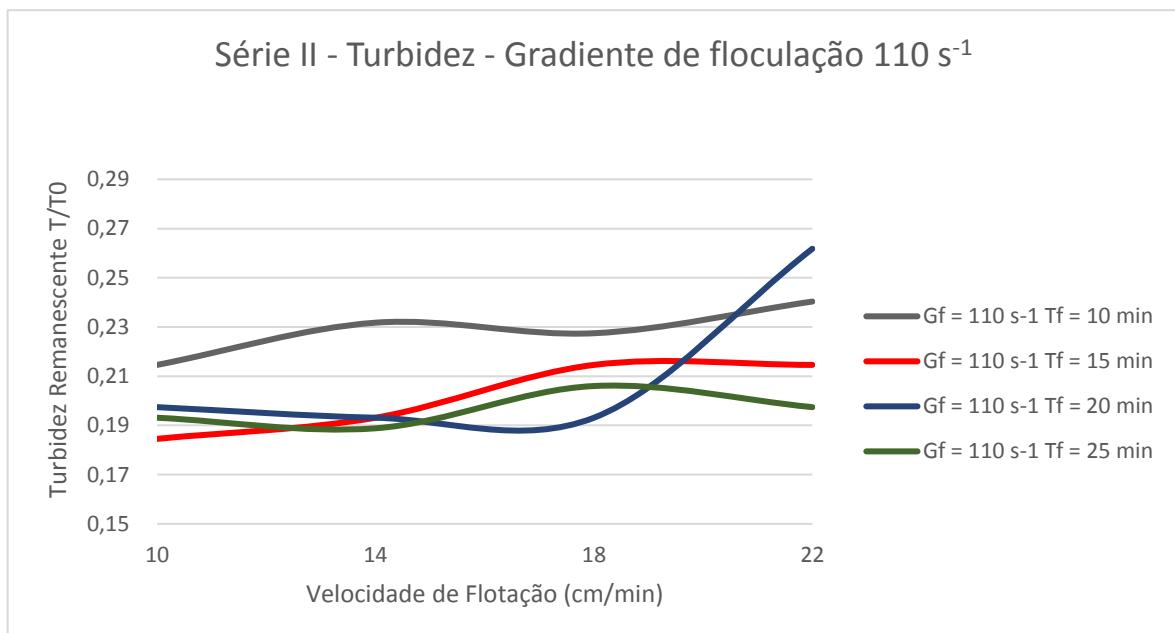


Figura 35 - Distribuição de T/T_0 para a condição de $G_f = 110 \text{ s}^{-1}$ em relação às velocidades de flotação

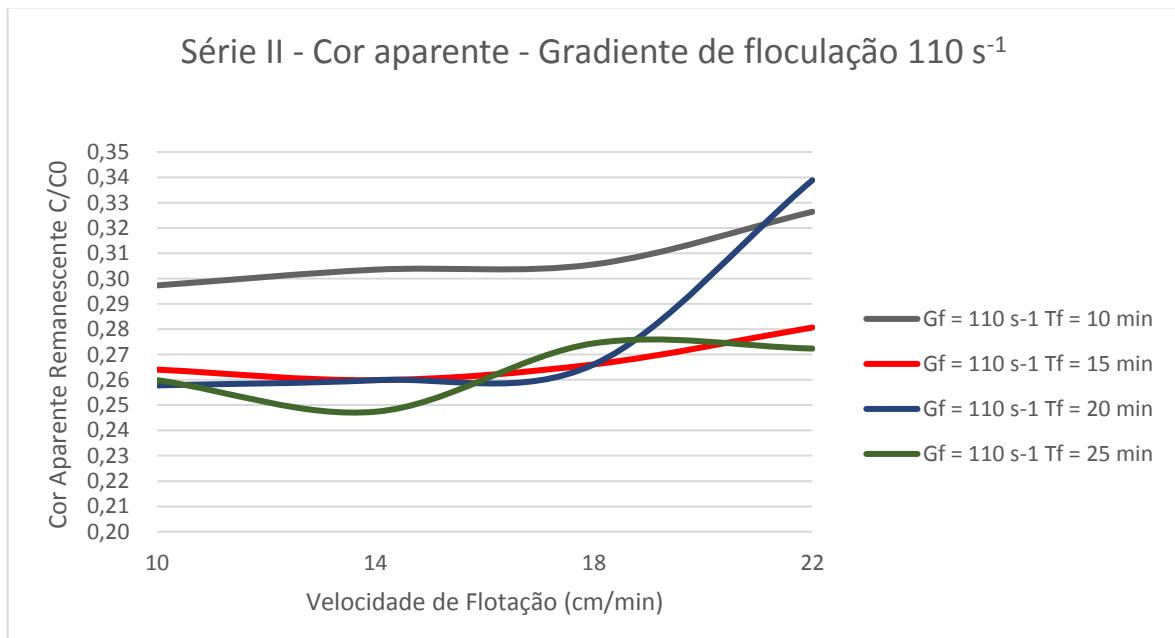


Figura 36 - Distribuição de C/C_0 para a condição de $G_f = 110 \text{ s}^{-1}$ em relação às velocidades de flotação

Em relação ao gradiente de 110 s^{-1} , diferentemente dos demais, ao analisarmos as Figuras 35 e 36 nota-se que a curva referente ao tempo de floculação de 15 min apresenta valores muito próximos aos obtidos nas curvas de tempos maiores. Ainda, em relação ao parâmetro cor, observa-se que este possui menor variabilidade ao longo das velocidades de flotação. Desta forma, considerou-se como a melhor alternativa o conjunto com gradiente de 110 s^{-1} e tempo de floculação de 15 minutos.

5.2.2. Demanda Química de Oxigênio

Na Tabela 15 são apontados os resultados obtidos para os parâmetros de DQO e DQO Filtrada, após a realização dos ensaios da Série II.

Tabela 15 - Resultados de remoção de DQO na Série II

| DQO da Amostra Bruta (mgO ₂ /L) | | Valores obtidos para as amostras flotadas | | | | | |
|---|---|---|------------------------------|----------------|--|----------------|--|
| Dosagem PAC mg/L | Gradiente de Floculação (s ⁻¹) | Tempo de Floculação (min) | Vf = 14 cm/min | | | | |
| | | | DQO (mgO ₂ /L) | Remoção (%) | DQO Filtrada (mgO ₂ /L) | Remoção (%) | |
| Série 2 | 70 | 10 | 140,23 | 42% | 60,88 | 51% | |
| | | 15 | 145,23 | 40% | 64,35 | 48% | |
| | | 20 | 141,38 | 42% | 60,50 | 52% | |
| | | 25 | 138,69 | 43% | 56,46 | 55% | |
| | 90 | 10 | 150,62 | 38% | 61,85 | 50% | |
| | | 15 | 151,00 | 38% | 62,04 | 50% | |
| | | 20 | 151,38 | 37% | 67,23 | 46% | |
| | | 25 | 144,46 | 40% | 58,77 | 53% | |
| | 110 | 10 | 143,31 | 41% | 67,04 | 46% | |
| | | 15 | 131,77 | 46% | 60,31 | 52% | |
| | | 20 | 135,23 | 44% | 56,08 | 55% | |
| | | 25 | 136,38 | 44% | 56,08 | 55% | |

Nas Figuras 37 e 38 estão apresentadas as distribuições de DQO remanescente para cada conjunto “Gradiente + Tempo de Floculação” avaliados, para a velocidade de flotação de 14 cm/min.

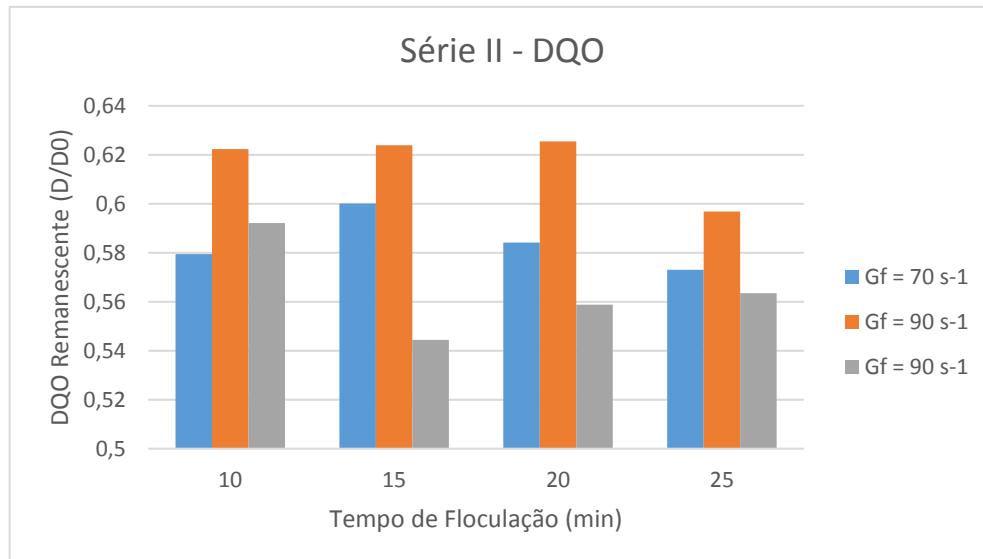


Figura 37 - Distribuição de DQO remanescente para as condições de floculação estudadas

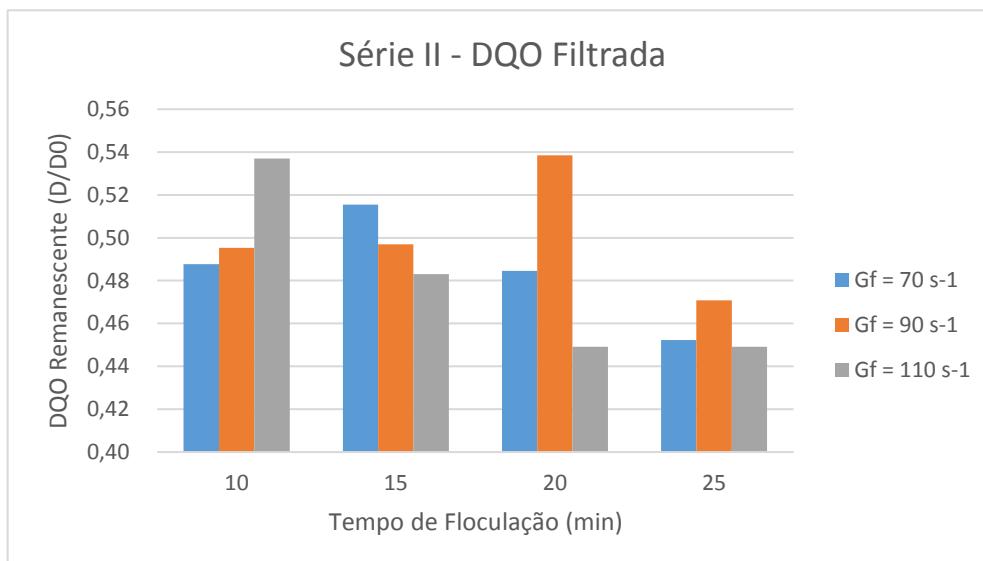


Figura 38 - Distribuição de DQO remanescente após filtração para as condições de floculação estudadas

Observa-se que com exceção da velocidade de 10 cm/min, o gradiente de 110 s⁻¹ apresenta as melhores eficiências de remoção. Quando acrescido o fator do tempo de floculação, as melhores eficiências são de 46 % de DQO para Gf = 110 s⁻¹ e Tf = 15 min, e de 55 % de DQO Filtrada para Gf = 110 s⁻¹ e Tf = 20 min.

5.2.3. Fósforo Total

Na Tabela 16 são apontados os resultados obtidos para os parâmetros de Fósforo Total e Fósforo Total Dissolvido, após a realização dos ensaios da série II.

Tabela 16- Resultados de remoção de fósforo total na Série II

| Fósforo Total da Amostra Bruta (mg/L) | | Valores obtidos para as amostras flotadas | | | | | |
|---|------------------------|--|---------------------------------|----------------------------|----------------|--|----------------|
| Fósforo Total Dissolvido da Amostra Bruta (mg/L) | | $V_f = 14 \text{ cm/min}$ | | | | | |
| Série 2 | Dosagem PAC mg/L | Gradiente de Floculação (s^{-1}) | Tempo de Floculação (min) | Fósforo Total (mg/L) | Remoção (%) | Fósforo Total dissolvido (mg/L) | Remoção (%) |
| | | | | 10,88 | 37% | 8,54 | 36% |
| 14 | 70 | 70 | 15 | 10,32 | 40% | 8,90 | 33% |
| | | | 20 | 10,14 | 42% | 9,38 | 29% |
| | | | 25 | 10,58 | 39% | 9,46 | 29% |
| | | | 10 | 10,54 | 39% | 9,02 | 32% |
| | 90 | 90 | 15 | 10,28 | 41% | 9,22 | 31% |
| | | | 20 | 10,10 | 42% | 8,96 | 33% |
| | | | 25 | 10,54 | 39% | 8,96 | 33% |
| | | | 10 | 11,14 | 36% | 8,62 | 35% |
| | 110 | 110 | 15 | 10,50 | 39% | 8,00 | 40% |
| | | | 20 | 10,22 | 41% | 8,34 | 37% |
| | | | 25 | 10,68 | 38% | 9,30 | 30% |

Nas Figuras 39 e 40 estão apresentadas as distribuições de fósforo total remanescente para os conjuntos “Gradiente + Tempo de Floculação” estudados, para a velocidade de flotação de 14 cm/min.

