

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E SANEAMENTO
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA HIDRÁULICA E SANEAMENTO

GABRIELLE MIGLIATO MAREGA

**Influência das características das partículas floculadas e das microbolhas de ar no
processo de Flotação por Ar Dissolvido**

VERSÃO CORRIGIDA

SÃO CARLOS

2020

GABRIELLE MIGLIATO MAREGA

Influência das características das partículas floculadas e das microbolhas de ar no processo de Flotação por Ar Dissolvido

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

Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio Penalva Reali

São Carlos

2020

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.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

Mi Migliato Marega, Gabrielle
 Influência das características das partículas
 floculadas e das microbolhas de ar no processo de
 Flotação por Ar Dissolvido / Gabrielle Migliato Marega;
 orientador Marco Antonio Penalva Reali. São Carlos,
 2020.

 Dissertação (Mestrado) - Programa de
 Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento e
 Área de Concentração em Hidráulica e Saneamento --
 Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
 São Paulo, 2020.

 1. Flotação por Ar Dissolvido. 2. Tratamento de
 água de abastecimento. 3. Análise de imagem. 4.
 partículas floculadas. 5. microbolhas de ar. 6. tamanho
 dos flocos. 7. tamanho das microbolhas. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenharia **GABRIELLE MIGLIATO MAREGA.**

Título da dissertação: "Influência das características das partículas floculadas e das microbolhas de ar no processo de flotação por ar dissolvido".

Data da defesa: 29/04/2020.

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dr. **Marco Antonio Penalva Reali** APROVADA
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Dra. **Leila Jorge Patrizzi** APROVADA
(Serviço Autônomo de Água e Esgoto/SAAE)

Prof. Dr. **Bernardo Arantes do Nascimento Teixeira** APROVADA
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

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

Prof. Dr. **Eduardo Mario Mendiando**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**

Dedico aos meus pais por todo o incentivo, dedicação e compressão.

Aos meus avós, por todo o exemplo de vida e inspiração.

E, aos meus irmãos, por todas as risadas e ajuda ao longo dos anos.

*“Pour chaque fin, il y a toujours un
nouveau départ.”*

*Le Petit Prince
(Antoine Saint Exupéry)*

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e meus irmãos em que diversas vezes me ajudaram a realizar essa pesquisa.

Ao Professor Doutor Marco Antonio Penalva Reali pela orientação, confiança, ensinamentos e paciência ao longo dos anos.

À professora Márcia Helena Rissato Zamariolli Damionovic por toda à supervisão nos estágios à docência e por todas palavras amigas e de motivação que me forneceu durante todo esse tempo na Universidade de São Paulo.

Ao professor Luiz Antonio Daniel pela supervisão do estágio docente.

À técnica Maria Tereza Hoffman por sempre me auxiliar na execução dos ensaios, assim como por todos os ensinamentos e companheirismo ao longo da graduação e da pós-graduação.

À Dr. Leila Jorge Patrizzi e ao Dr. André Pioltine pelas valiosas contribuições feitas no exame de qualificação.

Aos meus colegas, professores e funcionários que sempre estiveram presentes ao longo desses últimos dois anos, em diversas situações e que marcaram essa etapa da minha vida.

Ao CNPq, por meio do processo 131093/2018-5, pela bolsa de pós-graduação. A todos os contribuintes brasileiros que por meio da Universidade de São Paulo, proporcionaram minha formação.

RESUMO

MAREGA, G. M. **Influência das características das partículas floculadas e das microbolhas de ar no processo de Flotação por Ar Dissolvido**. 2020. 136p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

A flotação por ar dissolvido (FAD) é um processo de separação sólido-líquido, no qual microbolhas de ar são introduzidas em uma suspensão contendo partículas floculadas. A colisão e a ligação entre microbolhas e partículas formam um aglomerado (bolha + floco) de baixa densidade que flota até a superfície formando uma espuma flutuante que pode ser removida hidráulica ou mecanicamente. Entretanto, apesar de diversos estudos já conduzidos, algumas questões permanecem ainda obscuras. Entre elas, o processo de colisão das partículas floculadas e das microbolhas de ar. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo principal investigar a influência da distribuição do tamanho das partículas floculadas e da concentração em massa de ar dissolvido na eficiência do processo de FAD para uma água sintética que simulou uma água de abastecimento. Essa água produzida tinha cor aparente 62 ± 3 mg Pt-Co.L⁻¹, cor verdadeira de 60 ± 3 mg Pt-Co.L⁻¹, turbidez de 5 ± 1 NTU, alcalinidade $28,1 \pm 0,6$ mg CaCO₃, $0,82 \pm 0,03$ cm⁻¹ de UV_{254 nm}, condutividade igual a 64 ± 3 μS.cm⁻¹ e $1,69 \pm 0,05$ mg.L⁻¹ de carbono orgânico total. O estudo foi desenvolvido em escala laboratorial e de batelada e com uso de equipamento para aquisição e análise de imagens. Como principais resultados observados foi visto que: i) para a remoção da matéria orgânica, os tempos de floculação maiores que 12 minutos ou G_F mais elevados resultaram num efluente com melhor qualidade. Entretanto, tempo de flotação superior a oito minutos já resultou em um efluente com boa qualidade, especialmente em relação à remoção de turbidez; ii) com tempo de floculação baixo (3 minutos) já foi possível obter eficiência do processo superior a 80%, desde que o G_F e a porcentagem de recirculação pressurizada sejam elevados; iii) o aumento da recirculação pressurizada teve maior impacto nas condições com menores tempos de floculação; iv) as distribuições do tamanho de microbolhas de ar foram similares para as quatro recirculações (6, 8, 10 e 12 %); v) O aumento do tempo de floculação produziu flocos com maiores diâmetros médios de Feret; iv) Diâmetros superiores a 170 μm resultaram em maiores eficiências na FAD. Em geral, foi possível concluir que o tamanho das partículas floculadas pôde ser alterado com a alteração dos parâmetros responsáveis pela floculação e esse parâmetro foi fundamental para a eficiência da flotação por ar dissolvido.

Palavras-chave: Flotação por Ar Dissolvido, microbolhas de ar, modelos, análise de imagens, tratamento de água de abastecimento, imagens de flocos, tamanho de flocos, floculação.

ABSTRACT

MAREGA, G. M. Influence of the characteristics of flocculated particles and air microbubbles in the Dissolved Air Flotation process (DAF). 2020 136p. Dissertation (Master of Science) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

Dissolved air flotation (DAF) is a solid-liquid separation process, in which air microbubbles are introduced into a suspension containing flocculated particles. The collision and the attachment between microbubbles and particles form a low-density agglomerate (bubble + floc) that can float to the surface forming a floating foam that can be removed hydraulically or mechanically. However, despite several studies in the last three decades, some questions remain unclear. One of them is the collision phenomenon that occur between flocculated particles and air microbubbles. In this context, the present work had the main goal to investigate the influence of the size distribution of the flocculated particles and the air microbubbles volume concentration on the efficiency of DAF for a synthetic water that simulated a colored drinking water supply. This raw water had an apparent color of 62 ± 3 mg Pt-Co.L⁻¹, true color of 60 ± 3 mg Pt-Co.L⁻¹, turbidity of 5 ± 1 NTU, alkalinity $28,1 \pm 0,6$ mg CaCO₃, $0,82 \pm 0,03$ cm⁻¹ of UV_{254 nm}, conductivity equal to 64 ± 3 μS.cm⁻¹ and $1,69 \pm 0,05$ mg.L⁻¹ of total organic carbon. The study was carried out on a laboratory and batch scale, known as Flotatest, and using an equipment for image acquisition and analysis. The main results observed were: i) for the removal of organic matter, flocculation times greater than 12 minutes or higher rate for the flocculation mixing resulted in an effluent with better quality. However, flocculation time greater than eight minutes resulted in a good quality effluent, especially considering turbidity removal; ii) with low flocculation time (3 minutes) it was possible to obtain process efficiency higher than 80%, as long as the rate for the flocculation mixing and the pressurized recycle rate were high; iii) the increase in pressurized recycle rate had a significant impact on conditions with shorter flocculation times; iv) the microbubble's size distributions were similar for the all four recycle rates that were studied (6, 8, 10 and 12%); v) The increase in the flocculation time produced flocs with larger Feret's mean diameters; iv) Diameters greater than 170 μm resulted in greater efficiency for the DAF's process. In general, it was possible to conclude that the size of the flocculated particles could be altered by changing the parameters responsible for the

flocculation and this parameter was fundamental for the efficiency of the dissolved air flotation process.

Key words: Dissolved Air Flotation, air microbubbles, modelization of the contact zone, imaging analysis, drinking water treatment, flocs images, flocculation, floc's size.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| FIGURA 1 - APARATO EXPERIMENTAL EM ESCOAMENTO CONTÍNUO UTILIZADO PARA A AQUISIÇÃO DAS IMAGENS DAS MICROBOLHAS NAS DIFERENTES CONDIÇÕES INVESTIGADAS POR MORUZZI (2005). | 8 |
| FIGURA 2 – EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL USADO EM PESQUISA DE HAN, KIM T E KIM J (2007) PARA A MEDIDA DO TAMANHO DOS FLOCOS | 10 |
| FIGURA 3 - CONCEITO DA EFICIÊNCIA DO COLETOR ÚNICO REPRESENTANDO OS MECANISMOS DE COLISÃO DE TRANSPORTE DAS PARTÍCULAS COM A BOLHA (HAARDHOFF; EDZWALD, 2011 ADAPTADA)..... | 15 |
| FIGURA 4 - EQUIPAMENTO DE BANCADA (FLOTATESTES) PARA OS ENSAIOS DE FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO..... | 22 |
| FIGURA 5 – DETALHE DA COLUNA DE VIDRO COM ADAPTAÇÕES NECESSÁRIAS QUE FOI UTILIZADA PARA A AQUISIÇÃO DAS IMAGENS DAS PARTÍCULAS FLOCULADAS..... | 22 |
| FIGURA 6 - EQUIPAMENTO PARA AQUISIÇÃO DE IMAGENS A SER UTILIZADO NA PESQUISA. FONTE: PIOLTINE E REALI (2015). | 24 |
| FIGURA 7 – MONTAGEM DOS EQUIPAMENTOS NECESSÁRIOS PARA A ANÁLISE DE IMAGEM EM LABORATÓRIO E EM ESCALA DE BANCADA..... | 24 |
| FIGURA 8 – DETALHE DA AQUISIÇÃO DA ANÁLISE DE IMAGEM: COLPOSCÓPIO E COLUNA DE VIDRO COM A ADAPTAÇÃO NECESSÁRIA PARA OS EXPERIMENTOS..... | 25 |
| FIGURA 9 – DETALHE DA PÁGINA INICIAL DO SOFTWARE IMAGE-PRO PLUS 7.0.1, COM OS PARÂMETROS AJUSTADOS DE ACORDO COM O QUE FOI UTILIZADO DURANTE O ESTUDO DE CARACTERIZAÇÃO DAS PARTÍCULAS FLOCULADAS..... | 27 |
| FIGURA 10 – IMAGEM UTILIZADA PARA A CALIBRAÇÃO DO SOFTWARE, POSICIONADA NO FOCO DO EQUIPAMENTO. AUMENTO DE 14X. CADA INTERVALO PEQUENO (ENTRE LINHAS) POSSUI 20MM. | 31 |
| FIGURA 11 – EXEMPLO DE CALIBRAÇÃO UTILIZADA PARA A ANÁLISE DAS IMAGENS ADQUIRIDAS. ABA PARA INFORMAR AO SOFTWARE A MEDIDA CONHECIDA. AUMENTO DE 14X. CADA INTERVALO ENTRE LINHAS POSSUI 20MM..... | 31 |
| FIGURA 12 – EXEMPLO DE TRATAMENTO DE IMAGEM DE UMA IMAGEM DAS MICROBOLHAS DE AR (PROCESSO SIMILAR PARA AS PARTÍCULAS FLOCULADAS), ABA PARA APLICAÇÃO DO FILTRO. ... | 32 |
| FIGURA 13 – EXEMPLO DE TRATAMENTO DE IMAGEM DE UM FRAME CONTENDO MICROBOLHAS DE AR (PROCESSO SIMILAR PARA AS PARTÍCULAS FLOCULADAS), ETAPA DE BINARIZAÇÃO DA IMAGEM. | 33 |

| | |
|---|----|
| FIGURA 14 - EXEMPLO DE TRATAMENTO DE IMAGEM PARA UM FRAME CONTENDO MICROBOLHAS DE AR (PROCESSO SIMILAR PARA AS PARTÍCULAS FLOCULADAS), ABA PARA AS MEDIDAS REALIZADAS PELO SOFTWARE..... | 33 |
| FIGURA 15 – EXEMPLO DE MEDIDA DO DIÂMETRO DE FERET, SENDO D_x O DIÂMETRO MÍNIMO DE FERET E D_y O DIÂMETRO MÁXIMO. O DIÂMETRO MÉDIO DE FERET É A MÉDIA ARITMÉTICA ENTRE D_x E D_y | 34 |
| FIGURA 16 – ESQUEMA DE ENSAIOS DA ETAPA 2, COM O ESTUDO EM QUATRO DIFERENTES VELOCIDADES DE FLOTAÇÃO ($v_{FLOT} = 6, 9, 12$ E 15 M.H^{-1})..... | 37 |
| FIGURA 17 – ESQUEMA DE ENSAIOS DA ETAPA 3 COM O ESTUDO EM QUATRO DIFERENTES VELOCIDADES DE FLOTAÇÃO ($v_{FLOT} = 6, 9, 12$ E 15 M/H)..... | 38 |
| FIGURA 18 – ESQUEMA DE ENSAIOS DA ETAPA 4 COM O ESTUDO EM QUATRO DIFERENTES VELOCIDADES DE FLOTAÇÃO ($v_{FLOT} = 6, 9, 12$ E 15 M/H)..... | 39 |
| FIGURA 19 – CONDIÇÕES ANALISADAS PARA A AQUISIÇÃO DE IMAGENS EM ESCALA DE LABORATÓRIO PARA AS PARTÍCULAS FLOCULADAS. | 40 |
| FIGURA 20 – CONDIÇÕES ANALISADAS PARA A AQUISIÇÃO DE IMAGENS EM ESCALA DE LABORATÓRIO PARA AS MICROBOLHAS DE AR. | 40 |
| FIGURA 21 – DIAGRAMA DE COAGULAÇÃO PARA A EFICIÊNCIA (%) DE REMOÇÃO DA COR APARENTE COM $v_{FLOT} = 20 \text{ CM.MIN}^{-1}$. INTERIOR DA REGIÃO DELIMITADA CORRESPONDE À EFICIÊNCIA SUPERIOR À 90% ($G_{MR} = 900 \text{ S}^{-1}$; $T_{MR} = 20$ SEGUNDOS; $G_F = 90 \text{ S}^{-1}$; $T_F = 15$ MINUTOS; $P_{SAT} = 5 \text{ BAR}$; $\theta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; $R = 8\%$)..... | 41 |
| FIGURA 22 – DIAGRAMA DE COAGULAÇÃO PARA A EFICIÊNCIA (%) DE REMOÇÃO DE $UV_{254 \text{ NM}}$ COM $v_{FLOT} = 20 \text{ CM.MIN}^{-1}$. INTERIOR DA REGIÃO DELIMITADA CORRESPONDE À EFICIÊNCIA SUPERIOR À 90% ($G_{MR} = 900 \text{ S}^{-1}$; $T_{MR} = 20$ SEGUNDOS; $G_F = 90 \text{ S}^{-1}$; $T_F = 15$ MINUTOS; $P_{SAT} = 5 \text{ BAR}$; $\theta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; $R = 8\%$). | 42 |
| FIGURA 23 – DIAGRAMA DE COAGULAÇÃO PARA A EFICIÊNCIA (%) DE REMOÇÃO DE TURBIDEZ COM $v_{FLOT} = 20 \text{ CM.MIN}^{-1}$. INTERIOR DA REGIÃO DELIMITADA CORRESPONDE À EFICIÊNCIA SUPERIOR À 90% ($G_{MR} = 900 \text{ S}^{-1}$; $T_{MR} = 20$ SEGUNDOS; $G_F = 90 \text{ S}^{-1}$; $T_F = 15$ MINUTOS; $P_{SAT} = 5 \text{ BAR}$; $\theta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; $R = 8\%$). | 42 |
| FIGURA 24 – DIAGRAMA DE COAGULAÇÃO PARA A EFICIÊNCIA (%) DE REMOÇÃO DA COR APARENTE COM $v_{FLOT} = 15 \text{ CM.MIN}^{-1}$. INTERIOR DA REGIÃO DELIMITADA CORRESPONDE À EFICIÊNCIA SUPERIOR À 90% ($G_{MR} = 900 \text{ S}^{-1}$; $T_{MR} = 20$ SEGUNDOS; $G_F = 90 \text{ S}^{-1}$; $T_F = 15$ MINUTOS; $P_{SAT} = 5 \text{ BAR}$; $\theta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; $R = 8\%$)..... | 43 |
| FIGURA 25 – DIAGRAMA DE COAGULAÇÃO PARA A EFICIÊNCIA (%) DE REMOÇÃO DE $UV_{254 \text{ NM}}$ COM $v_{FLOT} = 15 \text{ CM.MIN}^{-1}$. INTERIOR DA REGIÃO DELIMITADA CORRESPONDE À EFICIÊNCIA SUPERIOR À 90% ($G_{MR} = 900 \text{ S}^{-1}$; $T_{MR} = 20$ SEGUNDOS; $G_F = 90 \text{ S}^{-1}$; $T_F = 15$ MINUTOS; $P_{SAT} = 5 \text{ BAR}$; $\theta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; $R = 8\%$). | 43 |

| | |
|--|----|
| FIGURA 26 – DIAGRAMA DE COAGULAÇÃO PARA A EFICIÊNCIA (%) DE REMOÇÃO DE TURBIDEZ COM $V_{FLOT} = 15 \text{ CM.MIN}^{-1}$. INTERIOR DA REGIÃO DELIMITADA CORRESPONDE À EFICIÊNCIA SUPERIOR À 90% ($G_{MR} = 900 \text{ S}^{-1}$; $T_{MR} = 20 \text{ SEGUNDOS}$; $G_F = 90 \text{ S}^{-1}$; $T_F = 15 \text{ MINUTOS}$; $P_{SAT} = 5 \text{ BAR}$; $\theta = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $R = 8\%$)..... | 44 |
| FIGURA 27 – EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DA COR APARENTE (%) PARA A VARIAÇÃO DO G_{MR} E T_{MR} | 45 |
| FIGURA 28 – EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DA ABSORBÂNCIA EM 254 NM (%) PARA A VARIAÇÃO DO G_{MR} E T_{MR} . (DSA = 40 MG.L ⁻¹ ; $\text{pH}_{COAG.} = 6,40$; $G_F = 90 \text{ S}^{-1}$; $T_F = 15 \text{ MINUTOS}$; $P_{SAT} = 5 \text{ BAR}$; $\theta = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $R = 8\%$). | 46 |
| FIGURA 29 – EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DA TURBIDEZ (%) PARA A VARIAÇÃO DO G_{MR} E T_{MR} | 46 |
| FIGURA 30 – FRAÇÃO RESIDUAL DA COR APARENTE PARA A VARIAÇÃO DO G_F E T_F COM BARRAS DO DESVIO PADRÃO PARA CADA VELOCIDADE DE FLOTAÇÃO ESTUDADA, $V_{FLOT} = 25, 20, 15 \text{ E } 10 \text{ CM.MIN}^{-1}$ (DSA = 40 MG.L ⁻¹ ; $\text{pH}_{COAG.} = 6,40$; $G_{MR} = 900 \text{ S}^{-1}$; $T_{MR} = 20 \text{ SEGUNDOS}$; $P_{SAT} = 5 \text{ BAR}$; $\theta = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $R = 8\%$). | 49 |
| FIGURA 31 – FRAÇÃO RESIDUAL DA $UV_{254 \text{ NM}}$ PARA A VARIAÇÃO DO G_F E T_F COM BARRAS DO DESVIO PADRÃO PARA CADA VELOCIDADE DE FLOTAÇÃO ESTUDADA, $V_{FLOT} = 25, 20, 15 \text{ E } 10 \text{ CM.MIN}^{-1}$ (DSA = 40 MG.L ⁻¹ ; $\text{pH}_{COAG.} = 6,40$; $G_{MR} = 900 \text{ S}^{-1}$; $T_{MR} = 20 \text{ SEGUNDOS}$; $P_{SAT} = 5 \text{ BAR}$; $\theta = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $R = 8\%$). | 49 |
| FIGURA 32 – FRAÇÃO RESIDUAL DE TURBIDEZ PARA A VARIAÇÃO DO G_F E T_F COM BARRAS DO DESVIO PADRÃO PARA CADA VELOCIDADE DE FLOTAÇÃO ESTUDADA, $V_{FLOT} = 25, 20, 15 \text{ E } 10 \text{ CM.MIN}^{-1}$ (DSA = 40 MG.L ⁻¹ ; $\text{pH}_{COAG.} = 6,40$; $G_{MR} = 900 \text{ S}^{-1}$; $T_{MR} = 20 \text{ SEGUNDOS}$; $P_{SAT} = 5 \text{ BAR}$; $\theta = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $R = 8\%$). | 50 |
| FIGURA 33 – FRAÇÃO RESIDUAL DE COR APARENTE PARA A VELOCIDADE DE 25 CM.MIN ⁻¹ , COM VARIAÇÕES NO GRADIENTE MÉDIO DE VELOCIDADE NA FLOCULAÇÃO (G_F), TEMPO DE FLOCULAÇÃO (T_F) E A RECIRCULAÇÃO PRESSURIZADA (DSA = 40 MG.L ⁻¹ ; $\text{pH}_{COAG.} = 6,40$; $G_{MR} = 900 \text{ S}^{-1}$; $T_{MR} = 20 \text{ SEGUNDOS}$; $P_{SAT} = 5 \text{ BAR}$; $\theta = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$)..... | 54 |
| FIGURA 34 - FRAÇÃO RESIDUAL DE $UV_{254 \text{ NM}}$ PARA A VELOCIDADE DE 25 CM.MIN ⁻¹ , COM VARIAÇÕES NO GRADIENTE MÉDIO DE VELOCIDADE NA FLOCULAÇÃO (G_F), TEMPO DE FLOCULAÇÃO (T_F) E A RECIRCULAÇÃO PRESSURIZADA (DSA = 40 MG.L ⁻¹ ; $\text{pH}_{COAG.} = 6,40$; $G_{MR} = 900 \text{ S}^{-1}$; $T_{MR} = 20 \text{ SEGUNDOS}$; $P_{SAT} = 5 \text{ BAR}$; $\theta = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$)..... | 54 |
| FIGURA 35 - FRAÇÃO RESIDUAL DE TURBIDEZ PARA A VELOCIDADE DE 25 CM.MIN ⁻¹ , COM VARIAÇÕES NO GRADIENTE MÉDIO DE VELOCIDADE NA FLOCULAÇÃO (G_F), TEMPO DE FLOCULAÇÃO (T_F) E A RECIRCULAÇÃO PRESSURIZADA (DSA = 40 MG.L ⁻¹ ; $\text{pH}_{COAG.} = 6,40$; $G_{MR} = 900 \text{ S}^{-1}$; $T_{MR} = 20 \text{ SEGUNDOS}$; $P_{SAT} = 5 \text{ BAR}$; $\theta = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$)..... | 54 |
| FIGURA 36 – FRAÇÃO RESIDUAL DE COR APARENTE PARA A VELOCIDADE DE 20 CM.MIN ⁻¹ , COM VARIAÇÕES NO GRADIENTE MÉDIO DE VELOCIDADE NA FLOCULAÇÃO (G_F), TEMPO DE FLOCULAÇÃO (T_F) E A RECIRCULAÇÃO PRESSURIZADA (DSA = 40 MG.L ⁻¹ ; $\text{pH}_{COAG.} = 6,40$; $G_{MR} = 900 \text{ S}^{-1}$; $T_{MR} = 20 \text{ SEGUNDOS}$; $P_{SAT} = 5 \text{ BAR}$; $\theta = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$)..... | 57 |

| | |
|---|----|
| FIGURA 37 - FRAÇÃO RESIDUAL DE $UV_{254\text{NM}}$ PARA A VELOCIDADE DE 20 CM.MIN^{-1} COM VARIAÇÕES NO GRADIENTE MÉDIO DE VELOCIDADE NA FLOCULAÇÃO (G_F), TEMPO DE FLOCULAÇÃO (T_F) E A RECIRCULAÇÃO PRESSURIZADA ($DSA = 40\text{ MG.L}^{-1}$; $\text{pH}_{\text{COAG.}} = 6,40$; $G_{\text{MR}} = 900\text{ S}^{-1}$; $T_{\text{MR}} = 20$ SEGUNDOS; $P_{\text{SAT}} = 5\text{ BAR}$; $\theta = 20\text{ }^\circ\text{C}$). | 57 |
| FIGURA 38 - FRAÇÃO RESIDUAL DE TURBIDEZ PARA A VELOCIDADE DE 20 CM.MIN^{-1} , COM VARIAÇÕES NO GRADIENTE MÉDIO DE VELOCIDADE NA FLOCULAÇÃO (G_F), TEMPO DE FLOCULAÇÃO (T_F) E A RECIRCULAÇÃO PRESSURIZADA ($DSA = 40\text{ MG.L}^{-1}$; $\text{pH}_{\text{COAG.}} = 6,40$; $G_{\text{MR}} = 900\text{ S}^{-1}$; $T_{\text{MR}} = 20$ SEGUNDOS; $P_{\text{SAT}} = 5\text{ BAR}$; $\theta = 20\text{ }^\circ\text{C}$). | 58 |
| FIGURA 39 - FRAÇÃO RESIDUAL DE COR APARENTE PARA A VELOCIDADE DE 15 CM.MIN^{-1} , COM VARIAÇÕES NO GRADIENTE MÉDIO DE VELOCIDADE NA FLOCULAÇÃO (G_F), TEMPO DE FLOCULAÇÃO E A RECIRCULAÇÃO PRESSURIZADA ($DSA = 40\text{ MG.L}^{-1}$; $\text{pH}_{\text{COAG.}} = 6,40$; $G_{\text{MR}} = 900\text{ S}^{-1}$; $T_{\text{MR}} = 20$ SEGUNDOS; $P_{\text{SAT}} = 5\text{ BAR}$; $\theta = 20\text{ }^\circ\text{C}$). | 60 |
| FIGURA 40 - FRAÇÃO RESIDUAL DE $UV_{254\text{NM}}$ PARA A VELOCIDADE DE 15 CM.MIN^{-1} , COM VARIAÇÕES NO GRADIENTE MÉDIO DE VELOCIDADE NA FLOCULAÇÃO (G_F), TEMPO DE FLOCULAÇÃO E A RECIRCULAÇÃO PRESSURIZADA ($DSA = 40\text{ MG.L}^{-1}$; $\text{pH}_{\text{COAG.}} = 6,40$; $G_{\text{MR}} = 900\text{ S}^{-1}$; $T_{\text{MR}} = 20$ SEGUNDOS; $P_{\text{SAT}} = 5\text{ BAR}$; $\theta = 20\text{ }^\circ\text{C}$). | 60 |
| FIGURA 41 - FRAÇÃO RESIDUAL DE TURBIDEZ PARA A VELOCIDADE DE 15 CM.MIN^{-1} , COM VARIAÇÕES NO GRADIENTE MÉDIO DE VELOCIDADE NA FLOCULAÇÃO (G_F), TEMPO DE FLOCULAÇÃO E A RECIRCULAÇÃO PRESSURIZADA ($DSA = 40\text{ MG.L}^{-1}$; $\text{pH}_{\text{COAG.}} = 6,40$; $G_{\text{MR}} = 900\text{ S}^{-1}$; $T_{\text{MR}} = 20$ SEGUNDOS; $P_{\text{SAT}} = 5\text{ BAR}$; $\theta = 20\text{ }^\circ\text{C}$). | 60 |
| FIGURA 42 - FRAÇÃO RESIDUAL DE COR APARENTE PARA A VELOCIDADE DE 10 CM.MIN^{-1} , COM VARIAÇÕES NO GRADIENTE MÉDIO DE VELOCIDADE NA FLOCULAÇÃO (G_F), TEMPO DE FLOCULAÇÃO E A RECIRCULAÇÃO PRESSURIZADA ($DSA = 40\text{ MG.L}^{-1}$; $\text{pH}_{\text{COAG.}} = 6,40$; $G_{\text{MR}} = 900\text{ S}^{-1}$; $T_{\text{MR}} = 20$ SEGUNDOS; $P_{\text{SAT}} = 5\text{ BAR}$; $\theta = 20\text{ }^\circ\text{C}$). | 62 |
| FIGURA 43 - FRAÇÃO RESIDUAL DE $UV_{254\text{NM}}$ PARA A VELOCIDADE DE 10 CM.MIN^{-1} , COM VARIAÇÕES NO GRADIENTE MÉDIO DE VELOCIDADE NA FLOCULAÇÃO (G_F), TEMPO DE FLOCULAÇÃO E A RECIRCULAÇÃO PRESSURIZADA ($DSA = 40\text{ MG.L}^{-1}$; $\text{pH}_{\text{COAG.}} = 6,40$; $G_{\text{MR}} = 900\text{ S}^{-1}$; $T_{\text{MR}} = 20$ SEGUNDOS; $P_{\text{SAT}} = 5\text{ BAR}$; $\theta = 20\text{ }^\circ\text{C}$). | 62 |
| FIGURA 44 - FRAÇÃO RESIDUAL DE TURBIDEZ PARA A VELOCIDADE DE 10 CM.MIN^{-1} , COM VARIAÇÕES NO GRADIENTE MÉDIO DE VELOCIDADE NA FLOCULAÇÃO (G_F), TEMPO DE FLOCULAÇÃO E A RECIRCULAÇÃO PRESSURIZADA ($DSA = 40\text{ MG.L}^{-1}$; $\text{pH}_{\text{COAG.}} = 6,40$; $G_{\text{MR}} = 900\text{ S}^{-1}$; $T_{\text{MR}} = 20$ SEGUNDOS; $P_{\text{SAT}} = 5\text{ BAR}$; $\theta = 20\text{ }^\circ\text{C}$). | 62 |
| FIGURA 45 – DISTRIBUIÇÃO DO DIÂMETRO MÉDIO DE FERET DAS PARTÍCULAS FLOCULADAS PARA $G_F = 60\text{ S}^{-1}$ EM RELAÇÃO AO TEMPO DE FLOCULAÇÃO. | 64 |
| FIGURA 46 – DISTRIBUIÇÃO DO DIÂMETRO MÉDIO DE FERET DAS PARTÍCULAS FLOCULADAS PARA $G_F = 90\text{ S}^{-1}$ EM RELAÇÃO AO TEMPO DE FLOCULAÇÃO. | 65 |

| | |
|---|----|
| FIGURA 47 – DISTRIBUIÇÃO DO DIÂMETRO MÉDIO DE FERET DAS PARTÍCULAS FLOCULADAS PARA $G_F = 130 \text{ s}^{-1}$ EM RELAÇÃO AO TEMPO DE FLOCULAÇÃO | 65 |
| FIGURA 48 – DIÂMETRO MÉDIO DE FERET DAS PARTÍCULAS FLOCULADAS EM FUNÇÃO DO T_F E DO G_F A. DIÂMETRO MÉDIO INCLUINDO OS VALORES LIMITES NUM INTERVALO DE CONFIANÇA DE 95%. B. CURVA REFERENTE AOS DIÂMETROS MÉDIOS DE FERET. | 67 |
| FIGURA 49 – TENDÊNCIA DE CRESCIMENTO DO DIÂMETRO MÉDIO DE FERET DAS PARTÍCULAS FLOCULADAS EM FUNÇÃO DO TEMPO DE FLOCULAÇÃO (PARA $T_F \geq 8$ MINUTOS) E DO GRADIENTE MÉDIO DE VELOCIDADE NA FLOCULAÇÃO. | 68 |
| FIGURA 50 – EXTRAPOLAÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS PARA UM GRÁFICO DE SUPERFÍCIE DO DIÂMETRO MÉDIO DE FERET DAS PARTÍCULAS FLOCULADAS EM FUNÇÃO DO TEMPO E DO GRADIENTE MÉDIO DE VELOCIDADE NA FLOCULAÇÃO..... | 69 |
| FIGURA 51 - DISTRIBUIÇÃO DO DIÂMETRO MÉDIO DAS MICROBOLHAS DE AR PARA AS QUATRO DIFERENTES RECIRCULAÇÕES PRESSURIZADAS ESTUDADAS – 6, 8, 10 E 12% QUE CORRESPONDEM A $C_B = 6,84; 8,96; 10,99$ E $12,96 \text{ MG.L}^{-1}$ RESPECTIVAMENTE ($P_{SAT} = 5 \text{ BAR}; \theta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$). | 70 |
| FIGURA 52 - DISTRIBUIÇÃO DOS DIÂMETRO MÉDIO DAS MICROBOLHAS DE AR EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA AS QUATRO DIFERENTES RECIRCULAÇÕES PRESSURIZADAS ESTUDADAS – 6, 8, 10 E 12% QUE CORRESPONDEM A $C_B = 6,84; 8,96; 10,99$ E $12,96 \text{ MG.L}^{-1}$ RESPECTIVAMENTE ($P_{SAT} = 5 \text{ BAR}; \theta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$). | 71 |
| FIGURA 53 - DISTRIBUIÇÃO DO DIÂMETRO MÉDIO DAS MICROBOLHAS DE AR PARA QUATRO DIFERENTES RECIRCULAÇÕES PRESSURIZADAS – 6, 8, 10 E 12% QUE CORRESPONDEM A $C_B = 6,84; 8,96; 10,99$ E $12,96 \text{ MG.L}^{-1}$ RESPECTIVAMENTE ($P_{SAT} = 5 \text{ BAR}; \theta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$). | 72 |
| FIGURA 54 – FRAÇÃO RESIDUAL DE COR APARENTE, COM VARIAÇÕES DE G_F E T_F , COM O VALOR DE DIÂMETRO MÉDIO DE FERET ASSOCIADO PARA CADA CONDIÇÃO, E PARA CADA RECIRCULAÇÃO PRESSURIZADA (A) $V_{FLOT} = 25 \text{ CM.MIN}^{-1}$; (B) $V_{FLOT} = 20 \text{ CM.MIN}^{-1}$; (C) $V_{FLOT} = 15 \text{ CM.MIN}^{-1}$; (D) $V_{FLOT} = 10 \text{ CM.MIN}^{-1}$; ($DSA = 40 \text{ MG.L}^{-1}$; $\text{pH}_{COAG} = 6,40$; $G_{MR} = 900 \text{ s}^{-1}$; $T_{MR} = 20 \text{ SEGUNDOS}$; $P_{SAT} = 5 \text{ BAR}; \theta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$)..... | 75 |
| FIGURA 55 –FRAÇÃO RESIDUAL DE $UV_{254 \text{ NM}}$ COM VARIAÇÕES DE G_F E T_F , COM O VALOR DE DIÂMETRO MÉDIO DE FERET ASSOCIADO PARA CADA CONDIÇÃO, E PARA CADA RECIRCULAÇÃO PRESSURIZADA PARA (A) $V_{FLOT} = 25 \text{ CM.MIN}^{-1}$; (B) $V_{FLOT} = 20 \text{ CM.MIN}^{-1}$; (C) $V_{FLOT} = 15 \text{ CM.MIN}^{-1}$; (D) $V_{FLOT} = 10 \text{ CM.MIN}^{-1}$; ($DSA = 40 \text{ MG.L}^{-1}$; $\text{pH}_{COAG} = 6,40$; $G_{MR} = 900 \text{ s}^{-1}$; $T_{MR} = 20 \text{ SEGUNDOS}$; $P_{SAT} = 5 \text{ BAR}; \theta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$)..... | 76 |
| FIGURA 56 – FRAÇÃO RESIDUAL DE TURBIDEZ, COM VARIAÇÕES DE G_F E T_F , COM O VALOR DE DIÂMETRO MÉDIO DE FERET ASSOCIADO PARA CADA CONDIÇÃO, E PARA CADA RECIRCULAÇÃO PRESSURIZADA PARA (A) $V_{FLOT} = 25 \text{ CM.MIN}^{-1}$; (B) $V_{FLOT} = 20 \text{ CM.MIN}^{-1}$; (C) $V_{FLOT} = 15 \text{ CM.MIN}^{-1}$; (D) $V_{FLOT} = 10 \text{ CM.MIN}^{-1}$; ($DSA = 40 \text{ MG.L}^{-1}$; $\text{pH}_{COAG} = 6,40$; $G_{MR} = 900 \text{ s}^{-1}$; $T_{MR} = 20 \text{ SEGUNDOS}$; $P_{SAT} = 5 \text{ BAR}; \theta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$)..... | 77 |

| | |
|---|----|
| FIGURA 57 – EFICIÊNCIA TOTAL DE UM ÚNICO COLETOR EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO MÉDIO DE FERET DAS PARTÍCULAS FLOCULADAS ($DSA = 40 \text{ MG.L}^{-1}$, $\text{PH} = 6,4$, $G_{\text{MR}} = 900 \text{ S}^{-1}$; $T_{\text{MR}} = 20 \text{ SEGUNDOS}$). | 83 |
| FIGURA 58 – RELAÇÃO LINEAR ENTRE A ABSORBÂNCIA MEDIDA NO COMPRIMENTO DE ONDA 495 NM E O COLORÍMETRO DE DISCOS (COLORÍMETRO ORBECO, HELLIGE, 711) PARA OITO DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE ÁCIDO HÚMICO..... | 93 |
| FIGURA 59 – RELAÇÃO LINEAR ENTRE A ABSORBÂNCIA MEDIDA NO COMPRIMENTO DE ONDA 254 NM E O COLORÍMETRO DE DISCOS (COLORÍMETRO ORBECO, HELLIGE, 711) PARA OITO DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE ÁCIDO HÚMICO..... | 93 |
| FIGURA 60 – RELAÇÃO LINEAR ENTRE A ABSORBÂNCIA MEDIDA NO COMPRIMENTO DE ONDA 254 NM E O CARBÔNICO ORGÂNICO TOTAL PARA OITO DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE ÁCIDO HÚMICO | 94 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| TABELA 1 – CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA BRUTA DE ESTUDO..... | 21 |
| TABELA 2 – PARÂMETROS ANALISADOS E OS RESPECTIVOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA AS ANÁLISES. | 23 |
| TABELA 3 – PARÂMETROS UTILIZADOS PARA A AQUISIÇÃO DAS IMAGENS DAS PARTÍCULAS FLOCULADAS..... | 27 |
| TABELA 4 – PARÂMETROS UTILIZADOS PARA A AQUISIÇÃO DAS IMAGENS DAS MICROBOLHAS DE AR..... | 29 |
| TABELA 5 - ESQUEMA DE ENSAIOS PREVISTOS NA ETAPA 1 (DIAGRAMA DE COAGULAÇÃO) COM O ESTUDO EM DUAS DIFERENTES VELOCIDADES DE FLOTAÇÃO ($V_{FLOT} = 9$ E 12 M.H^{-1})..... | 35 |
| TABELA 6 – RELAÇÃO ENTRE CADA CONDIÇÃO DE FLOCULAÇÃO (GRADIENTE MÉDIO DE VELOCIDADE E TEMPO MÉDIO DE FLOCULAÇÃO) E O DIÂMETRO MÉDIO DE FERET DA CONDIÇÃO)..... | 73 |
| TABELA 7 – PARÂMETROS NECESSÁRIOS E OS RESPECTIVOS VALORES PARA O CÁLCULO DA EFICIÊNCIA DE UM ÚNICO COLETOR..... | 82 |
| TABELA 8 – PARÂMETROS NECESSÁRIOS E RESPECTIVOS VALORES PARA O CÁLCULO DA EFICIÊNCIA NA ZONA DE CONTATO..... | 83 |
| TABELA 9 – VALORES CORRESPONDENTES AO INTERVALO DE TEMPO ENTRE A INTRODUÇÃO DO VOLUME DE RECIRCULAÇÃO PRESSURIZADA E A EXTRAÇÃO DA AMOSTRA DA COLUNA DE FLOTAÇÃO DO FLOTATESTE, INTERVALO DE TEMPO ESSE QUE FOI UTILIZADO COMO APROXIMAÇÃO PARA REPRESENTAR O TEMPO DE DETENÇÃO NA ZONA DE CONTATO PREVISTO NO MODELO ADOTADO. O PONTO DE COLETA NO FLOTATESTE É LOCALIZADO 30 CM DO PONTO EM QUE É INTRODUIDO O VOLUME DE ÁGUA DE RECIRCULAÇÃO PRESSURIZADA | 84 |
| TABELA 10 – RELAÇÃO ENTRE RECIRCULAÇÃO PRESSURIZADA, CONCENTRAÇÃO EM MASSA DE AR DISSOLVIDO E CONCENTRAÇÃO EM VOLUME DAS MICROBOLHAS..... | 85 |
| TABELA 11 – RESULTADOS DE TODOS OS CASOS ANALISADOS QUE FORNECERAM P-VALOR ≥ 0.05 PARA OS RESULTADOS DA ETAPA 3. | 96 |
| TABELA 12 – RESULTADOS DE TODOS OS CASOS ANALISADOS QUE FORNECERAM VALOR-P ≥ 0.05 PARA OS RESULTADOS DA ETAPA 4..... | 99 |
| TABELA 13 - RELAÇÃO ENTRE CADA CONDIÇÃO DE FLOCULAÇÃO (GRADIENTE MÉDIO DE VELOCIDADE E TEMPO DE FLOCULAÇÃO), O DIÂMETRO MÉDIO DE FERET DA CONDIÇÃO E O VALOR-P FORNECIDO PELO TESTE DE NORMALIDADE DE <i>SHAPIRO-WILK</i> | 104 |

| | |
|---|-----|
| TABELA 14 - RELAÇÃO ENTRE CADA CONDIÇÃO DE RECIRCULAÇÃO PRESSURIZADA, O DIÂMETRO MÉDIO DAS MICROBOLHAS E O VALOR-P FORNECIDO PELO TESTE DE NORMALIDADE DE SHAPIRO-WILK | 105 |
| TABELA 15 – EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DA COR APARENTE PARA $v_{FLOT} = 25$ E 20 CM.MIN^{-1} E PARA CONDIÇÃO DE FLOCULAÇÃO (G_F , T_F E DIÂMETRO MÉDIO DE FERET)..... | 106 |
| TABELA 16 – EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DA COR APARENTE PARA $v_{FLOT} = 15$ E 10 CM.MIN^{-1} E PARA CONDIÇÃO DE FLOCULAÇÃO (G_F , T_F E DIÂMETRO MÉDIO DE FERET)..... | 107 |
| TABELA 17 – EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DA UV_{254NM} PARA $v_{FLOT} = 25$ E 20 CM.MIN^{-1} E PARA CONDIÇÃO DE FLOCULAÇÃO (G_F , T_F E DIÂMETRO MÉDIO DE FERET)..... | 108 |
| TABELA 18 – EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DA UV_{254NM} PARA $v_{FLOT} = 15$ E 10 CM.MIN^{-1} E PARA CONDIÇÃO DE FLOCULAÇÃO (G_F , T_F E DIÂMETRO MÉDIO DE FERET)..... | 109 |
| TABELA 19 – EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DA TURBIDEZ PARA $v_{FLOT} = 25$ E 20 CM.MIN^{-1} E PARA CONDIÇÃO DE FLOCULAÇÃO (G_F , T_F E DIÂMETRO MÉDIO DE FERET)..... | 110 |
| TABELA 20 – EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DA TURBIDEZ PARA $v_{FLOT} = 15$ E 10 CM.MIN^{-1} E PARA CONDIÇÃO DE FLOCULAÇÃO (G_F , T_F E DIÂMETRO MÉDIO DE FERET)..... | 111 |