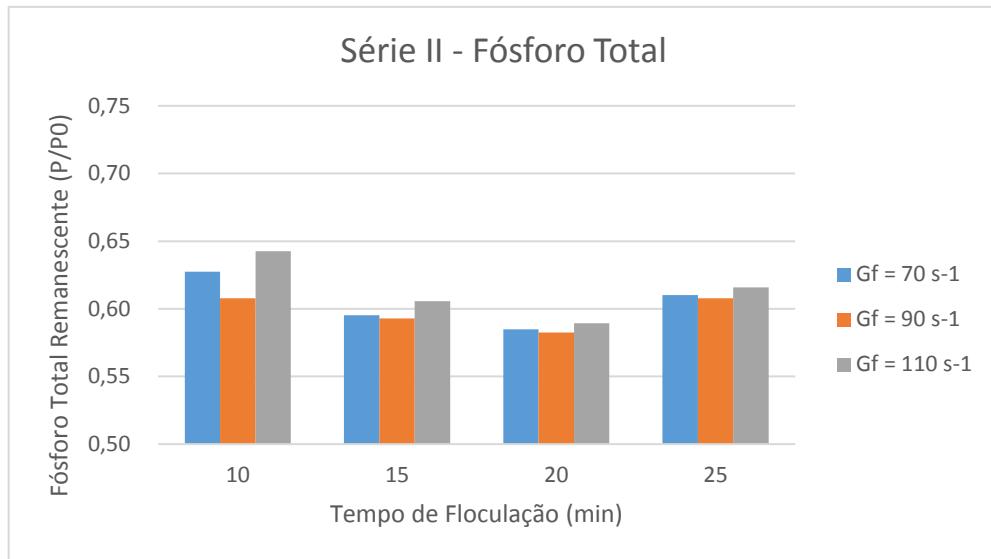


Figura 39 - Distribuição de fósforo total remanescente para as condições de floculação estudadas

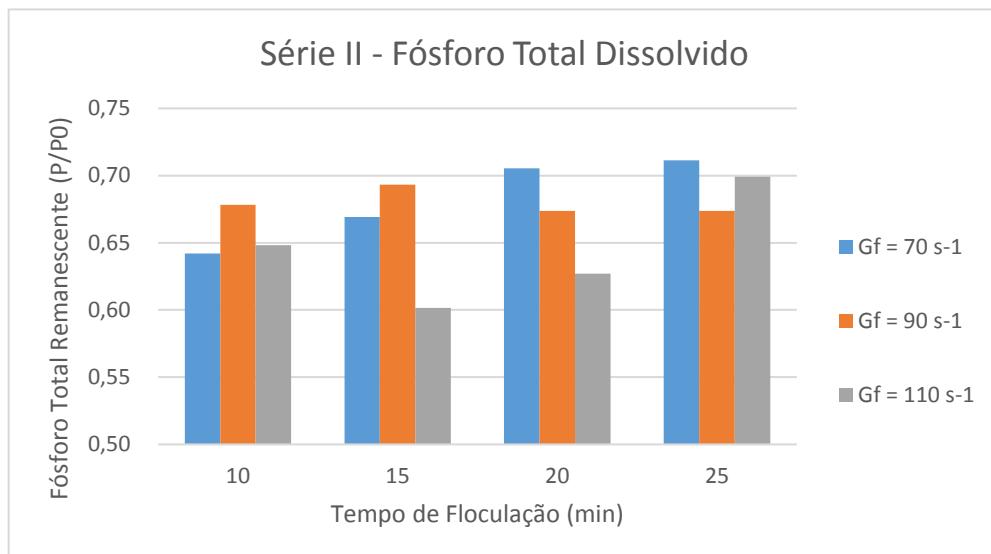


Figura 40 - Distribuição de fósforo total dissolvido para as condições de floculação estudadas

Observa-se que a remoção de fósforo total não apresentou grandes variações para as diferentes condições de floculação avaliadas, apresentando eficiência aproximada de 40 %, conforme Tabela 16. Fato que também pode ser observado na diferença entre as colunas, na Figura 39. Em relação ao fósforo total dissolvido a condição que apresentou melhor eficiência de remoção (40%) foi a combinação de $G_f = 110 \text{ s}^{-1}$ e $T_f = 15 \text{ min}$.

Para auxiliar na escolha da melhor condição de floculação dentre as avaliadas, elaborou-se a Tabela 17 com os valores de remoção dos parâmetros de cor aparente e turbidez para as condições consideradas como melhores para cada gradiente de floculação.

Tabela 17 - Resultados de remoção de turbidez e cor aparente para as condições de flocação selecionadas

| Gf (s^{-1}) | Tf (min) | Valores obtidos para as amostras flotadas | | | | | | | |
|-----------------|----------|---|----------|-----------------|----------|-----------------|----------|-----------------|----------|
| | | Vf1 = 22 cm/min | | Vf2 = 18 cm/min | | Vf3 = 14 cm/min | | Vf4 = 10 cm/min | |
| | | Remoção (%) | | Remoção (%) | | Remoção (%) | | Remoção (%) | |
| | | Cor | Turbidez | Cor | Turbidez | Cor | Turbidez | Cor | Turbidez |
| 70 | 20 | 70% | 78% | 71% | 79% | 74% | 81% | 74% | 79% |
| 90 | 20 | 70% | 79% | 71% | 79% | 73% | 80% | 74% | 80% |
| 110 | 15 | 72% | 79% | 73% | 79% | 74% | 81% | 74% | 82% |

Nota-se que as eficiências de remoção apresentadas na Tabela 17 possuem valores próximos, com uma pequena superioridade para o com junto $Gf = 110 s^{-1}$ e $Tf = 15$ min em relação aos demais, considerando as velocidades de 10 e 14 cm/min. Considerando os dados apresentados na Tabela 17, assim como os dados de remoção para DQO e Fósforo Total, definiu-se como a melhor condição de flocação o conjunto supramencionado de $Gf = 110 s^{-1}$ e $Tf = 15$ min. Porém, ressalta-se que pela proximidade dos valores obtidos nos diversos parâmetros, em uma hipotética unidade de flocação em escala real deve-se realizar um estudo de viabilidade econômica considerando a área de construção e os gastos para tal. Assim como os gastos energéticos para a manutenção do gradiente de flocação, estabelecendo dessa forma a condição de flocação mais viável para implantação.

5.3. Ensaios para verificação da influência da fração de recirculação na eficiência da flotação com PAC

A partir da condição ótima de flocação definida, e com a dosagem da primeira série de ensaios, seguiu-se para a análise da influência da fração de recirculação na eficiência de remoção da flotação com uso de PAC como coagulante.

5.3.1. Turbidez e Cor aparente

Os resultados de remoção obtidos para os parâmetros de turbidez e cor aparente na Série III estão expostos nas Tabelas 18 e 19, a seguir.

Tabela 18 - Resultados de remoção de turbidez na Série III

| Turbidez da Amostra Bruta (uT) | | Valores obtidos para as amostras flotadas | | | | | | | | |
|--------------------------------|---------------------|---|-----------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|
| | Dosagem PAC mg/L | Fração de recirculação (%) | Vf1 = 22 cm/min | | Vf2 = 18 cm/min | | Vf3 = 14 cm/min | | Vf4 = 10 cm/min | |
| | | | Turbidez (uT) | Remoção (%) |
| Série 3 | 14 | 8 | 14,1 | 57% | 8,1 | 76% | 6,5 | 80% | 5,4 | 84% |
| | | 10 | 12 | 64% | 8,7 | 74% | 6,7 | 80% | 5,5 | 83% |
| | | 12 | 11,1 | 66% | 8,8 | 73% | 6,6 | 80% | 5,8 | 82% |
| | | 14 | 15,4 | 53% | 9,5 | 71% | 8,2 | 75% | 6,1 | 82% |
| | | 16 | 13,4 | 60% | 7,8 | 76% | 6,4 | 81% | 5,5 | 83% |
| | | 18 | 27,1 | 18% | 14,7 | 56% | 11,2 | 66% | 8,5 | 74% |
| | | 20 | 22,3 | 33% | 12,1 | 63% | 9,8 | 70% | 6,2 | 81% |

Tabela 19 - Resultados de remoção de cor aparente na Série III

| Cor Aparente da Amostra Bruta (uH) | | 622 | | | | | | | | |
|------------------------------------|----------------|-------------------------------|---|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
| | Dosagem PAC | Fração de recirculação (%) | Valores obtidos para as amostras flotadas | | | | | | | |
| | | | Vf1 = 22 cm/min | | Vf2 = 18 cm/min | | Vf3 = 14 cm/min | | Vf4 = 10 cm/min | |
| | mg/L | | Cor (uH) | Remoção (%) | Cor (uH) | Remoção (%) | Cor (uH) | Remoção (%) | Cor (uH) | Remoção (%) |
| Série 3 | 14 | 8 | 363 | 42% | 242 | 61% | 195 | 69% | 168 | 73% |
| | | 10 | 318 | 49% | 259 | 58% | 189 | 70% | 171 | 73% |
| | | 12 | 306 | 51% | 266 | 57% | 202 | 68% | 180 | 71% |
| | | 14 | 385 | 38% | 269 | 57% | 230 | 63% | 189 | 70% |
| | | 16 | 362 | 42% | 235 | 62% | 184 | 70% | 168 | 73% |
| | | 18 | 518 | 17% | 411 | 34% | 338 | 46% | 276 | 56% |
| | | 20 | 454 | 27% | 343 | 45% | 276 | 56% | 183 | 71% |

Nas Figuras 41 e 42 estão apresentadas as curvas de turbidez, enquanto nas Figuras 43 e 44 as curvas de cor aparente remanescentes para cada velocidade de flotação analisada e frações de recirculação avaliados.

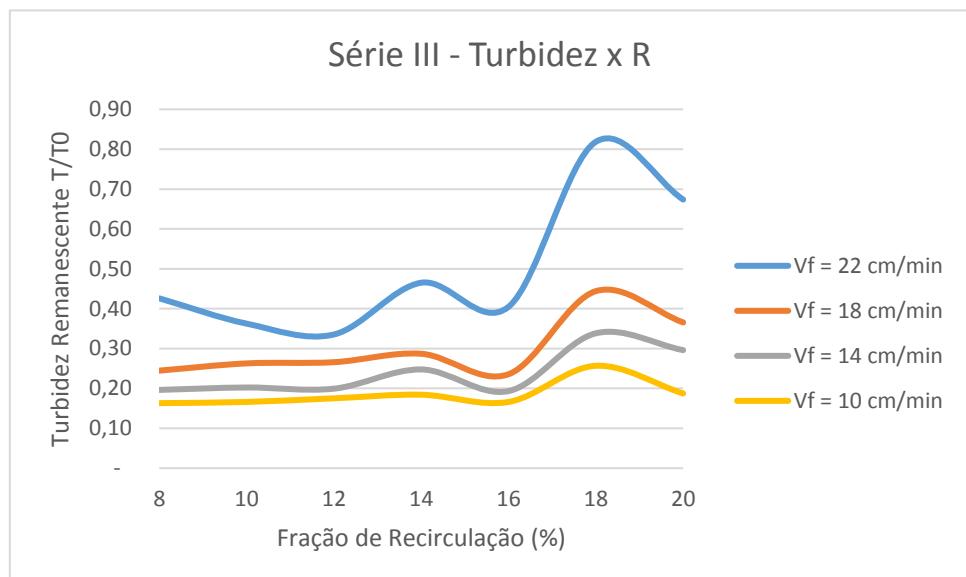


Figura 41 - Distribuição de T/T0 por velocidade de flotação no intervalo de fração de recirculação estudado

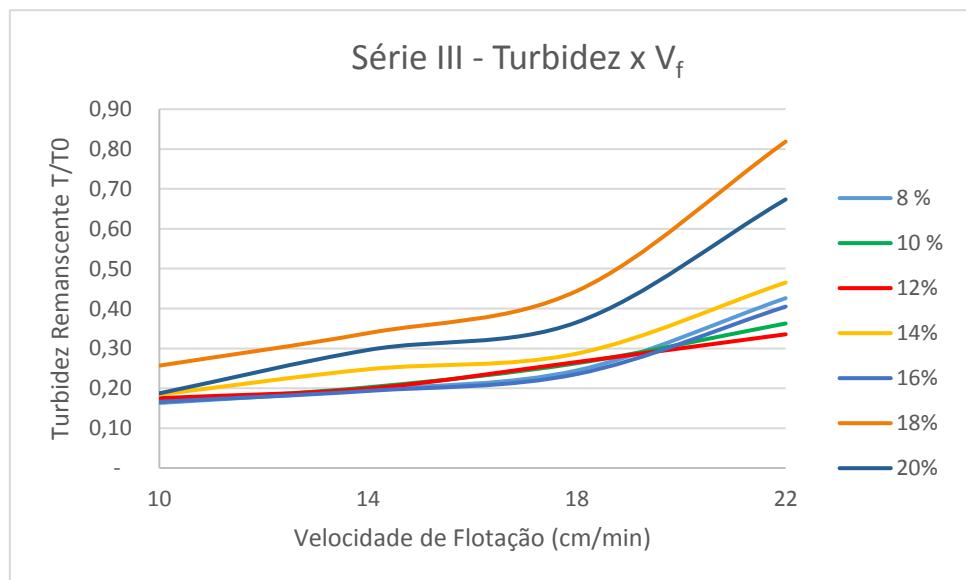


Figura 42 - Distribuição de T/T0 por fração de recirculação no intervalo de velocidades de flotação estudadas

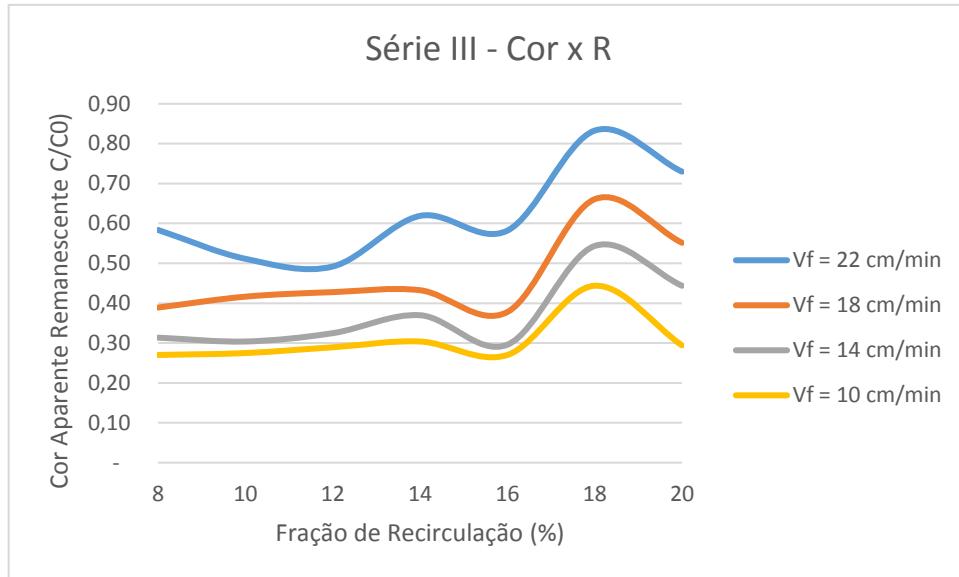


Figura 43 - Distribuição de C/C0 por velocidade de flotação no intervalo de fração de recirculação estudado

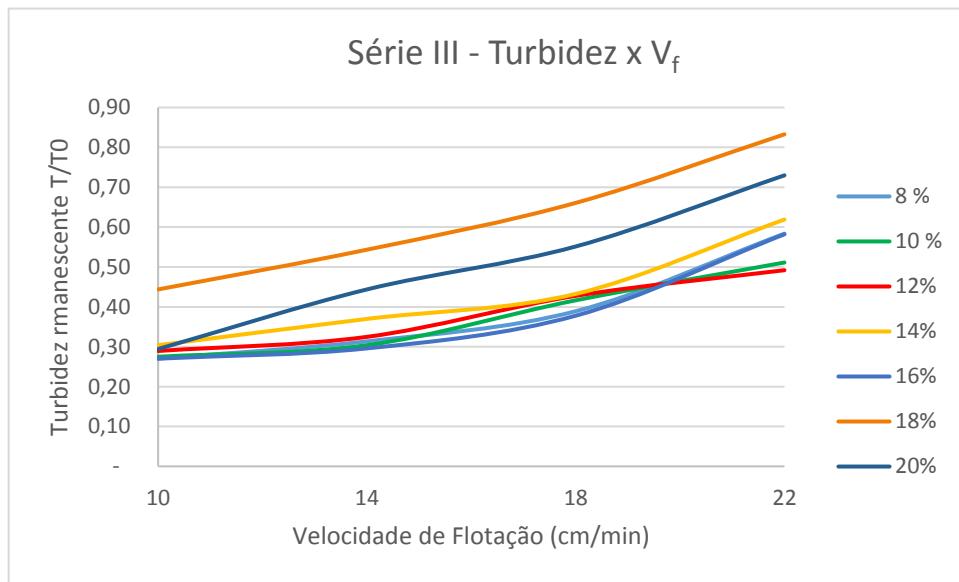


Figura 44 - Distribuição de C/C0 por fração de recirculação no intervalo de velocidades de flotação estudadas

Observa-se que tanto para o parâmetro de turbidez, quanto para o de cor aparente obteve-se valores muito próximos de eficiência de remoção para as frações de recirculação de 8 a 16 %. Enquanto para as frações maiores, como 18 e 20 % houve uma evidente queda na eficiência. Diante disto, como critério para determinar a melhor fração de recirculação, determinou-se pela de 12 %; visto que esta apresenta as melhores eficiências para a velocidade de flotação de 22 cm/min, situação mais crítica dentre as estudadas.