LISTA DE ABREVIACOES E SÍMBOLOS

| | |
|----------------------|---|
| C | Cor aparente residual |
| C_o | Cor aparente referente à água bruta |
| C_b | Concentrao em massa de ar dissolvido |
| d_p | Diâmetro médio da partícula ou do floco |
| d_b | Diâmetro da microbolha de ar |
| DSA | Dosagem de sulfato de alumínio |
| FAD | Flotao por Ar Dissolvido |
| G_F | Gradiente médio de velocidade na Floculao |
| G_{MR} | Gradiente médio de velocidade na Mistura Rápida |
| Min | Minutos |
| MON | Matéria Orgânica Natural |
| P_{SAT} | Pressão de saturao |
| $pH_{coag.}$ | pH de coagulao |
| R | Recirculao pressurizada |
| T | Turbidez residual |
| T_o | Turbidez referente da água bruta |
| t_{cz} | Tempo médio de deteno na zona de contato |
| T_F | Tempo médio de Floculao |
| T_{MR} | Tempo média de Mistura Rápida |
| $UV_{254\text{ nm}}$ | Absorbância medida no comprimento de onda de 254 nm |
| v_b | Velocidade ascensional das microbolhas de ar |
| V_{FLOT} | Velocidade média de flotao |
| Φ | Diâmetro do objeto |
| $\Phi_{máx}$ | Diâmetro do objeto máximo observado |
| $\Phi_{médio}$ | Diâmetro médio do objeto |
| ρ_b | Densidade das microbolhas de ar |
| ρ_p | Densidade das partículas ou das microbolhas de ar |
| θ | Temperatura da gua |
| %R | Porcentagem da Recirculao Pressurizada |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1. <i>Estrutura da Dissertação</i> | 2 |
| 2. OBJETIVOS | 4 |
| 2.1. <i>Objetivo principal</i> | 4 |
| 2.2. <i>Objetivos específicos</i> | 4 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 5 |
| 3.1. <i>Flotação por Ar Dissolvido (FAD)</i> | 5 |
| 3.2. <i>Características gerais das partículas floculadas e microbolhas</i> | 6 |
| 3.2.1. <i>Partículas floculadas</i> | 6 |
| 3.2.2. <i>Microbolhas de ar</i> | 7 |
| 3.3. <i>Análise de Imagem</i> | 8 |
| 3.4. <i>Modelização Matemática</i> | 12 |
| 3.4.1. <i>White-Water Blanket Model</i> | 13 |
| 4. MATERIAL E MÉTODOS | 20 |
| 4.1. <i>Considerações gerais</i> | 20 |
| 4.2. <i>Água de estudo</i> | 20 |
| 4.3. <i>Instalações e equipamentos</i> | 21 |
| 4.3.1. <i>Flotateste</i> | 21 |
| 4.3.2. <i>Equipamento de monitoramento dos ensaios</i> | 22 |
| 4.4. <i>Aquisição e Análise de Imagem</i> | 23 |
| 4.4.1. <i>Aquisição das Imagem</i> | 25 |
| 4.4.2. <i>Análise das Imagens</i> | 29 |
| 4.5. <i>Planejamento experimental</i> | 35 |
| 4.5.1. <i>Etapa 1 – Adequação das condições de coagulação</i> | 35 |
| 4.5.2. <i>Etapa 2 – Otimização das condições de Mistura Rápida</i> | 36 |

| | |
|--|------------|
| 4.5.3. Etapa 3 – Estudo das condições de Flocculação | 37 |
| 4.5.4. Etapa 4 - Estudo do impacto da concentração em massa de ar dissolvido em diferentes condições de flocculação | 38 |
| 4.5.5. Etapa 5..... | 39 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 41 |
| 5.1. Etapa 1 – Adequação das condições de coagulação..... | 41 |
| 5.2. Etapa 2 – Otimização das condições de Mistura Rápida..... | 45 |
| 5.3. Etapa 3 – Estudo das condições de Flocculação..... | 48 |
| 5.4. Etapa 4 – Estudo da Concentração em massa de ar dissolvido em diferentes condições de flocculação..... | 53 |
| 5.5. Etapa 5 – Análise da distribuição do diâmetro das partículas flocculadas e das microbolhas de ar..... | 64 |
| 5.5.1. Diâmetro das partículas flocculadas..... | 64 |
| 5.5.2. Diâmetro das microbolhas de ar | 69 |
| 5.6. Relação entre a eficiência do processo FAD e o diâmetro das partículas flocculadas..... | 73 |
| 5.7. Modelo White Water Blanket..... | 81 |
| 6. Conclusões | 87 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 89 |
| Apêndice A – Relação entre Cor Aparente, Carbono Orgânico Total e Absorbância em 254 e 495 nm | 92 |
| Apêndice B – Resultados estatísticos da etapa 3 | 95 |
| Apêndice C – Resultados estatísticos da etapa 4 | 99 |
| Apêndice D – Resultados estatísticos da etapa 5 | 103 |
| Apêndice E – Relação entre cada condição de flocculação estudada (G_F, T_F e Diâmetro médio de Feret) para cada v_{FLOT} e cada parâmetro de qualidade | 106 |

1. INTRODUÇÃO

A flotação por ar dissolvido (FAD) como técnica de alta eficiência para clarificação de águas para abastecimento consolidou-se nas últimas décadas. Como consequência verifica-se um número expressivo de estações de tratamento de grande porte já implantadas ou em construção em todo o mundo. No início da década passada já existiam várias unidades FAD espalhadas pelo globo, com cerca de noventa unidades no Reino Unido, trinta e sete na Finlândia, vinte e seis na Austrália, vinte e seis na África do Sul, vinte nos Estados Unidos, cinco na Suécia, quinze na Noruega, seis no Canadá, sete na França, cinco na Holanda, três na Bélgica e uma na Nova Zelândia (SCHOFIELD, 2001; EDZWALD, 2010). No Brasil, várias estações de tratamento de água de porte já foram construídas e se encontram em operação, dentre as quais podem ser citadas: ETA Vargem das Flores (Betim-MG), ETA Carapina (Vitória-ES), ETA Iraí (Curitiba-PR), ETA de Manaus- AM, ETA de Caraguatatuba-SP, ETA de Jaú-SP, além de várias outras de menor porte ou em construção.

Essa demanda por FAD ocorre já que a flotação por ar dissolvido constitui uma alternativa eficaz para o tratamento de águas para abastecimento, sendo aplicada como uma das etapas de pré-clarificação de determinados tipos de águas como, por exemplo, águas com altas concentrações de algas ou substâncias húmicas (REALI, 1991; EDZWALD, 2011).

Devido a esse maior uso da FAD como técnica de clarificação de água, várias pesquisas foram desenvolvidas nas últimas décadas. Segundo Edzwald (2010), os desenvolvimentos foram mais acentuados nas últimas três décadas. Segundo esse autor, alguns avanços merecem destaques, como o aumento das taxas de aplicação superficial (de 5 para 30 $\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$) e o decréscimo dos tempos de floculação (de 20-30 para 10 minutos). Desde 2015, a maior ETA utilizando o processo de FAD (Croton Water Filtration Plant, localizada na cidade Nova York, EUA), com capacidade de tratamento de 1,2 milhões $\text{m}^3\cdot\text{dia}^{-1}$, possui tempo de floculação de aproximadamente 5 minutos.

Entretanto, apesar de todos os estudos já conduzidos, algumas questões são ainda obscuras. Entre elas, o processo de colisão das partículas floculadas e das microbolhas de ar que ocorre na zona de contato de um reator. Neste contexto, alguns modelos matemáticos foram propostos

buscando caracterizar o processo da Flotação por Ar Dissolvido com o intuito de possibilitar uma melhor compreensão dos parâmetros envolvidos e otimizar cada vez mais o processo. Pode-se citar os mais importantes: EDZWALD, 1991; REALI, 1991; EDZWALD, 1995; FUKUSHI; TAMBO, 1998; LEPPINEN, 1999; HAARHOOF; EDZWALD, 2004.

O presente trabalho buscou investigar parâmetros relacionados à colisão entre as partículas floculadas e as microbolhas de ar com o emprego de método e equipamento para a aquisição e análise de imagens. Mais especificamente, buscou a análise da distribuição do tamanho das partículas floculadas e das microbolhas de ar e seu impacto na eficiência geral do processo de Flotação por Ar Dissolvido. Finalmente, os resultados experimentais foram inseridos, em caráter investigativo, nas equações propostas do modelo “White Water Blanket” (HAARHOOF; EDZWALD, 2004), com o objetivo de visualizar como os dados experimentais reagiriam neste modelo matemático que caracteriza a zona de contato da FAD.

1.1. Estrutura da Dissertação

Nas seções iniciais dessa dissertação é abordado os aspectos pertinentes a uma breve contextualização da temática desenvolvida. Essas seções são constituídas pela introdução (seção 1), os objetivos principais e secundários da pesquisa (seção 2) e ao estudo do estado da arte sobre o tema (seção 3). Essa terceira seção foi dividida em quatro grandes partes, nas quais são descritos os conceitos referentes [1] ao processo geral da flotação por ar dissolvido, [2] às características das microbolhas de ar e das partículas floculadas, [3] à análise de imagem empregada em processos similares e [4] à modelização matemática da zona de contato.

Na seção 4 apresentam-se os materiais e métodos empregados durante todo o desenvolvimento do estudo. Na seção 5 são apresentados os resultados obtidos, de modo a incluir, resumidamente: [1 e 2] a otimização dos parâmetros da coagulação (dosagem de coagulante, pH, gradiente médio de velocidade e tempo médio de mistura rápida); [3] estudo do impacto do gradiente médio de velocidade e do tempo médio de floculação no processo; [4] estudo da influência da concentração em massa de ar dissolvido no processo FAD variando tanto o tempo médio de floculação como o gradiente médio de velocidade na floculação; [5] análise da distribuição do tamanho das partículas floculadas e das microbolhas de ar; [6] impacto do tamanho das partículas floculadas e das microbolhas de ar na eficiência do processo e [7] os

resultados experimentais foram inseridos, em caráter investigativo, no modelo matemático da zona de contato proposto por Haardhoof e Edzwald (2004).

Nas seções finais são reportadas as principais conclusões observadas (seção 6) a partir dos resultados expostos e discutidos na seção 5, bem como as referências bibliográficas consultadas e citadas neste texto. Finalmente, apresentam-se os apêndices que complementam diversos pontos do texto principal.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo principal

O objetivo principal do estudo foi investigar a influência do tamanho das partículas floculadas e da concentração em massa de ar dissolvido na eficiência do processo FAD para uma água sintética obtida de modo a simular uma água para abastecimento com cor moderada/elevada e baixa turbidez.

2.2. Objetivos específicos

- Obtenção das condições ótimas de coagulação (dosagem de coagulante e pH) relativo à água em estudo;
- Adequação das condições de mistura rápida da água de estudo;
- Investigar a influência das condições de floculação (gradiente médio de velocidade e tempo de floculação) na eficiência de clarificação por flotação (FAD) da água de estudo coagulada em condições adequadas;
- Análise da influência da concentração de microbolhas de ar (controladas pela massa de ar dissolvido fornecida ao processo), em diversas condições de floculação na eficiência geral do processo FAD;
- Análise da distribuição do tamanho das partículas floculadas e das microbolhas de ar por meio do método de análise de imagens;
- Os resultados experimentais foram inseridos, com caráter investigativo, no modelo matemático da zona de contato proposto por Haardhoof e Edzwald (2004), com o objetivo de comparar os resultados obtidos no presente trabalho às conclusões obtidas pelos autores.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para o presente trabalho, a revisão bibliográfica foi dividida em quatro grandes seções: i) Aspectos gerais da Flotação por Ar Dissolvido (FAD); ii) Características gerais das partículas floculadas e das microbolhas de ar; iii) Análise de imagem iv) Modelização Matemática da FAD.

3.1. Flotação por Ar Dissolvido (FAD)

A Flotação por Ar Dissolvido (FAD) é um processo eficaz de clarificação utilizado para tratamento de águas com alta concentração de algas e matéria orgânica natural (MON). Esse processo é caracterizado como um processo trifásico de separação sólido-líquido através da introdução de uma alta concentração de microbolhas de ar dissolvido em água. Essas microbolhas de ar são inseridas na massa líquida com objetivo de remover os flocos que são gerados na etapa preliminar do tratamento. A colisão entre as partículas floculadas e as microbolhas de ar resultam num aglomerado com densidade inferior à da água, o qual sobe a superfície do líquido, local onde pode ser removido (METCALF; EDDY, 2003).

O método mais comum de produção dessas microbolhas é o método de recirculação pressurizada. Neste método, um fluxo de recirculação da água tratada é bombeado para um recipiente de saturação, onde o ar é adicionado e dissolvido sob pressão. O fluxo de recirculação pressurizado saturado é então introduzido ao tanque de FAD, numa zona chamada zona de contato, sendo injetado através de bocais. A mudança de pressão através dos bicos faz com que o ar dissolvido saia da solução sob a forma de pequenas bolhas de ar (EDZWALD, 2011).

Um reator de FAD é usualmente concebido como duas etapas distintas que ocorrem consecutivamente em duas partes diferentes do reator. No primeiro compartimento, conhecido como zona de contato, as partículas previamente floculadas são introduzidas concomitantemente com uma concentração de suspensão de microbolhas de ar, com a finalidade da formação dos aglomerados flocos-bolhas. Esse conjunto é conduzido para a segunda parte de um reator, a zona de separação, a qual tem tamanho maior do que a primeira. Nela os aglomerados (flocos-bolha) são coletados na parte superior do tanque em uma camada

flutuante, a qual consiste numa mistura de bolhas e de partículas floculadas vinculadas a bolhas. Já o efluente tratado é coletado na parte inferior do tanque (HAARHOOF; EDZWALD, 2004).

Em um sistema de tratamento de água de abastecimento, é recomendado o uso de flotação por ar dissolvido como etapa para clarificação precedendo o processo de filtração (ou equivalente), especialmente para águas com alto teor de algas ou alta cor e baixa turbidez. Além disso, a aplicação da FAD não se limita, apenas, ao tratamento de águas que contenham cor natural ou algas. A FAD tem amplas aplicações no tratamento de águas superficiais para abastecimento, principalmente em águas brutas com baixa temperatura (EDZWALD, 1995; EDZWALD, 2011).

3.2. Características gerais das partículas floculadas e microbolhas

No presente trabalho o interesse foi a investigação das características das partículas floculadas e das microbolhas de ar que resultariam na maior eficiência do processo FAD. Nessa seção é revisado os principais pontos conhecidos na literatura sobre partículas floculadas e sobre as microbolhas de ar.

3.2.1. Partículas floculadas

As partículas floculadas são formadas nos processos de coagulação e floculação que antecedem a flotação. De maneira geral, nesses processos físico-químicos as partículas presentes na água são desestabilizadas quimicamente através de coagulantes e posteriormente agrupadas para que possam ser separadas em processos subsequentes.

Segundo Reali (1991) e Reali e Patrizzi (2007), para obter condições ótimas de coagulação para uma determinada água a ser tratada por flotação é necessário análise em laboratório, em um equipamento denominado flotateste, chegando assim a doses de coagulante e valores de pH adequados, pois baixas dosagens de coagulante prejudicam a formação de flocos e altas dosagens podem produzir flocos grandes, os quais tendem a sedimentar ao invés de flotar.

Segundo Han (2011) e Han e Kim (2007), a eficiência da flotação ainda será maximizada se a carga das partículas floculadas forem opostas as cargas das microbolhas de ar.

3.2.2. Microbolhas de ar

Com relação às microbolhas de ar dissolvido, o seu tamanho é uma propriedade fundamental para um melhor desempenho do processo de FAD, sendo a faixa usual para o tamanho de microbolhas entre 10 a 120 μm , estabelecendo o diâmetro médio entre 40 a 60 μm (REALI, 1991). Neste contexto, pequenas bolhas são mais interessantes à flotação do que bolhas grandes, já que para uma mesma massa de ar dissolvido, aquelas possuem maior superfície específica e ainda necessitam deslocar menor volume de água da superfície dos flocos a que vão aderir.

Para Edzwald (2010), a concentração de microbolhas na zona de contato é uma das variáveis mais importantes de controle e operação de uma unidade de FAD. A vazão de recirculação e a pressão no interior da câmara de saturação são os principais responsáveis por este parâmetro. O autor ainda destaca que existem quatro interações ocorridas entre as microbolhas de ar em termos de coalescência: i) força atrativa de London-van der Waals; ii) força eletrostática repulsiva; iii) interação hidrofóbica atrativa e, iv) repulsão hidrodinâmica. Ademais, em água de abastecimento, na qual a concentração de sais é baixa (força iônica $< 0,02 \text{ mol.L}^{-1}$), a coalescência entre as bolhas de ar no interior da zona de contato é constatada, influenciando diretamente a eficiência do processo de FAD. Vale ressaltar que em água com altas concentrações de sais, a coalescência não é significativa.

O tamanho das bolhas é afetado principalmente pela diferença de pressão no sistema de injeção e no tipo de válvula utilizada. Geralmente, como já dito, a faixa de tamanho é de 10 a 100 μm , com média de 40 μm , sob pressão de 4 - 6 atm (EDZWALD, 2010). É importante ressaltar que o tamanho das microbolhas está relacionado com a forma de despressurização, com o tipo da câmara de saturação, com a taxa de recirculação, com a temperatura e com a pressão utilizada no interior da câmara de saturação.

Para a determinação do volume que deverá ser floculado em relação ao volume total, A/V (volume floculado em relação ao volume recirculado), Edzwald (2010) relaciona a concentração em massa de ar dissolvido (A/V) com a Recirculação (R) pela seguinte fórmula (Equação 1).

$$\frac{A}{V} = \left[\frac{f(P + 101.3)}{K_H} - \frac{P_{atm}}{K_H} \right] \left(\frac{R}{1 + R} \right) \quad (1)$$

Sendo que A/V (g.m^{-3}) é a concentração de microbolhas de ar após a mistura da vazão de recirculação com a vazão de água floculada; f o fator de eficiência da câmara de saturação; K_H a constante de Henry; P (kPa) a pressão relativa na câmara de saturação; P_{atm} (kPa) a pressão atmosférica local e R a porcentagem da recirculação pressurizada.

3.3. Análise de Imagem

Moruzzi (2005) e Moruzzi e Reali (2010) estudaram a distribuição dos diâmetros das microbolhas de ar em sistemas de tratamento de água por flotação por ar dissolvido (FAD) em escala piloto utilizando imagem digital. A água sintética preparada durante o estudo possuía 50 μC , 5 μT e $\theta = 22^\circ\text{C}$. Nesse estudo foram investigados possíveis agentes na aglutinação das microbolhas após a despressurização: i) As condições de mistura expressas em termos da taxa de aplicação superficial ($TAS_{ZC} = 25, 40 \text{ e } 60 \text{ m.h}^{-1}$) e o tempo de detenção na zona de contato ($TDH_{ZC} = 0,011; 0,017 \text{ e } 0,025 \text{ h}$); ii) $\text{pH} = 6; 6,25; 6,5 \text{ e } 6,75$; iii) taxa de recirculação = 5, 10 e 20% e iv) dosagem de coagulante 0 e 2,25 $\text{mg Al}^{+3}.\text{L}^{-1}$. A aquisição das imagens foi realizada com uma câmara digital de 5.1 MPixel acoplada a um conjunto de lentes (Figura 1). As imagens foram analisadas com o software *Image Tool versão 3.0*.

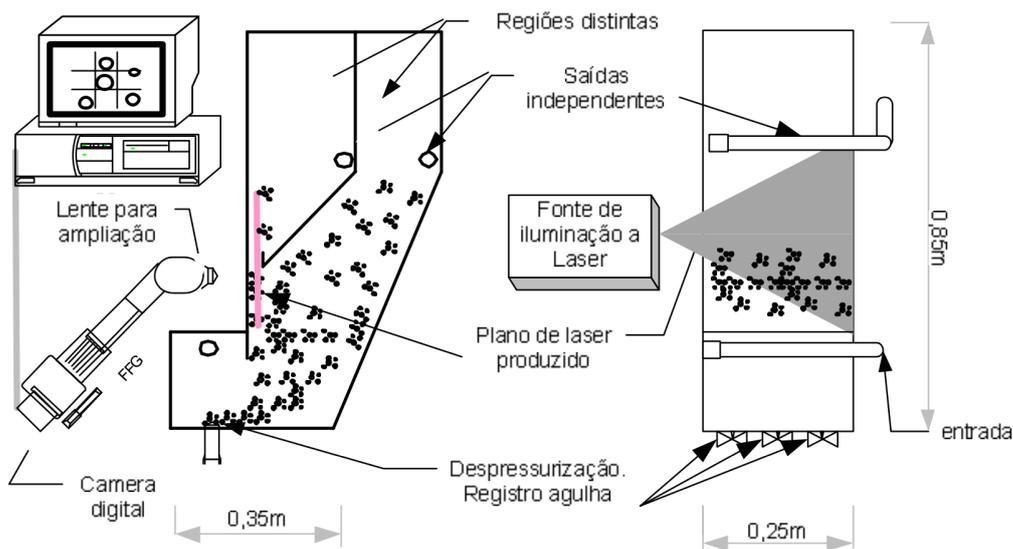


Figura 1 - Aparato experimental em escoamento contínuo utilizado para a aquisição das imagens das microbolhas nas diferentes condições investigadas por Moruzzi (2005).

Como resultado do estudo, todas as condições analisadas apresentaram os valores de diâmetros médio das microbolhas entre 10-120 μm . i) a alteração do TAZ_{ZC} e do TDH_{ZC} produziu uma mudança leve na distribuição de tamanho. ii) O pH produziu um achatamento da curva, sendo que o diâmetro das bolhas foi alterado de 27 a 35 μm . iii) A taxa de recirculação foi pouco importante na distribuição do tamanho das microbolhas (variação de 25 a 30 μm). iv) A aplicação do coagulante não influenciou significativamente o diâmetro médio das microbolhas de ar (27 μm na ausência de coagulante e 29 μm na presença).

Ademais, Moruzzi (2005) realizou um estudo preliminar para a análise do tamanho das partículas floculadas utilizando o método desenvolvido para as microbolhas de ar (Figura 1). O autor estudou duas condições distintas de floculação: i) $G_F = 50 \text{ s}^{-1}$ e $T_F = 34$ minutos e ii) $G_F = 90 \text{ s}^{-1}$ e $T_F = 34$ minutos. Neste trabalho, o diâmetro médio para os flocos foi calculado a partir do princípio da esfera equivalente de mesma área de projeção no plano. Nesse estudo foi concluído que o aumento no gradiente médio de velocidade na floculação deslocou a curva de distribuição de tamanho dos flocos para as faixas de menor diâmetro.

Han, Kim T e Kim J (2007) desenvolveram um estudo em escala laboratorial com o objetivo de analisar a influência do tamanho das partículas floculadas e das microbolhas de ar na eficiência da flotação por ar dissolvido. Neste estudo, os autores prepararam uma água sintética com 20 NTU, pH = 7,6 e temperatura de 15°C. A água foi coagulada com sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ com concentração de 1%, com $G_{MR} = 200 \text{ s}^{-1}$ e $T_{MR} = 30$ segundos. Para variar os tamanhos dos flocos, o gradiente médio de velocidade na floculação empregado foi de 45, 83, 115, 143 e 170 s^{-1} , para tempos de floculação iguais a 5, 10, 15, 20, 25 e 30 minutos. Para variar o diâmetro das microbolhas de ar foram variadas a pressão (2, 3 e 5 atm) e a recirculação pressurizada com valores de 4 e 10% para cada valor de pressão.

Para a análise de imagem, 20 mL de amostra foi coletado do reator com o auxílio de uma pipeta com ponta de diâmetro de 10 mm. A amostra coletada foi injetada em uma célula de PVC de 2x100x100 mm. Uma câmera digital (Nikon Coolpix 4500) equipada com um microscópio trifocal (Meiji Techno Co.) foi usada para gravar imagens dos flocos (20 vezes). A análise computacional foi realizada por meio de um programa comercial (Sigma Scan Pro) para considerar as formas irregulares dos flocos (Figura 2). O diâmetro médio das partículas floculadas foi calculado a partir do diâmetro médio de Feret.

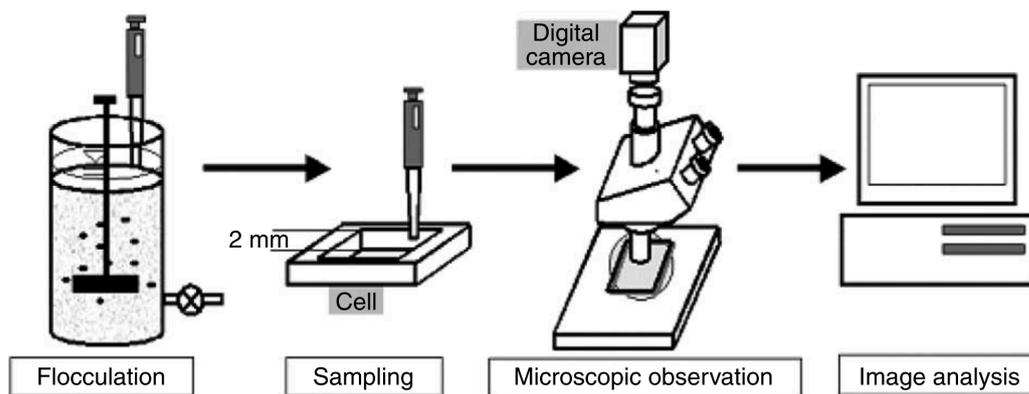


Figura 2 – Equipamento experimental usado em pesquisa de Han, Kim T e Kim J (2007) para a medição do tamanho dos flocos

Como resultados da pesquisa, os autores mostraram que a eficiência de remoção aumentou à medida que o tamanho do floco aumentou; contudo, após certo diâmetro a eficiência se tornou constante. Além disso, a eficiência de remoção observada com 10% foi maior do que a com 4%. Os autores também concluíram que, com o aumento da concentração em volume da bolha, também foi aumentado a oportunidade de colisão entre bolha e partícula. Assim, à medida que a colisão entre partícula e bolha aumentou, a eficiência do processo também aumentou.

Ademais, no estudo dos autores coreanos, foi constatado que o aumento na pressão de saturação promoveu a formação de microbolhas de ar com menores faixas de diâmetros e, conseqüentemente, uma maior concentração em número de bolhas. Ademais, quanto maior a pressão de saturação, logo, bolhas menores, maior a eficiência da flotação para as mesmas condições de recirculação e tamanho de partículas. Como conclusão geral do estudo, Han et al. (2007) afirmaram que para aumentar a eficiência de remoção foi necessário que os flocos possuíssem um tamanho maior que os das bolhas de ar.

Gorczyca e Zhang (2007) desenvolveram um estudo com análise de imagem na água de um reservatório (Deacon) que abastece a cidade de Winnipeg no Canadá. A água bruta do reservatório era caracterizada por baixa turbidez (0,25 a 1,9 NTU, com média de 0,8 NTU) e carbono orgânico total de moderado a alto (4 a 11 mg.L⁻¹, com média de 8,9 mg.L⁻¹). Neste estudo foi analisado os diâmetro dos flocos em três diferentes dosagens de coagulante (3,79; 2,32 e 1,41 mg.L⁻¹ de Al⁺³). O tempo de flocculação estudado variou de 5 a 15 minutos. Para a análise dos flocos, dado o tempo de flocculação, 1 mL da amostra contendo as partículas

floculadas era rapidamente transferida para uma placa Petri contendo 8 mL de solução *Noble* liquefeita de ágar a 1,5 %. Todos os flocos eram incorporados em ágar e não tinham mais a possibilidade de entrar em contato e flocular um com o outro. As amostras solidificadas em ágar foram armazenadas no refrigerador ($\theta = 1^{\circ}\text{C}$) para evitar alterações já que eram analisadas no dia posterior. O sistema da análise de imagem foi constituído de um microscópio óptico acoplado a um monitor de vídeo de alta resolução, uma câmera digital de alta resolução (*Sony Exwave HAD*), uma caixa de terminais digital usada para conectar todas as partes e o software de análise de imagem. As medidas dos diâmetros médios das partículas foram realizadas com o software *Image Pro Plus versão 4.5*. Para o estudo do diâmetro do floco, foi considerado o diâmetro médio equivalente de um círculo de mesma área projetada da imagem da partícula.

Como principais resultados, o estudo mostrou que, na dosagem ideal de $2,32 \text{ mg.L}^{-1}$ de Al^{+3} , a média logarítmica do diâmetro médio dos flocos foi de $27 \mu\text{m}$ e o tamanho da bolha foi de $30 \mu\text{m}$. Para $3,79 \text{ mg.L}^{-1}$ de Al^{+3} , a média logarítmica do diâmetro médio dos flocos foi de $45 \mu\text{m}$ e, para $1,41 \text{ mg.L}^{-1}$ de Al^{+3} , a média logarítmica dos flocos foi de $21 \mu\text{m}$. Assim, este estudo sugeriu que, para a água do reservatório de Deacon, o desempenho ideal da DAF foi alcançado quando o tamanho médio do floco e o tamanho da bolha foram similares.

Pioltine (2013) e Pioltine e Reali (2015) realizaram um estudo com o intuito de investigar a influência do tamanho das partículas floculadas no processo FAD. Para tanto, o trabalho foi desenvolvido com uma água sintética com as seguintes características: turbidez de $7,5 \pm 0,2$ NTU, cor aparente de 38 ± 1 uC, alcalinidade de $29,8 \pm 0,6 \text{ mg CaCO}_3.\text{L}^{-1}$, condutividade de $59,3 \pm 0,8 \mu\text{S.cm}^{-1}$, $\text{UV}_{254 \text{ nm}}$ de $0,128 \pm 0,004 \text{ cm}^{-1}$. A água em estudo foi coagulada com $1,9 \text{ mg.L}^{-1}$ de Al^{+3} e com pH de $6,60 \pm 0,05$. O estudo foi realizado tanto em unidade laboratorial como em unidade piloto. Para a medida do tamanho das partículas floculadas e das microbolhas de ar dissolvido, as imagens foram adquiridas com o auxílio de uma câmera CCD especial de alta luminosidade (*QImaging QICAM FAST MONO 12-bit*) acoplada a um colposcópico *Olympus OCS-3* e à um computador para a captura de imagens. Para a análise das imagens o software utilizado foi o *Image-Pro Plus 7.01*.

Os principais resultados do trabalho mostram que a distribuição de tamanho das partículas floculadas influenciou diretamente a eficiência do processo de Flotação por Ar Dissolvido. Os menores residuais foram alcançados com partículas floculadas com diâmetro médio de Feret acima de $300 \mu\text{m}$. Além disso, para a água estudada os maiores valores de eficiência alcançados

foram com um tempo de floculação de 17 minutos; contudo, a partir de 10 minutos de floculação já era alcançada uma boa eficiência para o processo FAD.

3.4. Modelização Matemática

Desde o começo da década de 90 muitos trabalhos foram realizados com o intuito de modelizar matematicamente a colisão entre as partículas floculadas e as microbolhas de ar visando analisar como os diversos parâmetros fundamentais da FAD influenciariam a eficiência geral do processo. Dentre os quais podem ser destacados: EDZWALD, 1991; REALI, 1991; EDZWALD, 1995; FUKUSHI; TAMBO; MATSUU, 1998; LEPPINEN, 1999; HAN; KIM; DOCKO, 2001; HAARHOOF; EDZWALD, 2004. Esses modelos possuem basicamente duas abordagens distintas: modelos sobre o tipo de floculação e o “White water blanket filtration”. Na primeira abordagem, as colisões são tratadas de forma semelhante à floculação heterogênea com partículas ou flocos colidindo com bolhas (em outras palavras, as bolhas são vistas como um grupo de partículas). Na segunda abordagem, uma manta de bolhas atua como coletor de partículas analogamente ao antracito ou meio de areia em um filtro (EDZWALD, 2010).

O modelo proposto por Reali (1991) buscou compreender como os parâmetros fundamentais da flotação por ar dissolvido impactariam a eficiência geral do processo. Tais parâmetros estudados foram: a razão de recirculação, a concentração em massa de ar dissolvido, o tamanho dos flocos e das microbolhas de ar.

Segundo este modelo, para que um determinado floco seja “flotável” seria necessário um número mínimo de bolhas de ar (quantidade de ar dissolvido) de tal maneira que a velocidade ascensional do aglomerado superasse a taxa de aplicação superficial empregada no reator. Dessa maneira, um aumento na quantidade de ar dissolvido fornecida ao sistema promoveria um aumento na eficiência do processo. Para que ocorresse esse aumento, seria possível modificar duas variáveis, tanto a razão de recirculação pressurizada utilizada, como o aumento na pressão de saturação (aumentando, assim, a concentração em volume de ar dissolvido disponível na recirculação), sendo que a modificação nessa última variável seria a mais recomendada.

Com relação aos outros dois parâmetros, tamanho dos flocos e das microbolhas de ar na FAD, foram realizadas simulações com o modelo matemático proposto verificando que um possível aumento no tamanho de flocos (maiores do que 100 μm) promoveria um aumento na eficiência do processo. No trabalho Moruzzi e Reali (2014) foi realizado um estudo em escala piloto de FAD com uma água sintética simulando uma água de abastecimento, com média cor e baixa turbidez. Os resultados experimentais de eficiência obtidos no estudo foram incorporados nesse modelo matemático, mostrando que tal modelo é uma aproximação razoável para o processo FAD.

É importante notar que as considerações sobre o tamanho dos flocos, que flocos maiores do que 100 μm melhoram a eficiência da flotação, foram feitas por outros modelos que utilizam a floculação como base dos modelos matemáticos propostos (FUKUSHI; TAMBO, MATSUI, 1998; LEPPINEN, 1999; HAN; KIM; DOCCKO, 2001).

3.4.1. White-Water Blanket Model

O modelo “White Water Bubble Blanket Model” foi proposto inicialmente no começo da década de 90 (EDZWALD, 1990; EDZWALD, 1995), posteriormente revisado e adaptado em Haarhoff e Edzwald (2004). A descrição resumida desse modelo que é apresentada no presente trabalho foi integralmente baseada na publicação posterior de Haarhoff e Edzwald (2011, pgs 7-8 a 7-39).

Para a proposição do modelo foi usada uma abordagem similar a utilizada para a modelização da performance de filtração de ar (FRIEDLANDER, 1977 apud HAARHOFF; EDZWALD 2011) e da filtração de água em meio granular (YAO et al., 1971 apud HAARHOFF; EDZWALD 2011). Salienta-se que o modelo proposto foi desenvolvido considerando o reator FAD com escoamento contínuo tipo pistão ideal. Para os autores, a manta ascendente de bolhas presente na zona de contato do processo FAD atua de forma análoga a um filtro. Os coletores no processo de separação por flotação seriam as microbolhas de ar, as quais, numa unidade de flotação apresentam uma distância média de separação (entre bolhas) entre 160 a 200 μm , distância que seria também o tamanho aproximado das aberturas dos poros para a água passar nos grãos do meio filtrante granular de uma unidade de filtração.

A suspensão de bolhas, estando em altas concentrações na zona de contato, foi denominada de manta de água branca (White Water Blanket). Neste caso, as microbolhas de ar são constantemente adicionadas através da introdução da água de recirculação pressurizada e continuamente removidas devido ao fluxo para zona de separação de tal maneira que o estado de equilíbrio dinâmico é atingido. Dessa maneira, essa manta de água branca estaria sempre com a mesma concentração alta de bolhas na zona de contato. Além disso, à medida que as partículas floculadas são transportadas para a superfície das bolhas e interagem com a manta de água branca, as microbolhas atuam como coletores para essas partículas, semelhantemente ao que ocorre em um filtro.

Este fato, a bolha atuando como coletor de partícula, é a consideração inicial do modelo desenvolvido. O conceito utilizado para o desenvolvimento de todo o estudo é o conceito de eficiência de colisão de um único coletor. Esse conceito já foi usado para o desenvolvimento dos modelos de deposição de partícula nos filtros de ar (FRIEDLANDER, 1977 apud HAARHOFF; EDZWALD 2004), nos filtros de água (YAO et al., 1971 apud HAARHOFF; EDZWALD 2011), na flotação por espuma (FLINT; HOWARTH, 1971 apud HAARHOFF; EDZWALD 2011) e na flotação por ar disperso (REAY; RATCLIF, 1973 apud HAARHOFF; EDZWALD 2011).

Fisicamente, é previsto que quatro mecanismos são responsáveis pelo transporte da partícula para a bolha (para a superfície coletora). Na zona de contato, a água se move no sentido ascendente com uma determinada velocidade, as bolhas de ar sobem com uma velocidade relativa a esse movimento de água. A velocidade ascensional da microbolha de ar (v_b) causa linhas de fluxos com o fluxo descendente ao redor da bolha, como pode ser visto na Figura 3. Como as microbolhas de ar na zona de contato da FAD geralmente tem diâmetros menores que 120 μm e velocidades ascensionais com o número de Reynolds menor do que 1, as linhas de fluxo são caracterizadas pelas condições de escoamento de Stokes. Os quatro mecanismos de transportes que podem causar o movimento da partícula da massa de água dentro da distância entre bolhas (no caso da FAD, normalmente 160 - 200 μm como já descrito acima) são: difusão Browniana, interceptação, sedimentação e inércia. É importante salientar que os quatro mecanismos de transporte são dependentes do tamanho da partícula (Equações 3 a 6).

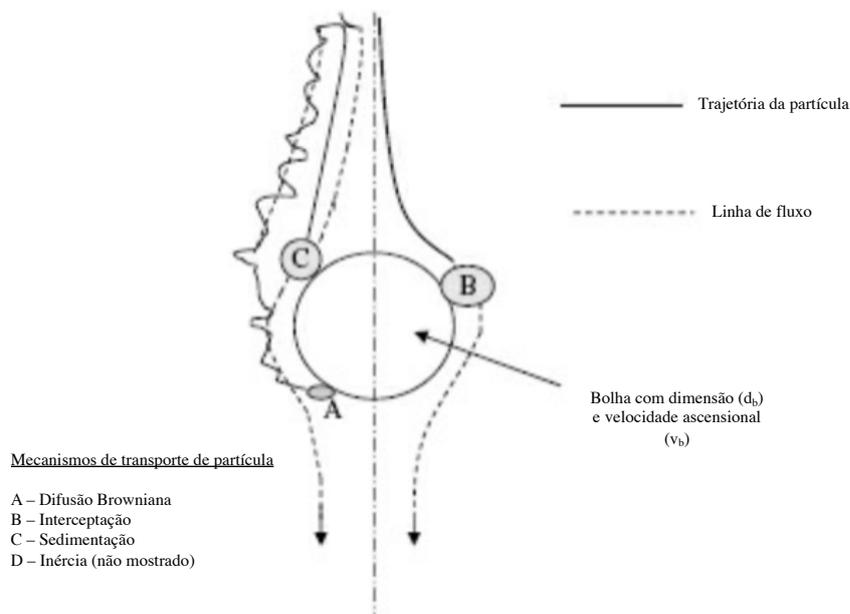


Figura 3 - Conceito da eficiência do coletor único representando os mecanismos de colisão de transporte das partículas com a bolha (Haardhoff, Edzwald, 2011 adaptada)

É sabido que as partículas com menores diâmetros (Partícula A da Figura 3) são impactadas pelo movimento Browniano. O movimento aleatório dentro da massa de água pode causar colisões com a bolha para partículas muito pequenas. Partículas representadas pela Partícula B têm densidade suficientemente baixa em relação à água, movendo-se, assim, com as linhas de fluxo, as quais podem ser interceptadas fisicamente quando se aproximam o suficiente da superfície da bolha. Esse processo de colisão de partículas com a bolha é chamado de interceptação. Partículas como a C possuem densidade maior do que a água, dessa maneira elas se acomodam nas linhas de fluxo e colidem com a bolha devido à influência da força gravitacional. Este tipo de transporte é chamado de sedimentação. O último tipo de mecanismo de transporte possível de partículas é a inércia. Entretanto, esse tipo de transporte não é significativo para o tamanho das partículas e das bolhas que são geralmente encontradas no processo de Flotação por Ar Dissolvido.

No modelo proposto são consideradas duas etapas para a deposição ou remoção real das partículas: (i) oportunidade de colisão e fixação das partículas às bolhas, (ii) eficiência da zona de contato. O conceito descrito de eficiência de um coletor único (η , definido na equação 2) retrata a primeira etapa (oportunidade de colisão), isto é, o transporte das partículas na massa líquida para a vizinhança da superfície da bolha.

$$\eta = \frac{\text{taxa na qual as partículas colidem com o coletor}}{\text{taxa na qual as partículas se aproximam do coletor}} \quad (2)$$

As equações 3 a 6 descrevem a eficiência individual de colisão para a difusão Browniana (η_{BD}), interceptação (η_I), sedimentação (η_S) e inércia (η_{IN}).

$$\eta_{BD} = 6.18 \left[\frac{k_b T}{g(\rho_w - \rho_b)} \right]^{\frac{2}{3}} \left[\frac{1}{d_b} \right]^{\frac{2}{3}} \left[\frac{1}{d_b} \right]^2 \quad (3)$$

$$\eta_I = \left(\frac{d_p}{d_b} + 1 \right)^2 - \frac{3}{2} \left(\frac{d_p}{d_b} + 1 \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{d_p}{d_b} + 1 \right)^{-1} \quad (4)$$

$$\eta_S = \left[\frac{(\rho_p - \rho_w)}{(\rho_w - \rho_b)} \right] \left(\frac{d_p}{d_b} \right)^2 \quad (5)$$

$$\eta_{IN} = \frac{g \rho_w \rho_p d_b (d_p)^2}{324 (\mu_w)^2} \quad (6)$$

Sendo que k é a constante de Boltzmann ($1,3807 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$), T é a temperatura absoluta (K [273 + °C]), g é a constante gravitacional ($9,806 \text{ m.s}^{-2}$), ρ_w é a densidade da água (kg.m^{-3}), ρ_b é a densidade das microbolhas de ar (kg.m^{-3}), ρ_p é a densidade da partícula ou do floco (kg.m^{-3}), d_b é o diâmetro da bolha (m), d_p é o diâmetro da partícula ou do floco (m) e μ_w é a viscosidade dinâmica da água (N.s.m^{-2} ou $\text{kg.m}^{-1}\text{s}^{-1}$).

Assim, eficiência total de um único coletor (η_T) é a soma de cada parcela individual da eficiência dos quatros mecanismos de colisão (Equação 7).

$$\eta_T = \eta_{BD} + \eta_I + \eta_S + \eta_{IN} \quad (7)$$

A partir de simulações numéricas usando valores que se aproximam do encontrado na prática nas equações acima, os autores chegaram as seguintes conclusões sobre as eficiências dos mecanismos de colisão para o coletor único no processo de flotação por ar dissolvido:

- As duas mais importantes variáveis que afetam a eficiência de colisão de um único coletor são o tamanho da bolha (d_b) e o da partícula ou floco (d_p). Bolhas menores aumentam a eficiência de colisão do coletor único. O movimento Browniano é o mecanismo mais importante para as partículas $< 1\mu\text{m}$, e interceptação é o parâmetro de colisão mais importante para partículas $> 1\mu\text{m}$;
- Considerando a eficiência total de um coletor único (η_T) em função do diâmetro das partículas, ocorre um ponto de mínimo (eficiência mínima) para partículas de $1\mu\text{m}$ de diâmetro. Nesse caso, a soma das contribuições dos mecanismos de difusão Browniana e interceptação são baixas.
- A densidade da partícula/floco e a temperatura da água tem impacto baixo na eficiência total de colisão de um único coletor.

A eficiência total de um único coletor (η_T) definida pela equação 7 considera somente a colisão entre a partícula e uma única bolha. Para a determinação da eficiência da zona de contato é necessário considerar outros parâmetros que influenciam essa zona, como a ligação entre a partícula e a bolha, a concentração de bolhas, a velocidade ascensional da microbolha e a área transversal da bolha. Para definir a eficiência da zona de contato os autores levaram em consideração todos esses parâmetros e incorporam as características do escoamento hidráulico dessa zona. Para tanto, foi considerado que o escoamento em pistão seria uma aproximação razoável para retratar as características hidrodinâmicas da zona de contato. Assim, chegou-se a expressão final para definir a eficiência da zona de contato (Equação 8).

Como os próprios autores comentam, é importante notar que a cinética que descreve a colisão e a ligação flocos-bolhas em um reator em batelada é a mesma que a de um reator com escoamento hidráulico contínuo tipo pistão ideal. Logo, isso significa dizer que o desempenho de um reator em batelada (como o Flotatest) seria idêntico a um reator ideal com escoamento pistonado, como considerado no processo FAD para a zona de contato com fluxo contínuo (HAARHOFF; EDZWALD, 2011, pg.7-37).

$$E_{cz} = \left(1 - \frac{n_{p,e}}{n_{p,i}}\right) = \left[1 - \exp\left(\frac{-3/2(\alpha_{pb}\eta_T v_b \phi_b t_{cz})}{d_b}\right)\right] \quad (8)$$

Sendo que α_{pb} é a eficiência de ligação entre bolhas e partículas; η_T a eficiência total de um único coletor; d_b (m) o diâmetro da bolha; v_b ($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$) a velocidade ascensional da bolha; ϕ_b a concentração em volume da bolha e t_{cz} (minutos) o tempo de detenção da zona de contato.

O parâmetro α_{pb} é a eficiência de ligação entre bolhas e partículas, o qual é afetado principalmente pela química de coagulação. É um parâmetro que depende das interações partículas-bolhas influenciado pela dupla camada elétrica, força de Van Der Waals, força hidrodinâmica e hidrofobicidade das partículas. Esse parâmetro pode variar entre 0 (nenhuma colisão que resulta em ligação floco-bolha) e 1 (todas as colisões resultam em ligação). Os autores consideram que valores de α_{pb} entre 0,5 e 1 é uma boa aproximação para situações de coagulação ótima.

Para o cálculo da velocidade ascensional das microbolhas de ar (v_b), o cálculo é feito por meio da expressão clássica de Stokes (Equação 9).

$$v_b = \frac{g (\rho_w - \rho_b)(d_b)^2}{18(\mu_w)^2} \quad (9)$$

Sendo g a constante gravitacional ($9,806 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$), ρ_w a densidade da água ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), ρ_b a densidade das microbolhas de ar ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), d_b é o diâmetro da bolha (m), e μ_w é a viscosidade dinâmica da água ($\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$ ou $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$).

A concentração em volume de bolhas (ϕ_b) na zona de contato depende da pressão de saturação e da taxa de recirculação. Esse parâmetro pode ser calculado por meio da concentração em massa de ar dissolvido. O t_{cz} é o tempo de detenção médio na zona de contato.

Como principais recomendações baseadas no modelo matemático proposto, os autores concluem que:

- Flocos entre 25 a 50 μm são desejáveis para uma boa performance da zona de contato;
- Recomendação do tempo de detenção de 10 minutos na câmara de floculação para a produção desses flocos ótimos, com gradiente médio de velocidade na floculação entre 60 e 100 s^{-1} ;

- Microbolhas com diâmetros entre 40 a 80 μm são melhores para a FAD;
- O agregado (cluster) floco-bolha não pode ascender à superfície ao menos que exista uma quantidade suficiente de bolhas que estejam ligadas aos flocos para reduzir a densidade do conjunto para menor que a densidade da água;
- Concentração em volume na zona de contato de microbolhas deve estar entre o intervalo de 7000 a 9000 ppm para o tratamento de águas de abastecimento.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Considerações gerais

O estudo foi desenvolvido no setor de equipamentos de bancada do Laboratório de Tratamento Avançado e Reuso de Águas – LATAR, pertencente ao Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC –USP.

A pesquisa experimental foi realizada em cinco etapas para a água de estudo: Etapa 1 – Ensaio visando a obtenção do diagrama de coagulação; Etapa 2 – Ensaio para a adequação da mistura rápida; Etapa 3 – Ensaio para análise das condições de floculação; Etapa 4 – Ensaio visando a análise da influência da concentração em massa de ar dissolvido na eficiência do processo FAD; Etapa 5 – Aquisição e Análise de Imagem.

As análises físico-químicas foram realizadas segundo as determinações do Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (2012).

4.2. Água de estudo

Como o estudo visou obter considerações teóricas sobre os fundamentos do processo de flotação por ar dissolvido, a água utilizada durante os ensaios foi uma água sintética preparada em laboratório para maior controle das condições experimentais. Foram adicionados $6,0 \text{ mg.L}^{-1}$ de ácido húmico comercial (marca ALDRICH *Chemistry*) e 4 mg.L^{-1} de caulinita (marca FLUKA Analytical) a água proveniente do lençol subterrâneo localizado no campus da EESC-USP. A temperatura da água de estudo durante todos os ensaios foi mantida sempre na fixa de $20,0 \pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Para a coagulação foi utilizado como coagulante primário o sulfato de alumínio (marca VETE P.A. 277), com fórmula molecular $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 16,5\text{H}_2\text{O}$. Para regular o pH da água durante a coagulação foi utilizada uma solução de carbonato de sódio (marca GENCO) e ácido sulfúrico quando necessário.

As características da água sintética de estudo preparada estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características da água bruta de estudo

| | |
|--|-------------|
| UV ₂₅₄ nm (cm ⁻¹) | 0,82 ± 0,03 |
| Turbidez (NTU) | 5 ± 1 |
| Cor aparente (mg Pt-Co.L ⁻¹) | 62 ± 3 |
| Cor verdadeira (mg Pt-Co.L ⁻¹) | 60 ± 1 |
| Alcalinidade Parcial (mg CaCO ₃) | 20,3 ± 0,7 |
| Alcalinidade Total (mg CaCO ₃) | 28,1 ± 0,6 |
| Condutividade (µS.cm ⁻¹) | 64 ± 3 |
| Temperatura (°C) | 20,0 ± 0,5 |
| Carbono orgânico total (mg.L ⁻¹) | 1,69 ± 0,05 |

4.3. Instalações e equipamentos

4.3.1. Flotateste

Os ensaios para o desenvolvimento do projeto foram realizados em um equipamento em escala de laboratório e com alimentação por batelada (Flotateste). Este possui quatro colunas de flotação independentes, construídas em acrílico e possuindo cada coluna um agitador removível, conforme desenvolvido por Reali (1991). Estas colunas funcionam tanto como unidades de floculação como de flotação, sendo que, para a realização desta última, a retirada dos agitadores removíveis é necessária. Interligadas às quatro colunas de flotação há uma câmara de saturação pressurizada, na qual é borbulhado ar comprimido à alta pressão de tal maneira que a solução atinja o ponto de saturação para a temperatura e pressão em estudo. Esse equipamento possui um conjunto mecânico com alta sensibilidade para o controle do gradiente médio de velocidade na floculação, como pode ser visto na Figura 4.

Para possibilitar o estudo da análise de imagens, uma das colunas de acrílico do Flotateste foi trocada por uma coluna de vidro com as adaptações necessárias para receber os equipamentos necessários para a análise de imagens (Figura 5).



Figura 4 - Equipamento de bancada (Flotateste) para os ensaios de flotação por ar dissolvido



Figura 5 – Detalhe da coluna de vidro com adaptações necessárias que foi utilizada para a aquisição das imagens das partículas floculadas

4.3.2. Equipamento de monitoramento dos ensaios

Antes do início da coagulação foi monitorada a temperatura da água de estudo e, quando necessário, essa temperatura era ajustada para a temperatura fixa estudada. Imediatamente após a coagulação foi monitorado o pH (pH de coagulação). Para a água tratada (após todo o

processo FAD), foram monitoradas a turbidez, a absorvância em 254 nm e a cor aparente, a qual foi medida indiretamente por meio da absorvância no comprimento de onda de 495 nm (Apêndice 1). Os equipamentos utilizados em cada análise estão listados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros analisados e os respectivos equipamentos utilizados para as análises.

| Parâmetro | Equipamento |
|---|---|
| Determinação da turbidez | Turbidímetro <i>Hach 2100N Turbidimeter</i> |
| Determinação da Cor Aparente e Verdadeira | Colorímetro Orbeco (Hellige) 711 <i>Nesslerizer System</i> |
| Medição do potencial zeta | Zetametro Malvern <i>Zetasizer mano NANO Z590</i> |
| pH | pHmetro <i>Digitalmed DM</i> |
| Absorvância UV ₂₅₄ | Espectrofotômetro <i>Hach DR 5000 em cubeta de 5 cm de caminho ótico</i> |
| Absorvância UV ₄₉₅ | Espectrofotômetro <i>Hach DR 5000 em cubeta de 5 cm de caminho ótico</i> |

4.4. Aquisição e Análise de Imagem

A partir do método de análise de imagens visou-se investigar, em primeiro momento, a distribuição de tamanho dos flocos formados em diferentes condições de floculação e verificar sua influência na eficiência geral do processo. Em seguida, foi analisada a distribuição de tamanho das microbolhas de ar em quatro condições distintas de recirculação. Para tanto foram utilizados os equipamentos e o método desenvolvido por Pioltine (2013), cuja descrição geral está na Figura 6.

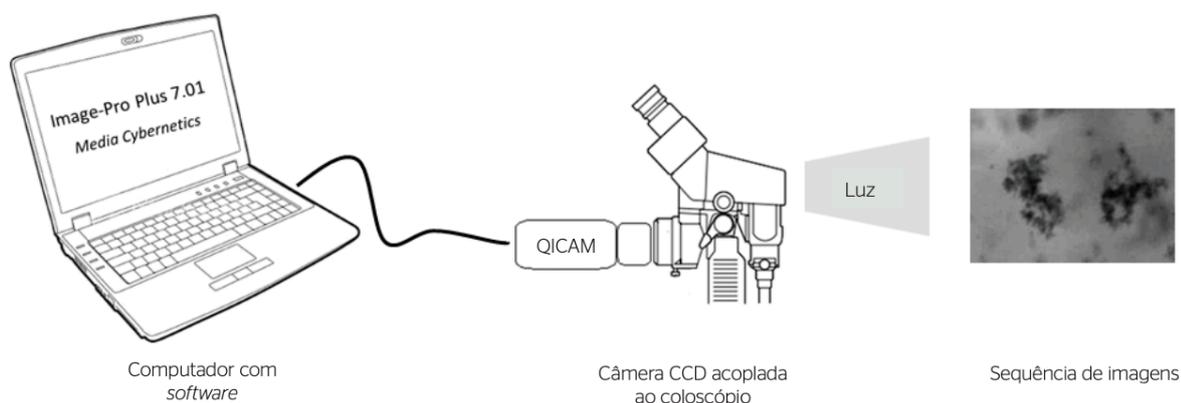


Figura 6 - Equipamento para aquisição de imagens a ser utilizado na pesquisa. Fonte: Pioltine e Reali (2015).

O sistema consta com uma câmera CCD (charge-coupled device) especial de alta luminosidade (QImaging QICAM FAST MONO 12-bit) acoplada a um coloscópio (Olympus OCS-3) e a um computador, o qual possuía o software específico para a captura e análise das imagens (Image Pro Plus 7.01), ver Figura 7.



Figura 7 – Montagem dos equipamentos necessários para a análise de imagem em laboratório e em escala de bancada

A aquisição das imagens para todas as condições das partículas floculadas e das microbolhas de ar dissolvido foram obtidas a partir de um sistema não intrusivo. Como já dito, o flotateste utilizado foi modificado de tal maneira que uma das colunas de floculação/flotação era de vidro (Figura 8). Nesta coluna, após a remoção das hastes que são utilizadas durante a floculação, prevê-se que as imagens sejam obtidas a, aproximadamente, 25 cm da base inferior da coluna de flotação. Nessa posição existe uma “luva branca” com uma lâmina de quartzo, permitindo a melhor captura possível das imagens, como pode ser visto nas Figura 8.



Figura 8 – Detalhe da aquisição da análise de imagem: coloscópio e coluna de vidro com a adaptação necessária para os experimentos

4.4.1 Aquisição das Imagem

Os procedimentos para a aquisição e posterior análise das imagens foi bastante similar ao desenvolvido por Pioltine (2013). Esses procedimentos foram testados e validados antes do início dos ensaios realizados. A aquisição das imagens foi dividida em dois momentos. No primeiro, foi feita a aquisição das imagens das partículas floculadas e, no segundo, as imagens das microbolhas de ar. Para as partículas, foram selecionados randomicamente 100 objetos (flocos) para cada condição de floculação estudada. Como será explicado posteriormente foram

analisadas 15 condições, totalizando 1 500 flocos (objetos) caracterizados. Para as microbolhas de ar, foram estudadas 4 condições variando a quantidade em massa de ar dissolvido fornecida ao sistema. Para cada condição foram analisadas 300 bolhas, totalizando 1 200 objetos caracterizados. Para a aquisição desses objetos realizou-se ensaios em triplicata tanto para a análise da distribuição dos tamanhos dos flocos como para as microbolhas de ar.

É importante notar que foi utilizada a luz verde do colposcópico para a aquisição dos objetos. O equipamento em questão (Olympus OCS-3) possui três diferentes filtros de luz: *green* ou *LB-Lighter e Brighter filter*; filtro verde, magenta e marrom claro respectivamente. Como os flocos formados pelo ácido húmico possuíam a coloração amarronzada, foi optado pelo filtro verde (*green*), já que este destaca com maior intensidade as partículas floculadas e suas extremidades. Para as microbolhas de ar, o mesmo filtro também foi utilizado. Além disso, o colposcópico em questão possui um botão manual que permite controlar a intensidade de luz que pode ser emitida.

O acoplamento da câmera CCD de alta luminosidade ao colposcópico foi realizada por meio de um dispositivo desenvolvido anteriormente para ambos os equipamentos. É destacado ainda que as imagens foram adquiridas sem a influência da luminosidade externa, já que, foi identificado maior facilidade no tratamento nessas condições.

Os procedimentos práticos para a aquisição das imagens das partículas floculadas estão enumerados a seguir:

1. Montagem do computador, do colposcópico e da câmera (Figura 7);
2. O colposcópico era ajustado de tal maneira que o foco do equipamento estivesse no ponto de interesse no interior da coluna de vidro do flotateste. Neste momento, era ajustado, também, o filtro utilizado;
3. O software Image-Pro Plus 7.0.1 no computador era aberto e o menu *Acquire* → *Video/Digital Capture*, acessado;
4. Os parâmetros necessários para a aquisição de imagens eram ajustados. Neste caso, estes são: tempo de exposição, número de bits, taxa de frames por segundo e binning. Os parâmetros para regular o sinal de aquisição também eram regulados, sendo eles: ganho (*gain*), *gamma*, *offset* (Figura 9). Vale destacar que por meio dos inúmeros testes realizados previamente optou-se por deixar todos esses parâmetros constantes durante

todas as condições (Tabela 3). Em cada condição a mudança necessária era regular a intensidade de luz fornecida pelo colposcópio por meio do botão manual;

Tabela 3 – Parâmetros utilizados para a aquisição das imagens das partículas floculadas

| | |
|--|------------------------|
| Filtro do colposcópio | Verde (<i>green</i>) |
| Tempo de exposição (<i>Exp. Acq.</i>)* | 00:12:501 |
| Número de bits (<i>capture depth</i>) | 12-bits |
| Sequência (<i>sequence</i>) | 160 |
| <i>Binning</i> | 2 x 2 |
| Ganho (<i>gain</i>) | 1.0 |
| <i>Gamma</i> | 1450 |
| <i>Offset</i> | -2000 |
| Intensidade da luz do colposcópio | Variável |

* Ajustado de acordo com o *binning* utilizado

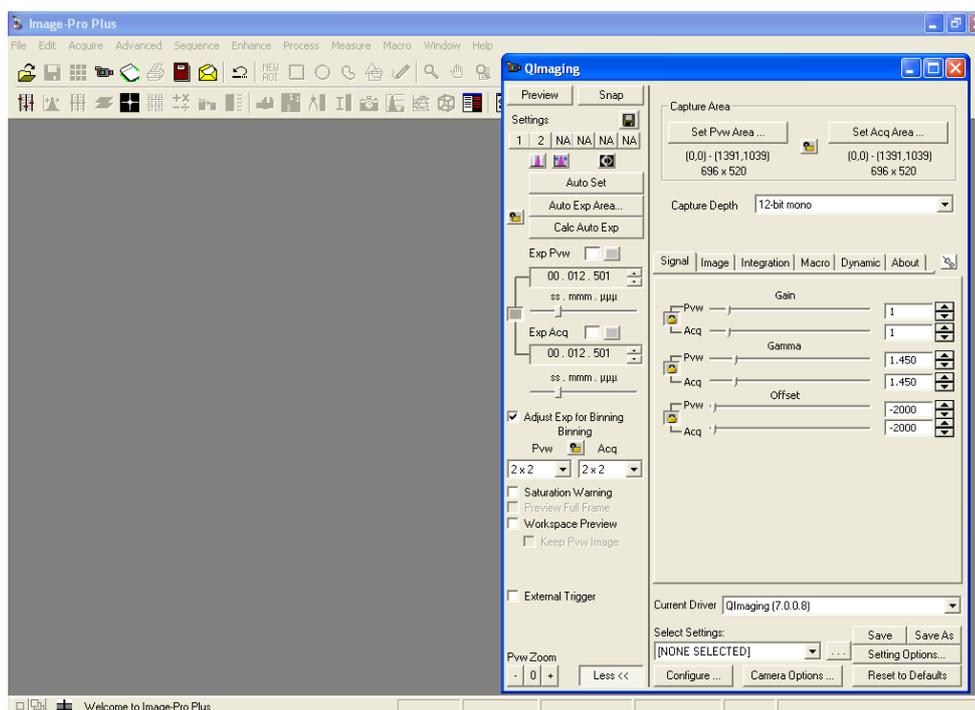


Figura 9 – Detalhe da página inicial do software Image-Pro Plus 7.0.1, com os parâmetros ajustados de acordo com o que foi utilizado durante o estudo de caracterização das partículas floculadas

- Ajustou-se a dioptria que foi utilizada em cada condição. Como será descrito posteriormente, os flocos possuem diâmetros médios de Feret que variam desde 10 até

650 μm , assim os aumentos utilizados para a aquisição das partículas floculadas foram variados. Qual aumento utilizar foi determinado em ensaios preliminares caso a caso, com flocos maiores, aumentos menores foram necessários; com os flocos menores, maiores aumentos.

6. Foi regulado o número de imagens adquiridas em sequência. Assim, em cada ensaio eram adquiridas sequências de imagens (semelhante a um filme). Esse parâmetro está localizado na aba *Image* da tela de aquisição de imagem. No presente trabalho, foram adquiridas 160 imagens para cada ensaio realizado. Como todos os parâmetros definidos no software eram os mesmos para todas as quinze condições, o tempo de aquisição das imagens das partículas floculadas era o mesmo. É importante notar que o tempo entre duas imagens consecutivas era o menor possível dentro das condições estabelecidas. Ainda na aba *Image* era possível selecionar a opção que informava ao software para minimizar esse intervalo de tempo.
7. O comando *preview* era acionado. Dessa maneira, foi possível observar o fluxo das partículas floculadas no interior da coluna em tempo real;
8. A intensidade de luz fornecida pelo colposcópio era ajustada manualmente e o comando *preview* desligado;
9. Como o ensaio foi realizado em um equipamento de bancada, no instante em que foi atingido o tempo de floculação estudado desligou-se a haste que promove a floculação e, simultaneamente, o comando *snap* foi acionado.
10. Era necessário salvar a sequência adquirida. No caso específico desse trabalho optou-se por salvar as sequências utilizando a extensão *.seq* e *.tiff*, porém era possível, depois de salva a imagem, modificar sua extensão salvando-a novamente.

Os procedimentos práticos para a aquisição das imagens das microbolhas de ar foram similares aos utilizados para as partículas floculadas. Entretanto, algumas alterações foram necessárias. Como será explicado a posteriori, foi analisado a distribuição dos tamanhos das microbolhas de ar para quatro diferentes condições de recirculação pressurizada, isto é, quatro diferentes concentrações em massa de ar dissolvido fornecida ao sistema. Para a determinação do diâmetro médio mediu-se todas as bolhas desde o instante em que a flotação foi iniciada até o momento em que não se era possível observar mais bolhas de ar no aparelho. Especula-se que, nesse momento, todas as bolhas inseridas no sistema já tinham saído da massa líquida. Para tanto, foram adquiridas 800 imagens em cada ensaio realizado.

Como a quantidade inserida de microbolhas de ar, ou seja, de objetos era extremamente alta nos momentos iniciais da flotação (formando uma manta de água branca) foi necessário utilizar um anteparo para que fosse possível observar e adquirir as microbolhas de ar nesses momentos iniciais. Neste estudo, o anteparo utilizado foi o agitador removível utilizado durante a floculação. Optou-se pelo uso desse objeto já que, como ele já era utilizado durante a floculação, as características do material não influenciariam negativamente o estudo.

A partir de inúmeros teste preliminares, o anteparo utilizado foi ajustado na melhor posição observada. Dessa maneira, o colposcópico era posicionado de tal maneira que o foco do aparelho ficasse entre o agitador removível e a parede de quartzo.

A captura de imagem era acionada no mesmo instante em que as microbolhas de ar eram liberadas pelo registro. Os próximos passos são exatamente iguais aos descritos para a aquisição das partículas floculadas.

Como as características das microbolhas de ar e das partículas floculadas são diferentes, os parâmetros do software foram ajustados para atender essas diferenças (item 4 do procedimento descrito), os quais estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros utilizados para a aquisição das imagens das microbolhas de ar

| | |
|---|------------------------|
| Filtro do colposcópico | Verde (<i>green</i>) |
| Tempo de exposição (<i>Exp. Acq.</i>) | 00:007:501 |
| Número de bits (<i>capture depth</i>) | 12-bits |
| Sequência (<i>sequence</i>) | 800 |
| <i>Binning</i> | 2 x 2 |
| Ganho (<i>gain</i>) | 4 540 |
| <i>Gamma</i> | 2 930 |
| <i>Offset</i> | -2 048 |
| Intensidade da luz do colposcópico | Variável |

4.4.2. Análise das Imagens

Após a etapa de aquisição das imagens, o próximo passo foi o tratamento e a análise das sequências obtidas. Como já dito, em cada ensaio foram adquiridas 160 imagens para os focos

e 800 para as microbolhas. Além disso, em cada condição, os ensaios foram feitos em triplicata. O processo de tratamento baseou-se no método descrito em Pioltine (2013). O método desenvolvido é um processo manual; foi realizada a análise frame a frame de cada sequência obtida em laboratório afim de identificar o objeto de interesse, no caso a partícula floculada (ou microbolha) que estava posicionada no foco do colposcópio, o qual após a identificação era caracterizado individualmente. Tal processo manual tem a finalidade de diminuir o erro inerente ao processo de tratamento de imagem. Além disso, em se tratando de um processo manual, foram realizadas diversas análises precedentes a fim de reduzir o máximo possível o erro da análise e a maior veracidade de comparação das condições entre elas. É importante salientar que esses ensaios preliminares foram essenciais para a melhor delimitação do objeto estudado, principalmente em relação aos flocos. Como as partículas floculadas não possuem suas bordas delimitadas, as análises iniciais permitiram a adequação dessa delimitação.

Para a análise de imagem, os procedimentos podem ser divididos em dois: a calibração do software e a análise das imagens adquiridas em laboratório.

4.4.2.1 Calibração do software

As imagens para a calibração do software foram adquiridas de forma semelhante com o procedimento descrito no item 4.4.1. Entretanto, em se tratando de um objeto estático foi adquirido uma imagem ao invés de uma sequência de imagens. Para a adequada calibração do software, foram feitas calibrações para cada dioptria fornecida pelo colposcópio. Para a calibração foi utilizada uma escala microscópica em μm .

Os procedimentos utilizados foram:

1. As imagens que foram utilizadas para a calibração do software (ver Figura 10) foram adquiridas por meio de procedimento semelhante ao descrito no item 4.4.1;
2. O arquivo com a imagem feita de calibração era aberto;
3. Era necessário a aplicação do filtro. Menu *process* → *filters* → *enhancement* → *median*. É essencial que o filtro aplicado para a calibração seja o mesmo que o aplicado para a posterior análise das partículas floculadas.
4. Calibração do software feita por meio do menu *measure* → *calibration* → *spatial* → *new*. Era escolhido um nome adequado para a calibração e sua respectiva unidade. No

menu *unit/pixel* → *image* foi possível calibrar o software (ver Figura 10). Neste menu, por meio da linha vermelha fornecida informa-se ao software a medida conhecida, como pode ser visto na Figura 11.

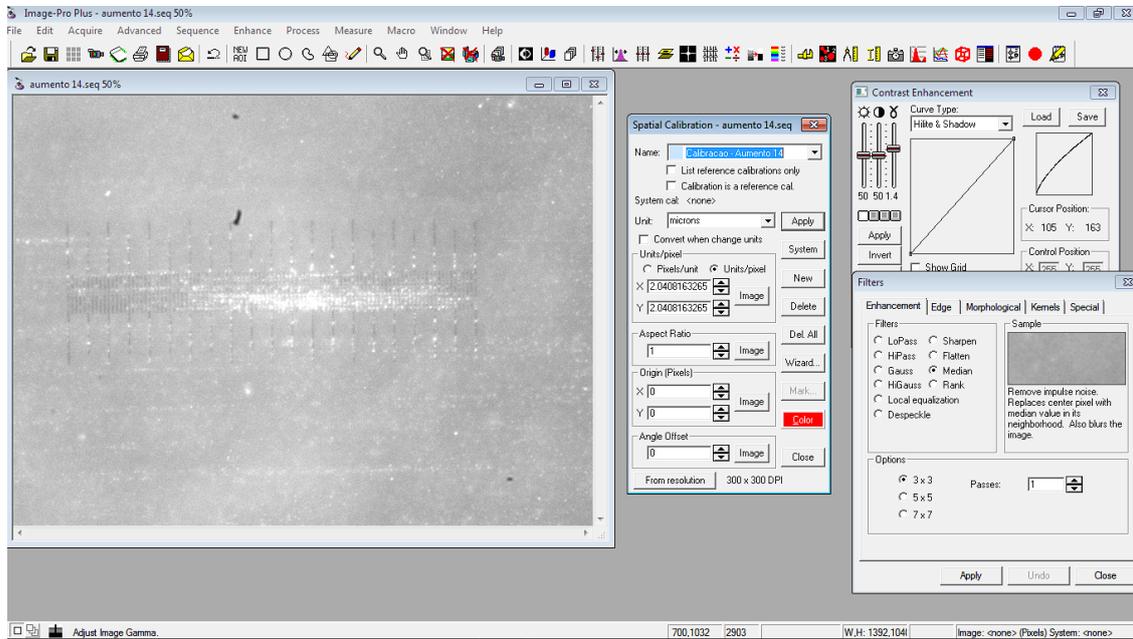


Figura 10 – Imagem utilizada para a calibração do software, posicionada no foco do equipamento. Aumento de 14x. Cada intervalo pequeno (entre linhas) possui 20 μ m.