5.3.2. Demanda Química de Oxigênio

Na Tabela 20 são apresentados os resultados de remoção obtidos para os parâmetros de DQO e DQO filtrada nos ensaios da Série III.

Tabela 20 - Resultados de remoção de DQO na Série III

| DQO da Amostra Bruta (mgO₂/L) | | 272,42 | | | |
|--|-----------------------------------|--|--------------------|---|--------------------|
| DQO Filtrada da Amostra Bruta após passagem em membrana # 0,45 µm (mgO₂/L) | | 195,62 | | | |
| Dosagens PAC | Fração de recirculação (%) | Valores obtidos para as amostras flotadas | | | |
| | | Vf = 14 cm/min | | | |
| | | DQO (mgO₂/L) | Remoção (%) | DQO filtrada (mgO₂/L) | Remoção (%) |
| Série 3 | 14 | 8 | 38% | 78,38 | 50% |
| | | 10 | 37% | 75,88 | 51% |
| | | 12 | 38% | 71,27 | 50% |
| | | 14 | 38% | 74,73 | 52% |
| | | 16 | 40% | 70,69 | 51% |
| | | 18 | 35% | 67,62 | 51% |
| | | 20 | 37% | 69,92 | 51% |

Na Figura 45 estão apresentadas as curvas de DQO e DQO Filtrada remanescentes em relação a cada fração de recirculação avaliada.

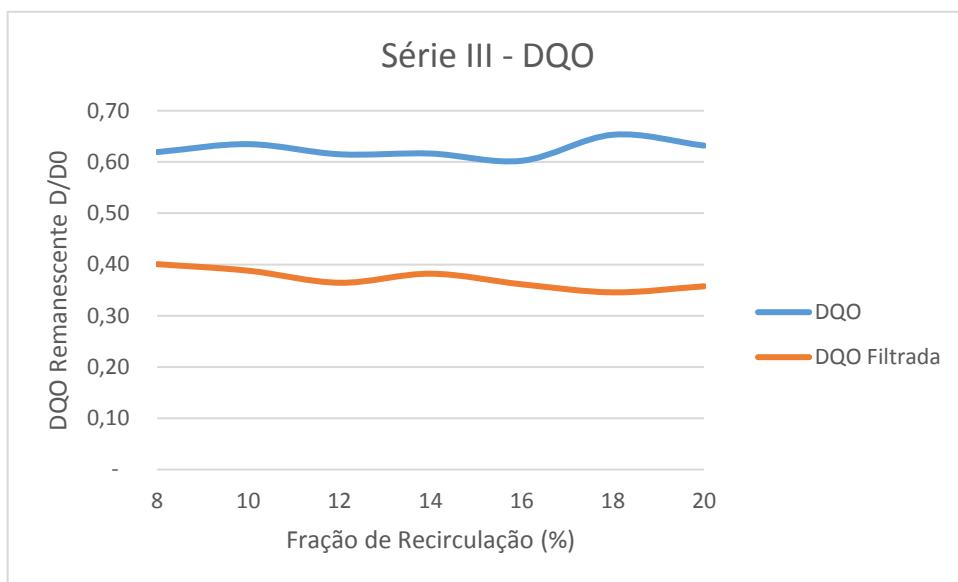


Figura 45 - Distribuição de DQO remanescente por fração de recirculação

Observa-se que a remoção de DQO não mostrou grandes variações para as diferentes frações de recirculação avaliadas, apresentando eficiência aproximada de 40% para a DQO na faixa de 8 a 16 % de recirculação e de aproximadamente 50% para a DQO filtrada, conforme Tabela 20. Fato que também pode ser observado nas curvas apresentadas na Figura 45.

5.3.3. Fósforo Total

Na Tabela 21 são apresentados os resultados de remoção obtidos para os parâmetros de fósforo total e fósforo total dissolvido nos ensaios da Série III.

Tabela 21 - Resultados de remoção de fósforo total dissolvido na Série III

| | | | | | |
|---|-----------------------------------|--|--------------------|--|--------------------|
| Fósforo Total da Amostra Bruta (mg/L) | | 22,36 | | | |
| Fósforo Total Dissolvido da Amostra Bruta (mg/L) | | 17,70 | | | |
| Dosagens PAC | Fração de recirculação (%) | Valores obtidos para as amostras flotadas | | | |
| | | Vf = 14 cm/min | | | |
| Série 3 | mg/L | Fósforo Total (mg/L) | Remoção (%) | Fósforo total Dissolvido (mg/L) | Remoção (%) |
| | 8 | 14,70 | 34% | 12,30 | 31% |
| | 10 | 15,60 | 30% | 12,64 | 29% |
| | 12 | 14,72 | 34% | 12,52 | 29% |
| | 14 | 15,40 | 31% | 12,16 | 31% |
| | 16 | 15,00 | 33% | 11,82 | 33% |
| | 18 | 15,26 | 32% | 11,88 | 33% |
| | 20 | 14,74 | 34% | 11,14 | 37% |

Na Figura 46 estão apresentadas as curvas de fósforo total e fósforo total dissolvido remanescentes em relação a cada fração de recirculação avaliada.

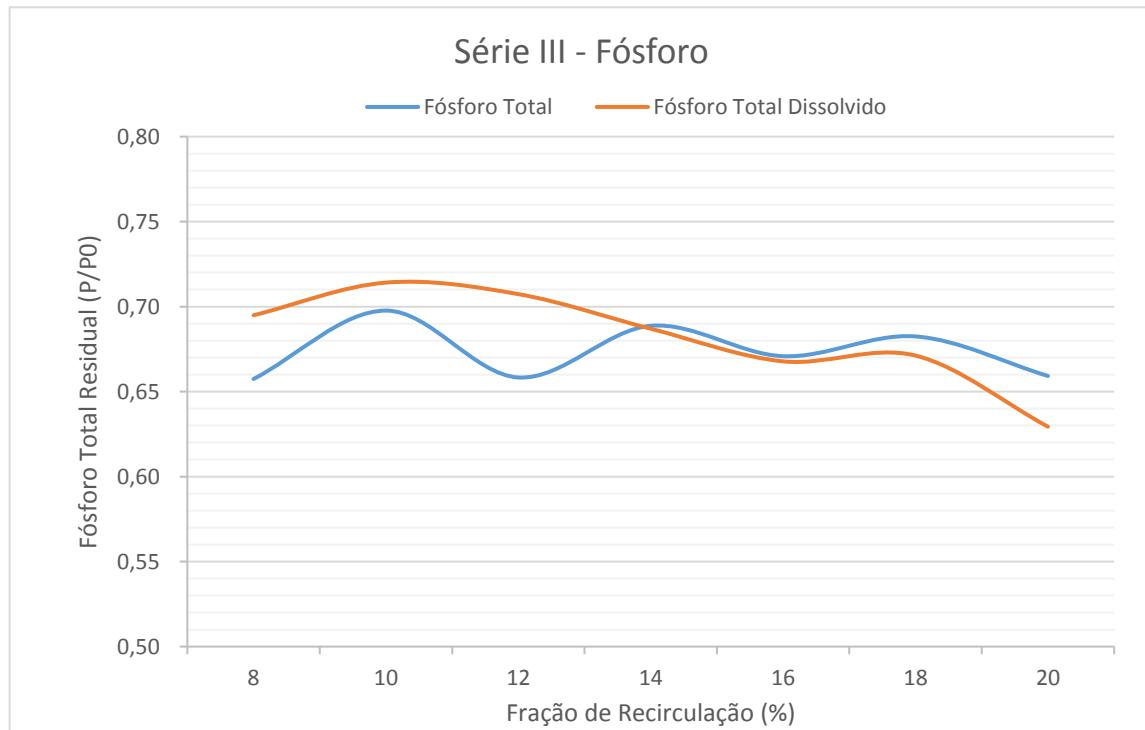


Figura 46 - Distribuição de fósforo remanescente por fração de recirculação

Observa-se que a remoção de fósforo total, assim como a de DQO, não apresentou grandes variações para as diferentes frações de recirculação, apresentando eficiência de

aproximadamente 30% ao longo da faixa de recirculação analisada, com exceção para a DQO filtrada e fração de recirculação de 20 % a qual obteve eficiência máxima de remoção de 37%, conforme a Tabela 21 e as curvas apresentadas na Figura 46.

Considerando a pequena variação nos resultados obtidos para os parâmetros de DQO e fósforo total, a determinação da fração de recirculação ótima foi realizada com base nos parâmetros de cor aparente e turbidez. Desta forma definiu-se como a fração de recirculação de 12% a adotada para realização das etapas seguintes.

Logo, a partir desta definição é possível calcular a massa de ar fornecida por unidade de volume de líquido afluente (A/V), utilizando a Equação 4, apresentada anteriormente na metodologia:

Prontamente,

$$A/V = 17,5 \times 1,17 \times \left[1,0 \times \left(\frac{500 + 101,3}{101,3} \right) - 1 \right] \times \frac{0,12}{1 + 0,12}$$

$$\frac{A}{V} = 10,83 \text{ g de ar/m}^3 \text{ de água bruta}$$

5.4. Série IV - Ensaios de determinação da demanda de cloreto férrico para coagulação

Utilizando-se dos parâmetros ótimos definidos nas Séries II e III, na Série IV foram realizados ensaios para a verificação da influência do cloreto férrico como coagulante na eficiência da flotação por ar dissolvido.

5.4.1. Turbidez e Cor aparente

Nas Tabelas 22 e 23 estão apresentados os resultados de remoção para os parâmetros de turbidez e cor aparente.

Tabela 22 - Resultados de remoção de turbidez na série IV

| Turbidez da Amostra Bruta (uT) | | Valores obtidos para as amostras flotadas | | | | | | | | |
|--------------------------------|--------------------------|---|-----------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|
| Série 4 | Dosagens Cloreto Férlico | pH de coagulação | Vf1 = 22 cm/min | | Vf2 = 18 cm/min | | Vf3 = 14 cm/min | | Vf4 = 10 cm/min | |
| | mg/L | | Turbidez (uT) | Remoção (%) |
| Série 4 | 0 | - | 61 | 68% | 55 | 71% | 45 | 76% | 37 | 81% |
| | 30 | 6,91 | 43 | 77% | 35 | 82% | 29 | 85% | 27 | 86% |
| | 40 | 6,90 | 33 | 83% | 30 | 84% | 27 | 86% | 25 | 87% |
| | 50 | 6,84 | 33 | 83% | 30 | 84% | 25 | 87% | 23 | 88% |
| | 60 | 6,87 | 32 | 83% | 27 | 86% | 24 | 87% | 24 | 87% |
| | 70 | 6,84 | 29 | 85% | 24 | 87% | 22 | 88% | 22 | 88% |
| | 80 | 6,87 | 37 | 81% | 24 | 87% | 21,4 | 89% | 21 | 89% |
| | 90 | 6,86 | 43 | 77% | 24 | 87% | 19 | 90% | 18 | 91% |

Tabela 23 - Resultados de remoção de cor aparente na Série IV

| Cor Aparente da Amostra Bruta (uH) | | | 1960 | | | | | | | |
|---------------------------------------|--------------------------------|---------------------|---|-------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|
| | Dosagens Cloreto Férrico | pH de coagulação | Valores obtidos para as amostras flotadas | | | | | | | |
| | | | Vf1 = 22 cm/min | | Vf2 = 18 cm/min | | Vf3 = 14 cm/min | | Vf4 = 10 cm/min | |
| | | | mg/L | Cor (uH) | Remoção (%) | Cor (uH) | Remoção (%) | Cor (uH) | Remoção (%) | Cor (uH) |
| Série 4 | 0 | - | 1013 | 48% | 977 | 50% | 862 | 56% | 847 | 57% |
| | 30 | 6,91 | 811 | 59% | 769 | 61% | 703 | 64% | 675 | 66% |
| | 40 | 6,90 | 771 | 61% | 682 | 65% | 659 | 66% | 641 | 67% |
| | 50 | 6,84 | 732 | 63% | 670 | 66% | 612 | 69% | 612 | 69% |
| | 60 | 6,87 | 687 | 65% | 626 | 68% | 595 | 70% | 600 | 69% |
| | 70 | 6,84 | 618 | 68% | 573 | 71% | 542 | 72% | 547 | 72% |
| | 80 | 6,87 | 739 | 62% | 557 | 72% | 524 | 73% | 569 | 71% |
| | 90 | 6,86 | 705 | 64% | 536 | 73% | 473 | 76% | 439 | 78% |

Nas Figuras 47 e 48 são apresentadas as curvas de turbidez e cor aparente remanescentes, respectivamente, para cada dosagem de cloreto férrico analisada. Enquanto nas Figuras 49 e 50 encontram-se a variação da turbidez e cor aparente remanescentes, para cada dosagem, em relação às velocidades de flotação analisadas.