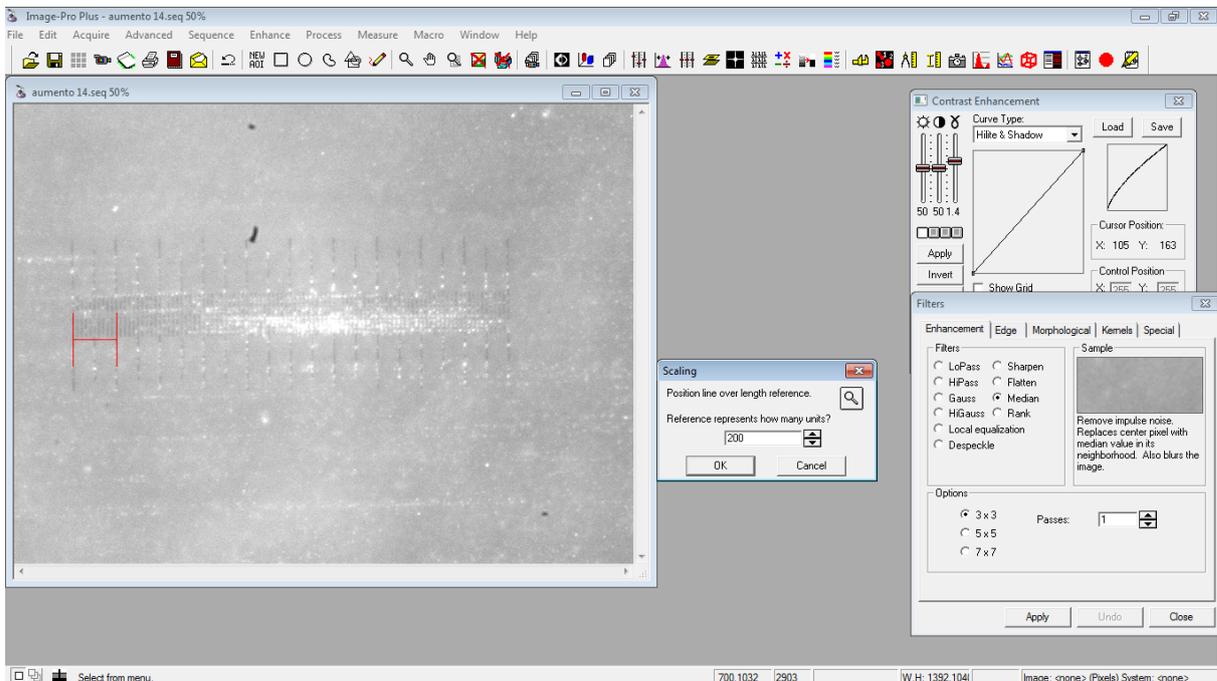


Figura 11 – Exemplo de calibração utilizada para a análise das imagens adquiridas. Aba para informar ao software a medida conhecida. Aumento de 14x. Cada intervalo entre linhas possui 20 μ m.

4.4.2.2 Análise de imagem

Para a análise de todas as partículas floculadas e das microbolhas de ar, os procedimentos utilizados no frame contendo o objeto de estudo foram:

1. O arquivo em análise era aberto no software *Image-Pro*;
2. Seleção da calibração. Menu *measure* → *calibration* → *select spatial*. Era carregada a calibração do aumento correspondente à condição estudada.
3. Seleção da área de interesse (ver Figura 12). Por meio da ferramenta *New AOI* era selecionado o objeto de interesse no frame analisado. Essa ferramenta possui diversas formas geométricas que podem ser utilizadas para a delimitação do objeto estudado.
4. Aplicação do filtro (ver Figura 12). Menu *process* → *filters* → *enhancement* → *median*. É importante salientar novamente que o filtro aplicado nessa etapa precisa ser o mesmo que foi aplicado para a calibração do software.

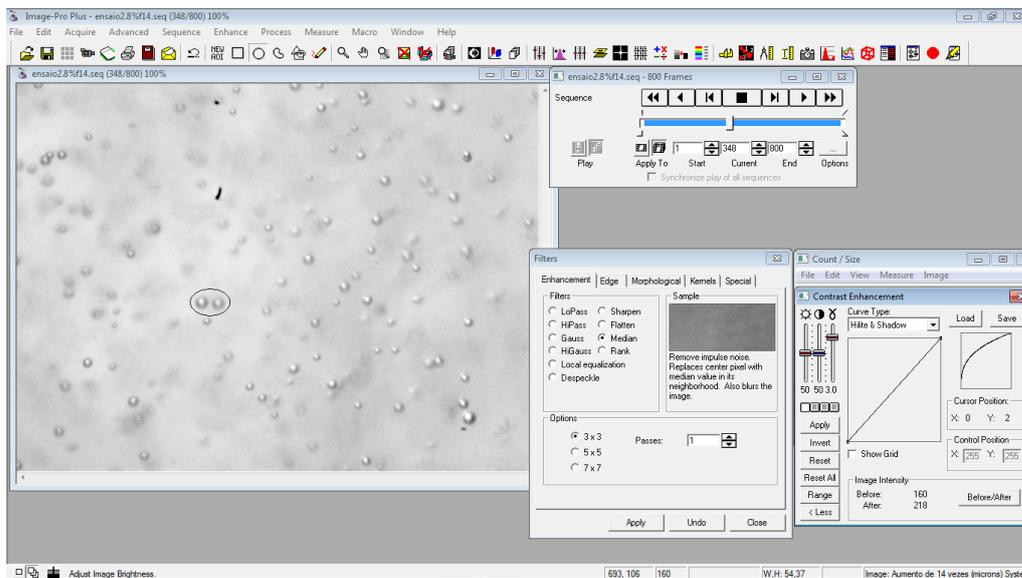


Figura 12 – Exemplo de tratamento de imagem de uma imagem das microbolhas de ar (processo similar para as partículas floculadas), aba para aplicação do filtro.

5. Etapa de binarização da imagem (ver Figura 13). Menu *measure* → *count/size*; comando *select range*. Essa binarização foi realizada a partir do histograma de intensidade fornecido.

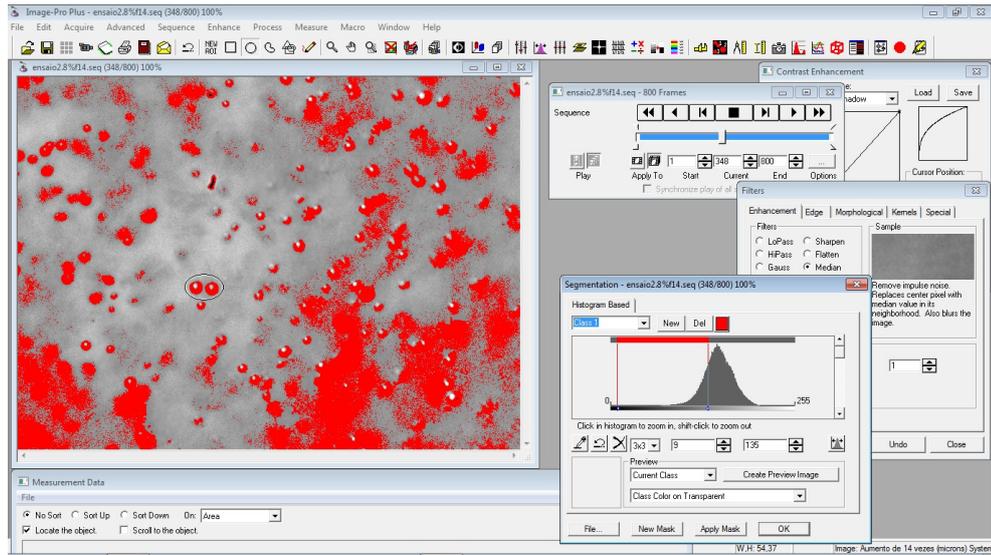


Figura 13 – Exemplo de tratamento de imagem de um frame contendo microbolhas de ar (processo similar para as partículas floculadas), etapa de binarização da imagem.

6. Caracterização da partícula (Figura 14). Menu *measure* → *count/size* → *count*. Para visualizar a visualização das medidas, o comando é localizado no menu *count/size* → aba *view* → *measurement data*.

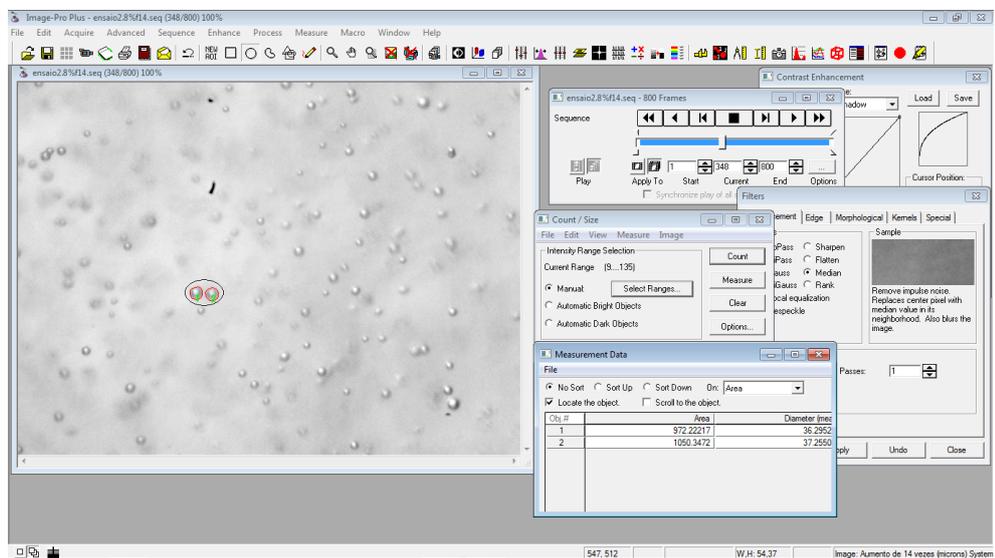


Figura 14 - Exemplo de tratamento de imagem para um frame contendo microbolhas de ar (processo similar para as partículas floculadas), aba para as medidas realizadas pelo software.

Tal procedimento foi realizado para todos os frames de todos ensaios realizados.

4.4.2.3 Parâmetros utilizados para a caracterização do tamanho das partículas

Como as microbolhas de ar são objetos esféricos, com as bordas bem definidas, foi utilizado o diâmetro médio da bolha para a caracterização da distribuição de tamanho desses objetos.

Já os flocos, não possuem as bordas bem definidas e nem possuem a forma esférica. Assim, para a caracterização do tamanho dos flocos foi utilizado o diâmetro médio de Feret. Esse diâmetro é uma medida linear do tamanho de um objeto ao longo de uma direção especificada. Em geral, pode ser definida entre os dois planos paralelos que restringem o objeto perpendicular a essa direção.

O diâmetro de Feret é um parâmetro calculado diretamente pelo software *Image-Pro Plus 7.01* (*Feret Mean*). Como já dito, o diâmetro de Feret consiste na distância paralela a uma direção fixa entre duas tangentes localizadas nos lados opostos da partícula (Figura 15). O diâmetro médio de Feret calculado pelo software é a média do diâmetro mínimo e o máximo de Feret da partícula floculada.

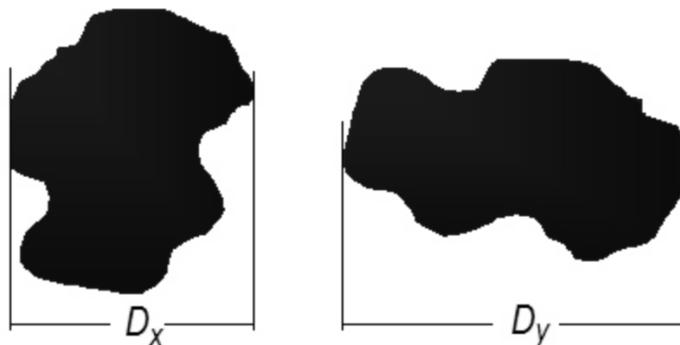


Figura 15 – Exemplo de medida do diâmetro de Feret, sendo D_x o diâmetro mínimo de Feret e D_y o diâmetro máximo. O diâmetro médio de Feret é a média aritmética entre D_x e D_y .

É ressaltado que este parâmetro foi empregado em diversas pesquisas onde houve a caracterização de partículas (PIOLTINE, 2013, MILKLI ET AL. 2001; AL_THYABAT; MILE, 2006; CONSEGLIO, 2009; PARK; KIM, T; KIM Y., 2007; GRAU; HEISKANEN, 2002; HAN; KIM T.; KIM J., 2007, entre outros).

4.5. Planejamento experimental

4.5.1. Etapa 1 – Adequação das condições de coagulação

Nesta primeira etapa do trabalho foi desenvolvido um diagrama de coagulação visando a flotação. Para isto foi empregando o aparelho Flotatest, no qual foram determinadas as condições ótimas de coagulação, dosagem de coagulante (Sulfato de Alumínio) e pH, relativos à água em estudo.

Na investigação fixou-se dez diferentes dosagens de sulfato de alumínio (DSA), sendo que para cada dosagem foi analisado sete diferentes valores de pH. Os valores de pH estudados foram, aproximadamente, os mesmos para cada DSA. Em cada uma das 70 condições optou-se o estudo em duas velocidades de flotação distintas ($v_{\text{FLOT}} = 15$ e $20 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$, equivalentes à $v_{\text{FLOT}} = 9$ e $12 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ respectivamente).

Os parâmetros fixos em todos os ensaios foram: gradiente médio de velocidade na mistura rápida ($G_{\text{MR}} = 900 \text{ s}^{-1}$); tempo médio para a mistura rápida ($T_{\text{MR}} = 20$ segundos); gradiente médio de velocidade na floculação ($G_{\text{F}} = 90 \text{ s}^{-1}$); tempo médio de floculação ($T_{\text{F}} = 15$ minutos); pressão na câmara de saturação ($P_{\text{SAT}} = 5 \text{ bar}$); temperatura da água ($\theta = 20 \pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$); e razão de recirculação ($R = 8\%$). Os valores dessas variáveis foram otimizados nas etapas posteriores.

Todas as condições estudadas nesta primeira etapa estão descritas na Tabela 5.

Tabela 5 - Esquema de ensaios previstos na Etapa 1 (diagrama de coagulação) com o estudo em duas diferentes velocidades de flotação ($v_{\text{FLOT}} = 9$ e $12 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$)

| Dosagem de Sulfato de Alumínio ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3\cdot 16,5\text{H}_2\text{O}$ | Al^{3+} (mg/L) | pH de coagulação |
|--|---|--|
| 25 | 2,32 | 6,14; 6,25; 6,39; 6,57; 6,58; 6,82; 7,01 |
| 30 | 2,79 | 5,94; 6,18; 6,45; 6,55; 6,81; 7,04; 7,14 |
| 35 | 3,25 | 6,01; 6,26; 6,30; 6,37; 6,71; 6,82; 6,90 |
| 37,5 | 3,49 | 5,80; 6,05; 6,22; 6,42; 6,47; 6,60; 6,81 |
| 40 | 3,72 | 5,87; 5,99; 6,17; 6,24; 6,48; 6,63; 6,77; 7,02 |
| 42,5 | 3,95 | 5,82; 6,07; 6,27; 6,34; 6,36; 6,53; 6,66; 6,86 |

| Dosagem de Sulfato de Alumínio (mg.L ⁻¹); Al ₂ (SO ₄) ₃ 16.5H ₂ O | Al ³⁺ (mg/L) | pH de coagulação |
|--|-------------------------|--|
| 45 | 4,18 | 5,75; 6,03; 6,23; 6,42; 6,62; 6,74; 6,91 |
| 47,5 | 4,42 | 5,78; 5,92; 6,25; 6,42; 6,54; 6,73; 6,87 |
| 50 | 4,65 | 6,00; 6,13; 6,23; 6,49; 6,52; 6,77; 6,95 |
| 55 | 5,11 | 5,70; 6,01; 6,27; 6,38; 6,52; 6,68; 6,89 |

Como resultado desta etapa foi possível obter a dosagem de sulfato ótima (DSA_{ótima}) e o pH ótimo (pH_{ótimo}), os quais foram utilizados em todas as etapas posteriores. Foi também analisado o potencial zeta (PZ) para a condição ótima.

4.5.2. Etapa 2 – Otimização das condições de Mistura Rápida

Nesse segundo momento foi realizado a adequação das condições de mistura rápida para a DSA_{ótima} e pH_{ótimo} determinados na primeira etapa. As variáveis otimizadas foram: tempo médio para a mistura rápida (T_{MR}) e gradiente médio de velocidade na mistura rápida (G_{MR}). Foram variados cinco diferentes gradientes médios de velocidade na mistura rápida (G_{MR}), sendo que para cada G_{MR} foram analisados dois diferentes valores de T_{MR}. Os valores de T_{MR} estudados foram os mesmos para cada G_{MR} e para quatro velocidades de flotação (v_{FLOT} = 10, 15, 20 e 25 cm.min⁻¹, equivalentes à v_{FLOT} = 6, 9, 12 e 15 m.h⁻¹ respectivamente).

Os parâmetros fixados foram: a dosagem ótima de sulfato de alumínio e pH obtidos na etapa 1; gradiente médio de velocidade na floculação (G_F = 90 s⁻¹); tempo médio de floculação (T_F = 15 minutos); pressão na câmara de saturação (P_{SAT} = 5 bar); temperatura da água (θ = 20 ± 0,1 °C); e razão de recirculação (R = 8%).

O esquema ilustrativo dos ensaios da Etapa 2 pode ser visualizado na Figura 16.

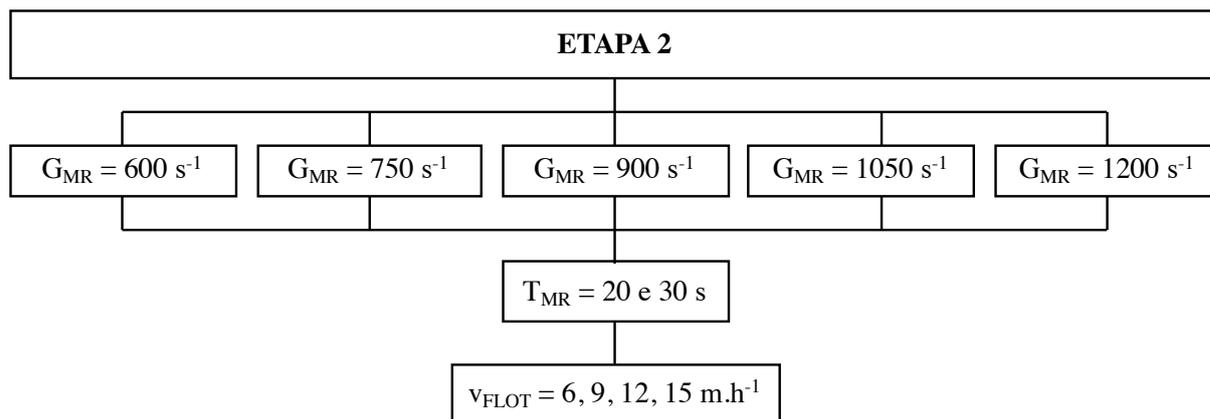


Figura 16 – Esquema de ensaios da Etapa 2, com o estudo em quatro diferentes velocidades de flotação ($v_{FLOT} = 6, 9, 12$ e 15 m.h^{-1})

4.5.3. Etapa 3 – Estudo das condições de Floculação

Nessa etapa foram investigadas 25 diferentes condições de floculação, variando tanto o gradiente médio de velocidade na floculação (G_F) quanto o tempo médio de floculação (T_F), com o objetivo de verificar a influência das condições de floculação na eficiência geral do processo FAD. Foram analisados cinco G_F , cada qual com cinco diferentes tempos médio de floculação. Cada uma das 25 condições foi avaliada para quatro velocidades de flotação ($v_{FLOT} = 10, 15, 20$ e 25 cm.min^{-1} , equivalentes à $v_{FLOT} = 6, 9, 12$ e 15 m.h^{-1} respectivamente). Nessa etapa os ensaios foram realizados em triplicata e as análises para a água tratada foram a análise de turbidez, cor aparente e absorvância em 254 nm ($UV_{254 \text{ nm}}$).

Os parâmetros fixados nesta etapa: a dosagem ótima de sulfato de alumínio e pH obtidos na etapa 1; tempo médio para a mistura rápida (T_{MR}) e gradiente médio de velocidade na mistura rápida (G_{MR}) otimizados na etapa 2; pressão na câmara de saturação ($P_{SAT} = 5 \text{ bar}$); temperatura da água ($\theta = 20 \pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$); e razão de recirculação ($R = 8\%$).

O esquema ilustrativo dos ensaios da etapa três pode ser visualizado na Figura 17.

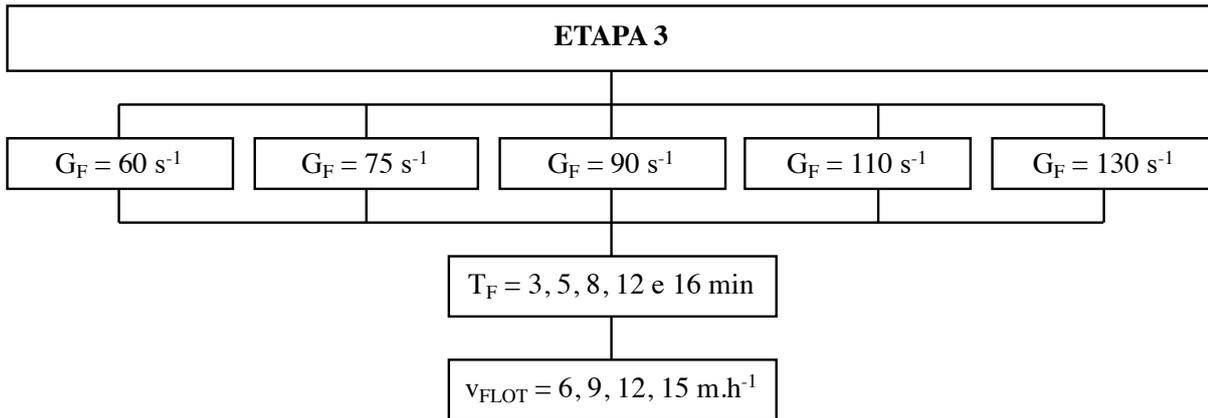


Figura 17 – Esquema de ensaios da Etapa 3 com o estudo em quatro diferentes velocidades de flotação ($v_{FLOT} = 6, 9, 12$ e 15 m/h)

4.5.4. Etapa 4 - Estudo do impacto da concentração em massa de ar dissolvido em diferentes condições de floculação

O objetivo da etapa 4 foi analisar o impacto da concentração em massa de ar dissolvido em diferentes condições de floculação na eficiência geral da FAD. Para tanto, foram variadas quatro diferentes concentrações em massa de ar dissolvido (C_b) a partir da variação da porcentagem da recirculação pressurizada (%R) utilizada. Essa recirculação foi aumentada até que, a cor aparente analisada para a água tratada, na melhor condição, ficou abaixo ou no limite de detecção do espectrofotômetro utilizado (Tabela 2). A variação da concentração em massa de ar dissolvido foi feita para 15 diferentes condições de floculação, totalizando 60 ensaios distintos nessa etapa. Assim como nas etapas anteriores foram analisadas quatro velocidades de flotação distintas ($v_{FLOT} = 10, 15, 20$ e 25 $\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$, equivalentes à $v_{FLOT} = 6, 9, 12$ e 15 $\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$ respectivamente). Os ensaios foram feitos em triplicata, totalizando, no final, 180 ensaios, cada um com 4 diferentes condições (v_{FLOT}) para a análise de turbidez, cor aparente e absorvância em 254 nm.

Os parâmetros fixados: a dosagem ótima de sulfato de alumínio e pH obtidos na etapa 1; tempo médio para a mistura rápida (T_{MR}) e gradiente médio de velocidade para mistura rápida (G_{MR}) otimizados na etapa 2; pressão na câmara de saturação ($P = 5$ bar) e temperatura da água ($\theta = 20 \pm 0,1$ °C). A porcentagem da recirculação pressurizada foi variada para a variação da concentração em massa de ar dissolvido; as quatro recirculações analisadas foram 6, 8, 10 e

12 %, equivalentes a uma concentração de massa em ar dissolvido de 6,84; 8,96; 10,99 e 12,96 mg.L^{-1} respectivamente. O esquema está ilustrado na Figura 18.

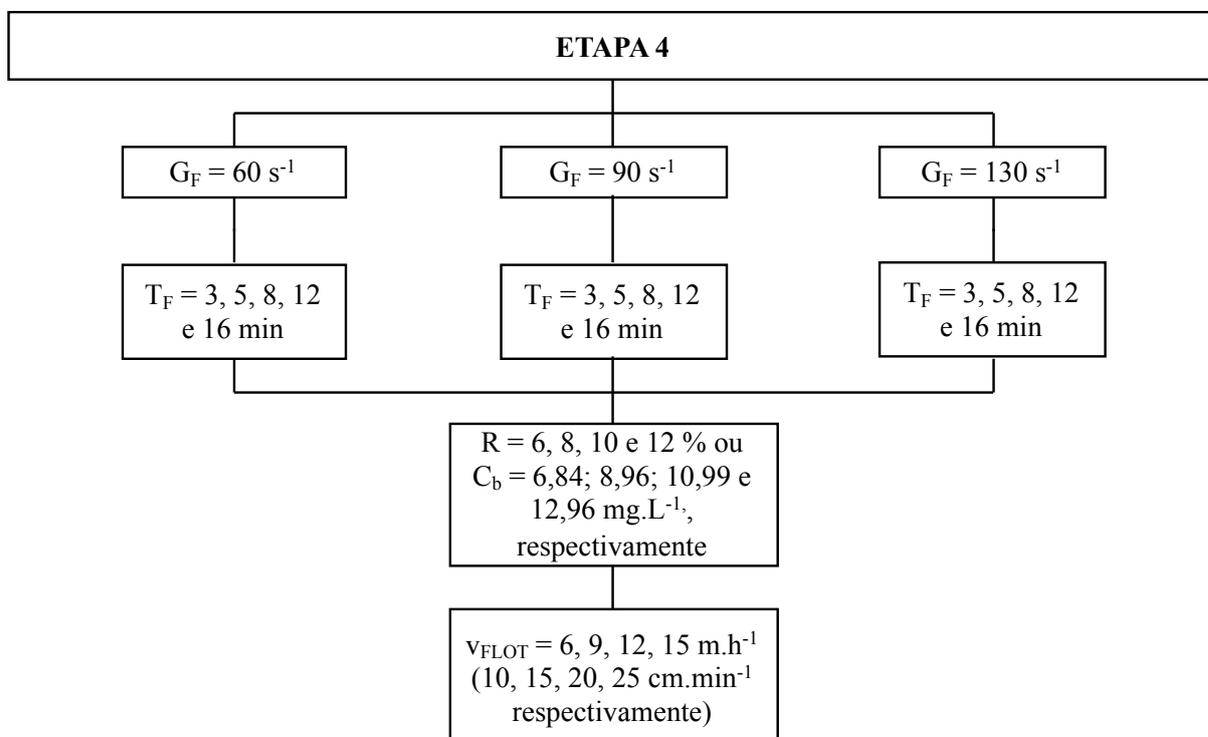


Figura 18 – Esquema de ensaios da Etapa 4 com o estudo em quatro diferentes velocidades de flotação ($v_{\text{FLOT}} = 6, 9, 12$ e 15 m/h)

4.5.5. Etapa 5

Nesta última etapa experimental foi previsto a aquisição de imagem em laboratório para a posterior análise da distribuição dos tamanhos dos flocos e das microbolhas de ar. Para tanto, a metodologia para a aquisição e a análise está descrita no passo a passo do item 4.4.

Foram analisadas 15 condições de floculação, a qual acarretou 15 diferentes condições para as partículas floculadas. Para a análise da distribuição do tamanho das partículas floculadas escolheu-se as condições de floculação que foram estudadas tanto na etapa 3 como na etapa 4, como consta na Figura 19.

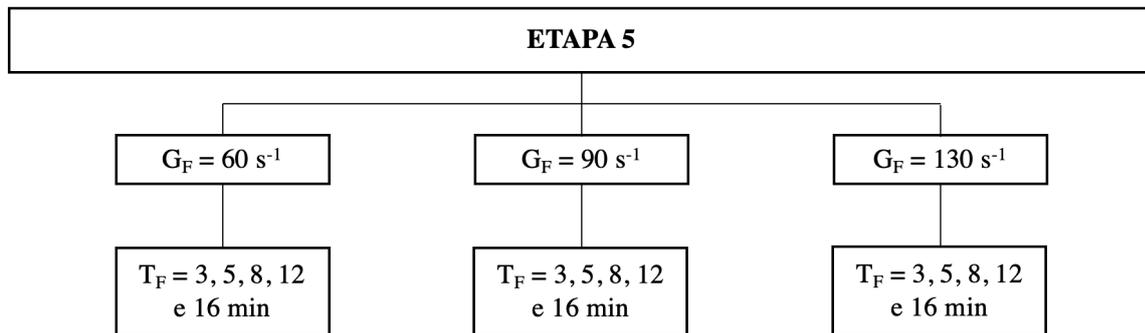


Figura 19 – Condições analisadas para a aquisição de imagens em escala de laboratório para as partículas floculadas.

Os parâmetros fixados: a dosagem ótima de sulfato de alumínio e pH ótimo obtidos na etapa 1; tempo médio para a mistura rápida (T_{MR}) e gradiente médio de velocidade para mistura rápida (G_{MR}) otimizados na etapa 2 e temperatura da água sintética ($\theta = 20 \pm 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$).

A aquisição de imagens para cada uma das 15 condições analisadas para as partículas floculadas foi realizada em triplicata e na ausência de luminosidade externa, já que foi notado que esta condição facilitava a análise das imagens. Como já dito, em cada um dos 45 ensaios foi adquirido 160 imagens das partículas floculadas.

Para as microbolhas de ar, foram analisadas as 4 condições diferentes estudadas na etapa 4, como retratado na Figura 20. Para a análise das microbolhas de ar os parâmetros fixados foram: a temperatura da água sintética ($\theta = 20 \pm 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$) e a pressão na câmara de saturação ($P = 5 \text{ bar}$).

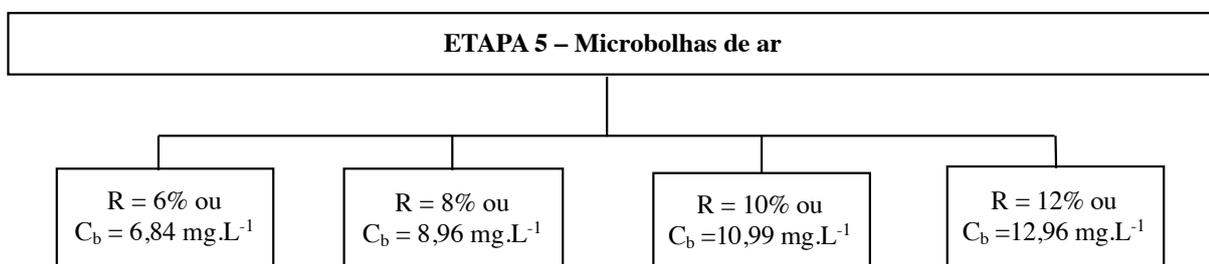


Figura 20 – Condições analisadas para a aquisição de imagens em escala de laboratório para as microbolhas de ar.

A aquisição das imagens das microbolhas de ar foi feita em triplicata para cada uma das quatro condições retratadas na Figura 20.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Etapa 1 – Adequação das condições de coagulação

Como resultado dos 70 ensaios realizados, foram feitos três diagramas de coagulação para cada uma das duas velocidades de flotação estudadas. Nas Figuras 21 a 23 são representados os diagramas para a velocidade de flotação = $20 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ ($12 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$) para remoção de cor aparente, $\text{UV}_{254 \text{ nm}}$ e turbidez respectivamente. Nas Figuras 24 a 26 são os diagramas para a velocidade de flotação de $15 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ ($9 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$) para os mesmos parâmetros.

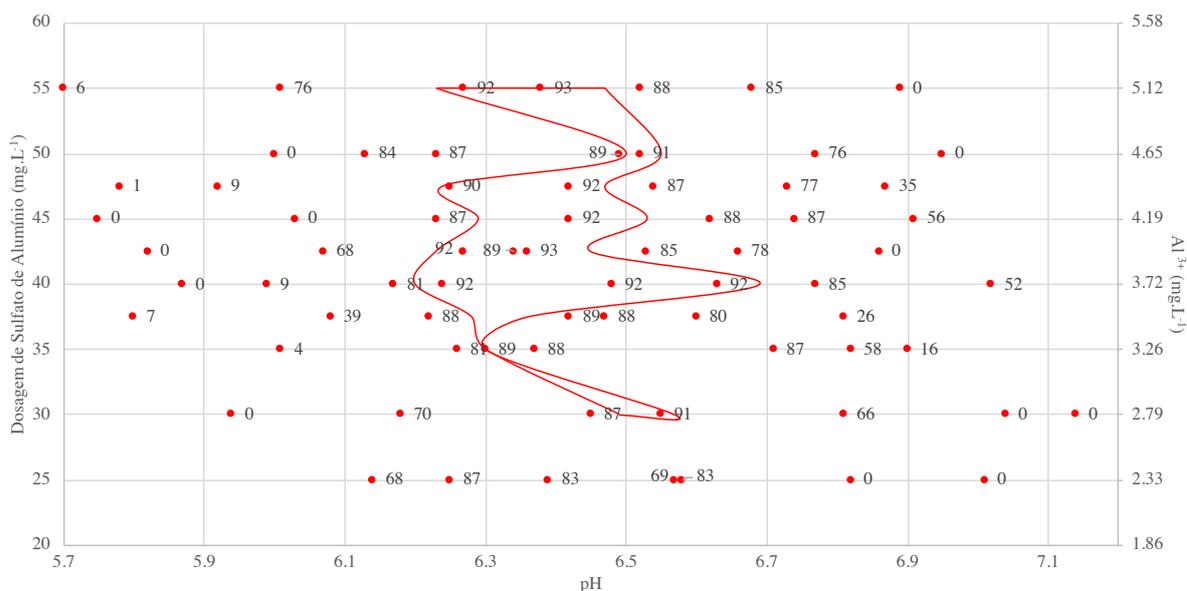


Figura 21 – Diagrama de Coagulação para a eficiência (%) de remoção da cor aparente com $v_{\text{FLOT}} = 20 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$. Interior da região delimitada corresponde à eficiência superior à 90% ($G_{\text{MR}} = 900 \text{ s}^{-1}$; $T_{\text{MR}} = 20$ segundos; $G_{\text{F}} = 90 \text{ s}^{-1}$; $T_{\text{F}} = 15$ minutos; $P_{\text{SAT}} = 5$ bar; $\theta = 20$ °C; $R = 8\%$).

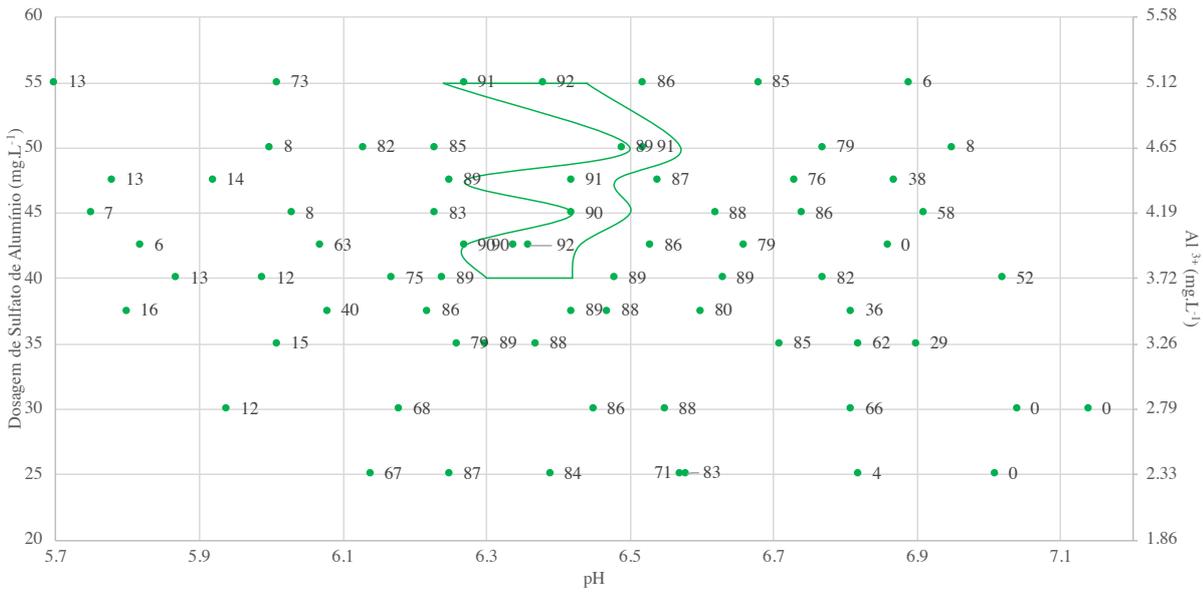


Figura 22 – Diagrama de Coagulação para a eficiência (%) de remoção de UV_{254nm} com v_{FLOT} = 20 cm.min⁻¹. Interior da região delimitada corresponde à eficiência superior à 90% (G_{MR} = 900 s⁻¹; T_{MR} = 20 segundos; G_F = 90 s⁻¹; T_F = 15 minutos; P_{SAT} = 5 bar; θ = 20 °C; R = 8%).

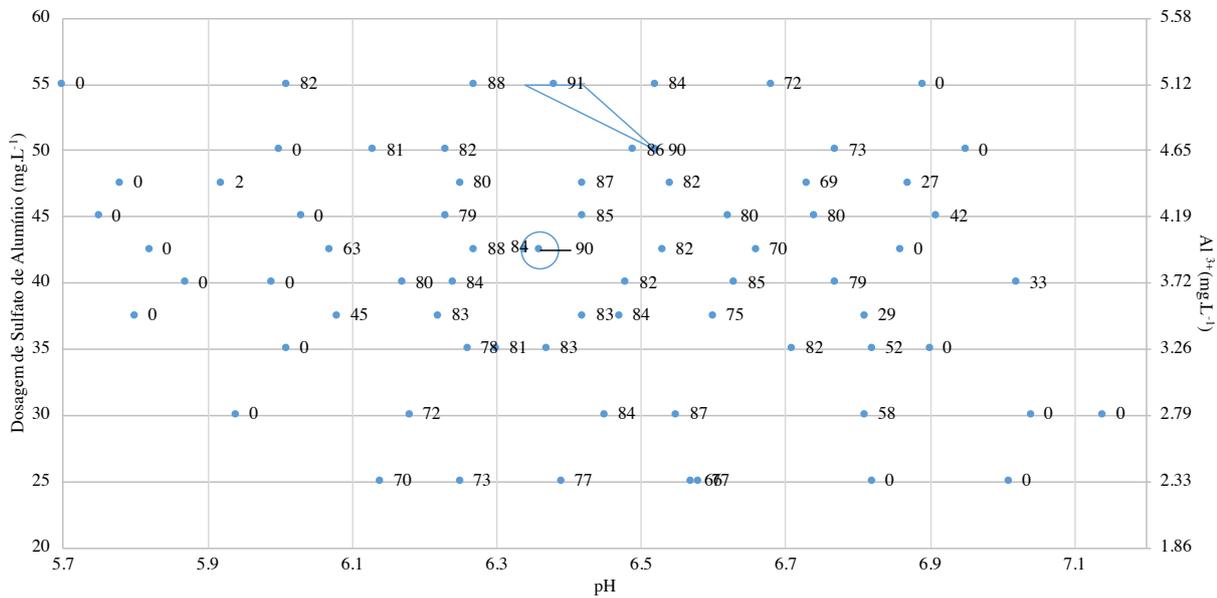


Figura 23 – Diagrama de Coagulação para a eficiência (%) de remoção de Turbidez com v_{FLOT} = 20 cm.min⁻¹. Interior da região delimitada corresponde à eficiência superior à 90% (G_{MR} = 900 s⁻¹; T_{MR} = 20 segundos; G_F = 90 s⁻¹; T_F = 15 minutos; P_{SAT} = 5 bar; θ = 20 °C; R = 8%).

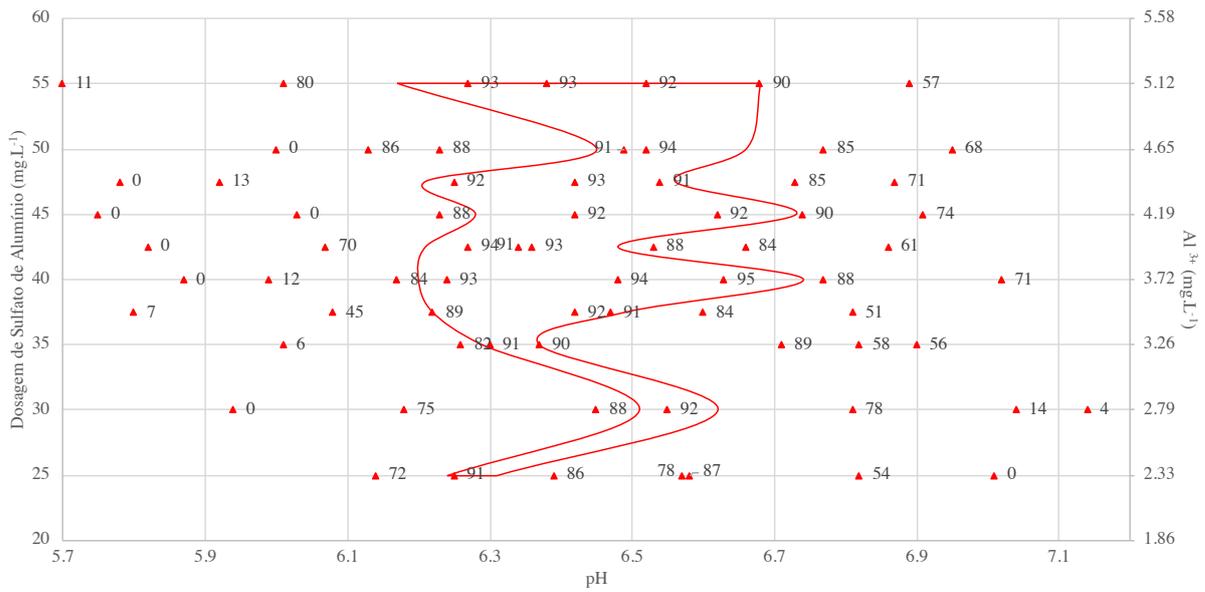


Figura 24 – Diagrama de Coagulação para a eficiência (%) de remoção da cor aparente com $v_{FLOT} = 15 \text{ cm.min}^{-1}$. Interior da região delimitada corresponde à eficiência superior à 90% ($G_{MR} = 900 \text{ s}^{-1}$; $T_{MR} = 20$ segundos; $G_F = 90 \text{ s}^{-1}$; $T_F = 15$ minutos; $P_{SAT} = 5 \text{ bar}$; $\theta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; $R = 8\%$).

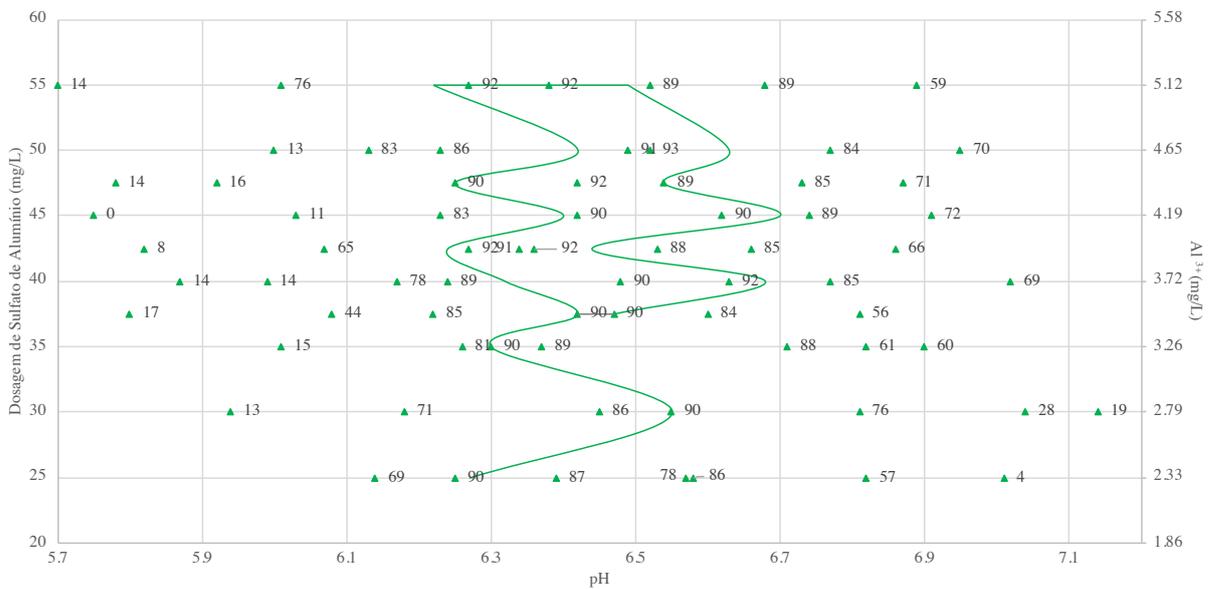


Figura 25 – Diagrama de Coagulação para a eficiência (%) de remoção de $UV_{254 \text{ nm}}$ com $v_{FLOT} = 15 \text{ cm.min}^{-1}$. Interior da região delimitada corresponde à eficiência superior à 90% ($G_{MR} = 900 \text{ s}^{-1}$; $T_{MR} = 20$ segundos; $G_F = 90 \text{ s}^{-1}$; $T_F = 15$ minutos; $P_{SAT} = 5 \text{ bar}$; $\theta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; $R = 8\%$).

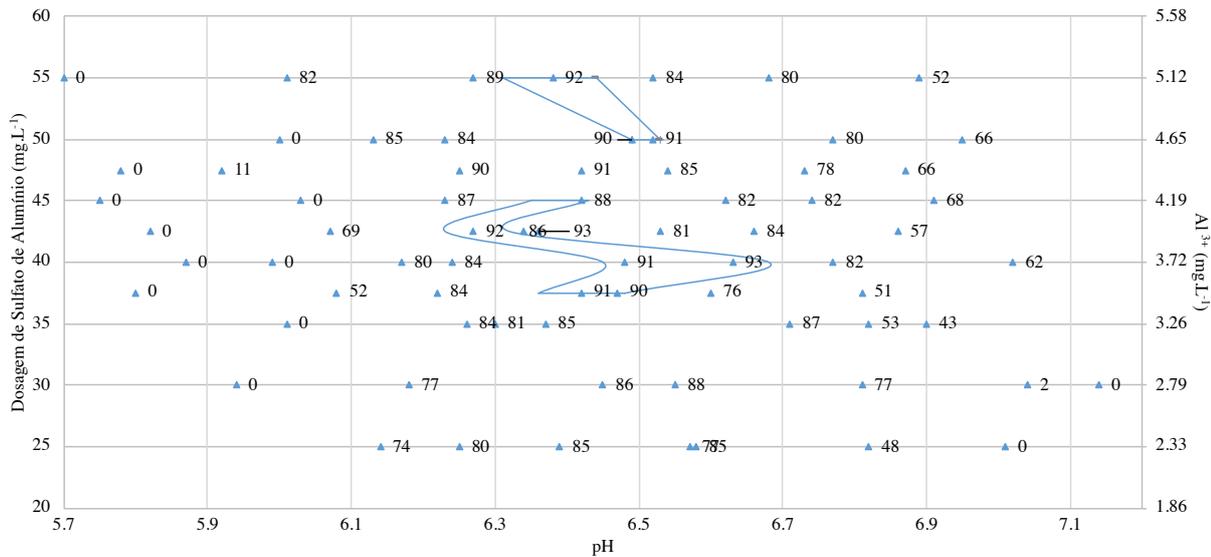


Figura 26 – Diagrama de Coagulação para a eficiência (%) de remoção de Turbidez com $v_{FLOT} = 15 \text{ cm.min}^{-1}$. Interior da região delimitada corresponde à eficiência superior à 90% ($G_{MR} = 900 \text{ s}^{-1}$; $T_{MR} = 20 \text{ segundos}$; $G_F = 90 \text{ s}^{-1}$; $T_F = 15 \text{ minutos}$; $P_{SAT} = 5 \text{ bar}$; $\theta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; $R = 8\%$).

Como resultado dos diagramas de coagulação foi obtido o par ótimo de dosagem de coagulante e pH para o restante do estudo. Para a água sintética de estudo optou-se pelo par **DSA = 40 mg.L⁻¹ (Al³⁺ = 3,72 mg.L⁻¹) e pH = 6,4**.

Como pode ser visto nas Figura 21 e 22, a dosagem de 40 mg.L⁻¹ foi a primeira que forneceu mais de um resultado com eficiência superior a 90% para $v_{FLOT} = 20 \text{ cm.min}^{-1}$. Para $v_{FLOT} = 15 \text{ cm.min}^{-1}$, esse par também chegou a uma remoção maior de 90% em relação à turbidez. É importante notar que uma variação pequena de pH em torno de 6,4, na dosagem de 40 mg.L⁻¹, resultou em eficiências próximas, tanto em relação à remoção de cor aparente e UV_{254 nm} como de turbidez.

Nessa condição de coagulação (pH = 6,4 e DSA = 40 mg.L⁻¹, correspondente a 3,72 Al³⁺ mg.L⁻¹), o PZ da água estudada foi de $2 \pm 3 \text{ mV}$.

5.2. Etapa 2 – Otimização das condições de Mistura Rápida

Para a análise de cada condição de mistura rápida investigada, foram coletadas as amostras em quatro intervalos de tempo distintos, de forma que as amostras correspondessem as seguintes velocidades de flotação, $v_{FLOT} = 25, 20, 15$ e 10 cm.min^{-1} , ou $v_{FLOT} = 15, 12, 9$ e 6 m.h^{-1} . Foram analisados cinco gradientes de mistura rápida (600, 750, 900, 2050 e 1150 s^{-1}) cada um com dois tempos de coagulação (20 e 30 segundos).

Para determinar qual G_{MR} e T_{TM} que seria utilizado nos estudos a posteriori, analisou-se a eficiência de remoção da cor aparente (Figura 27), a remoção da absorbância em 254 nm (Figura 28) e a remoção da turbidez (Figura 29).

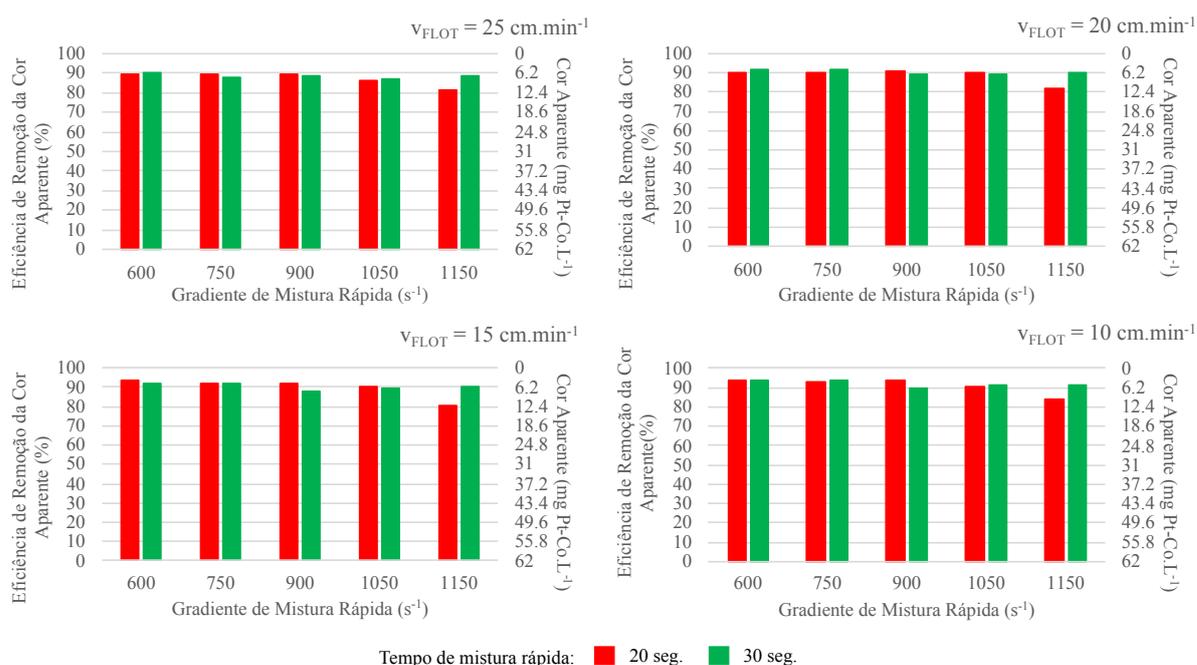


Figura 27 – Eficiência de Remoção da Cor Aparente (%) para a variação do G_{MR} e T_{MR} . (DSA = 40 mg.L^{-1} ; $\text{pH}_{\text{coag.}} = 6,40$; $G_F = 90 \text{ s}^{-1}$; $T_F = 15$ minutos; $P_{\text{SAT}} = 5 \text{ bar}$; $\theta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $R = 8\%$).

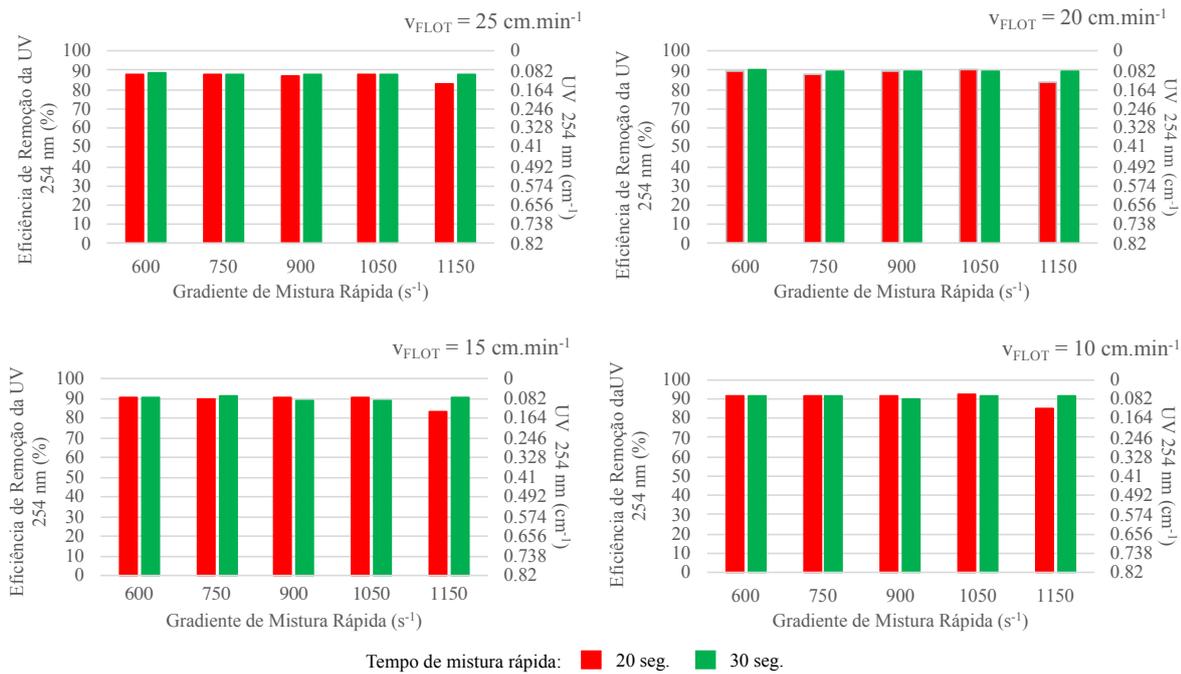


Figura 28 – Eficiência de Remoção da Absorbância em 254 nm (%) para a variação do G_{MR} e T_{MR}. (DSA = 40 mg.L⁻¹; pH_{coag.} = 6,40; G_F = 90 s⁻¹; T_F = 15 minutos; P_{SAT} = 5 bar; θ = 20 °C, R = 8%).

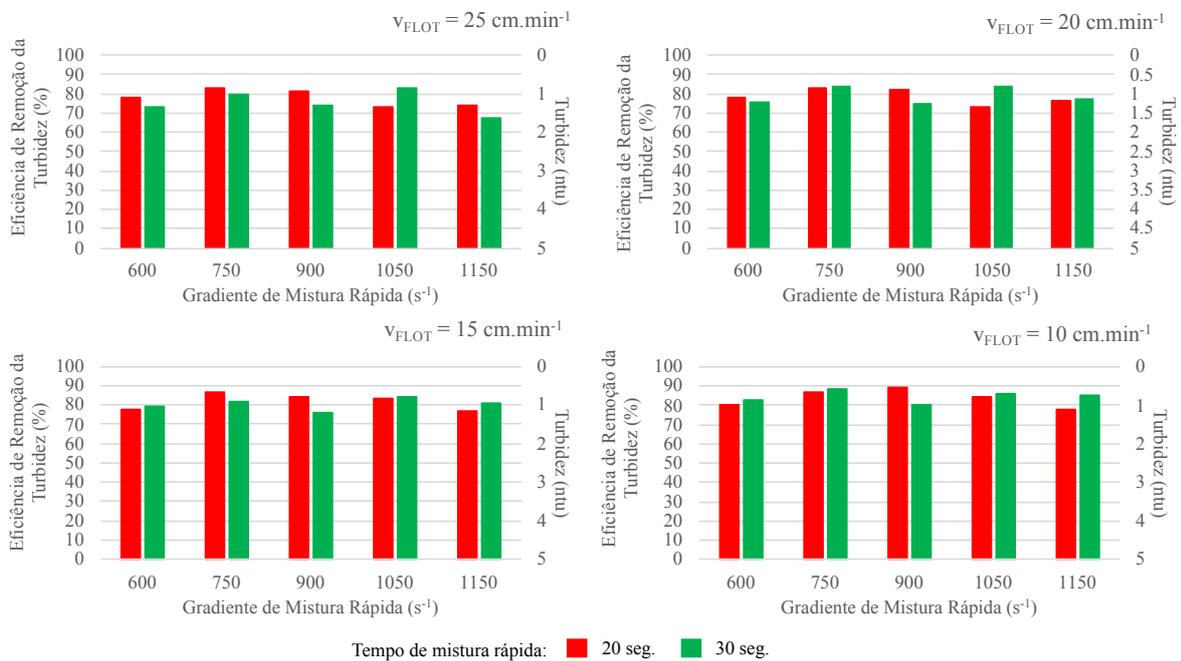


Figura 29 – Eficiência de Remoção da Turbidez (%) para a variação do G_{MR} e T_{MR}. (DSA = 40 mg.L⁻¹; pH_{coag.} = 6,40; G_F = 90 s⁻¹; T_F = 15 minutos; P_{SAT} = 5 bar; θ = 20 °C; R = 8%).

A partir dos gráficos das Figuras 27 a 29 o par escolhido para a realização dos ensaios das etapas seguintes foi **G_{MR} = 900 s⁻¹** e **T_{MR} = 20 segundos**, já que, em geral, foi o par que resultou

na maior eficiência nas três variáveis analisadas (Cor Aparente, Turbidez e Absorbância em 254 nm) e nas velocidades consideradas.

Visualmente, para a água em estudo, é notado que o impacto das condições da etapa de coagulação foi maior na remoção de turbidez. Nesta variável (para a maior velocidade de flotação estudada, $v_{\text{FLOT}} = 25 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$), a pior condição ($G_{\text{MR}} = 1150 \text{ s}^{-1}$ e $T_{\text{MR}} = 30 \text{ seg.}$) resultou numa eficiência de 68%, enquanto que as melhores condições ($G_{\text{MR}} = 750 \text{ s}^{-1}$ e $T_{\text{MR}} = 20 \text{ seg.}$; $G_{\text{MR}} = 900 \text{ s}^{-1}$ e $T_{\text{MR}} = 20 \text{ seg.}$; $G_{\text{MR}} = 750 \text{ s}^{-1}$ e $T_{\text{MR}} = 30 \text{ seg.}$; $G_{\text{MR}} = 1050 \text{ s}^{-1}$ e $T_{\text{MR}} = 30 \text{ seg.}$) atingiram eficiências superiores à 80 %.

Em geral, o maior valor do gradiente médio de velocidade na mistura rápida ($G_{\text{MR}} = 1150 \text{ s}^{-1}$) resultou nas piores eficiências para todos parâmetros qualitativos analisados em todas as velocidades consideradas.

Em relação à remoção de cor aparente e $UV_{254 \text{ nm}}$, os quatro menores G_{MR} ($G_{\text{MR}} = 600; 750; 900; 1050 \text{ s}^{-1}$) possuíram comportamento similar tanto para o tempo de 20 como para o de 30 segundos.

5.3. Etapa 3 – Estudo das condições de Floculação

Como já dito, nesta etapa foram investigadas 25 condições de floculação, variando o gradiente médio de velocidade $G_F = 60, 75, 90, 110$ e 130 s^{-1} para cinco diferentes tempos médio de floculação ($T_F = 3, 5, 8, 12$ e 16 minutos). Cada uma das 25 condições foi avaliada para quatro velocidades de flotação ($v_{\text{FLOT}} = 10, 15, 20$ e $25 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$, equivalentes à $v_{\text{FLOT}} = 6, 9, 12$ e $15 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ respectivamente), em relação a remoção de cor aparente, absorvância em 254 nm e turbidez.

Os resultados dessa etapa estão nas Figuras 30 a 32. No gráfico da Figura 30 está apresentado o resultado em termos da fração residual de cor aparente para as 25 condições de floculação e para as quatro velocidades de flotação estudadas. No da Figura 31, condições similares em respeito à remoção de $UV_{254 \text{ nm}}$ e no da Figura 32, em relação à turbidez.

Como a quantidade de ar dissolvido fornecida para o processo foi fixada ($R = 8 \%$) a intenção dessa etapa foi a análise, somente, de como as condições de floculação interferiram no processo.

Inicialmente, é importante notar que uma fração residual inferior a 10% ($0,1$) corresponde a um efluente de ótima qualidade em relação aos indicadores estéticos e indiretos da qualidade da água. Este residual corresponde a uma cor aparente $\leq 6,2 \text{ mg Pt-Co}\cdot\text{L}^{-1}$, turbidez $\leq 0,5 \text{ NTU}$ e $UV_{254 \text{ nm}} \leq 0,082 \text{ cm}^{-1}$, valores esses considerados ótimos a excelentes não só para a etapa de clarificação (objeto deste estudo) como até mesmo para o efluente final de uma ETA na totalidade das legislações mundiais. O residual de 25% ($0,25$) para a cor aparente já atende a legislação brasileira e da União Europeia para a qualidade do efluente final para tal parâmetro.

É importante salientar ainda que a Flotação por Ar Dissolvido normalmente não é o processo final de tratamento de água, mas sim um processo intermediário com o objetivo da clarificação da água bruta. Entretanto, quanto maior a eficiência de remoção é obtida com a FAD, menor a sobrecarga nos processos mais nobres que a sucedem.

Para as análises estatísticas dessa seção foi utilizado o teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis, os resultados de todos os testes realizados encontram-se no Apêndice B. Utilizou-se deste teste não-paramétrico já que não eram atendidas todas as premissas necessárias para a

realização do teste paramétrico One-Way ANOVA em todas as situações. A partir dessa etapa todos os ensaios foram feitos em triplicatas.

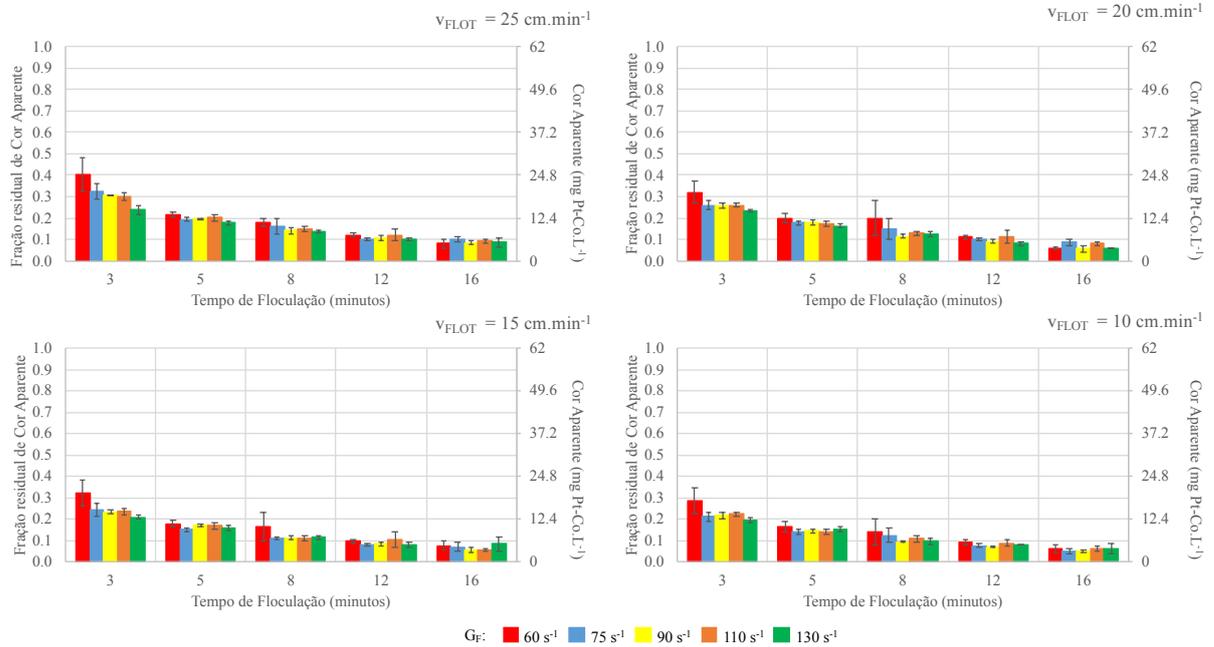


Figura 30 – Fração residual da Cor Aparente para a variação do G_F e T_F com barras do desvio padrão para cada velocidade de flotação estudada, $v_{FLOT} = 25, 20, 15$ e 10 cm.min^{-1} ($DSA = 40 \text{ mg.L}^{-1}$; $\text{pH}_{\text{coag.}} = 6,40$; $G_{MR} = 900 \text{ s}^{-1}$; $T_{MR} = 20$ segundos; $P_{SAT} = 5 \text{ bar}$; $\theta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; $R = 8\%$).

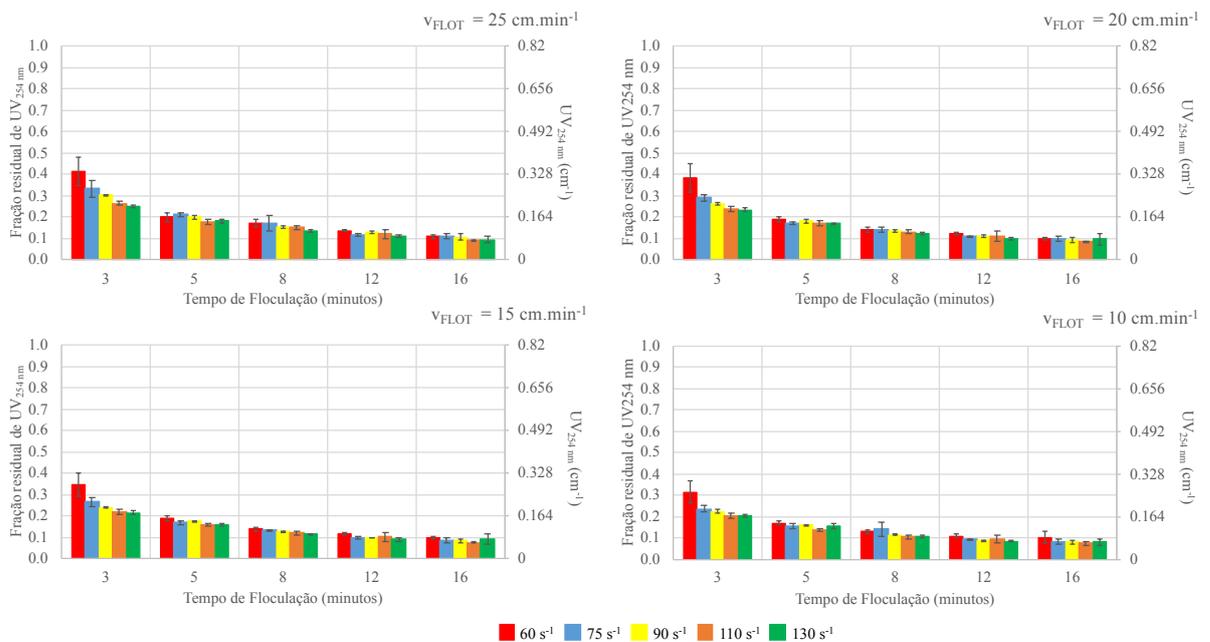


Figura 31 – Fração residual da $UV_{254 \text{ nm}}$ para a variação do G_F e T_F com barras do desvio padrão para cada velocidade de flotação estudada, $v_{FLOT} = 25, 20, 15$ e 10 cm.min^{-1} ($DSA = 40 \text{ mg.L}^{-1}$; $\text{pH}_{\text{coag.}} = 6,40$; $G_{MR} = 900 \text{ s}^{-1}$; $T_{MR} = 20$ segundos; $P_{SAT} = 5 \text{ bar}$; $\theta = 20^\circ\text{C}$; $R = 8\%$).

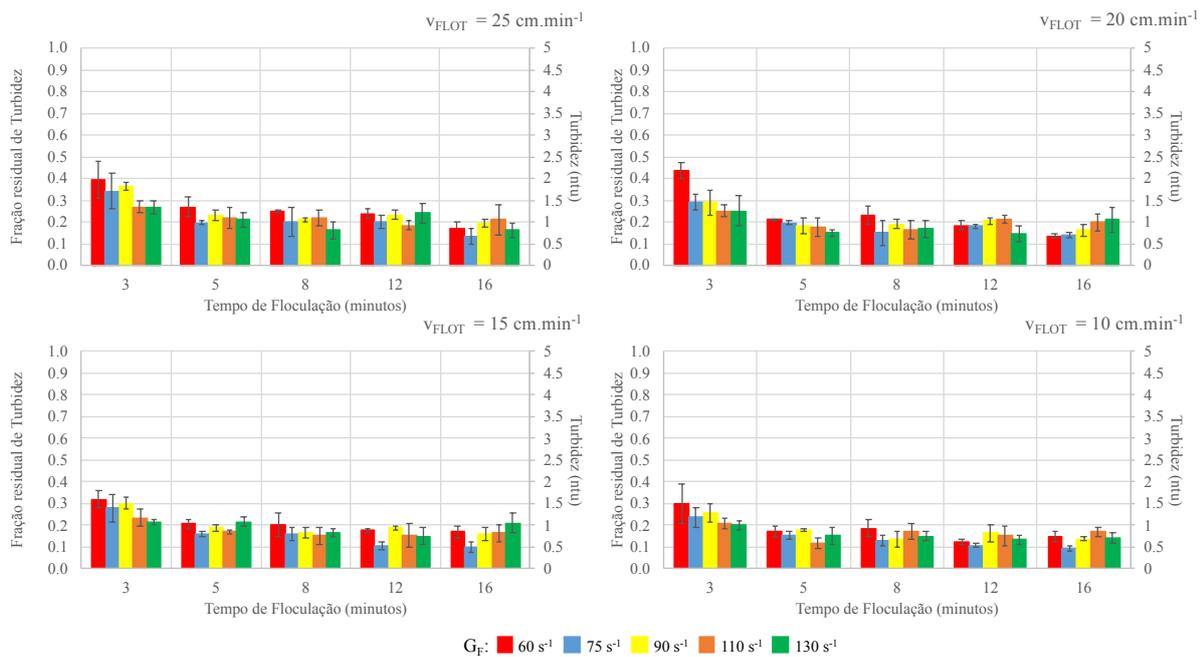


Figura 32 – Fração residual de Turbidez para a variação do G_F e T_F com barras do desvio padrão para cada velocidade de flotação estudada, $v_{FLOT} = 25, 20, 15$ e 10 cm.min⁻¹ (DSA = 40 mg.L⁻¹; $pH_{coag.} = 6,40$; $G_{MR} = 900$ s⁻¹; $T_{MR} = 20$ segundos; $P_{SAT} = 5$ bar; $\theta = 20^\circ\text{C}$; $R = 8\%$).

Com o menor tempo de floculação estudado ($T_F = 3$ minutos), foi visivelmente notada a influência do gradiente médio de velocidade na floculação na eficiência do processo de Flotação por Ar Dissolvido para os três parâmetros de qualidade analisados. A eficiência do processo cresceu à medida que o valor G_F aumentou. Este ganho de eficiência teve maior intensidade para a maior velocidade de flotação e decresceu até a velocidade menor. Em relação à cor aparente, para $v_{FLOT} = 25$ cm.min⁻¹, com $G_F = 60$ s⁻¹ (menor G_F estudado), a eficiência do processo resultou em uma fração residual de 0,40 (25 ± 5 mg Pt-Co.L⁻¹). Já com o $G_F = 130$ s⁻¹ (maior G_F considerado), a fração residual foi de 0,24 ($14,9$ mg Pt-Co.L⁻¹). Com a menor velocidade de flotação (10 cm.min⁻¹), estes valores foram reduzidos para 0,29 (18 ± 4 mg Pt-Co.L⁻¹) e 0,20 ($12,4 \pm 0,6$ mg Pt-Co. L⁻¹). Tendências similares foram observadas para a absorção em 254 nm e para a turbidez. Com o $G_F = 60$ s⁻¹, o residual foi de $0,34 \pm 0,06$ cm⁻¹ em relação a UV_{254nm} e, $2,0 \pm 0,4$ NTU, para a turbidez, ambos com $v_{FLOT} = 25$ cm.min⁻¹. Enquanto que para $G_F = 130$ s⁻¹, a fração residual de UV_{254nm} foi de $0,205 \pm 0,001$ cm⁻¹ e a turbidez de $1,3 \pm 0,2$ NTU, com $v_{FLOT} = 25$ cm.min⁻¹.

Para $T_F = 5$ minutos, curiosamente todos os valores de G_F forneceram estatisticamente a mesma eficiência (Apêndice B). Em outras palavras, para uma v_{FLOT} fixada, não há diferença nos resultados obtidos com a aplicação dos cinco valores de gradientes médios de velocidade na

floculação nos três parâmetros de qualidade analisados. Com relação à cor aparente, com $v_{\text{FLOT}} = 25 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$, o residual médio dos cinco valores de G_{F} foi de $12 \pm 1 \text{ mg Pt-Co}\cdot\text{L}^{-1}$ (19%). Com $v_{\text{FLOT}} = 10 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$, o residual diminuiu à $9 \pm 1 \text{ mg Pt-Co}\cdot\text{L}^{-1}$. Neste caso, aponta-se que todas as frações residuais de cor estudadas, já são inferiores aos residuais finais para uma água destinada ao consumo humano, recomendação essa tanto pela legislação brasileira quanto pela OMS (ressaltando novamente que essas exigências se referem à qualidade após as etapas de clarificação, filtração e desinfecção final da água e, não após a clarificação por flotação, que é o caso deste estudo). Similarmente, para a absorção em $\text{UV}_{254\text{nm}}$ essa fração residual foi de $0,17 \pm 0,02 \text{ cm}^{-1}$ ($v_{\text{FLOT}} = 25 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$) e de $0,13 \pm 0,02 \text{ cm}^{-1}$ ($v_{\text{FLOT}} = 10 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$). Para a turbidez, $1,1 \pm 0,2 \text{ NTU}$ para a maior v_{FLOT} e $0,8 \pm 0,2 \text{ NTU}$ para a menor.

Embora os gráficos das Figuras 30 a 32 indiquem um ligeiro aumento na eficiência da FAD para os valores de G_{F} maiores que 90 s^{-1} e para um T_{F} até 12 minutos, a análise estatística não permitiu tal afirmação. Para cada $T_{\text{F}} = 8, 12$ e 16 minutos considerado individualmente, e para uma v_{FLOT} fixada, a eficiência, neste estudo, foi a mesma para todos os valores de G_{F} estudados, tanto em relação à remoção da cor aparente quanto para a remoção da $\text{UV}_{254\text{nm}}$ e da turbidez. Além disso, a remoção de cor aparente foi igual para as três menores velocidades de flotação ($v_{\text{FLOT}} = 20, 15$ e $10 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$) em cada valor de $T_{\text{F}} = 8, 12$ e 16 min.