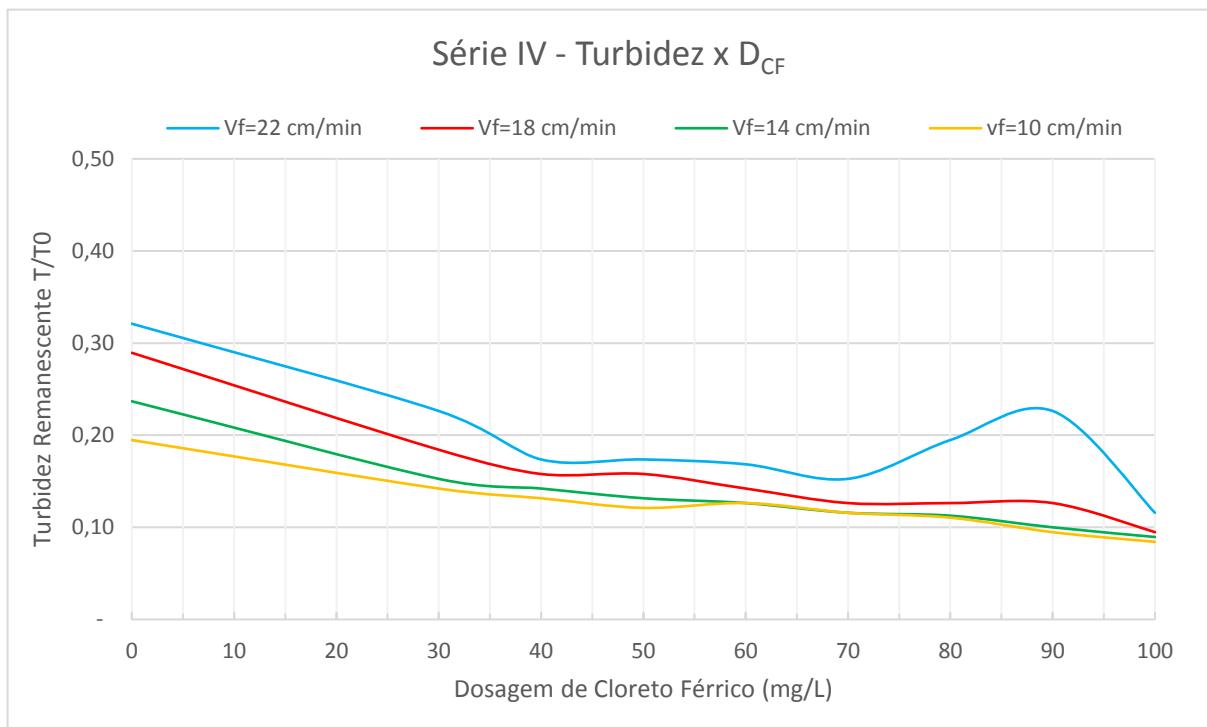


Figura 47 - Distribuição de turbidez remanescente em relação à dosagem de coagulante por velocidade de flotação

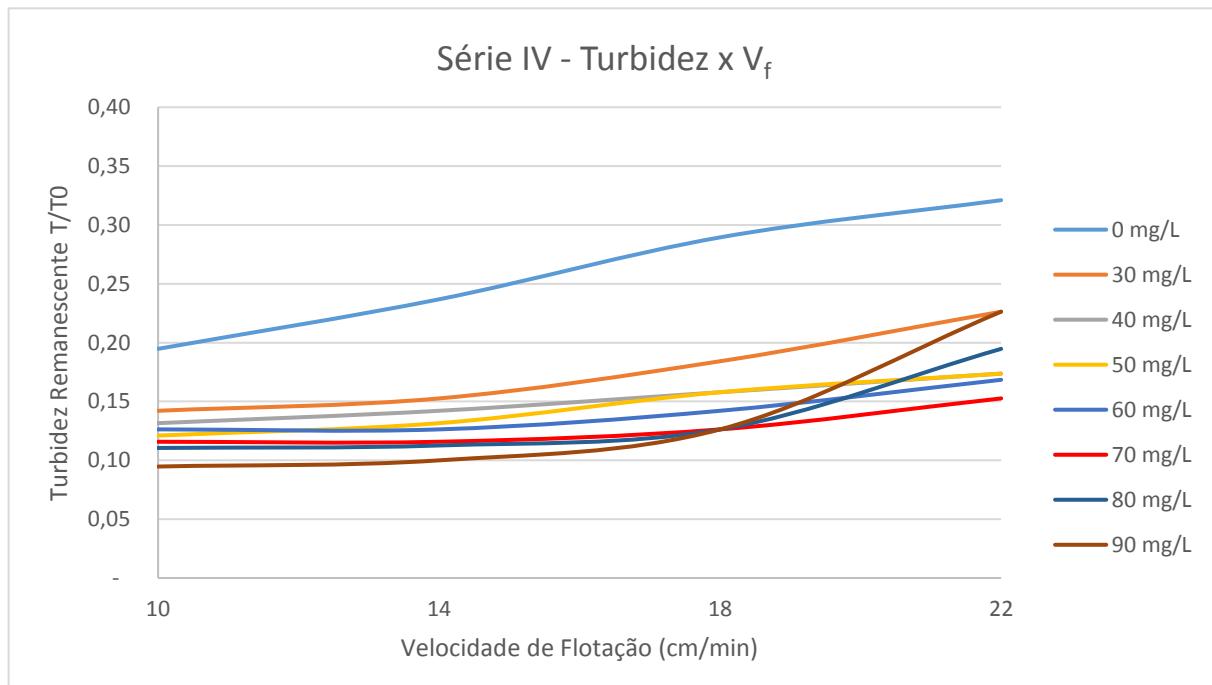


Figura 48 - Distribuição de turbidez remanescente em relação à velocidade de flotação por dosagem de cloreto

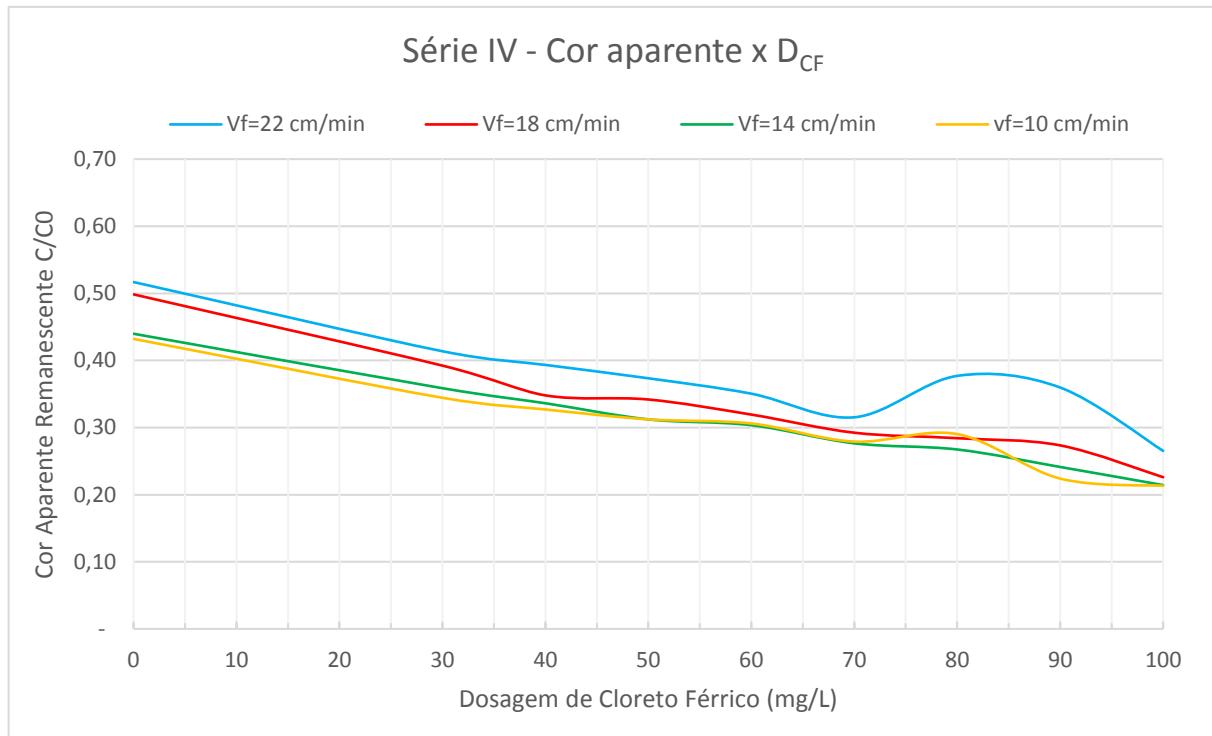


Figura 49 - Distribuição de cor aparente remanescente em relação à dosagem de coagulante por velocidade de flotação

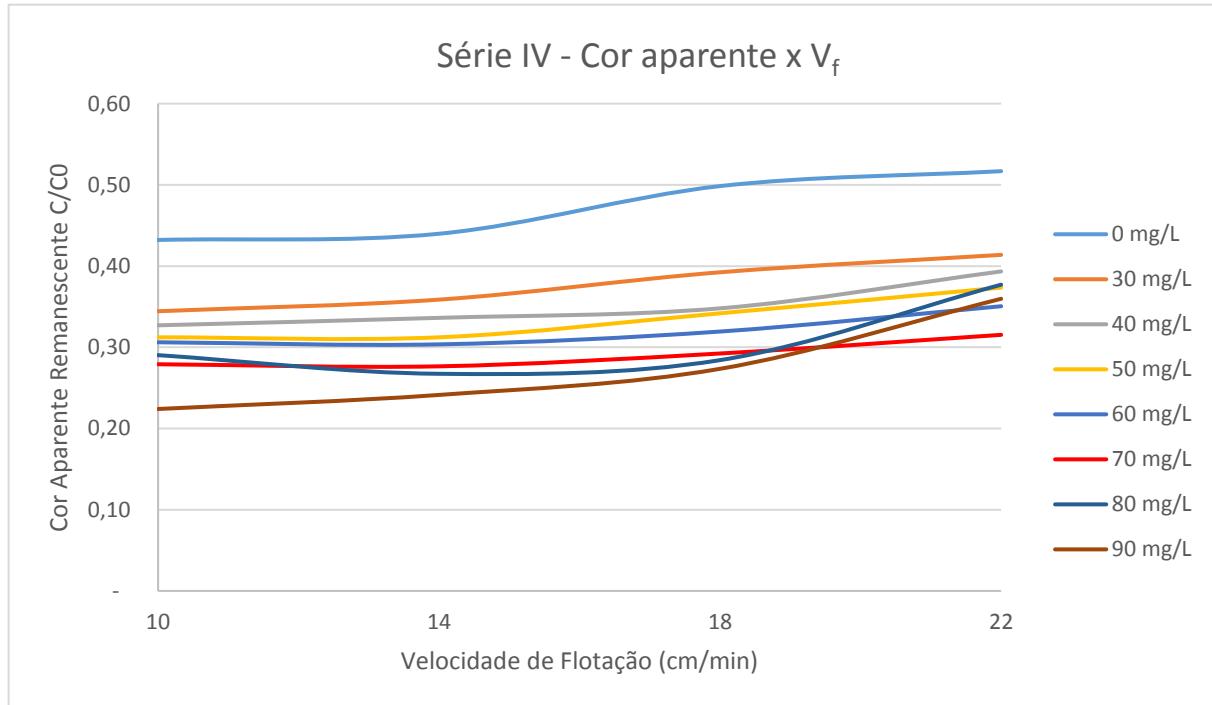


Figura 50 - Distribuição de cor aparente remanescente em relação à velocidade de flotação por dosagem de cloreto

Considerando os dados de remoção de cor aparente e turbidez remanescente obtidos nos ensaios realizados sem aplicação de coagulante, observa-se que o emprego somente da flotação (sem as etapas de coagulação e flocação) para a clarificação desse tipo de efluente promoveu

remoção de parcela significativa de turbidez (de 61% a 81%, para as velocidades de flotação de 22 cm/min e 10 cm/min, respectivamente) e de cor (de 48% a 57%, para as velocidades de flotação de 22 cm/min e 10 cm/min, respectivamente).

Por outro lado, fica clara a ação do coagulante ao observarmos as Figuras 48 e 50 e compararmos as curvas dos ensaios com dosagem de cloreto férrico e a curva de branco, sem dosagem de coagulante. Tal ação é denotada pela manutenção de uma certa eficiência de remoção mesmo que em velocidades de flotação maior, algo que não acontece na curva de ensaio sem coagulante, na qual há uma estabilização da eficiência de remoção apenas para as duas menores velocidades analisadas. É importante salientar que os valores de pH de coagulação obtidos durante os ensaios mantiveram-se na faixa apropriada considerada de 6,5 a 7,5 (REALI, et al, 2001); enquanto a variação de pH durante os ensaios variou entre 6,84 e 6,91. Destaca-se que o uso de Cloreto férrico como coagulante obteve melhores resultados na remoção de turbidez em relação à cor aparente. Ainda assim, em apreciação aos valores aferidos nota-se que foi possível obter uma boa eficiência para ambos os parâmetros, em alguns casos ultrapassando os 90% de remoção de turbidez e aproximando-se dos 80 % de remoção de cor, como por exemplo, para a dosagem de 90 mg/L.

Nota-se que, para o parâmetro de turbidez foi possível obter altas eficiências para praticamente todas as dosagens analisadas, com valores acima de 80 % de remoção, e próximos de 90 % para as velocidades de 10 e 14 cm/min, e para a velocidade de 18 cm/min nas dosagens de coagulante de 70 mg/L ou maiores. Já em relação à cor aparente destaca-se a remoção próxima de 70% para a dosagem de 70 mg/L e velocidade de flotação de 22 cm/min; e as remoções acima de 70 % para as dosagens de 70 mg/L ou maiores nas velocidades de 18, 14 e 10 cm/min, aproximando-se dos 80 % de remoção de cor aparente, no ensaio utilizando a dosagem de 90 mg/ de cloreto férrico.

Em análise às Figuras 48 e 50, evidencia-se os melhores resultados de remoção dos parâmetros turbidez e cor aparente nas dosagens de 70 a 90 mg/L.

Vale ressaltar a grande variação observada nos parâmetros analisados para a amostra bruta, em relação às etapas anteriores, isto ocorreu devido ao aumento considerável da presença de sólidos no efluente do reator anaeróbio.

5.4.2. Demanda Química de Oxigênio

Os resultados de remoção obtidos para os parâmetros de DQO e DQO filtrada estão apresentados na Tabela 24, a seguir.

Tabela 24 - Resultados de remoção de DQO na Série IV

| DQO da Amostra Bruta (mgO₂/L) | | 769,60 | | | | |
|--|---------------------------------|-------------------------|--|--------------------|---|--------------------|
| DQO Filtrada da Amostra Bruta após passagem em membrana # 0,45 µm (mgO₂/L) | | 323,00 | | | | |
| Série 4 | Dosagens Cloreto Férrico | pH de coagulação | Valores obtidos para as amostras flotadas | | | |
| | | | Vf= 14 cm/min | | | |
| | mg/L | | DQO (mgO₂/L) | Remoção (%) | DQO Filtrada (mgO₂/L) | Remoção (%) |
| 0 | - | | 424,93 | 45% | 315,38 | 2% |
| 30 | 6,91 | | 374,95 | 51% | 267,37 | 17% |
| 40 | 6,90 | | 348,62 | 55% | 260,71 | 19% |
| 50 | 6,84 | | 362,24 | 53% | 273,53 | 15% |
| 60 | 6,87 | | 373,19 | 52% | 279,53 | 13% |
| 70 | 6,84 | | 347,37 | 55% | 275,45 | 15% |
| 80 | 6,87 | | 342,68 | 55% | 283,40 | 12% |
| 90 | 6,86 | | 356,03 | 54% | 303,49 | 6% |

Na Figura 51 são apresentadas as curvas de DQO e DQO filtrada para cada dosagem de cloreto férrico analisada.

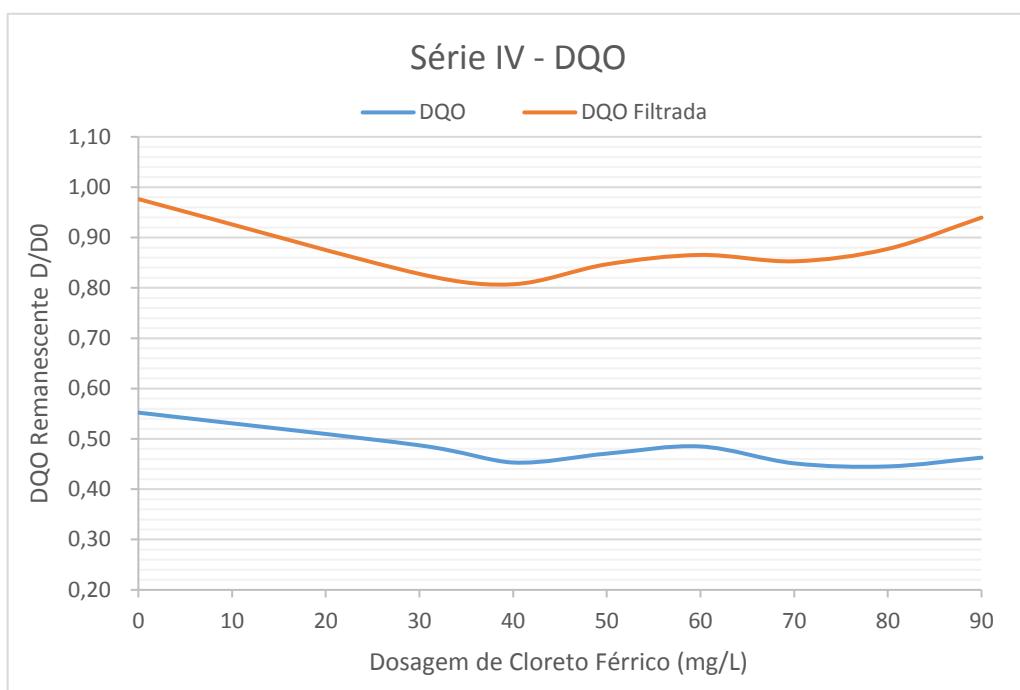


Figura 51 - Distribuição de DQO remanescente por dosagem de cloreto férrico

Observa-se que a remoção de DQO não apresentou grandes variações para as dosagens de PAC aplicadas, apresentando eficiência pouco superior a 50 % em praticamente todos os ensaios, com eficiência máxima de 55% para as dosagens de 70 e 80 mg/L, conforme Tabela 24. Na Figura 51é possível observarmos esta baixa variação, assim como a curva de DQO Filtrada, relacionada à faixa de matéria orgânica desestabilizada pelo coagulante, mas que não foi removida no processo de FAD. Ainda, é possível notar o nível relativamente elevado de DQO remanescente (amostras filtradas), representando a matéria orgânica solúvel e não passível de ser desestabilizada pelo uso do coagulante (mesmo com dosagens de coagulante de 90 mg/L) e, consequentemente, não passível de remoção pelos processos de floculação, flotação e filtração em membrana filtrante.

5.4.3. Fósforo Total

Os resultados de remoção obtidos para os parâmetros de fósforo total e fósforo total dissolvido estão apresentados na Tabela 25, a seguir.

Tabela 25 - Resultados de remoção de fósforo total na Série IV

| | | | | | | |
|---|--------------------------------|---|--|------------------------|--|------------------------|
| Fósforo Total da Amostra Bruta (mg/L) | | 21,73 | | | | |
| Fósforo Total Dissolvido da Amostra Bruta (mg/L) | | 13,43 | | | | |
| Série 4 | Dosagens Cloreto Férrico | pH de coagulação mg/L | Valores obtidos para as amostras flotadas | | | |
| | | | Vf= 14 cm/min | | | |
| | | | Fósforo Total (mg/L) | Remoção (%) | Fósforo total dissolvido (mg/L) | Remoção (%) |
| | 0 | | 15,73 | 28% | 12,33 | 8% |
| | 30 | | 14,45 | 33% | 9,60 | 28% |
| | 40 | | 13,45 | 38% | 9,03 | 33% |
| | 50 | | 12,98 | 40% | 8,40 | 37% |
| | 60 | | 12,23 | 44% | 7,95 | 41% |
| | 70 | | 11,28 | 48% | 6,60 | 51% |
| | 80 | | 11,00 | 49% | 6,20 | 54% |
| | 90 | | 10,90 | 50% | 6,05 | 55% |

Em seguida, na Figura 52, são apresentadas as curvas de fósforo total e fósforo total dissolvido para cada dosagem de cloreto férrico analisada.

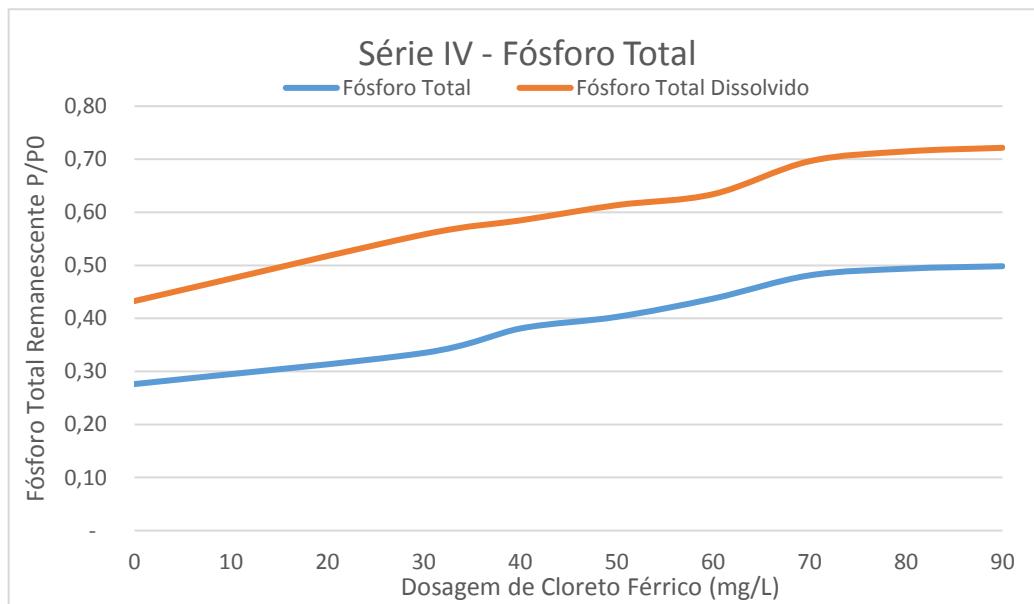


Figura 52 - Distribuição do fósforo total remanescente por dosagem de cloreto férrico

Em análise às curvas na Figura 52, conforme aumenta-se a dosagem de cloreto férrico há uma queda da concentração de fósforo total remanescente, esta tendência prevalece ao longo

de toda a faixa de dosagens analisadas, para ambas as curvas apresentadas. Pode-se destacar na figura a dosagem de 70 mg/L, pois a partir deste ponto a remoção de fósforo total aproxima-se dos 50 % de eficiência e mantem-se para as dosagens superiores.

Considerando os dados expostos para todos os parâmetros estudados, adotou-se como ótima a dosagem de 70 mg/L para o coagulante cloreto férrico, visto que esta apresenta em média resultados superiores às dosagens menores, e os ganhos em eficiência de remoção para as dosagens maiores não são tão significativos a ponto de justificarem o gasto com maior dosagem. Além disso, esta apresenta a maior eficiência na remoção de cor aparente e turbidez para a velocidade mais crítica, de 22 cm/min.

5.5. Série V - Ensaios de determinação da demanda de sulfato de alumínio para coagulação

Para a Série V, utilizando-se dos parâmetros ótimos definidos nas Séries II e III foram realizados ensaios para a verificação da influência do sulfato de alumínio como coagulante na eficiência da flotação por ar dissolvido.

5.5.1. Turbidez e Cor aparente

Nas Tabelas 26 e 27 estão apresentados os resultados de remoção para os parâmetros de turbidez e cor aparente.

Tabela 26 - Resultados de remoção de turbidez na Série V

| Turbidez da Amostra Bruta (uT) | | Valores obtidos para as amostras flotadas | | | | | | | | |
|--------------------------------|--|---|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|
| Série 5 | Dosagens Sulfato de Alumínio mg/L | pH de coagulação | Vf1 = 22 cm/min | | Vf2 = 18 cm/min | | Vf3 = 14 cm/min | | Vf4 = 10 cm/min | |
| | | | Turbidez (uT) | Remoção (%) | Turbidez (uT) | Remoção (%) | Turbidez (uT) | Remoção (%) | Turbidez (uT) | Remoção (%) |
| Série 5 | 0 | - | 37,4 | 58% | 31,1 | 65% | 26,6 | 70% | 25,7 | 71% |
| | 30 | 6,89 | 19,2 | 78% | 18,5 | 79% | 18,1 | 80% | 16,6 | 81% |
| | 40 | 6,88 | 16,7 | 81% | 14,9 | 83% | 15,3 | 83% | 14,8 | 83% |
| | 50 | 6,88 | 15,3 | 83% | 13,4 | 85% | 13,6 | 85% | 13,2 | 85% |
| | 60 | 6,91 | 14,2 | 84% | 14,3 | 84% | 13,0 | 85% | 12,8 | 86% |
| | 70 | 6,88 | 12,2 | 86% | 11,4 | 87% | 11,1 | 87% | 10,8 | 88% |
| | 80 | 6,87 | 12,6 | 86% | 11,0 | 88% | 10,5 | 88% | 10,3 | 88% |
| | 90 | 6,85 | 10,7 | 88% | 10,1 | 89% | 9,4 | 89% | 9,4 | 89% |

Tabela 27 - Resultados de remoção de cor aparente na Série V

| Cor Aparente da Amostra Bruta (uH) | | 1051 | | | | | | | | |
|------------------------------------|------------------------------|------------------|---|-------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|
| mg/L | Dosagens Sulfato de Alumínio | pH de coagulação | Valores obtidos para as amostras flotadas | | | | | | | |
| | | | Vf1 = 22 cm/min | | Vf2 = 18 cm/min | | Vf3 = 14 cm/min | | Vf4 = 10 cm/min | |
| | | | Cor (uH) | Remoção (%) | Cor (uH) | Remoção (%) | Cor (uH) | Remoção (%) | Cor (uH) | Remoção (%) |
| Série 5 | 0 | - | 769 | 27% | 718 | 32% | 649 | 38% | 621 | 41% |
| | 30 | 6,89 | 498 | 53% | 473 | 55% | 450 | 57% | 458 | 56% |
| | 40 | 6,88 | 431 | 59% | 415 | 61% | 392 | 63% | 386 | 63% |
| | 50 | 6,88 | 405 | 61% | 381 | 64% | 371 | 65% | 365 | 65% |
| | 60 | 6,91 | 376 | 64% | 370 | 65% | 341 | 68% | 343 | 67% |
| | 70 | 6,88 | 322 | 69% | 313 | 70% | 294 | 72% | 295 | 72% |
| | 80 | 6,87 | 324 | 69% | 285 | 73% | 267 | 75% | 265 | 75% |
| | 90 | 6,85 | 278 | 74% | 261 | 75% | 237 | 77% | 234 | 78% |

Nas Figuras 53 e 54 são apresentadas as curvas de turbidez e cor aparente remanescentes, respectivamente, para cada dosagem de sulfato de alumínio analisada. Enquanto nas Figuras 55 e 56 encontram-se a variação da turbidez e cor aparente remanescentes para cada dosagem em relação às velocidades de flotação analisadas.