Com $T_{\text{F}} = 8$ minutos, a remoção de cor aparente foi $9 \pm 1 \text{ mg Pt-Co}\cdot\text{L}^{-1}$ para $v_{\text{FLOT}} = 25 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ e $8 \pm 2 \text{ mg Pt-Co}\cdot\text{L}^{-1}$ para $v_{\text{FLOT}} \leq 20 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$. Para $T_{\text{F}} = 12$ minutos, esses valores foram de $7 \pm 1 \text{ mg Pt-Co}\cdot\text{L}^{-1}$ ($v_{\text{FLOT}} = 25 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$) e $6 \pm 1 \text{ mg Pt-Co}\cdot\text{L}^{-1}$ ($v_{\text{FLOT}} \leq 20 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$). Para, $T_{\text{F}} = 16$ minutos, $5 \pm 1 \text{ mg Pt-Co}\cdot\text{L}^{-1}$ ($v_{\text{FLOT}} = 25 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$) e $4 \pm 1 \text{ mg Pt-Co}\cdot\text{L}^{-1}$ ($v_{\text{FLOT}} \leq 20 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$). É importante notar que o tempo de floculação interferiu de forma mais marcante na eficiência do processo; à medida que o tempo de floculação aumentou, houve um ligeiro acréscimo na eficiência.

É interessante comentar que para os três maiores valores de G_{F} ($90, 110$ e 130 s^{-1}), a partir de 12 min a remoção de cor aparente foi igual para a mesma velocidade de flotação considerada. Logo, a eficiência de remoção no que tange a remoção de cor aparente foi independente do G_{F} empregado (para a água estudada) quando os valores de G_{F} foram superiores ou iguais a 90 s^{-1} e em tempos de floculação superiores ou igual a 12 minutos.

Para $\text{UV}_{254 \text{ nm}}$, a tendência foi a mesma. A partir de 12 minutos de floculação e com G_{F} maior ou igual a 90 s^{-1} , a eficiência geral do processo foi igual, para cada v_{FLOT} analisada

separadamente. Dessa maneira, a partir desse resultado e considerando a água de estudo analisada, seria possível cogitar na diminuição do tempo de floculação para 12 minutos e para o valor de G_F de 90 s^{-1} para a remoção da cor aparente e de $UV_{254\text{nm}}$ sem comprometer a eficiência do processo FAD.

No que concerne a turbidez, é interessante notar que, para uma dada velocidade de flotação, todos os resultados com $T_F \geq 8$ minutos apresentaram-se estatisticamente semelhantes, independente do G_F empregado. Na situação com a maior v_{FLOT} empregada, a turbidez residual média foi de $(1,0 \pm 0,2)$ NTU e para a menor v_{FLOT} de $(0,7 \pm 0,1)$ NTU.

5.4. Etapa 4 – Estudo da Concentração em massa de ar dissolvido em diferentes condições de floculação

Para verificar a possível influência da concentração em massa de ar dissolvido em diferentes condições de floculação na eficiência geral da FAD, foram variadas quatro concentrações em massa de ar dissolvido, cada uma para 15 condições distintas de floculação e em quatro velocidades ($v_{\text{FLOT}} = 25, 20, 15$ e $10 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ equivalentes à $v_{\text{FLOT}} = 6, 9, 12$ e $15 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ respectivamente).

Para análise dos resultados, optou-se por analisar os três parâmetros de qualidade da água (cor aparente, $UV_{254 \text{ nm}}$ e a turbidez) em cada velocidade de flotação. Os resultados para a $v_{\text{FLOT}} = 25 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ estão nos gráficos das Figuras 33 a 35; para $v_{\text{FLOT}} = 20 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$, Figuras 36 a 38; para $v_{\text{FLOT}} = 15 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$, Figuras 39 a 41; para $v_{\text{FLOT}} = 10 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$, Figuras 42 a 44.

Essa etapa teve como objetivo complementar a análise realizada na etapa três, por meio da comparação das condições de floculação conjuntamente com a modificação da quantidade de ar dissolvido (microbolhas) fornecida ao sistema.

Para a variação da C_b foi variada a porcentagem da recirculação pressurizada (%R). As quatro recirculações analisadas foram 6, 8, 10 e 12 %, equivalentes a uma concentração em massa de ar dissolvido de 6,84; 8,96; 10,99 e 12,96 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, valores habituais para o tratamento de água de abastecimento.

Semelhantemente à etapa anterior, as análises estatísticas foram feitas utilizando o teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis, os resultados de todos os testes realizados encontram-se no Apêndice C.

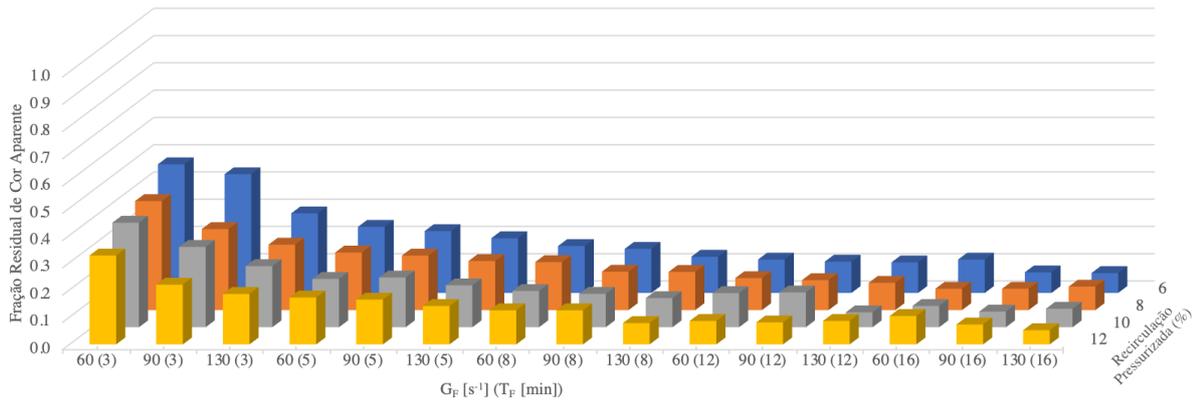


Figura 33 – Fração residual de Cor Aparente para a velocidade de $25 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$, com variações no gradiente médio de velocidade na floculação (G_F), tempo de floculação (T_F) e a recirculação pressurizada ($DSA = 40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; $\text{pH}_{\text{coag.}} = 6,40$; $G_{MR} = 900 \text{ s}^{-1}$; $T_{MR} = 20$ segundos; $P_{SAT} = 5$ bar; $\theta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$).

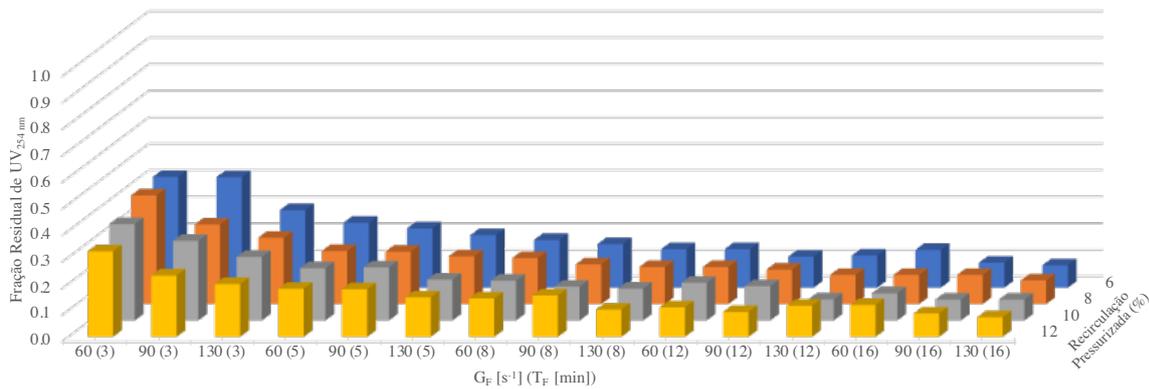


Figura 34 - Fração residual de $UV_{254 \text{ nm}}$ para a velocidade de $25 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$, com variações no gradiente médio de velocidade na floculação (G_F), tempo de floculação (T_F) e a recirculação pressurizada ($DSA = 40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; $\text{pH}_{\text{coag.}} = 6,40$; $G_{MR} = 900 \text{ s}^{-1}$; $T_{MR} = 20$ segundos; $P_{SAT} = 5$ bar; $\theta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$).

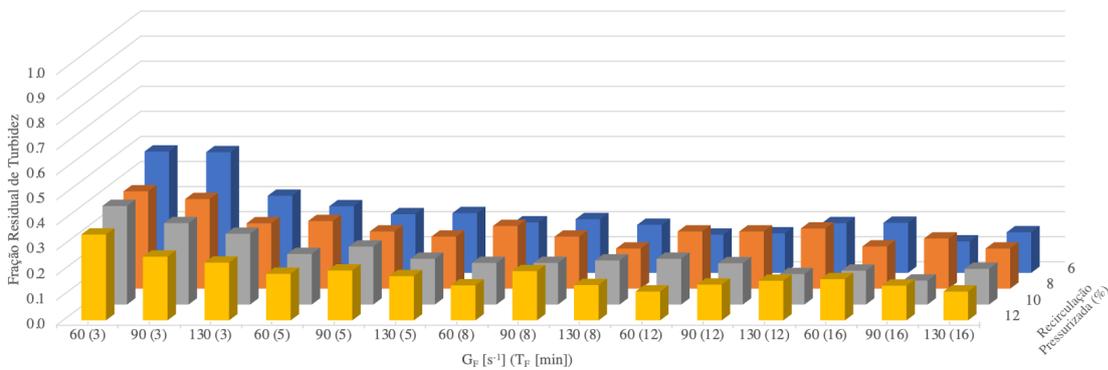


Figura 35 - Fração residual de Turbidez para a velocidade de $25 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$, com variações no gradiente médio de velocidade na floculação (G_F), tempo de floculação (T_F) e a recirculação pressurizada ($DSA = 40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; $\text{pH}_{\text{coag.}} = 6,40$; $G_{MR} = 900 \text{ s}^{-1}$; $T_{MR} = 20$ segundos; $P_{SAT} = 5$ bar; $\theta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$).

A discussão nessa etapa foi dividida de acordo com cada velocidade de flotação estudada, de forma decrescente. Vale ressaltar que a maior velocidade de flotação corresponderia grosseiramente à maior taxa empregada num flotador hipotético com escoamento contínuo. Deve ser salientado que o termo "grosseiramente" foi aqui empregado devido ao fato de que no presente estudo foi utilizado o Flotatest com alimentação por batelada, com condições hidrodinâmicas diferentes das de um flotador com escoamento contínuo. Ainda em relação à velocidade, a v_{FLOT} está diretamente relacionada às velocidades ascensionais dos aglomerados flocos + bolhas.

Inicialmente, é importante frisar que a discussão abaixo foi referente à $v_{\text{FLOT}} = 25 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$. Em todas as quinze condições de floculação ocorreu um aumento visual (Figuras 33 a 35) de eficiência para o acréscimo da concentração da massa de ar dissolvido nos três parâmetros de qualidade analisados. A maior diferença entre valores de eficiência, para uma mesma condição de floculação, sucedeu com os menores valores de tempo de floculação ($T_F = 3$ minutos). Em relação à remoção de cor aparente, na condição $G_F = 60 \text{ s}^{-1}$ e $T_F = 3$ minutos, a fração residual diminuiu paulatinamente de 0,47 ($29 \pm 4 \text{ mg Pt-Co}\cdot\text{L}^{-1}$), na condição de menor recirculação ($R = 6\%$), para 0,33 ($20 \pm 3 \text{ mg Pt-Co}\cdot\text{L}^{-1}$) na condição com maior concentração em massa de ar dissolvido ($R = 12\%$). Similarmente, o mesmo ocorreu tanto para a remoção de $\text{UV}_{254 \text{ nm}}$ (a fração residual diminuiu de 0,42 para 0,32) e para a remoção da turbidez (de 0,48 para 0,34). Para o mesmo tempo de floculação ($T_F = 3 \text{ min}$), resultados com tendência similar sobrevieram para os outros dois valores de G_F estudados. Para $G_F = 90 \text{ s}^{-1}$, adveio uma redução de 0,44 ($27 \pm 2 \text{ mg Pt-Co}\cdot\text{L}^{-1}$ com $R = 6\%$) para 0,22 ($14 \pm 2 \text{ mg Pt-Co}\cdot\text{L}^{-1}$ com $R = 12\%$). Para $G_F = 130 \text{ s}^{-1}$, a redução foi de 0,29 ($R = 6\%$) para 0,19 ($R = 12\%$), ambos os casos em relação à cor aparente. Nesse caso (para tempo de 3 minutos), é interessante notar como a eficiência do processo foi altamente influenciada, tanto pela agitação mecânica quanto pela concentração em massa de ar dissolvido fornecida. Somente com a manipulação dessas variáveis, foi possível obter eficiência de flotação superior a 80% para a remoção de cor aparente ($G_F = 130 \text{ s}^{-1}$ e $R = 12\%$). É importante sublinhar que 80% de remoção em cor aparente equivale a uma cor aparente residual de $12,4 \text{ mg Pt-Co}\cdot\text{L}^{-1}$, valor abaixo do máximo admitido ($15 \text{ mg Pt-Co}\cdot\text{L}^{-1}$) pela portaria brasileira consolidada nº 5 do Ministério da Saúde e pela Organização Mundial da Saúde para água tratada. Seria até mesmo interessante investigar se um aumento ainda maior na concentração de massa de ar dissolvido aumentaria ainda mais a eficiência nessas condições, já que o decréscimo em residual ainda perdurou quando a recirculação de $R=10\%$ aumentou para $R=12\%$. Isso talvez seja um indicativo de que quando se teve a formação de flocos muito

pequenos, como os obtidos com baixo T_F (3min) e alto G_F (130 s^{-1}), para obtenção de aumento de eficiência da FAD foi necessário um aumento na concentração de microbolhas de ar na etapa de contato entre flocos e bolhas.

Fixando $T_F = 5$ minutos, há a mesma tendência que na condição de floculação com $T_F = 3$ min, a eficiência aumentou com o aumento da concentração em massa de ar dissolvido para os três valores de G_F analisados. As maiores eficiências de remoção foram com $R = 12\%$. Interessantemente, para cada recirculação analisada, os três valores de G_F forneceram estatisticamente a mesma eficiência usando o teste de Kruskal-Wallis. Logo, é possível observar que com 5 minutos, a agitação fornecida durante o processo de floculação não impactou significativamente a eficiência geral do processo. Para uma dada recirculação, a eficiência foi a mesma para todos os valores de gradientes médio de velocidade na floculação. Destaca-se que, estatisticamente, a eficiência não foi a mesma entre as recirculações. Dessa maneira, há um ganho de eficiência à medida que a concentração em massa de ar dissolvido foi aumentada. Para esse tempo de floculação, para a condição com menor C_b inserida no sistema ($R = 6\%$), a cor aparente residual foi $14 \pm 2 \text{ mg Pt-Co.L}^{-1}$, a $UV_{254 \text{ nm}}$ residual de $0,18 \pm 0,01 \text{ cm}^{-1}$ e a turbidez residual equivalente a $1,23 \pm 0,06 \text{ NTU}$. Quanto maior foi a C_b , menores foram esses residuais.

Na condição intermediária de floculação ($T_F = 8$ minutos), as diversas condições, tanto em relação aos três G_F analisados, quanto à variação da quantidade de ar dissolvido inserida no sistema, não foram significativamente diferentes estatisticamente. Assim, a eficiência do processo FAD não foi influenciada pela porcentagem de ar inserida no sistema nem na variação do G_F . As doze condições estudadas para $T_F = 8$ minutos forneceram resultados similares para os três indicadores de qualidade estudados.

Algo semelhante ocorreu para os tempos de floculação superiores a 10 minutos. Tanto para o T_F de 12 quanto de 16 minutos, nem a variação na concentração de massa de ar dissolvido nem a variação do G_F impactaram a eficiência de floculação. Neste caso, a variável que impactou a eficiência geral foi o tempo de floculação, já que ocorreu a diminuição da fração residual de 12 para 16 minutos. Pelos resultados obtidos, seria possível refletir sobre a possibilidade de, para a água analisada e para os tempos de floculação de 12 e 16 minutos, reduzir a recirculação para 6% sem alterar a eficiência do processo. É importante ainda salientar que com 12 e 16 minutos

de floculação os valores de cor aparente situaram-se abaixo de $6,2 \text{ mg Pt-Co.L}^{-1}$ e de turbidez abaixo de 1 NTU.

Outro fator importante é que, com $G = 130 \text{ s}^{-1}$ e para os dois maiores tempos de floculação, não houve diferença estatística nas medidas realizadas. Assim, com $T_F = 12$ e 16 minutos e, em todas as situações de concentração de massa de ar dissolvido, estatisticamente as medianas das eficiências foram iguais (para a cor aparente, para $UV_{254 \text{ nm}}$ e para a turbidez).

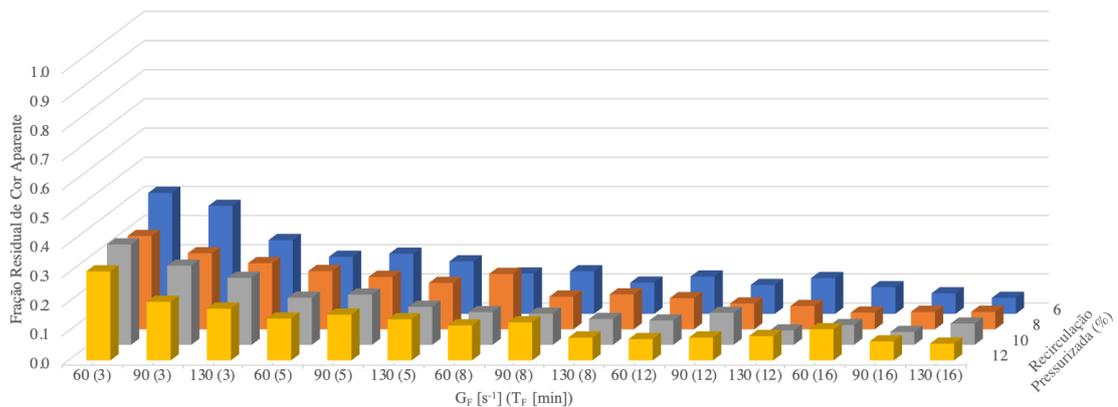


Figura 36 – Fração residual de Cor Aparente para a velocidade de 20 cm.min^{-1} , com variações no gradiente médio de velocidade na floculação (G_F), tempo de floculação (T_F) e a recirculação pressurizada ($DSA = 40 \text{ mg.L}^{-1}$; $pH_{\text{coag.}} = 6,40$; $G_{MR} = 900 \text{ s}^{-1}$; $T_{MR} = 20$ segundos; $P_{SAT} = 5 \text{ bar}$; $\theta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$).

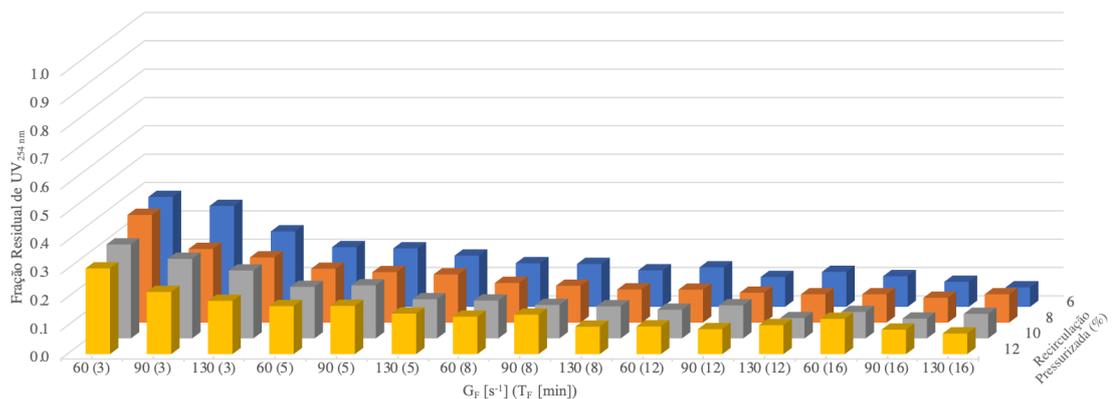


Figura 37 - Fração residual de $UV_{254 \text{ nm}}$ para a velocidade de 20 cm.min^{-1} com variações no gradiente médio de velocidade na floculação (G_F), tempo de floculação (T_F) e a recirculação pressurizada ($DSA = 40 \text{ mg.L}^{-1}$; $pH_{\text{coag.}} = 6,40$; $G_{MR} = 900 \text{ s}^{-1}$; $T_{MR} = 20$ segundos; $P_{SAT} = 5 \text{ bar}$; $\theta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$).

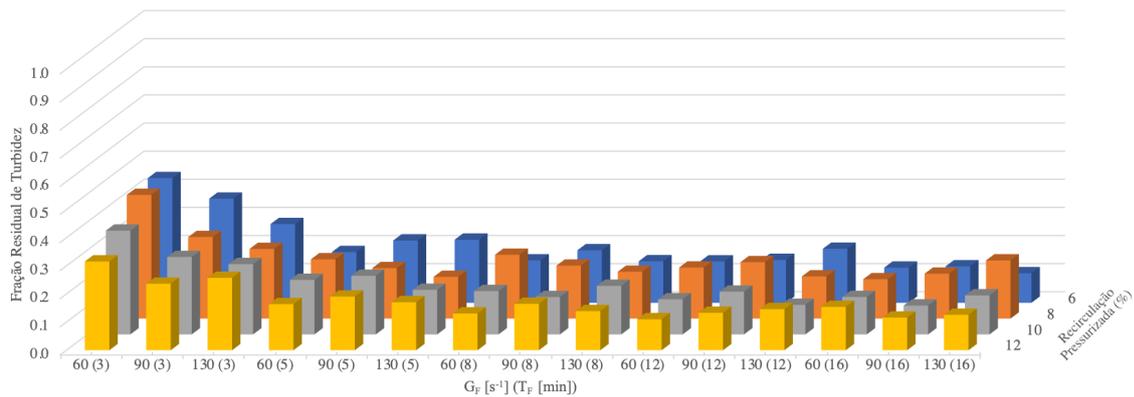


Figura 38 - Fração residual de Turbidez para a velocidade de $20 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$, com variações no gradiente médio de velocidade na floculação (G_F), tempo de floculação (T_F) e a recirculação pressurizada ($DSA = 40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; $\text{pH}_{\text{coag.}} = 6,40$; $G_{MR} = 900 \text{ s}^{-1}$; $T_{MR} = 20$ segundos; $P_{SAT} = 5 \text{ bar}$; $\theta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$).

Para a velocidade de $20 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$, as conclusões foram semelhantes às que foram realizadas para $v_{FLOT} = 25 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$. Com um tempo médio de floculação de 3 minutos foi perceptível visualmente que tanto o aumento na recirculação pressurizada quanto o aumento no G_F acarretaram o aumento na eficiência de floculação. Além do mais, como era esperado, essa velocidade de flotação mais baixa também propiciou o aumento na eficiência do processo em relação à $v_{FLOT} = 25 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$. Outro aspecto que vale salientar é o resultado obtido com $G_F = 130 \text{ s}^{-1}$ para $T_F = 3$ minutos. Com a menor recirculação ($R = 6\%$), a cor aparente residual foi de $15,5 \pm 2 \text{ mg Pt-Co}\cdot\text{L}^{-1}$, a qual chegou a $11,2 \pm 3 \text{ mg Pt-Co}\cdot\text{L}^{-1}$ com $R = 12\%$. Em relação à turbidez, esse parâmetro ficou relativamente estável nessa condição de floculação, sendo que a fração residual foi reduzida de 0,28 para 0,25, ou seja, de $1,4 \pm 0,1$ para $1,25 \pm 0,14 \text{ NTU}$.

De modo similar ao ocorrido com a velocidade de $25 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$, para a $v_{FLOT} = 20 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ e para cada recirculação estudada, as medianas das eficiências com $T_F = 5$ minutos foram iguais para os três valores de G_F considerados, nos três parâmetros de qualidade. Isso quer dizer que, para uma dada recirculação, a eficiência foi a mesma para os três valores de G_F considerados. Acrescente-se ainda que, com $R = 12$ e 10% , a concentração de massa de ar dissolvido já não interferiu na eficiência do processo, isto é, a eficiência foi a mesma. Entretanto, a quantidade de ar dissolvido fornecida ao sistema interferiu com o resultado nas três recirculações menores; quanto maior a massa de ar inserida durante a flotação (até $R = 10\%$), maior foi a eficiência e, conseqüentemente, menor a fração residual. Todos esses resultados estatísticos decorrem do teste de Kruskal-Wallis (ver Apêndice C).

Algo semelhante ocorreu entre os três maiores tempos de floculação (8, 12 e 16 minutos). Com relação aos parâmetros de cor aparente e $UV_{254\text{ nm}}$, em um mesmo T_F , estatisticamente, não houve diferença de eficiência em todas as situações consideradas quando cada T_F é analisado individualmente. Assim, tanto a variação do G_F quanto a concentração de microbolhas não interferiram no processo de flotação. Entretanto, o tempo ainda teve impacto no processo; quanto maior foi o tempo de floculação, maior a eficiência geral. A partir desses resultados foi possível supor que, considerando a água de estudo em questão e para a faixa de valores de G_F investigada (entre 60 e 130 s^{-1}), em relação à remoção de matéria orgânica, o tempo de floculação foi o principal fator que influenciou a FAD. Entretanto, o parâmetro de turbidez apresentou um comportamento distinto. Todas as condições consideradas com T_F maior ou igual a 8 minutos apresentaram resultados estatisticamente semelhantes, sendo que tanto o aumento no T_F ou na recirculação pressurizada ou no G_F não influenciaram a remoção de turbidez para $v_{FLOT} = 20\text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$.

Para a $v_{FLOT} = 20\text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ e $G_F = 130\text{ s}^{-1}$, é importante notar que as três condições de floculação a partir de 8 minutos (inclusive) e as quatro condições de recirculação não interferiram na eficiência da flotação, tanto em relação à remoção de matéria orgânica quanto a remoção de turbidez. Assim, para o maior valor de G_F , um tempo mais baixo de floculação (8 minutos) apresentou resultados estatisticamente similares à remoção promovida ao maior tempo de floculação (16 minutos).

Para $G = 90\text{ s}^{-1}$, a partir de 12 minutos, todas as condições estudadas apresentaram resultados estatisticamente semelhantes, tanto em relação à remoção de cor aparente, quanto de $UV_{254\text{ nm}}$ e de turbidez.

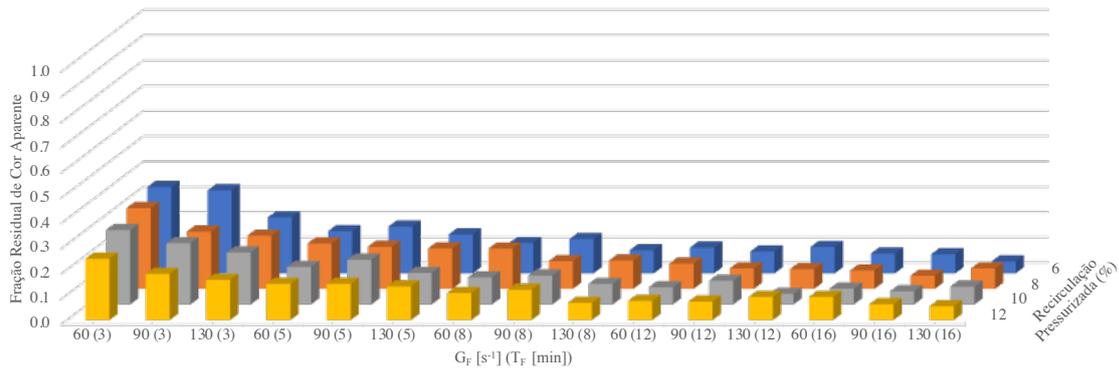


Figura 39 - Fração residual de Cor Aparente para a velocidade de $15 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$, com variações no gradiente médio de velocidade na floculação (G_F), tempo de floculação e a recirculação pressurizada ($DSA = 40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; $\text{pH}_{\text{coag}} = 6,40$; $G_{\text{MR}} = 900 \text{ s}^{-1}$; $T_{\text{MR}} = 20 \text{ segundos}$; $P_{\text{SAT}} = 5 \text{ bar}$; $\theta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$).

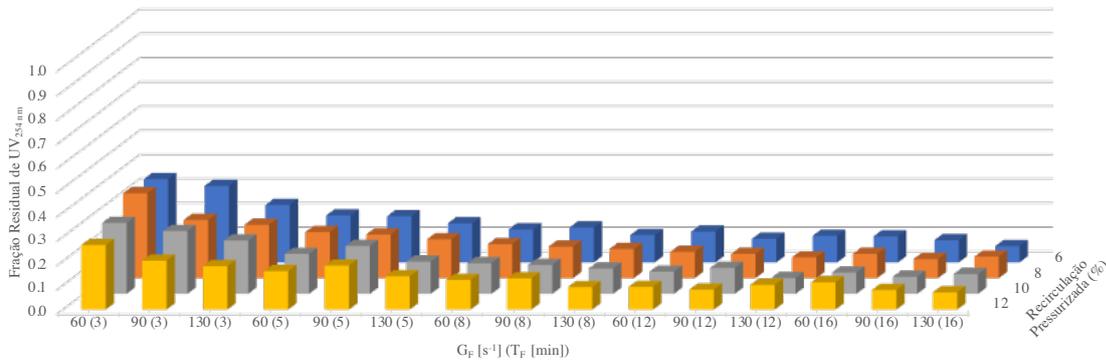


Figura 40 - Fração residual de $UV_{254 \text{ nm}}$ para a velocidade de $15 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$, com variações no gradiente médio de velocidade na floculação (G_F), tempo de floculação e a recirculação pressurizada ($DSA = 40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; $\text{pH}_{\text{coag}} = 6,40$; $G_{\text{MR}} = 900 \text{ s}^{-1}$; $T_{\text{MR}} = 20 \text{ segundos}$; $P_{\text{SAT}} = 5 \text{ bar}$; $\theta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$).

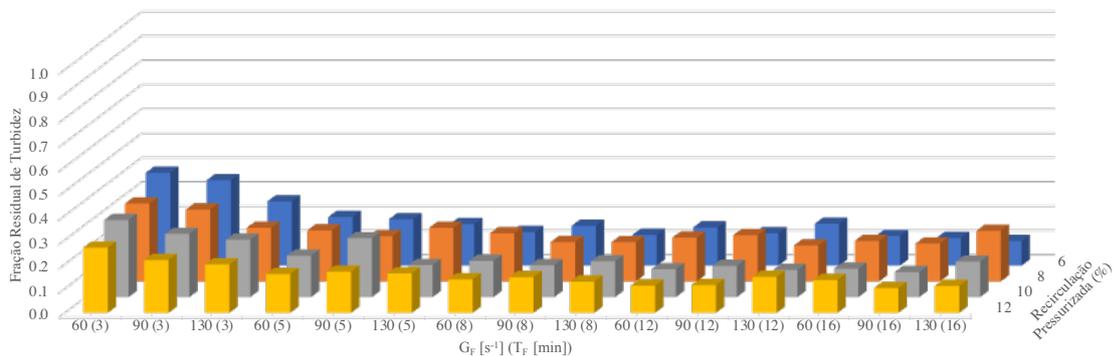


Figura 41 - Fração residual de Turbidez para a velocidade de $15 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$, com variações no gradiente médio de velocidade na floculação (G_F), tempo de floculação e a recirculação pressurizada ($DSA = 40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; $\text{pH}_{\text{coag}} = 6,40$; $G_{\text{MR}} = 900 \text{ s}^{-1}$; $T_{\text{MR}} = 20 \text{ segundos}$; $P_{\text{SAT}} = 5 \text{ bar}$; $\theta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$).

Como era de se esperar, à medida que a velocidade de flotação foi reduzida as eficiências em geral foram maiores, isto é, os residuais foram menores. Para o menor tempo de floculação estudado, a análise foi semelhante para as duas velocidades superiores ($v_{\text{FLOT}} = 25$ e $20 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$). Quanto maior o valor de G_{F} considerado e quanto maior a porcentagem de massa de ar dissolvido injetada no sistema, maior a eficiência observada para os indicadores considerados. Na melhor situação observada com $T_{\text{F}} = 3$ minutos ($G = 130 \text{ s}^{-1}$ e $R = 12\%$), a cor aparente residual é de $(9,9 \pm 0,6) \text{ mg Pt-Co}\cdot\text{L}^{-1}$, a $\text{UV}_{254 \text{ nm}}$, de $(0,148 \pm 0,001) \text{ cm}^{-1}$ e a turbidez de $(1,0 \pm 0,2) \text{ NTU}$.

Para $T_{\text{F}} = 5$ minutos, o resultado foi similar ao já exposto. Para uma dada recirculação, os valores de G_{F} não influenciaram a eficiência de remoção. Nesta velocidade é notado ainda que a porcentagem de recirculação não afetou mais a remoção de cor aparente. Para esse indicador, todas as condições consideradas resultaram em uma eficiência similar com valor de $8 \pm 2 \text{ mg Pt-Co}\cdot\text{L}^{-1}$. Em relação à turbidez, as duas recirculações ($R = 10$ e 12%) são semelhantes e iguais a $(0,8 \pm 0,1) \text{ NTU}$. Para $\text{UV}_{254 \text{ nm}}$, a porcentagem de recirculação ainda influenciou a remoção deste parâmetro. Os melhores resultados foram atingidos com a maior recirculação.

Similarmente ao que já ocorreu para a $v_{\text{FLOT}} = 20 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$, para os três maiores tempos de floculação ($T_{\text{F}} = 8, 12$ e 16 minutos), não houve diferença entre a variação do G_{F} (considerando a faixa estudada, entre 60 e 130 s^{-1}) e das concentrações em massa de ar dissolvido (para valores entre $6,84$ e $12,96 \text{ mg de ar}\cdot\text{L}^{-1}$) dentro de um mesmo tempo de floculação. Ademais, todas as condições estudadas com 12 e 16 minutos de tempo de floculação foram similares estatisticamente em relação à remoção de cor aparente. Para a turbidez, todas as condições estudadas a partir de oito minutos foram idênticas estatisticamente. Logo, nem o T_{F} ou o G_{F} ou a quantidade em massa de ar alteraram a eficiência do processo. Entretanto, a remoção de $\text{UV}_{254 \text{ nm}}$ ainda foi impactada pela variação do tempo de floculação. Quanto maior o tempo de floculação, menor foi o residual de absorção em 254 nm .

Para $G_{\text{F}} = 130 \text{ s}^{-1}$, a partir de $T_{\text{F}} = 8 \text{ min}$ a remoção foi a mesma para todas as condições analisadas tanto em relação à MON quanto à turbidez, resultado que também foi obtido para a velocidade de $20 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$.

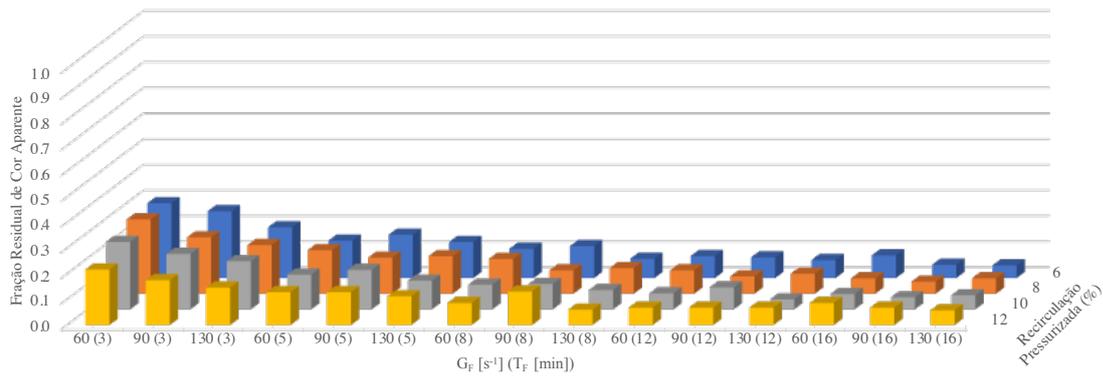


Figura 42 - Fração residual de Cor Aparente para a velocidade de $10 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$, com variações no gradiente médio de velocidade na floculação (G_F), tempo de floculação e a recirculação pressurizada ($DSA = 40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; $\text{pH}_{\text{coag.}} = 6,40$; $G_{MR} = 900 \text{ s}^{-1}$; $T_{MR} = 20 \text{ segundos}$; $P_{SAT} = 5 \text{ bar}$; $\theta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$).

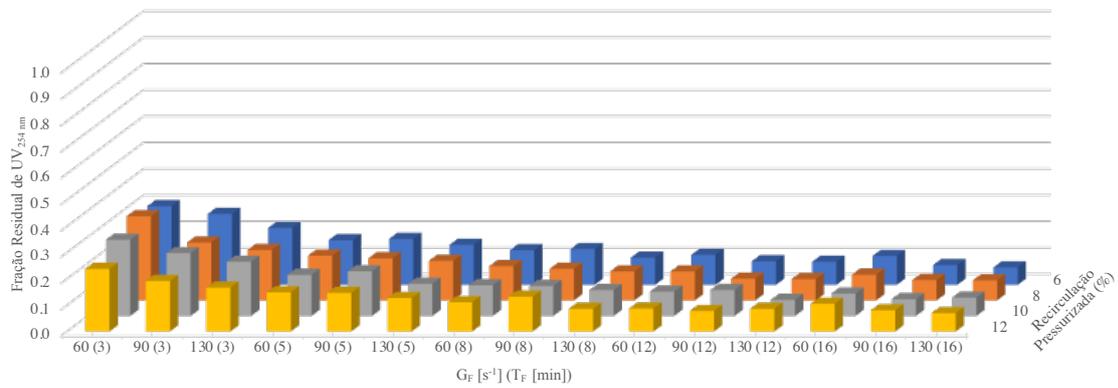


Figura 43 - Fração residual de $UV_{254 \text{ nm}}$ para a velocidade de $10 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$, com variações no gradiente médio de velocidade na floculação (G_F), tempo de floculação e a recirculação pressurizada ($DSA = 40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; $\text{pH}_{\text{coag.}} = 6,40$; $G_{MR} = 900 \text{ s}^{-1}$; $T_{MR} = 20 \text{ segundos}$; $P_{SAT} = 5 \text{ bar}$; $\theta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$).