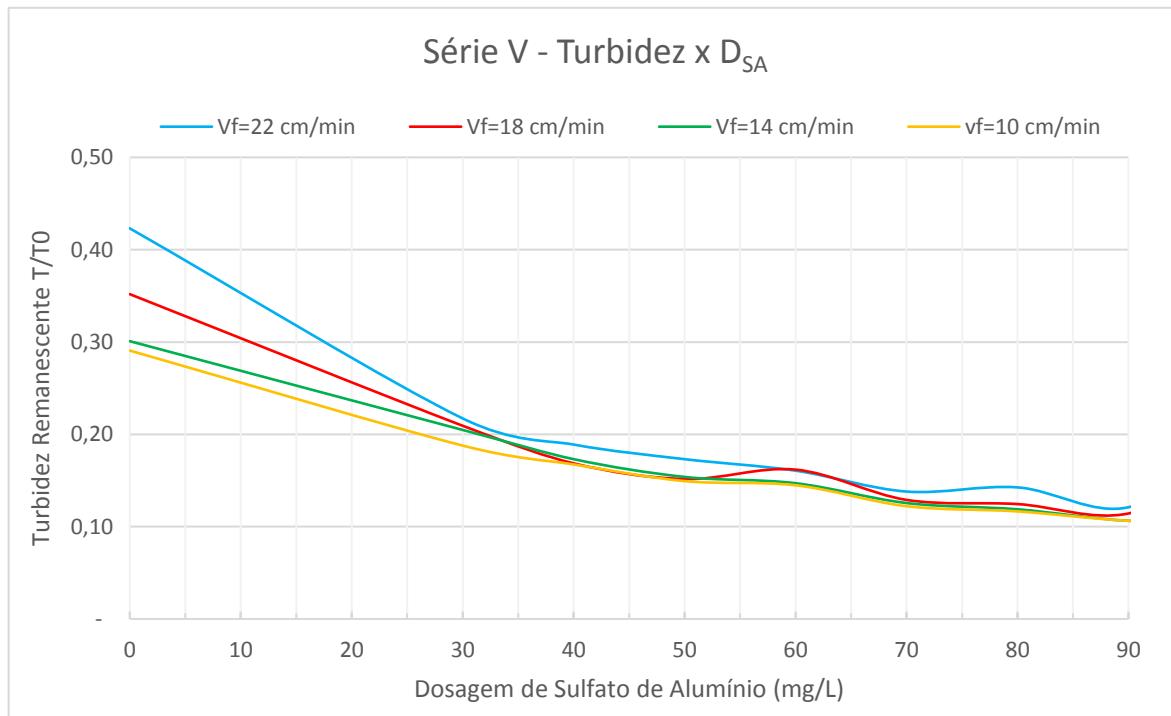


Figura 53 - Distribuição de T/T0 em relação à dosagem de sulfato de alumínio por velocidade de flotação

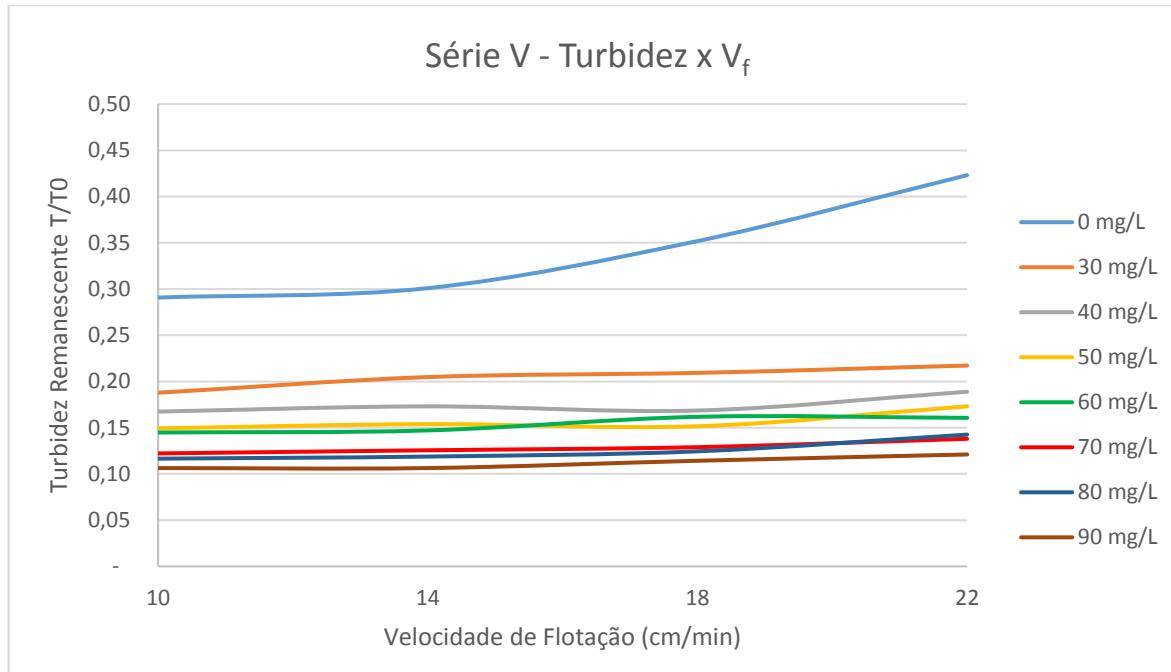


Figura 54 - Distribuição de T/T0 em relação à velocidade de flotação por dosagem de sulfato de alumínio

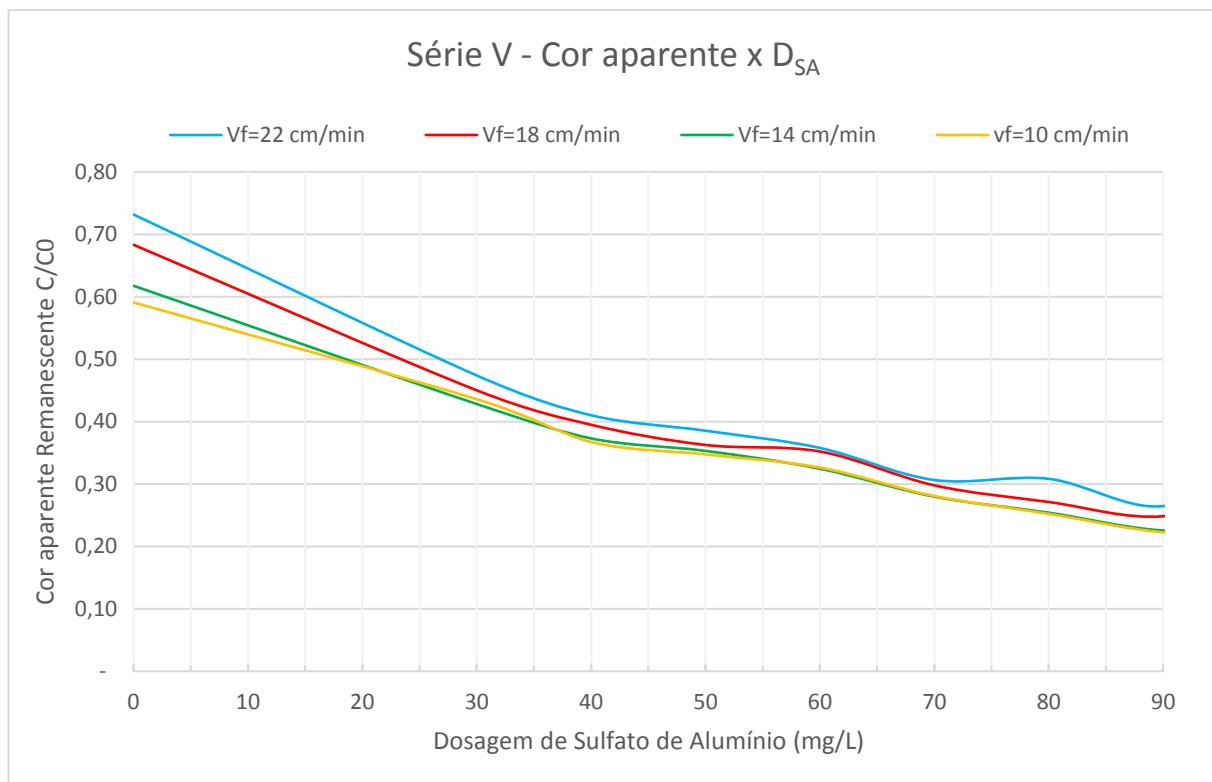


Figura 55 - Distribuição de C/C₀ em relação à dosagem de sulfato de alumínio por velocidade de flotação

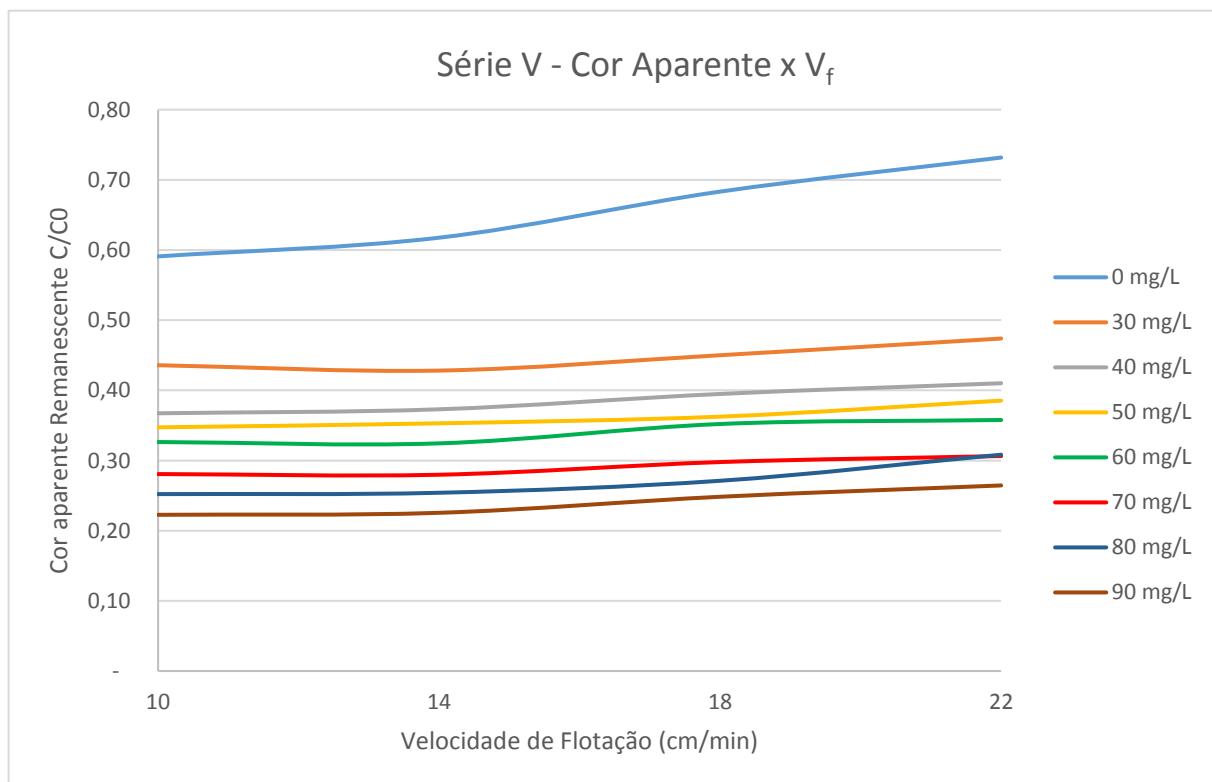


Figura 56 - Distribuição de C/C₀ em relação à velocidade de flotação por dosagem de sulfato de alumínio

Da mesma forma que na série anterior, fica clara a ação do coagulante ao observarmos as Figuras 54 e 56 e compararmos as curvas dos ensaios com dosagem de sulfato de alumínio e a curva de branco, sem dosagem de coagulante. Tal ação é denotada pela manutenção de uma certa eficiência de remoção mesmo que em velocidades de flotação maior, algo que não acontece na curva de ensaio sem coagulante, na qual há uma estabilização da eficiência de remoção apenas para as duas menores velocidades analisadas. É importante salientar que os valores de pH de coagulação obtidos durante os ensaios mantiveram-se na faixa apropriada considerada de 6,5 a 7,5 (REALI, et al, 2001); enquanto a variação de pH durante os ensaios variou entre 6,85 e 6,91. Destaca-se que o uso de sulfato de alumínio, assim como os demais coagulantes analisados, obteve-se melhores resultados na remoção de turbidez em relação à cor aparente. Ainda assim, em apreciação aos valores aferidos nota-se que foi possível obter uma boa eficiência de remoção para ambos os parâmetros.

Nota-se que, para o parâmetro de turbidez foi possível obter altas eficiências para praticamente todas as dosagens analisadas, com valores acima de 80 % de remoção para praticamente todas as dosagens e velocidades de flotação consideradas. Ultrapassando-se os 85 % de remoção para todas velocidades nas dosagens de 70 mg/L ou maiores de coagulante. Já em relação à cor aparente destacam-se as dosagens de 70 a 90 mg/L nas quais obteve-se eficiência de remoção acima de 70%.

Em análise às Figuras 54 e 56, evidencia-se os melhores resultados de remoção dos parâmetros turbidez e cor aparente nas dosagens de 70 a 90 mg/L.

5.5.2. Demanda Química de Oxigênio

Os resultados de remoção obtidos para os parâmetros de DQO e DQO filtrada estão apresentados na Tabela 28, a seguir.

Tabela 28 - Resultados de remoção de DQO na Série V

| DQO da Amostra Bruta (mgO ₂ /L) | | 694,39 | | | | |
|---|-----------------------------------|------------------|---|-------------|------------------------------------|-------------|
| DQO Filtrada da Amostra Bruta após passagem em membrana # 0,45 µm (mgO ₂ /L) | | 353,65 | | | | |
| Série 5 | Dosagens Sulfato de Alumínio mg/L | pH de coagulação | Valores obtidos para as amostras flotadas | | | |
| | | | Vf= 14 cm/min | | | |
| | mg/L | | DQO (mgO ₂ /L) | Remoção (%) | DQO Filtrada (mgO ₂ /L) | Remoção (%) |
| 0 | - | | 392,72 | 43% | 284,68 | 59% |
| 30 | 6,91 | | 347,95 | 50% | 265,29 | 62% |
| 40 | 6,90 | | 354,27 | 49% | 280,20 | 60% |
| 50 | 6,84 | | 348,79 | 50% | 263,68 | 62% |
| 60 | 6,87 | | 335,15 | 52% | 256,33 | 63% |
| 70 | 6,84 | | 346,24 | 50% | 268,49 | 61% |
| 80 | 6,87 | | 344,90 | 50% | 264,00 | 62% |
| 90 | 6,86 | | 349,78 | 50% | 277,47 | 60% |

Na Figura 57 são apresentadas as curvas de DQO e DQO filtrada para cada dosagem de sulfato de alumínio analisada.

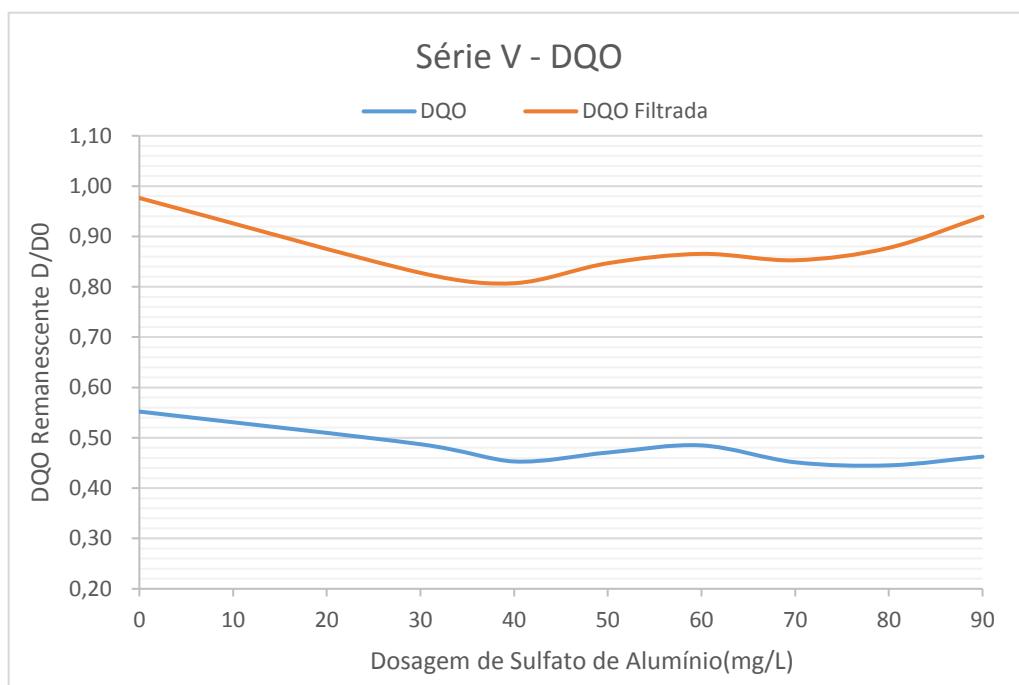


Figura 57 - Distribuição da DQO remanescente por dosagem de sulfato de alumínio

Observa-se que a remoção de DQO não apresentou grandes variações para as dosagens de sulfato de alumínio aplicadas, seguindo a tendência dos demais coagulantes. Obteve-se eficiência aproximada de 50 % em praticamente todos os ensaios, com eficiência máxima de 52% para a dosagem de 60 mg/L, conforme Tabela 28. Na Figura 57 é possível observarmos esta baixa variação, assim como a curva de DQO Filtrada, relacionada à faixa de matéria orgânica desestabilizada pelo coagulante, mas que não foi removida no processo de FAD. Ainda, é possível notar o nível significativo de DQO Filtrada remanescente, representando a matéria orgânica não desestabilizada pelo uso do coagulante e não removida pelos processos de flocação e flotação e filtração em membrana.

5.5.3. Fósforo Total

Na Tabela 29 a seguir, estão apresentados os resultados de remoção para os parâmetros de fósforo total e fósforo total dissolvido.

Tabela 29 - Resultados de remoção de fósforo total na Série V

| Fósforo Total da Amostra Bruta (mg/L) | | 20,83 | | | | |
|---|---|--|--|------------------------|--|------------------------|
| Fósforo Total Dissolvido da Amostra Bruta (mg/L) | | 19,15 | | | | |
| Série 5 | Dosagens Cloreto Férrico | pH de coagulação | Valores obtidos para as amostras flotadas | | | |
| | | | Vf= 14 cm/min | | | |
| | mg/L | Fósforo total dissolvido (mg/L) | Fósforo total dissolvido (mg/L) | Remoção (%) | Fósforo total dissolvido (mg/L) | Remoção (%) |
| | | | 18,175 | 13% | 14,875 | 29% |
| | | | 16,100 | 23% | 12,775 | 39% |
| | | | 15,875 | 24% | 11,675 | 44% |
| | | | 15,500 | 26% | 11,375 | 45% |
| | | | 14,550 | 30% | 10,525 | 49% |
| | | | 13,050 | 37% | 9,650 | 54% |
| | | | 12,300 | 41% | 8,625 | 59% |
| | | | 12,200 | 41% | 8,325 | 60% |

Em seguida, na Figura 58, são apresentadas as curvas de fósforo total e fósforo total dissolvido para cada dosagem de sulfato de alumínio analisada.

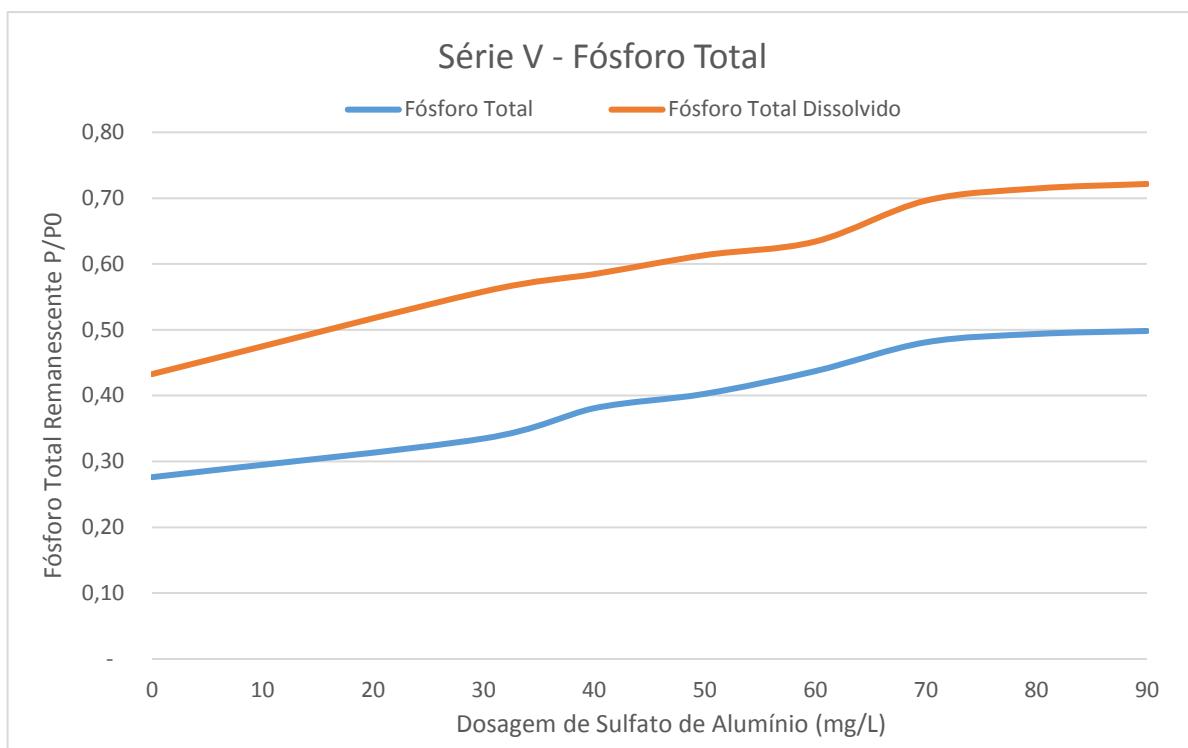


Figura 58 - Distribuição de fósforo total remanescente por dosagem de sulfato de alumínio

Em análise às curvas na Figura 58, conforme aumenta-se a dosagem de sulfato de alumínio há uma queda no fósforo total remanescente, esta tendência prevalece ao longo de toda a faixa de dosagens analisadas, para ambas as curvas apresentadas. Porém, não se obteve valores satisfatórios na remoção de fósforo total, com percentual de remoção máximo de 41% para as dosagens de 80 e 90 mg/L.

De acordo com os dados apresentados, considerando principalmente os obtidos para os parâmetros de turbidez e cor aparente, adotou-se como ótima a dosagem de 70 mg/L para o coagulante sulfato de alumínio, visto que esta apresenta em média resultados superiores às dosagens inferiores, e os ganhos em eficiência de remoção para as dosagens superiores não são tão significativos a ponto de justificarem o gasto com a maior dosagem.

5.6. Série VI –Ensaios para análises detalhadas

Nesta série final utilizou-se das dosagens ótimas definidas para cada um dos coagulantes testados, associados aos parâmetros definidos para a condição de flocação e fração de recirculação. De forma a comparar as eficiências de remoção excluindo-se a influência da variabilidade das características da amostra bruta ao longo do tempo.

Os resultados e eficiências de remoção obtidos nesta etapa estão apresentados nas Tabelas 30 e 31, a seguir:

Tabela 30 - Valores remanescentes obtidos na Série VI no processo de coagulação

| Amostras | Dosagem (mg/L) | pH de Coagulação | Parâmetros | | | | |
|----------------------------------|-------------------|---------------------|------------------|-------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | | Turbidez (uT) | Cor (uH) | Cor Verdadeira (uH) | SSV (mg sólidos/L) | SST (mg sólidos/L) |
| Bruto | - | - | 91,60 | 1028 | 7 | 120,00 | 130,70 |
| Branco | - | - | 26,70 | 503 | - | 48,30 | 63,30 |
| Coagulada PAC | 14 | 7,30 | 50,70 | 764 | - | 140,00 | 176,70 |
| Coagulada Cloreto Férrico | 70 | 7,41 | 50,60 | 736 | - | 128,30 | 136,70 |
| Coagulada Sulfato de Alumínio | 70 | 7,40 | 52,40 | 735 | - | 98,30 | 118,30 |

Tabela 31 - Valores remanescentes obtidos na Série VI

| Amostras | Dosagem (mg/L) | pH de Coagulação | Turbidez (uT) | Cor (uH) | DQO (mg O ₂ /L) | DQO Filtrada (mg O ₂ /L) | Fósforo Total (mg/L) | Fósforo Total Dissolvido (mg/L) | Parâmetros | |
|------------------------|-------------------|---------------------|------------------|-------------|-------------------------------|---|----------------------------|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | | | | | | | | SSV (mg sólidos/L) | SST (mg sólidos/L) |
| Bruto | - | - | 91,60 | 1028 | 362,86 | 215,54 | 18,00 | 12,48 | 120,00 | 130,70 |
| Branco | - | - | 26,70 | 503 | 217,08 | 161,31 | 11,79 | 10,29 | 48,30 | 63,30 |
| PAC | 14 | 7,30 | 14,70 | 275 | 179,77 | 149,00 | 9,95 | 8,83 | 30,00 | 50,00 |
| Cloreto Férrico | 70 | 7,41 | 15,10 | 308 | 172,85 | 142,46 | 10,72 | 9,47 | 24,20 | 41,70 |
| Sulfato de Alumínio | 70 | 7,40 | 17,10 | 327 | 184,38 | 149,77 | 10,91 | 9,26 | 31,70 | 55,00 |

Observando os resultados apresentados na Tabela 30, para as amostras coaguladas, nota-se que com a adição do coagulante as amostras apresentam valores absolutos nos parâmetros analisados superiores em relação à amostra sem coagulante. Isto deve-se pelo fato de que com a ação do coagulante as partículas coloidais presentes no afluente são desestabilizadas, possibilitando o crescimento das partículas por meio da colisão entre estas, e formando os flocos.

Tabela 32 - Resultados de remoção obtidos na Série VI

| Série 6 | Amostras | pH de coagulação | Parâmetros | | | | | |
|----------|-----------------------------|------------------|----------------|--------------|--------|--------------|---------------|--------------------------|
| | | | Vf 14,0 cm/min | | | | | |
| | | | Remoção (%) | | | | | |
| | | | Turbidez | Cor Aparente | DQO | DQO Filtrada | Fósforo Total | Fósforo Total Dissolvido |
| | Branco Flotado | - | 71% | 51% | 40% | 25% | 34% | 18% |
| | PAC Flotado | 7,30 | 84% | 73% | 50% | 31% | 45% | 29% |
| | Cloreto Férrico Flotado | 7,41 | 84% | 70% | 52% | 34% | 40% | 24% |
| | Sulfato de Alumínio Flotado | 7,40 | 81% | 68% | 49% | 31% | 39% | 26% |
| Afluente | | | 91,6 | 1028 | 362,86 | 215,54 | 18,00 | 12,48 |

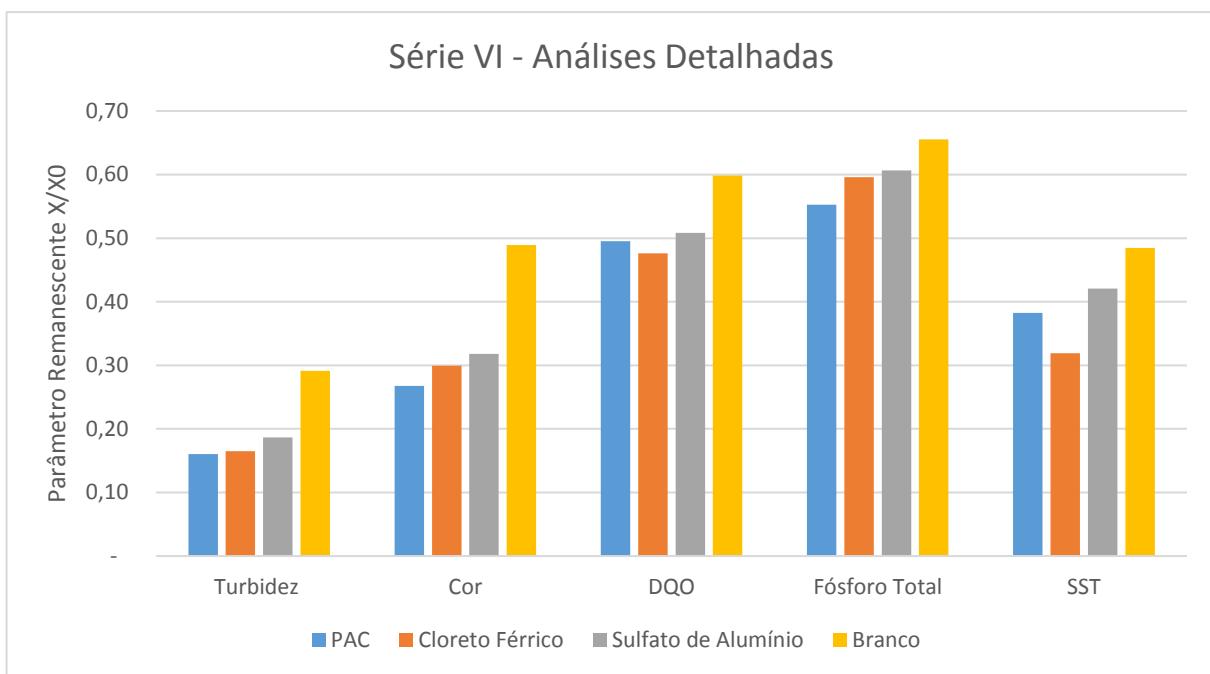


Figura 59 - Distribuição de parâmetros remanescentes para cada coagulante estudado

A partir dos dados fornecidos na Tabela 32 e na Figura 59, os três coagulantes analisados apresentaram valores próximos de remoção em todos os parâmetros de controle, com o PAC ligeiramente superior em eficiência na remoção de cor aparente e fósforo total. Enquanto o cloreto férrico apresenta eficiência ligeiramente superior na remoção de DQO e SST, com ambos obtendo remoção de 84% para o parâmetro de turbidez. Ainda, nota-se o efeito provocado pela coagulação nos ensaios realizados ao comparar-se a coluna de Branco, sempre com residuais superiores, com as demais. Com o ganho máximo de eficiência, utilizando coagulante, de 13% em relação à turbidez, 22% à cor aparente, 12% à DQO, 11% ao Fósforo Total e 16 % aos SST.