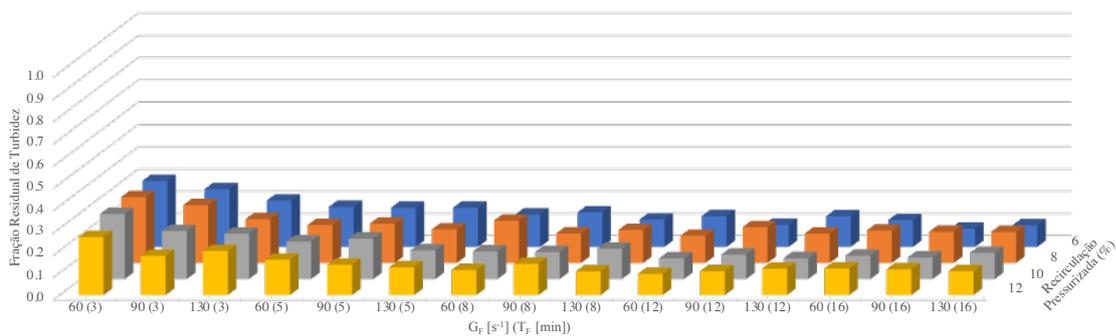


Figura 44 - Fração residual de Turbidez para a velocidade de $10 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$, com variações no gradiente médio de velocidade na floculação (G_F), tempo de floculação e a recirculação pressurizada ($DSA = 40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; $\text{pH}_{\text{coag.}} = 6,40$; $G_{MR} = 900 \text{ s}^{-1}$; $T_{MR} = 20 \text{ segundos}$; $P_{SAT} = 5 \text{ bar}$; $\theta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$).

Na velocidade mais baixa de flotação ($v_{\text{FLOT}} = 10 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$) e para o $T_F = 3$ minutos, ainda houve diferença entre os gradientes médio de velocidade na floculação. Quanto maior o G_F , maior foi a eficiência do processo. Entretanto, não houve mais diferença, em termos de eficiência, no que se refere à quantidade de ar dissolvido fornecida ao sistema. Para um dado G_F , a eficiência foi a mesma para as quatro recirculações consideradas ($R = 6, 8, 10$ e 12%), tanto para a remoção de cor aparente quanto para $UV_{254 \text{ nm}}$ e turbidez. Na melhor condição ($G_F = 130 \text{ s}^{-1}$), os residuais obtidos foram: $(12 \pm 2) \text{ mg Pt-Co}\cdot\text{L}^{-1}$, $(0,18 \pm 0,02) \text{ cm}^{-1}$ e $(1,1 \pm 0,3) \text{ NTU}$.

Com 5 minutos de floculação, tanto a remoção da cor aparente quanto da turbidez, não foram mais influenciadas nem pela quantidade de ar dissolvido fornecida ao sistema nem pela agitação que o efluente foi submetido durante a floculação. Contudo, o residual de $UV_{254 \text{ nm}}$ ainda foi influenciado pela porcentagem da recirculação pressurizada utilizada no sistema. Até $R = 10\%$, houve o decréscimo do residual conforme a C_b inserida foi aumentada. Para $R = 10$ e 12% , a remoção de $UV_{254 \text{ nm}}$ foi a mesma. O residual de cor aparente obtido foi de $(8 \pm 2) \text{ mg Pt-Co}\cdot\text{L}^{-1}$ e o de turbidez $(0,8 \pm 0,2) \text{ NTU}$ em todas as condições estudadas para $T_F = 5$ minutos.

Para $T_F \geq 8$ minutos, as eficiências não foram influenciadas pela porcentagem da recirculação pressurizada nem pelo G_F empregado. Para um T_F fixado, o residual foi o mesmo para todas as 12 condições analisadas nesse tempo, tanto para cor aparente como para $UV_{254 \text{ nm}}$ e turbidez. Além do mais, assim como já tinha sido comentado anteriormente, o residual de turbidez resultante foi o mesmo para todas as condições estudadas com o $T_F \geq 8 \text{ min}$. Já para a remoção de MON (cor aparente e $UV_{254 \text{ nm}}$), houve ganho de eficiência do $T_F = 8$ minutos para o $T_F = 12$ minutos, porém a eficiência de 12 e 16 min foi a mesma.

Como já ocorreu com velocidades superiores, para $G_F = 130 \text{ s}^{-1}$, a eficiência da FAD começou a apresentar resultados estatisticamente similares com $T_F \geq 8$ minutos, tanto em relação à cor aparente, $UV_{254 \text{ nm}}$ e turbidez.

5.5. Etapa 5 – Análise da distribuição do diâmetro das partículas floculadas e das microbolhas de ar

5.5.1. Diâmetro das partículas floculadas

As distribuições de tamanho das partículas floculadas para as quinze condições de floculação investigadas nesse trabalho estão apresentadas nos gráficos das Figuras 45 a 47. Essas distribuições estão apresentadas em forma de Box-Plot. Os três gráficos se referem aos diâmetros das partículas floculadas, nos cinco tempos de floculação considerados, para $G_F = 60$, 90 e 130 s^{-1} respectivamente.

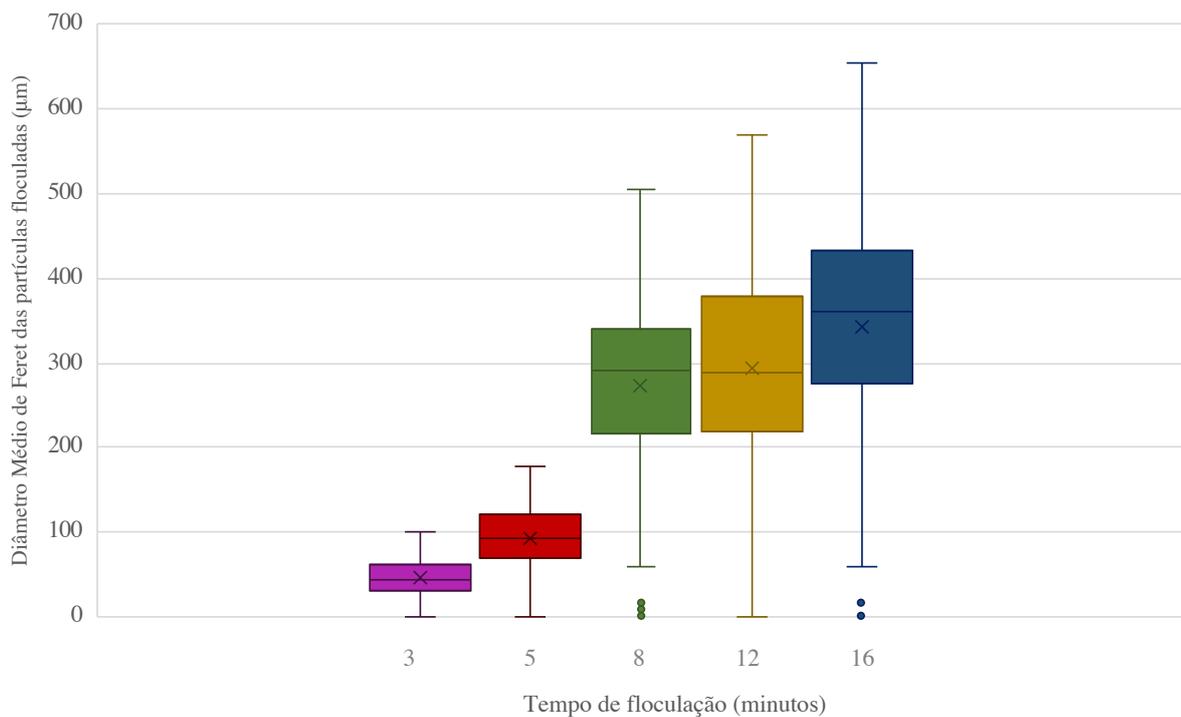


Figura 45 – Distribuição do diâmetro médio de Feret das partículas floculadas para $G_F = 60 s^{-1}$ em relação ao tempo de floculação

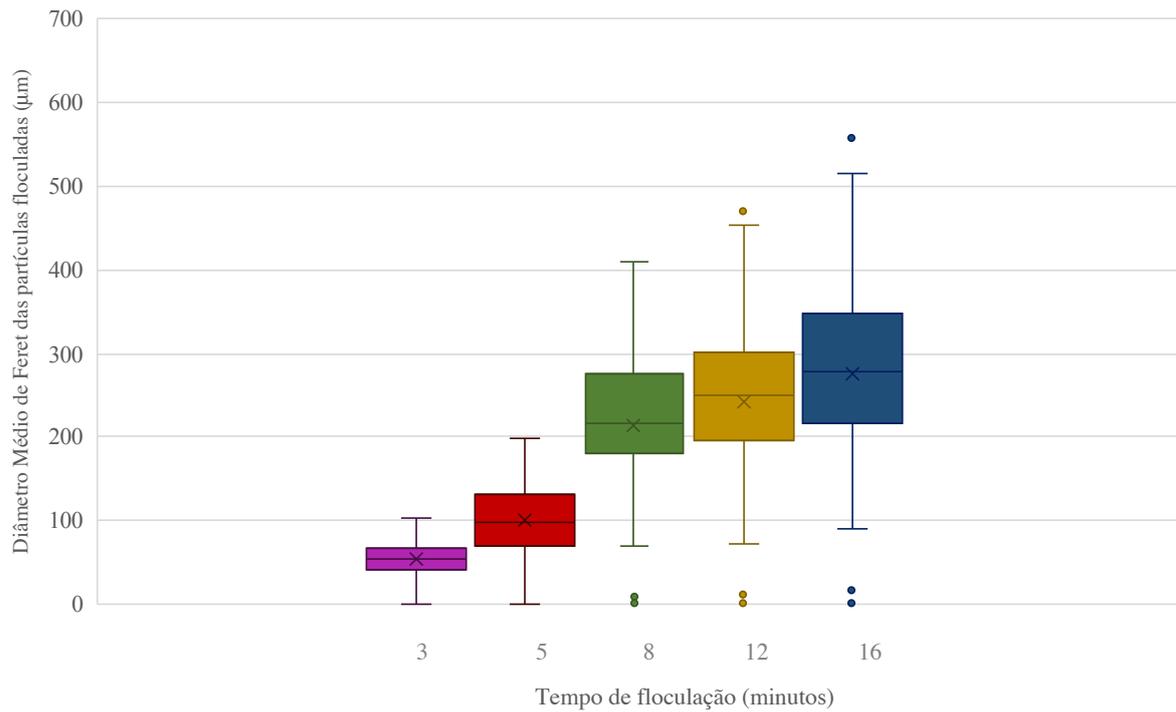


Figura 46 – Distribuição do diâmetro médio de Feret das partículas floculadas para $G_F = 90 \text{ s}^{-1}$ em relação ao tempo de flocculação

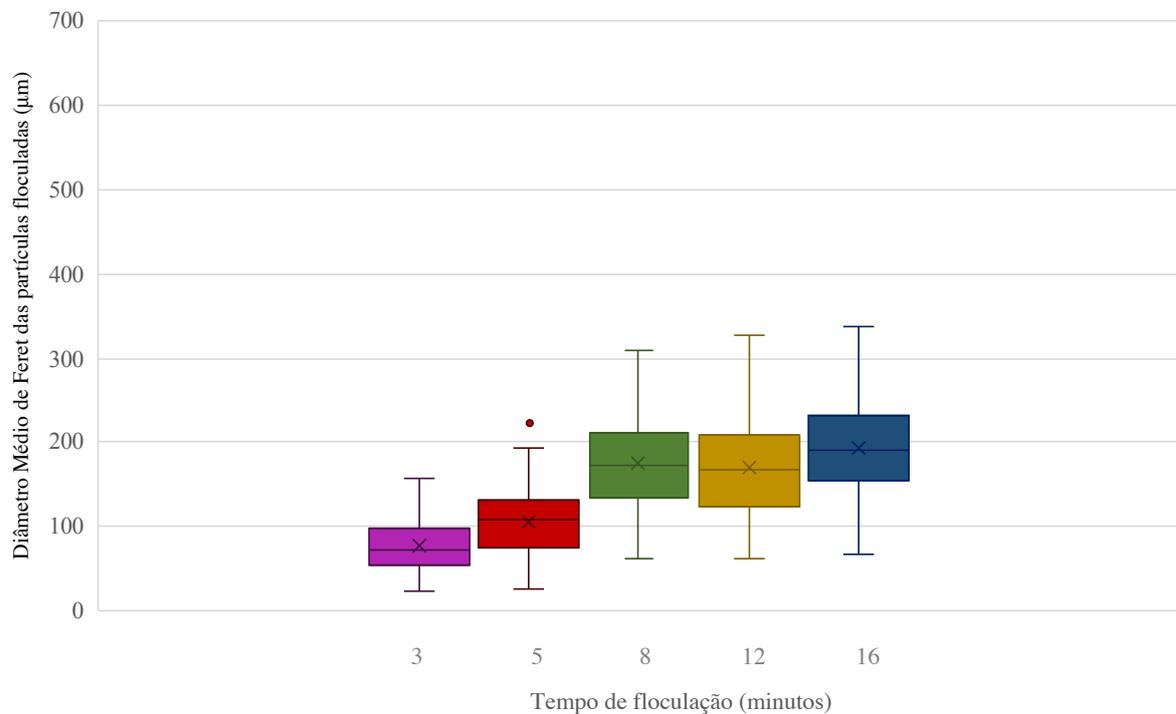


Figura 47 – Distribuição do diâmetro médio de Feret das partículas floculadas para $G_F = 130 \text{ s}^{-1}$ em relação ao tempo de flocculação

Nesse estudo foram observadas partículas floculadas com diâmetro médio de Feret de 11 ($G_F = 60 \text{ s}^{-1}$ e $T_F = 3$ minutos) até $655 \mu\text{m}$ ($G_F = 60 \text{ s}^{-1}$ e $T_F = 16$ minutos). Graficamente foi possível observar que, para todos os valores de gradiente médio de velocidade na floculação analisados, o diâmetro da partícula floculada aumentou à medida que o tempo de floculação cresceu. Tal crescimento foi mais acentuado para o menor valor do gradiente médio de velocidade na floculação ($G_F = 60 \text{ s}^{-1}$), o qual possuiu o maior intervalo entre o diâmetro mínimo e o máximo observado (11 - $655 \mu\text{m}$). Esse intervalo decresceu quanto maior o valor de G_F empregado; para $G_F = 90 \text{ s}^{-1}$ foi de 17 a $558 \mu\text{m}$ e, para $G_F = 130 \text{ s}^{-1}$ foi de 22 a $338 \mu\text{m}$. Como pode ser suspeitado pela simetria dos quinze Box-Plots e pela proximidade entre os valores da média e da mediana, as 15 distribuições de tamanho de partículas possuíram distribuição normal segundo resultados do teste de normalidade de Shapiro-Wilk (ver Apêndice D).

Com um $T_F = 3$ minutos, o menor diâmetro médio de Feret estudado ocorreu para $G_F = 60 \text{ s}^{-1}$, $47 \mu\text{m}$, o qual aumentou conforme o valor de G_F cresceu (foi de $57 \mu\text{m}$, para $G_F = 90 \text{ s}^{-1}$ e $77 \mu\text{m}$, para $G_F = 130 \text{ s}^{-1}$). É importante acrescentar que esses resultados foram coerentes com o observado visualmente durante os ensaios. Com o menor G_F , ainda não era possível ver a olho nu os flocos formados; para $G_F = 90 \text{ s}^{-1}$, era possível ver alguns poucos flocos e, para $G_F = 130 \text{ s}^{-1}$, já era possível observar uma quantidade razoável de flocos formados sem a ajuda do equipamento óptico.

A partir da análise gráfica das Figuras 45 a 47, curiosamente, pode ser observado que, para $T_F = 5$ min, os tamanhos das partículas apresentaram valores médios semelhante para as três condições de floculação estudadas. A média observada estava compreendida entre $97 \mu\text{m}$ (para $G_F = 60 \text{ s}^{-1}$) e $106 \mu\text{m}$ (para $G_F = 90 \text{ s}^{-1}$). Como as distribuições foram normalmente distribuídas e com todas as premissas satisfeitas, optou-se pela utilização do teste paramétrico One-Way Anova (ver Apêndice D). Assim, por meio deste teste a suposição inicial foi corroborada, concluindo-se que, para a situação estudada, as médias das distribuições de tamanho, para $T_F = 5$ minutos, apresentaram valores estatisticamente semelhantes.

Para os três valores de T_F maiores que 5 min (8, 12 e 16 min), os resultados apresentaram tendência diametralmente oposta do que ocorreu com 3 minutos de floculação. Para esses valores de T_F , os valores de G_F mais elevados produziram flocos menores do que aqueles obtidos para valores de G_F maiores. Tal informação pode ser melhor observada na Figura 48.

Para $G = 60 \text{ s}^{-1}$ e $T_F = 8 \text{ min}$, o diâmetro médio foi de $293 \mu\text{m}$, sendo que o acréscimo no diâmetro entre as duas condições consecutivas ($T_F = 5 \text{ min}$ e $T_F = 8 \text{ min}$, ambos com $G_F = 60 \text{ s}^{-1}$) foi de aproximadamente $200 \mu\text{m}$. Enquanto que para o $G = 130 \text{ s}^{-1}$, esse acréscimo foi de $70 \mu\text{m}$ quando o valor de T_F passou de 5 para 8 min.

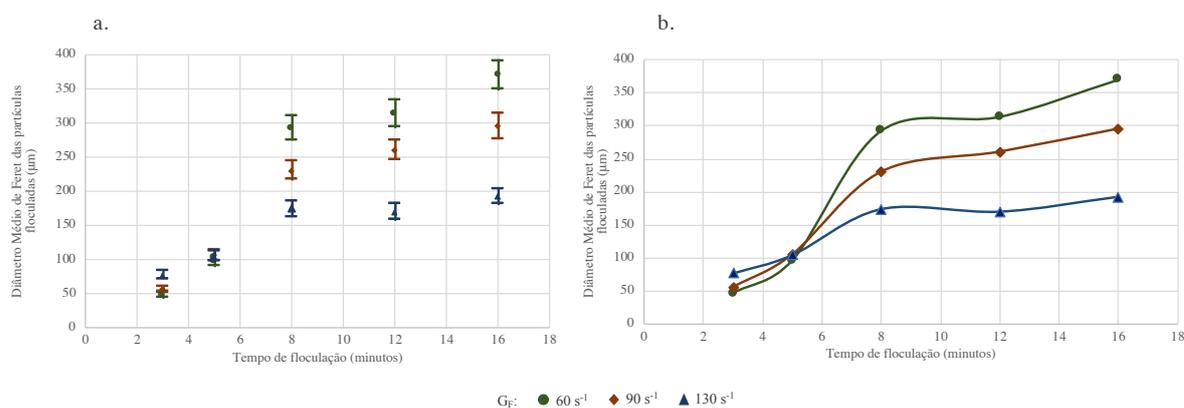


Figura 48 – Diâmetro médio de Feret das partículas floculadas em função do T_F e do G_F **a.** Diâmetro médio incluindo os valores limites num intervalo de confiança de 95%. **b.** Curva referente aos diâmetros médios de Feret.

Assim, para a água de estudo em questão, o T_F de 5 min demonstrou constituir um ponto de inflexão no que se refere ao comportamento do tamanho dos flocos em relação ao valor de G_F aplicado: para T_F pequeno (menor que 5 min) o aumento de G_F causou sempre aumento do diâmetro médio dos flocos, e, para T_F maior que 5 min, o aumento de G_F causou sempre a diminuição do tamanho dos flocos. Uma possível explicação para esse curioso comportamento pode ser que, para valores de T_F muito pequenos (3 min no caso em apreço), houve formação de flocos muito pequenos, os quais tenderiam a crescer mais com a aplicação de G_F maiores devido ao aumento da taxa de colisões entre eles e, devido ao fato de serem compactos, seriam menos suscetíveis de sofrerem a ação das forças cisalhantes que também aumentariam com a elevação de G_F . No entanto, ao se aumentar o T_F (para valores acima de 5 min, no caso em questão), os flocos ultrapassaram um tamanho crítico (em torno de $100 \mu\text{m}$ no caso) e passaram a ser mais suscetíveis às maiores intensidades das forças cisalhantes resultantes do aumento de G_F , ou seja, o aumento da taxa de erosão dos flocos passou a preponderar sobre o acréscimo da taxa de aglutinação de partículas aos flocos devido ao aumento simultâneo da taxa de colisões entre as mesmas.

Com base nos gráficos mostrados na Figura 49, verifica-se que entre o $T_F = 8$ e 16 minutos, foi observada uma tendência relativamente linear de crescimento à medida que T_F aumentou. É

visto que o coeficiente angular da reta ajustada para $G_F = 60 \text{ s}^{-1}$ possuiu o maior valor, logo esta foi a condição com crescimento mais acentuado nessa fase. A taxa de crescimento do tamanho dos flocos foi menor a medida que o G_F empregado foi maior. Para o maior valor de G_F considerado ($G = 130 \text{ s}^{-1}$), apesar da aproximação linear ser mais baixa ($R^2 = 0.599$), a reta possuiu uma taxa de crescimento menor (coeficiente angular de 2,32) que os demais valores de G_F estudados. É possível supor que com $G_F = 130 \text{ s}^{-1}$, o tempo necessário para que se atinja uma distribuição de tamanho aproximadamente constante, a qual não mudaria a medida em que houvesse o aumento no tempo de floculação, esteja próxima ao valor de $T_F = 16$ minutos para $G_F = 130 \text{ s}^{-1}$.

A partir das considerações anteriores buscou-se estudar melhor a condição de floculação com $G = 130 \text{ s}^{-1}$, já que esta possuiu um coeficiente de correlação ($R^2 = 0.599$) bem inferior às outras duas condições. Nesse caso, com o auxílio da análise estatística (ver apêndice D), foi visto que o diâmetro médio das distribuições, para $T_F = 8$ e 12 minutos, são estatisticamente similares, porém são distintos do diâmetro médio com $T_F = 16$ minutos. Considerou-se que o aumento ocorrido entre as duas condições similares e a de maior diâmetro foi singela, já que o aumento do valor médio foi de, aproximadamente, 170 para 190 μm .

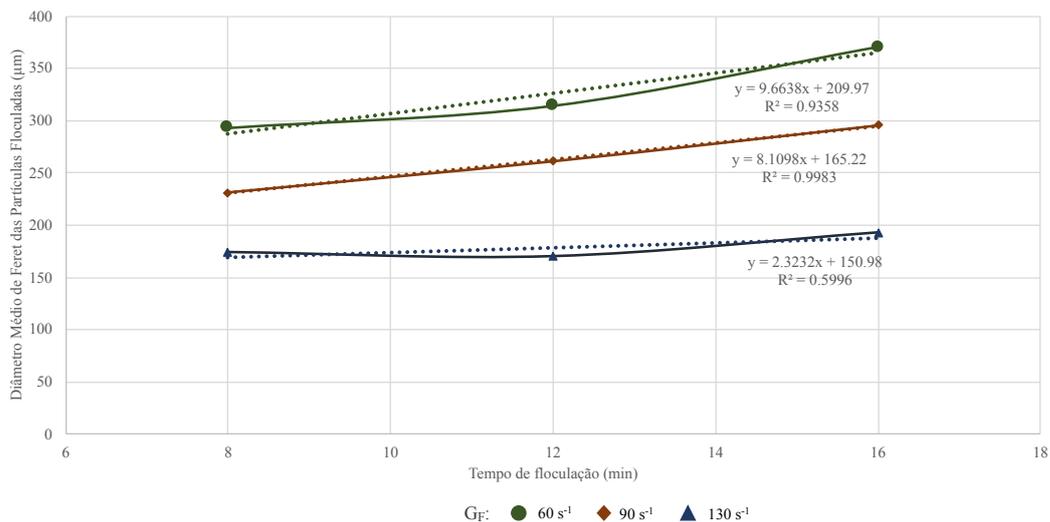


Figura 49 – Tendência de crescimento do diâmetro médio de Feret das partículas floculadas em função do tempo de floculação (para $T_F \geq 8$ minutos) e do gradiente médio de velocidade na floculação.

A partir de $T_F \geq 8$ minutos, para $G_F = 90 \text{ s}^{-1}$, todos os diâmetros médios de Feret dos flocos foram superiores ao maior valor obtido na condição com $G_F = 130 \text{ s}^{-1}$. Para $G = 90 \text{ s}^{-1}$, os

diâmetros médios variaram entre 231 a 296 μm ., sendo que o máximo diâmetro observado nas distribuições foi de 558 μm (ver Figura 46).

Para $G_F = 60 \text{ s}^{-1}$ e $T_F \geq 8$ minutos, todos os diâmetros médios obtidos dos flocos foram superiores a todas as condições estudadas para os outros dois valores de G_F , com exceção do $G = 90 \text{ s}^{-1}$ e $T_F = 16$ minutos, o qual possuiu diâmetro próximo à condição com $T_F = 8$ minutos e $G_F = 60 \text{ s}^{-1}$. Os diâmetros médios variaram entre 293 a 370 μm , com o maior diâmetro observado nas distribuições equivalente 655 μm (ver Figura 45).

Como resultado final do estudo dos diâmetros das partículas floculadas elaborou-se o gráfico da Figura 50 extrapolando-se os valores obtidos experimentalmente para induzir ou supor os possíveis diâmetros que seriam obtidos nos intervalos considerados.

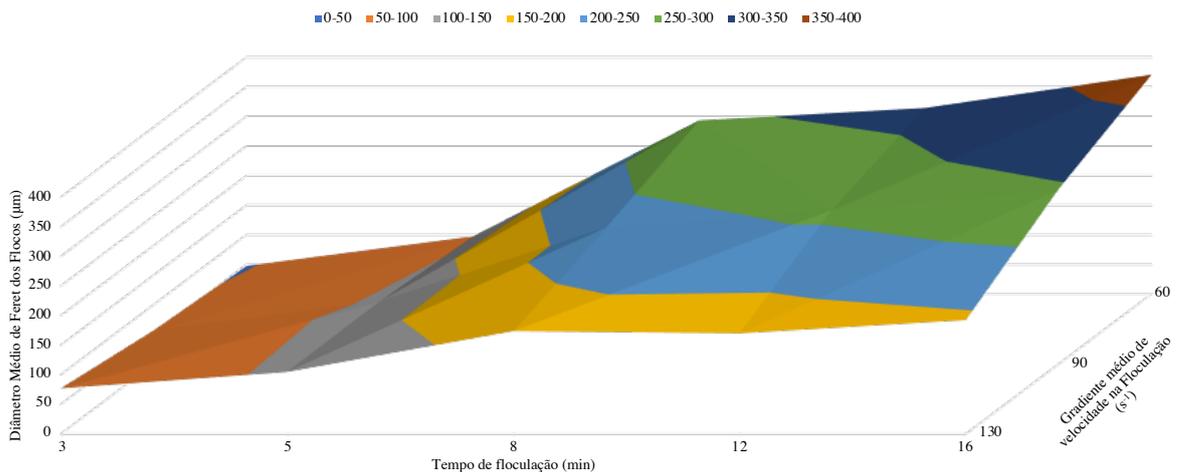


Figura 50 – Extrapolação dos dados experimentais para um gráfico de superfície do diâmetro médio de Feret das partículas floculadas em função do tempo e do gradiente médio de velocidade na floculação.

5.5.2. Diâmetro das microbolhas de ar

As distribuições de tamanho das microbolhas de ar investigadas nesse trabalho estão apresentadas no gráfico da Figura 51. Semelhantemente às distribuições das partículas floculadas, as distribuições do tamanho das microbolhas de ar estão em forma de Box-Plot. Como já foi explicado no item 4.4.2.2 Análise de imagem, foram analisados 300 objetos (bolhas) para cada condição e, em se tratando de ensaios em batelada, esses objetos foram

medidos desde o instante em que as microbolhas foram geradas no sistema até o momento em que a última bolha foi observada na coluna de flotação.

Como exposto na seção 3.2.2. Microbolhas de ar, geralmente as microbolhas encontradas no processo de Flotação por Ar Dissolvido situam-se entre 10 a 100 μm , sendo que o diâmetro médio normalmente está compreendido no intervalo entre 40 a 60 μm . Além disso, é pouco usual observar valores de bolhas acima de 120 μm . Como visto na Figura 51, neste estudo foram observadas microbolhas entre 15 (R = 10%) a 114 μm (R = 12%). Para a distribuição de tamanho de R = 6%, o diâmetro médio encontrado foi de $39 \pm 12 \mu\text{m}$; para R = 8%, $40 \pm 13 \mu\text{m}$; para R = 10%, $39 \pm 11 \mu\text{m}$; para R = 12%, $40 \pm 13 \mu\text{m}$. Todos esses valores estão coerentes com os encontrados na literatura.

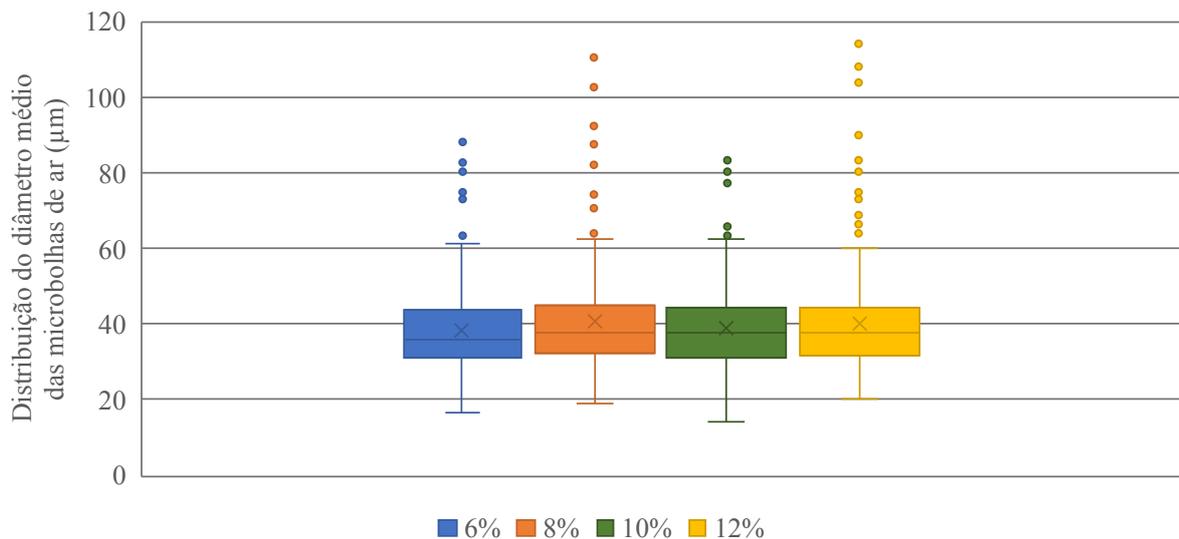


Figura 51 - Distribuição do diâmetro médio das microbolhas de ar para as quatro diferentes recirculações pressurizadas estudadas – 6, 8, 10 e 12% que correspondem a $C_b = 6,84; 8,96; 10,99$ e $12,96 \text{ mg.L}^{-1}$ respectivamente ($P_{\text{SAT}} = 5 \text{ bar}$; $\theta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$).

Observando a simetria dos quatro Box-Plot analisados e a proximidade entre as médias e as medianas das quatro amostras, suspeitou-se que os quatro estudos fossem distribuídos normalmente e, além do mais, possuísem a média igual. Assim, com as mesmas premissas do item 5.5.1. Diâmetro das partículas floculadas, foi realizado o teste estatístico de Shapiro-Wilk (teste de normalidade) e, posteriormente, o teste One-Way ANOVA (resultados no apêndice D). Como resultado do primeiro teste, as quatro distribuições de tamanho foram normalmente distribuídas. Como resultado do segundo teste, é possível concluir que a recirculação

pressurizada, quando variada de 6 a 12% e com pressão de saturação de 5 bar, não interferiu na média do diâmetro das microbolhas de ar. Nesse caso, a variação da recirculação pressurizada só alterou a concentração de microbolhas de ar dissolvido a qual usualmente é expressa em termos de concentração em massa de ar dissolvido fornecida ao sistema (g de ar por m³ de água bruta a ser clarificada por flotação) ou simplesmente por porcentagem, em volume, de recirculação pressurizada (% R), sendo que nesse último caso deve ser indicada a pressão de saturação.

Como os ensaios foram feitos em bateladas, optou-se em estudar também o diâmetro das microbolhas de ar em função do tempo da análise de imagem (Figuras 52 e 53). Nesses gráficos, o tempo inicial (t = 0 segundos) corresponde tanto ao instante em que o registro era aberto para que a recirculação pressurizada fosse liberada ao sistema como ao instante em que a câmera começou a fotografá-lo. Como as recirculações foram variadas, o tempo em que se liberou as microbolhas de ar foram diferentes (tempo em que o registro de globo permaneceu aberto). Para a maior recirculação, as bolhas foram liberadas durante um tempo de 18 segundos, dobro do tempo necessário para 6% (9 segundos). Com R = 8% esse tempo foi de 12 segundos e para R = 10%, 15 segundos.

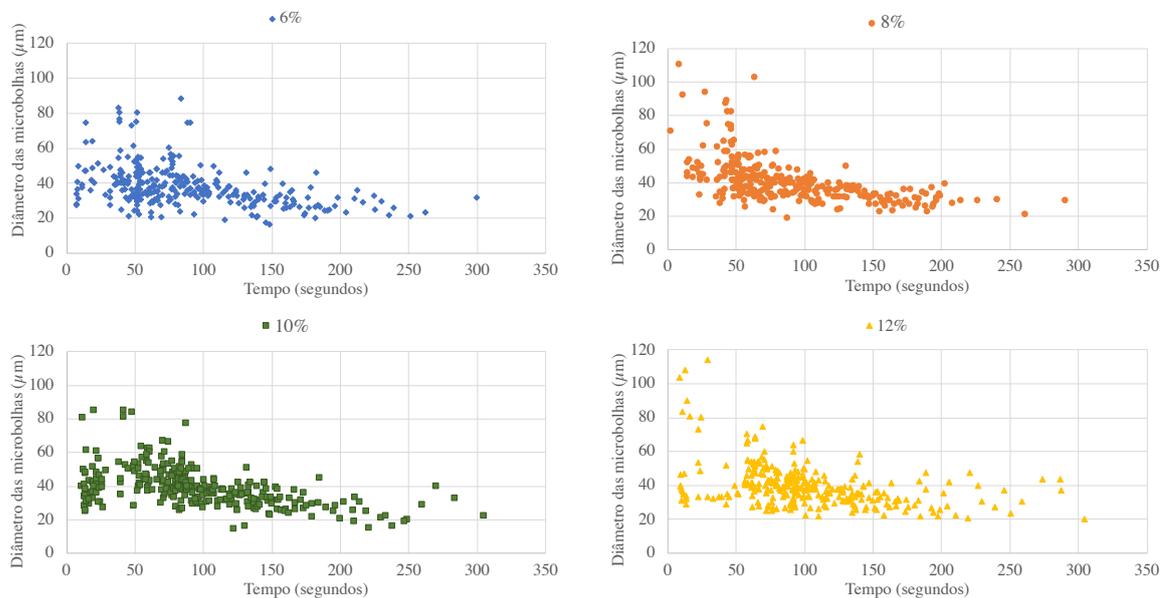


Figura 52 - Distribuição dos diâmetro médio das microbolhas de ar em função do tempo para as quatro diferentes recirculações pressurizadas estudadas – 6, 8, 10 e 12% que correspondem a $C_b = 6,84; 8,96; 10,99$ e $12,96 \text{ mg.L}^{-1}$ respectivamente ($P_{SAT} = 5 \text{ bar}; \theta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$).

A partir da equação 9 do item 3.3 Modelização Matemática (equação clássica de Stokes) é sabido que as velocidades ascensionais das microbolhas de ar são diretamente proporcionais ao diâmetro da microbolha ao quadrado. Logo, quanto maior o diâmetro observado, maior a velocidade ascensional. Experimentalmente tal fato foi visualizado nos quatro gráficos da Figura 52. Os maiores diâmetros, $d_b \geq 60 \mu\text{m}$, foram analisados durante os 100 primeiros segundos. De modo oposto, os menores diâmetros foram analisados nos tempos maiores.

Com relação a coalescência das microbolhas de ar, especulou-se que esta tem maior intensidade nos primeiros momentos da análise da distribuição, já que foram nas imagens obtidas nesses instantes em que as microbolhas de ar apresentaram os maiores diâmetros médios observados. Tal fato está coerente com o esperado com o experimento realizado em batelada, em que a maior concentração de microbolhas de ar ocorre quando o volume de recirculação de água saturada é liberado no fundo da coluna do Flotateste, nos instantes iniciais dos ensaios de flotação. Entretanto, a coalescência aparentemente não foi influenciada com o aumento da recirculação pressurizada empregada no presente estudo, conforme pode ser observado nos resultados apresentados na Figura 53.