5.6.1. Distribuição do Tamanho das Partículas (DTB)

Além dos parâmetros já apresentados, foi realizada para a Série VI a análise da distribuição do tamanho das partículas presentes na amostra bruta e nas amostras no momento da coagulação e após a flotação para os três coagulantes testados. Ressalta-se que a análise de distribuição por meio dos dados apresentados neste tópico caracteriza-se de forma qualitativa, exibindo resultados referentes ao percentual de partículas presentes para cada intervalo de diâmetro na faixa investigada pelo equipamento, de 0,3 nm a 10 µm.

Da Figura 60 a 62 estão apresentadas as distribuições do tamanho das partículas por coagulante aplicado, tais dados foram obtidos por meio do equipamento Zetasizer nano, modelo ZS90-Malvern.

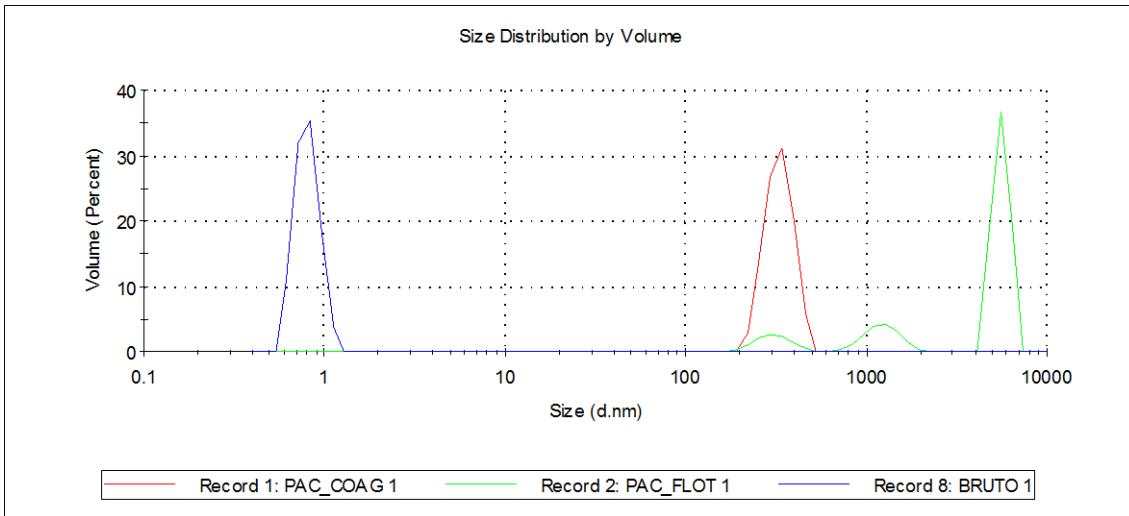


Figura 60 - Distribuição do tamanho das partículas para o coagulante PAC

Conclui-se pela Figura 60 que havia na amostra bruta a predominância de partículas da ordem de 0,5 a 1,1 nm, e após a coagulação a predominância torna-se de 0,2 a 0,5 μm . Para a amostra após a flotação as partículas predominantes eram da ordem de 4 a 7 μm , o que exemplifica a boa eficiência de remoção das partículas coloidais pelo processo de FAD com uso de PAC como coagulante.

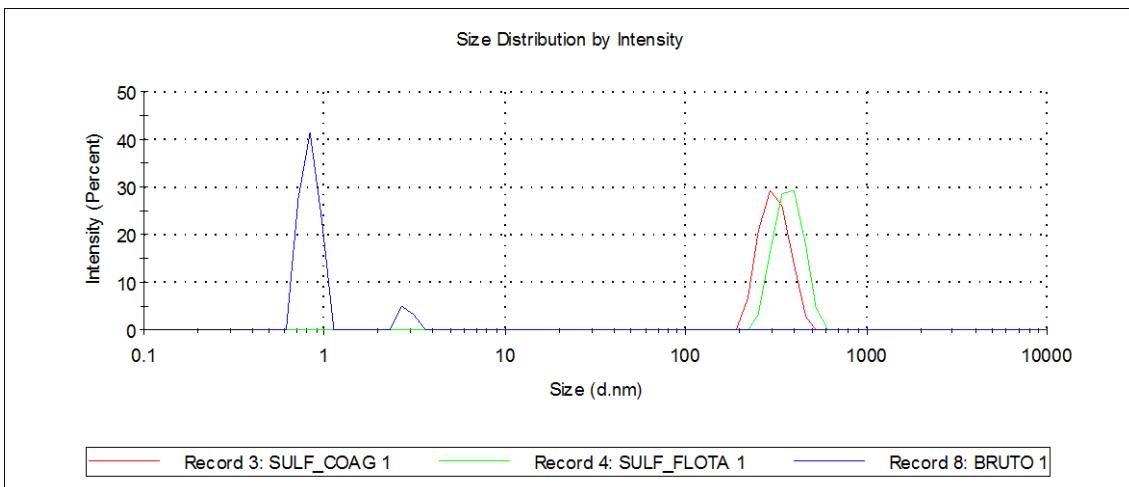


Figura 61 - Distribuição do tamanho das partículas para o coagulante Sulfato de Alumínio

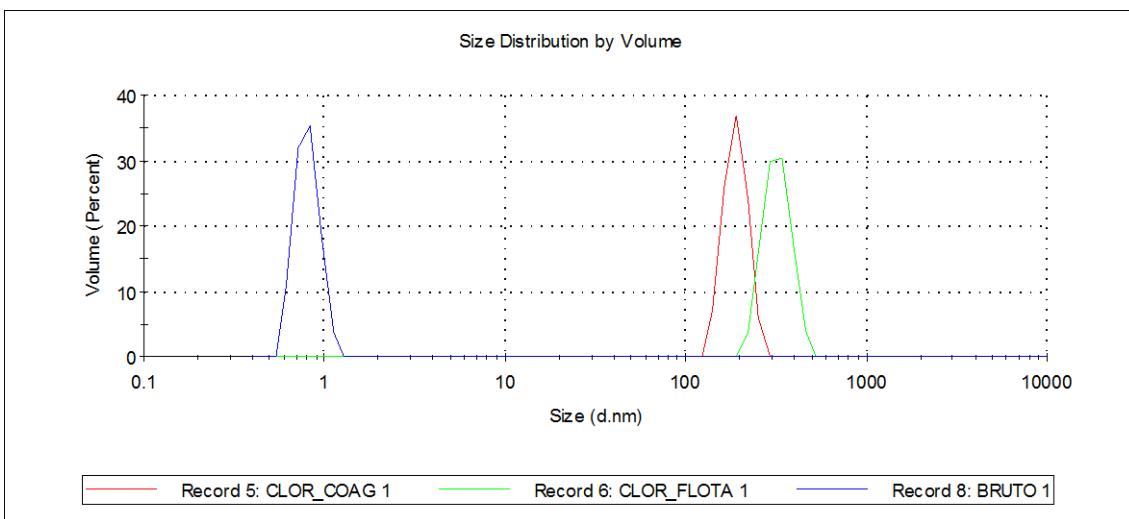


Figura 62 - Distribuição do tamanho das partículas para o coagulante Cloreto Férrico

Da mesma forma, para os coagulantes cloreto férrico e sulfato de alumínio, nas Figuras 61 e 62, observa-se a mudança na predominância de partículas da ordem de 0,5 a 1,1 nm para 0,2 a 0,5 μm , após a coagulação, para o sulfato de alumínio; e 0,15 a 0,3 μm para o cloreto férrico. Porém, estes não demonstraram a mesma eficiência na remoção das partículas até 1 μm como observado para o PAC.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base nos estudos e experimentos realizados, foram possíveis as seguintes conclusões e recomendações:

- a) A flotação (FAD) demonstrou ser técnica eficiente para remoção de sólidos suspensos presentes no efluente do reator anaeróbio com leito fixo constituído de fibras flexíveis, mesmo sem aplicação de coagulantes. Nesta condição (sem aplicação de coagulante), a flotação foi capaz de remover turbidez e cor com eficiências nas faixas de 60-80% e 48-57%, respectivamente;
- b) Comparados os resultados obtidos com a FAD sem a adição de coagulante, com os resultados obtidos nos ensaios em que foram introduzidas as etapas de coagulação, tanto com uso de PAC, cloreto férrico ou sulfato de alumínio, e de flocação antecedendo à flotação, houve aumento significativo na eficiência de remoção de turbidez, cor, SST, DQO e P.
- c) Dentre os três tipos de coagulante investigados, o PAC apresentou os maiores valores de eficiência de remoção dos parâmetros analisados quando utilizado antes da FAD para o pós-tratamento do efluente do reator anaeróbio de leito fixo constituído de fibras flexíveis; ainda que os demais coagulantes apresentem resultados próximos de eficiência de remoção, principalmente em relação ao cloreto férrico. Devido ao PAC obter os melhores resultados para a remoção de turbidez e cor aparente, este se sobressai ligeiramente em relação aos demais;
- d) Para os parâmetros de DQO e fósforo total, não se obteve resultados tão bons quanto os de remoção de cor e turbidez, com eficiências máximas de 55% e 50%, respectivamente, ao longo dos ensaios realizados. Nesta questão, cabe salientar um fator que dificultou a remoção relacionado ao tamponamento do reator anaeróbio com bicarbonato de sódio, de forma a preservar a basicidade do meio.
- e) Observa-se para a distribuição do tamanho das partículas o efeito da coagulação e desestabilização dos coloides, com a elevação da predominância de partículas maiores após a coagulação seguida de flocação e flotação. Os melhores resultados foram obtidos com o uso de PAC para o qual o tamanho predominante das partículas ficou entre 4 a 7 μm , sendo o limite máximo de medição de 10 μm .

Para futuros estudos e recomendações referentes aos resultados obtidos, sugere-se:

- a) Devido à proximidade dos valores obtidos para as condições de floculação, considerando diferentes conjuntos de Gf eTf, em uma hipotética unidade de floculação em escala real deve-se realizar um estudo de viabilidade econômica considerando a área de construção e os gastos para tal. Assim como os gastos energéticos para a manutenção do gradiente de floculação, estabelecendo dessa forma a condição de floculação mais viável para implantação.
- b) Realizar estudos em relação à forma de como o fósforo encontra-se presente no efluente sintético utilizado, visando melhor esclarecimento para a baixa eficiência de remoção obtida;
- c) Realização de estudos com aplicação do coagulante PAC associado a polímeros sintéticos, de forma a aumentar a remoção dos parâmetros fósforo total, DQO e SST.
- d) Por fim, a realização de ensaios da eficiência de tratamento do sistema objeto de estudo deste trabalho alimentado por águas residuais domésticas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION/ AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION/ WATER ENVIRONMENT FEDERATION. Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. 22 th Ed. Washington DC, USA, 2012.

ARIANO, G. C. Coagulação, Floculação e Flotação do efluente de reatores anaeróbios, tratando esgoto sanitário, com aplicação de diferentes dosagens de coagulantes em função da variação da turbidez do esgoto afluente ao longo do dia. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.140 p.

CAMPOS, J. R.; REALI, M. A. P.; DOMBROSKI, S. A. G.; MARCETTO, M. & LIMA, M. R. A. Tratamento Físico-Químico por Flotação de Efluentes de Reatores Anaeróbios. XXV Congreso Interamericano Ingeniería Sanitaria y Ambiental, México. 1996.

CARDOSO, M. Efeito do tipo de coagulante na produção de lodo de estação de tratamento de água. Dissertação (Mestrado. Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003. 109 p.

CARVALHO, M. E. Flotação de Alta Taxa aplicada ao pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbicos. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003. 158 p.

CHERNICHARO, C. A. L. et al, Introdução In: CHERNICHARO, C. A. L. et al. Pós-tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios. (1997). Reatores anaeróbios. In: Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Belo Horizonte/MG: [s.n.], 2001. Cap. 1.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. Métodos e Técnicas de Tratamento de Água. 2^a. Ed. V.2. São Carlos: RiMa, 2005. 1584 p.

EDZWALD, J. K.; HAARHOFF, J. Dissolved Air Flotation for Water Clarification, McGraw-Hill, New York and AWWA, Denver, 2012. 352 p.

FAGUNDES, T. S. Uso de polímero Natural a Base de Amido como auxiliar de floculação no pós-tratamento de efluentes UASB com Flotação por Ar Dissolvido. São Carlos. EESC-USP, 2010. 111 p.

HO, J. H. Anaerobic membrane bioreactor for the treatment of low strength wastewater. Partial Thesis (PhD). Iowa State University, 2007.142 p.

HUNT, J. R. Coagulation in Continuous particle size distributions; theory and experimental verification. Thesis (PhD). California Institute of technology, Pasadena, 1980. 190 p.

METCALF & EDDY, INC, Wastewater engineering: treatment and reuse. 4th. Ed., McGraw Hill, New York, 2003. 1819 p.

PELEGRINO, E. C. F. Emprego de coagulante à base de tanino em sistema de pós-tratamento de efluente de reator UASB por flotação. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011. 161 p.

PENETRA, R. G. Pós-tratamento Físico-químico por Flotação de efluentes de Reatores Anaeróbicos de Manta de Lodo. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.185 p.

REALI, M. A. P. 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, São Carlos, 1991.

REALI, M. A. P. et al. Tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios por Sistema de Flotação. In: CHERNICHARO, C. A. L. et al. Pós-tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios. Belo Horizonte/MG: [s.n.], 2001. Cap. 6, p. 333-376.

REALI, M. A. P.; PENETRA, R. G. & CAMPOS, J. R. Influência da floculação na flotação de efluentes de reatores anaeróbios UASB. In: XXVI Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Lima, Peru, 1 a 5 de novembro. Anais eletrônicos, 1998.

RICHTER, C.A.; AZEVEDO NETTO, J. Tratamento de água. Tecnologia atualizada. Edgard Blucher, São Paulo. 1991.

SACCHI, G. D. Flotação por ar dissolvido aplicado à separação de microalgas cultivadas em fotobioreator, alimentado com vinhaça pré-tratada físico-quimicamente, com vistas à exploração de seu potencial bioenergético. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

SCHOENHALS, M. Avaliação da eficiência do processo de flotação aplicado ao tratamento primário de efluentes de abatedouro avícola. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006. 99 p.

TANSEL, B. VILAR, F. Enhancement of Media Filter Performance with Coagulant Use for Treatment of Diesel Oil Contaminated Surface Water Desalination. Civil and Environmental Engineering Department, Florida International University. Miami. 2004.