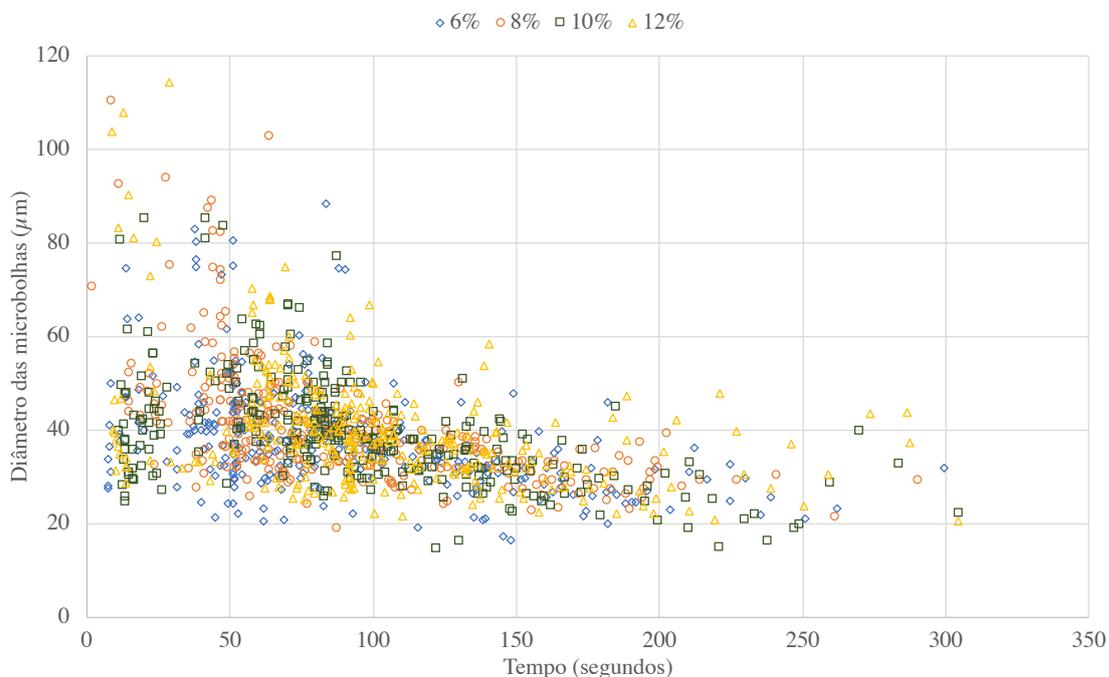


Figura 53 - Distribuição do diâmetro médio das microbolhas de ar para quatro diferentes recirculações pressurizadas – 6, 8, 10 e 12% que correspondem a $C_b = 6,84; 8,96; 10,99$ e $12,96 \text{ mg.L}^{-1}$ respectivamente ($P_{\text{SAT}} = 5 \text{ bar}$; $\theta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$).

5.6. Relação entre a eficiência do processo FAD e o diâmetro das partículas floculadas

O propósito principal dessa parte do trabalho foi a análise da eficiência geral do processo de flotação por ar dissolvido, resultados obtidos na seção 5.4 em relação aos diâmetros das partículas floculadas e das microbolhas de ar, resultados obtidos na seção 5.5.

Na Tabela 6 está apresentada a consolidação dos diâmetros obtidos para cada condição analisada no presente estudo. É importante frisar que cada diâmetro médio de Feret observado está associado a um G_F e um tempo de floculação específicos. No apêndice E estão todas as tabelas (Tabela 15 a 19) que relacionam o diâmetro médio de Feret, com o G_F e T_F , e as eficiências de remoção (cor aparente, $UV_{254\text{ nm}}$ e turbidez) para todas as recirculações pressurizadas estudadas no trabalho.

Tabela 6 – Relação entre cada condição de floculação (Gradiente médio de velocidade e Tempo médio de Floculação) e o diâmetro médio de Feret da condição)

| G_F (s^{-1}) | T_F (minutos) | Diâmetro médio de Feret (μm) |
|--------------------|-----------------|-------------------------------------|
| 60 | 3 | 47 ± 19 |
| 60 | 5 | 97 ± 35 |
| 60 | 8 | 293 ± 89 |
| 60 | 12 | 314 ± 104 |
| 60 | 16 | 370 ± 108 |
| 90 | 3 | 57 ± 18 |
| 90 | 5 | 106 ± 40 |
| 90 | 8 | 231 ± 68 |
| 90 | 12 | 261 ± 72 |
| 90 | 16 | 296 ± 94 |
| 130 | 3 | 77 ± 29 |
| 130 | 5 | 105 ± 40 |
| 130 | 8 | 174 ± 56 |
| 130 | 12 | 170 ± 61 |
| 130 | 16 | 193 ± 56 |

Para as microbolhas de ar, os diâmetros médios encontrados para cada uma das quatro condições foram estatisticamente iguais. Assim, nas quatro condições estudadas de recirculação ($R = 6, 8, 10$ e 12%) o diâmetro médio das bolhas teve valor de $40 \pm 12 \mu m$.

Os gráficos mostrados nas Figuras 54 a 56 relacionam a fração residual (cor aparente, turbidez e $UV_{254\text{ nm}}$) com todas as condições analisadas de G_F e T_F na etapa 4 e o respectivo diâmetro de Feret associado, para cada v_{FLOT} e para cada recirculação pressurizada. Deve-se ressaltar que a rigor esses gráficos devem ser analisados com algumas ressalvas, pois é possível a obtenção de um determinado tamanho de floco em duas ou mais condições de floculação (G_F e T_F), porém, a eficiência de remoção dos parâmetros escolhidos, principalmente o residual de cor aparente e de $UV_{254\text{ nm}}$, podem ser diferentes devido ao fato dos mesmos muitas vezes dependerem mais do tempo de detenção (T_F) do que do G_F . Por exemplo, com o T_F de 8 min associado ao G_F de 60 s^{-1} foram obtidos flocos com diâmetro médio de $293\text{ }\mu\text{m}$, valor esse bastante próximo ao diâmetro médio de $296\text{ }\mu\text{m}$ obtido com aplicação de $T_F = 16\text{ min}$ associado a um $G_F = 90\text{ s}^{-1}$. No entanto, a flotação dos flocos obtidos na primeira situação apresentaram resultados de remoção de cor aparente, $UV_{254\text{ nm}}$ e turbidez (respectivamente iguais a $82 \pm 2\%$, $83 \pm 4\%$, $80 \pm 7\%$, para a 6% de recirculação e $v_{FLOT} = 25\text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$) um tanto diferentes daqueles obtidos na segunda situação (respectivamente iguais a $93 \pm 3\%$, %, $91 \pm 2\%$, % e $87 \pm 2\%$, para a 6% de recirculação e $v_{FLOT} = 25\text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$). Mesmo assim, e agora sabendo que se trata de aproximação um tanto desprovida de rigor, é interessante a análise de gráficos contendo os resultados gerais de eficiência de remoção por flotação em função dos diferentes diâmetros médios obtidos experimentalmente para cada situação de fornecimento de microbolhas de ar (% R) e valores de v_{FLOT} , conforme apresentados nas Figuras 54 a 56.

±

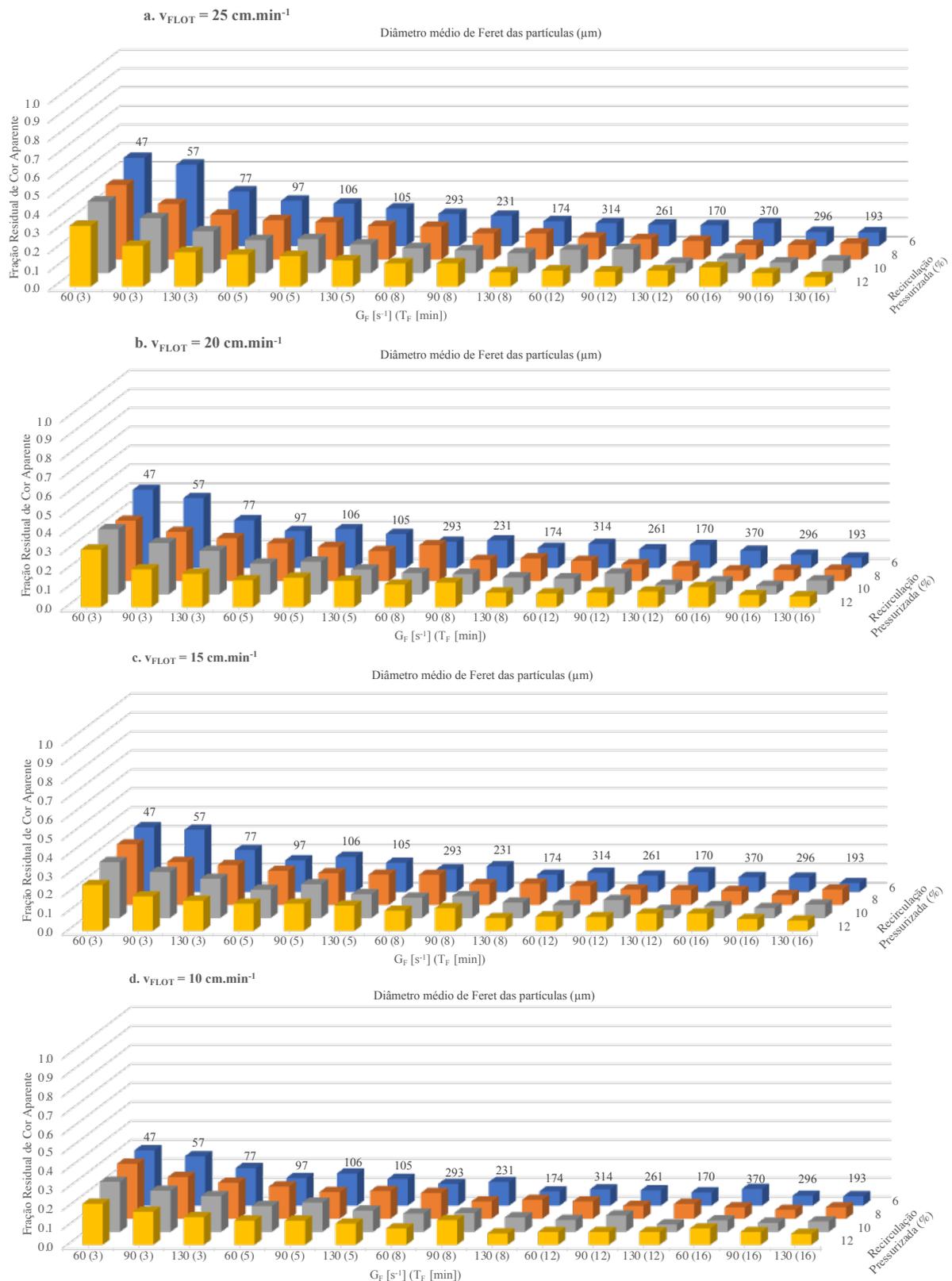


Figura 54 – Fração residual de Cor Aparente, com variações de G_F e T_F , com o valor de diâmetro médio de Feret associado para cada condição, e para cada recirculação pressurizada (a) $v_{FLOT} = 25 \text{ cm.min}^{-1}$; (b) $v_{FLOT} = 20 \text{ cm.min}^{-1}$; (c) $v_{FLOT} = 15 \text{ cm.min}^{-1}$; (d) $v_{FLOT} = 10 \text{ cm.min}^{-1}$; (DSA = 40 mg.L^{-1} ; $\text{pH}_{\text{coag}} = 6,40$; $G_{MR} = 900 \text{ s}^{-1}$; $T_{MR} = 20$ segundos; $P_{SAT} = 5 \text{ bar}$; $\theta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$).

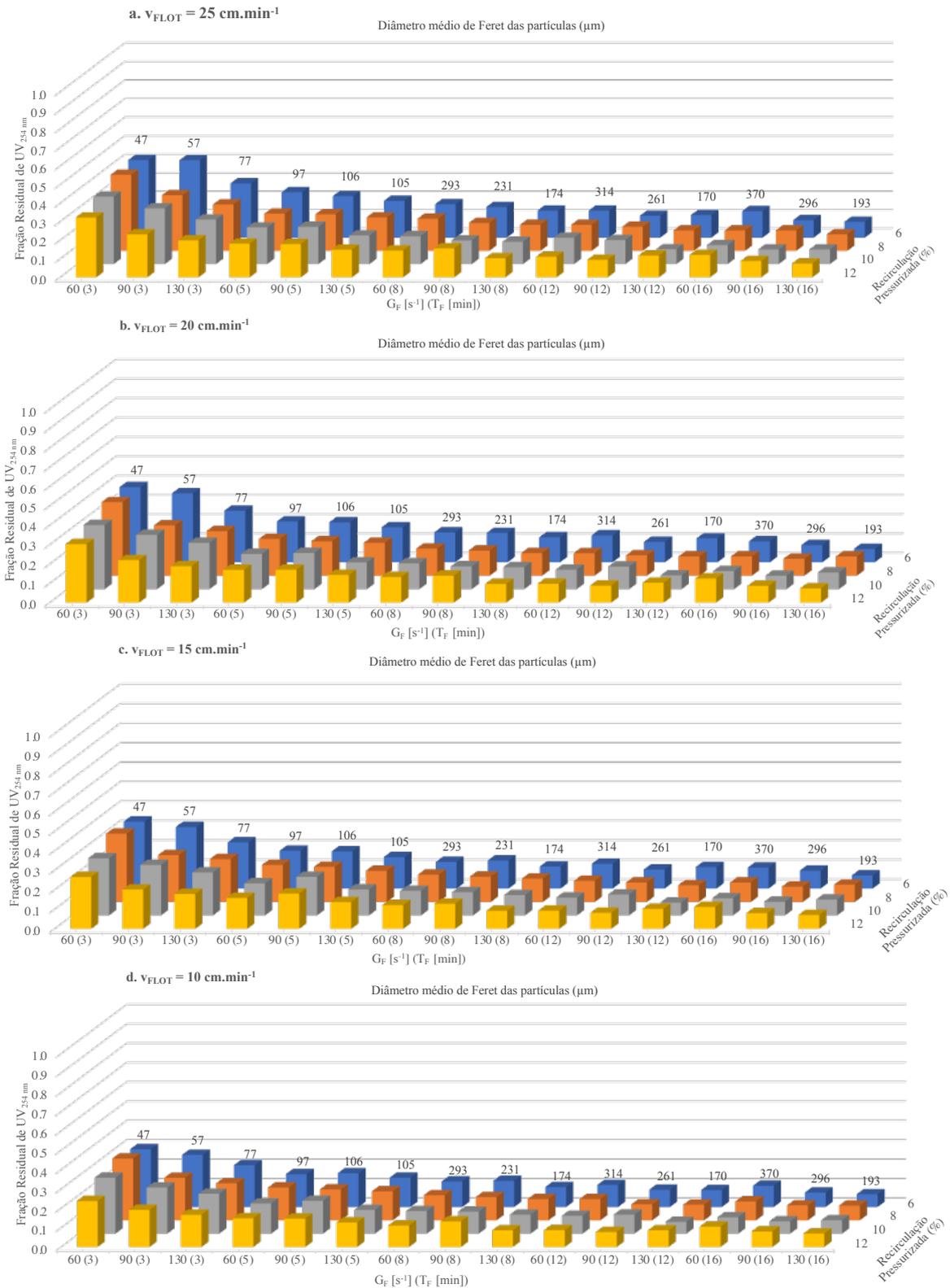


Figura 55 – Fração residual de $UV_{254 \text{ nm}}$ com variações de G_F e T_F , com o valor de diâmetro médio de Feret associado para cada condição, e para cada recirculação pressurizada para (a) $v_{FLOT} = 25 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$; (b) $v_{FLOT} = 20 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$; (c) $v_{FLOT} = 15 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$; (d) $v_{FLOT} = 10 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$; (DSA = $40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; $\text{pH}_{\text{coag}} = 6,40$; $G_{MR} = 900 \text{ s}^{-1}$; $T_{MR} = 20 \text{ segundos}$; $P_{SAT} = 5 \text{ bar}$; $\theta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$).

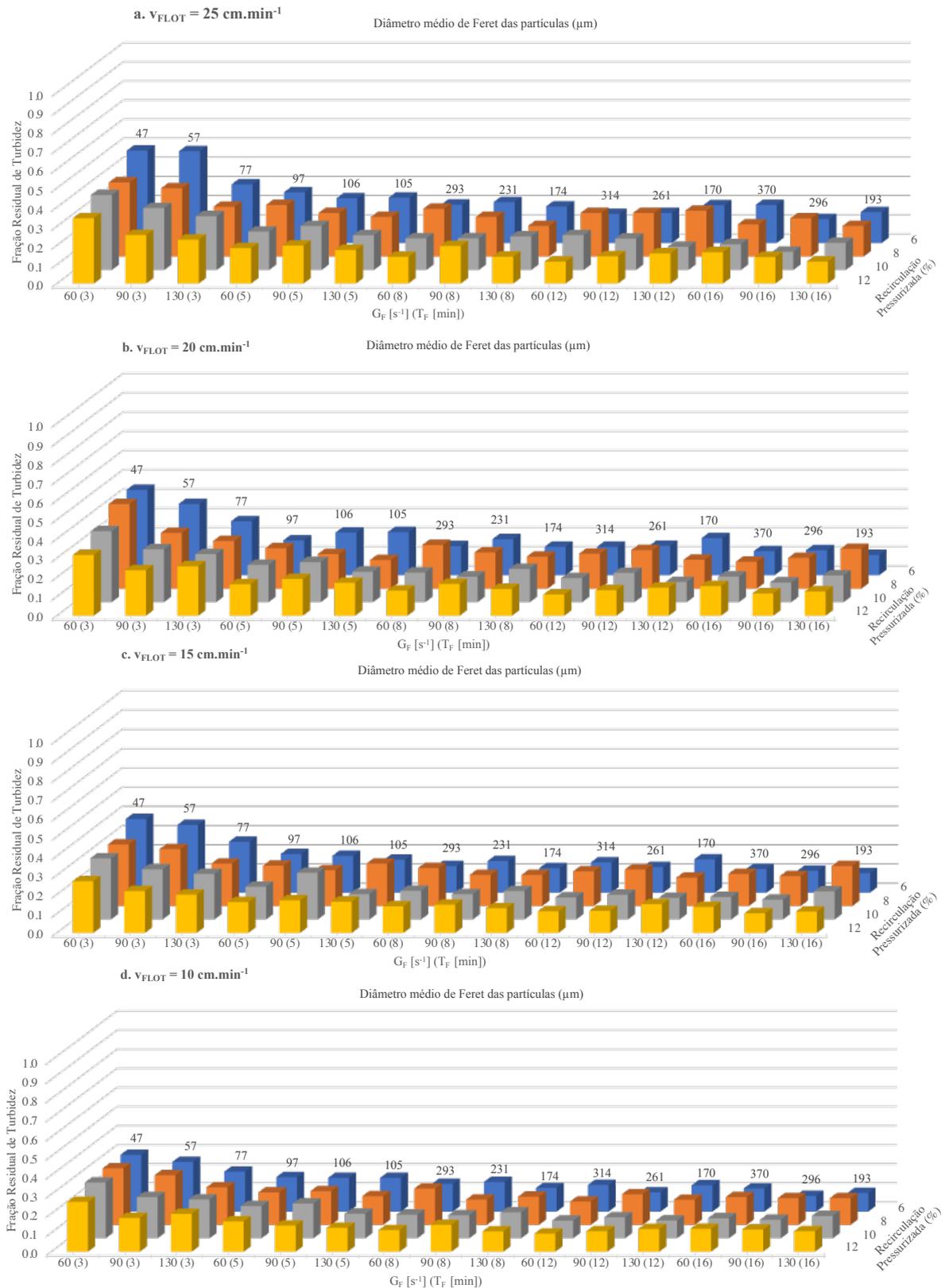


Figura 56 – Fração residual de Turbidez, com variações de G_F e T_F , com o valor de diâmetro médio de Feret associado para cada condição, e para cada recirculação pressurizada para (a) $v_{FLOT} = 25 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$; (b) $v_{FLOT} = 20 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$; (c) $v_{FLOT} = 15 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$; (d) $v_{FLOT} = 10 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$; (DSA = $40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; $\text{pH}_{\text{coag}} = 6,40$; $G_{MR} = 900 \text{ s}^{-1}$; $T_{MR} = 20$ segundos; $P_{SAT} = 5 \text{ bar}$; $\theta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$).

Como já dito anteriormente, a fração residual de 10% (0,1) equivale à uma cor aparente residual de 6,2 mg Pt-Co.L⁻¹, à UV_{254 nm} residual de 0,082 cm⁻¹ e ao residual de 0,5 NTU para a turbidez. Para a fração residual de 20% (0,2) esses valores são duas vezes maiores, logo, equivalem a 12,4 mg Pt-Co.L⁻¹ para a cor aparente, 0,164 cm⁻¹ para a UV_{254 nm} e 1 NTU para a turbidez.

Nos três gráficos (Figuras 54 a 56) estão os resultados obtidos para as quatro velocidades de flotação consideradas (25, 20, 15 e 10 cm.min⁻¹). De modo geral, quanto menor a velocidade de flotação, menor a fração residual obtida e, conseqüentemente, maior a eficiência do processo. É importante frisar que esse decréscimo da fração residual, à medida que a velocidade diminuiu, teve maior expressividade para os menores flocos estudados (partículas floculadas com diâmetros médio de Feret de 47, 57 e 77 µm). No menor floco considerado, a fração residual se encontrou no intervalo compreendido entre 0,4 a 0,5, nos três parâmetros qualitativos, para R = 6% e para a v_{FLOT} = 25 cm.min⁻¹. Já para a menor velocidade, essa fração residual estava entre 0,2 e 0,3. Dessa maneira, houve um ganho em eficiência no processo de aproximadamente 20%. Além disso, nos três menores flocos, que corresponderam ao tempo de floculação igual a 3 minutos, a recirculação impactou significativamente o processo. Quanto maior a recirculação pressurizada empregada no sistema, menores os residuais remanescentes em todas as velocidades analisadas. É importante notar que a condição com diâmetro de 77 µm e R = 12% já atingiu frações residuais inferiores à 20%, para os parâmetros qualitativos referentes à remoção de MON, e em todas as velocidades de flotação.

Nos casos em que os flocos possuíram menores diâmetros médios, a quantidade em número das partículas presentes no meio líquido foi maior do que quando os flocos tiveram maiores diâmetros. Assim, como é necessário no mínimo uma microbolha de ar para cada partícula floculada no processo de flotação por ar dissolvido (HAARDHOOF; EDZWALD, 2011), é de se esperar que quanto maior a quantidade em número de microbolhas de ar fornecida no sistema, maior será a razão entre microbolhas e partículas floculadas, fato que poderia aumentar a eficiência geral. Como visto na seção 5.5.2. *Diâmetro das microbolhas de ar*, o aumento da recirculação pressurizada não influenciou o diâmetro das microbolhas de ar (nos casos estudados). Dessa maneira, como o diâmetro das microbolhas de ar foi o mesmo, o aumento na concentração em massa de ar dissolvido e no volume de bolhas injetados no sistema, aumentou o valor numérico de bolhas disponíveis para a colisão. Tal situação poderia ser uma possível explicação para a tendência que ocorreu para as menores partículas analisadas.

Com relação aos três diâmetros em torno de 100 μm (97, 105 e 106 μm), foi visto na seção 5.5.1. Diâmetro das partículas floculadas, que esses três diâmetros médios possuíam valores estatisticamente iguais. Além do mais, como já analisado na seção 5.4, cada condição de recirculação e de v_{FLOT} forneceu resultados iguais para os três diâmetros considerados. Entretanto, é importante notar que tanto o aumento na recirculação pressurizada como a diminuição na velocidade de flotação acarretaram a diminuição nos residuais caracterizados.

Para diâmetros médios de Feret superiores ou iguais a 170 μm , foi notado que todas as frações residuais estudadas estavam situadas abaixo de 18% em relação à cor aparente e a $UV_{254\text{ nm}}$. Para a turbidez, a fração residual situou-se ligeiramente acima de 20% em algumas condições e para as maiores v_{FLOT} . Como já dito anteriormente, a eficiência superior a 80% no processo resultou em um efluente com boa qualidade. Nesse caso, o impacto tanto da recirculação pressurizada como da velocidade de flotação teve intensidade menor do que a observada para os seis primeiros diâmetros (47 a 106 μm).

Nos diâmetros acima de 170 μm , os tempos de floculação empregados foram iguais ou superiores a 8 minutos para os três valores de G_F considerados ($G_F = 60, 90$ e 130 s^{-1}). Nestes casos, o sistema considerado apresentou maior robustez. Tanto a variação do G_F e do tempo de floculação, como da recirculação e da velocidade de flotação resultaram em um efluente com boa qualidade, como já comentado.

Diante de todo o exposto, foi percebido que o diâmetro das partículas floculadas foi um parâmetro essencial para o processo de flotação por ar dissolvido para a água estudada. Os diâmetros menores resultaram em efluentes com característica final razoável, porém pôde-se inferir maior grau de instabilidade no processo, já que tanto a mudança no valor de G_F quanto na %R fornecida ao sistema afetaram a eficiência de remoção significativamente. Os diâmetros maiores foram atingidos por meio de maiores tempos de floculação e geraram condições mais estáveis quanto aos aspectos operacionais (controle da floculação) tornando o sistema mais robusto.

As recirculações pressurizadas usadas durante este trabalho forneceram distribuições de tamanho das microbolhas com diâmetros médios iguais a $40 \pm 12\text{ }\mu\text{m}$, valor situado dentro da faixa ótima de diâmetro conhecida na literatura. Supõe-se, nesse caso, que a variação do diâmetro das bolhas de ar não impactou a eficiência do processo. Entretanto, como os diâmetros

das bolhas foram iguais, quanto maior a recirculação pressurizada empregada, maior foi o valor numérico de microbolhas fornecida ao sistema. Esse fato influenciou a eficiência do sistema, principalmente, nos menores diâmetros, já que quanto maior a recirculação, maior foi a eficiência para os diâmetros médios iguais a 47, 57, 77, 97, 105 e 106 μm .

5.7. Modelo White Water Blanket

O intuito desta última parte do trabalho teve um *caráter investigativo*. Os dados experimentais foram inseridos no modelo matemático da zona de contato proposto por Haarhoff e Edzwald (2004) com o objetivo de comparar os resultados obtidos no presente trabalho às conclusões obtidas pelos autores. O citado modelo foi proposto para unidades FAD com escoamento contínuo. Como as colunas de flotação presentes no equipamento Flotateste são unidades estáticas com alimentação por batelada, foi assumido que o tempo de detenção na zona de contato no reator contínuo pode ser igualado ao intervalo de tempo decorrido entre a introdução do volume de recirculação e a extração da amostra referente a uma determinada velocidade de flotação, conforme será visto com mais detalhe.

O modelo White Water Blanket, objeto de estudo, e toda a formulação matemática necessária que foi empregada nesta seção está descrita resumidamente no item 3.4.1. Modelo White Water Blanket.

É importante notar que o caráter do estudo foi, somente, investigativo devido à diversas limitações em empregar dados experimentais obtidos em reatores em batelada em um modelo matemático desenvolvido para reatores com escoamento contínuo. Inicialmente, os valores de entrada do modelo, para o cálculo da eficiência de um único coletor foram tanto os diâmetros das partículas floculadas como os das microbolhas de ar. No estudo experimental, foi encontrada uma distribuição de tamanho tanto para os flocos como para as microbolhas. Os valores que foram empregados na formulação do modelo foram os diâmetros médios encontrados para cada situação de floculação (Tabela 6) e para as microbolhas de ar.

O parâmetro α_{pb} é um parâmetro relacionado à coagulação das partículas floculadas, reflete a eficiência de ligação entre as bolhas e as partículas. Para os autores do modelo, na condição ótima de coagulação esse valor situa-se no intervalo entre 0,5 e 1,0, sendo que 0,5 já é um valor adotado para a condição ótima. Como todos os ensaios foram feitos em uma condição ótima de coagulação, adotou-se um valor pertencente a esse intervalo. Contudo, não há evidências para se saber qual o valor exato desse parâmetro. Assim, seguindo a orientação dos autores do modelo (HAARHOFF; EDZWALD, 2011), foi adotado o valor $\alpha_{pb} = 0,50$.

Entretanto, a maior limitação do modelo tem caráter hidrodinâmico. A modelização matemática da zona de contato foi realizada para escala piloto e plena, assumindo um reator com escoamento em pistão ideal. Os dados experimentais foram obtidos em regime de alimentação por batelada no aparelho flotateste. Dessa maneira, para permitir uma estimativa, mesmo que aproximada, do tempo de detenção da zona de contato foi assumido que no reator batelada tal parâmetro possa ser igualado ao intervalo de tempo decorrido entre a introdução do volume de recirculação e a extração da amostra referente à uma determinada velocidade de flotação, sendo que num reator batelada tal velocidade pode ser equiparada (de modo aproximado) à taxa de aplicação superficial num flotor com escoamento contínuo.

Essa aproximação parece ser possível tendo em vista que os próprios autores do modelo, ora utilizado, em obra posterior (HAARHOFF; EDZWALD, 2011, pg. 7-37) afirmaram que a equação do modelo que descreve a cinética de colisões e aderência de partículas nas microbolhas desenvolvida para reator com escoamento contínuo tipo pistão é idêntica à equação desenvolvida para reatores FAD tipo batelada. Dessa maneira, segundo os autores, o desempenho da FAD em reatores batelada é igual ao desempenho previsto para a zona de contato com escoamento contínuo e pistonado em reatores FAD.

Para o cálculo inicial da eficiência total de um único coletor foram utilizados os parâmetros da Tabela 7. A eficiência total de um único coletor para cada diâmetro médio de Feret estudado está na Figura 57.

Tabela 7 – Parâmetros necessários e os respectivos valores para o cálculo da eficiência de um único coletor

| Parâmetro | Valor |
|--|----------------------------|
| k - Constante de Boltzmann (J.K ⁻¹) | 1,3807 x 10 ⁻²³ |
| T – Temperatura Absoluta (K) | 293 |
| g – Constante gravitacional (m.s ⁻²) | 9,806 |
| ρ_w * - Densidade da água (kg.m ⁻³), | 998,2 |
| ρ_b * - Densidade das microbolhas de ar (kg.m ⁻³) | 1,19 |
| ρ_p - Densidade da partícula ou do floco (kg.m ⁻³) | 1100 |

| Parâmetro | Valor |
|--|---|
| d_p - Diâmetro da partícula ou do floco (μm) | 15 condições (entre 47 e 370); Tabela 6 |
| d_b - Diâmetro da bolha (μm) | 40 |
| μ_w * - Viscosidade dinâmica da água (N.s.m^{-2} ou $\text{kg.m}^{-1}\text{s}^{-1}$) | 0,0010016 |

* Esses parâmetros são tabelados e dependem da temperatura da água (no estudo em questão fixada em $T = 20,0 \pm 0,5$ °C), eles foram retirados de Haardhoff e Edzwald (2011).

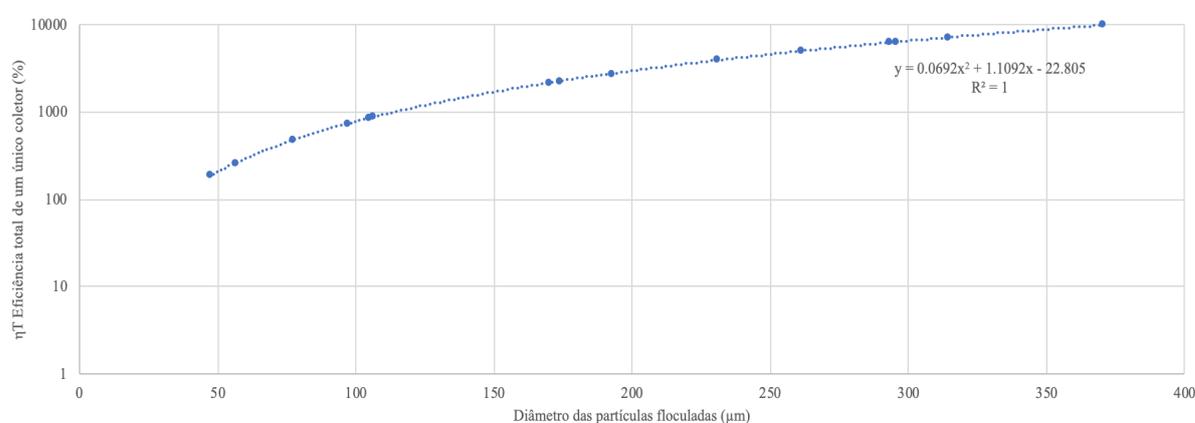


Figura 57 – Eficiência total de um único coletor em função do diâmetro médio de Feret das partículas floculadas ($\text{DSA} = 40 \text{ mg.L}^{-1}$, $\text{pH} = 6,4$, $G_{\text{MR}} = 900 \text{ s}^{-1}$; $T_{\text{MR}} = 20$ segundos).

Como pode ser visto na Figura 57, todos os tamanhos dos flocos considerados no estudo possuíram $\eta_T > 1$, isto é, a eficiência total de um único coletor foi superior a 100%. Assim, para que esse parâmetro seja considerado no cálculo da eficiência da zona de contato, ele foi limitado ao valor de 1 para todas as condições consideradas. Os parâmetros necessários para o cálculo da eficiência na zona de contato estão na Tabela 8.

Tabela 8 – Parâmetros necessários e respectivos valores para o cálculo da eficiência na zona de contato

| Parâmetro | Valor |
|---|----------|
| α_{pb} - Eficiência de ligação entre bolhas e partículas | 0,50 |
| η_T - Eficiência total de um único coletor | 1 (100%) |
| d_b - Diâmetro da bolha (μm) | 40 |

| Parâmetro | Valor |
|---|--|
| v_b - Velocidade ascensional da bolha (m.min ⁻¹); obtida pela equação de Stokes (8) para o diâmetro médio da microbolha de 40 μm | 0,05206 |
| ϕ_b - Concentração em volume da bolha (mL.L ⁻¹) | 4 condições (6,46; 8,46; 10,37; 12,14) |
| t_{cz} - Tempo de detenção médio da zona de contato (minutos) | 4 condições (1,2; 1,5; 2 e 3 minutos) |

Os diâmetros médios das microbolhas foram retirados da seção 5.5.2. Diâmetro das microbolhas de ar (foi adotado o valor médio da distribuição de tamanhos obtidos experimentalmente, o qual foi igual a 40 μm) e a velocidade ascensional das microbolhas foi obtida por meio da equação clássica de Stokes (Equação 9). A concentração em volume das microbolhas (ϕ_b) foi calculada a partir do C_b das microbolhas de ar dissolvido nas condições estudadas e considerando que a pressão na câmara de saturação era de 500 kPa e a altitude do local no qual foi realizado o experimento de 898 m (Tabela 10). Como foi usada a aproximação entre a velocidade de flotação e o tempo médio de detenção na zona de contato, os resultados que buscaram correlacionar esses parâmetros estão na Tabela 9.

Tabela 9 – Valores correspondentes ao intervalo de tempo entre a introdução do volume de recirculação pressurizada e a extração da amostra da coluna de flotação do Flotateste, intervalo de tempo esse que foi utilizado como aproximação para representar o tempo de detenção na zona de contato previsto no modelo adotado. O ponto de coleta no flotatesto é localizado 30 cm do ponto em que é introduzido o volume de água de recirculação pressurizada

| V_{FLOT} (cm.min⁻¹) | t_{cz} (min) |
|---|----------------------------------|
| 25 | 1,2 |
| 20 | 1,5 |
| 15 | 2 |
| 10 | 3 |

Tabela 10 – Relação entre Recirculação pressurizada, concentração em massa de ar dissolvido e concentração em volume das microbolhas

| R (%) | C_b (mg.L ⁻¹) | ϕ_b (mL.L ⁻¹) |
|-------|-----------------------------|--------------------------------|
| 6 | 6,84 | 6,46 |
| 8 | 8,96 | 8,46 |
| 10 | 10,99 | 10,37 |
| 12 | 12,96 | 12,14 |

Assim, com todos esses dados delimitados foi possível inserir os dados experimentais no modelo matemático para a determinação da eficiência da zona de contato proposta por Haarhoff e Edzwald (2004), conforme mostrado no item 3.4.1. White-Water Blanket Model, equações 2 a 9.

Para a água de estudo e para os parâmetros obtidos em laboratório (diâmetro médio das partículas floculadas e das microbolhas de ar) ou variados no estudo (tempo médio de detenção na zona de contato, concentração em volume das microbolhas de ar dissolvido), a eficiência prevista pelo modelo em questão resultou em 100% para todas as condições analisadas (no total foram 240 situações simuladas).

Assim, é possível observar que em qualquer tempo de detenção estimado para a zona de contato e qualquer valor C_b resultaram em uma fração residual nula, ou seja, na eficiência máxima, 100%. Além do mais, como a eficiência prevista pelo modelo foi a mesma para todas as condições de floculação, seria possível supor que a eficiência obtida a partir do diâmetro 47 μm já seria uma máxima observada para o processo de flotação por ar dissolvido.

Dessa maneira, quando os resultados (dados de saída) do modelo matemático foram comparados com os dados obtidos em laboratório houve uma discrepância para os menores diâmetros médios observados (ver Tabelas 15 a 20, apêndice E). Em laboratório, nesses diâmetros, apesar da eficiência de remoção de cor aparente, $UV_{254\text{ nm}}$ e turbidez serem superiores a 50% em todas as condições ensaiadas, a eficiência ainda aumentou quanto maior a concentração em massa de ar dissolvido que foi fornecida ao sistema. Além disso, a eficiência de remoção da cor aparente, $UV_{254\text{ nm}}$ e turbidez cresceu visualmente a medida que o diâmetro dos flocos aumentou, principalmente até os diâmetros médios próximos de 100 μm . A partir do

diâmetro médio de 170 μm , a eficiência permaneceu maior do que 80% em todos os casos, chegando a ultrapassar 90% de remoção de cor aparente para diâmetros médios dos flocos acima de 170 μm , em diversas condições (ver Tabelas 15 e 16, apêndice E), e tiveram oscilação em valor com menor intensidade do que para os diâmetros médios inferiores a 100 μm .

Em geral, a partir dos resultados obtidos em laboratório e para a água em estudo, a FAD apresentou maior eficiência para as condições em que os diâmetros das partículas floculadas foram maiores que 100 μm . Além disso, apesar dos diâmetros menores terem fornecido uma eficiência razoável para o processo, este pôde ser otimizado por meio, principalmente do tempo de floculação, o qual proporcionou um aumento do tamanho das partículas floculadas.

Dessa maneira, para o presente trabalho e tendo em vista todas as limitações supracitadas, a aplicação do modelo White Water Blanket, adaptado em caráter especulativo para as colunas FAD do Flotateste, não foi capaz, para a água de estudo, de prever os resultados obtidos experimentalmente. Ademais, os autores do modelo White Water Blanket (EDZWALD; HAARDHOOF, 2004) concluíram que o tamanho médio ótimo para a flotação de partículas floculadas estaria compreendido no intervalo de 25 a 50 μm ; porém o único diâmetro analisado em laboratório neste trabalho que se encontrava nesse intervalo (47 μm), foi o que apresentou os piores resultados de eficiência em todas as condições analisadas. Entretanto, nas condições experimentais do estudo, como o tempo de floculação nessa situação foi abaixo (3 minutos), pode ser que a baixa eficiência observada tenha ocorrido devido à uma coagulação/floculação incompleta e não ao baixo valor do diâmetro médio de Feret das partículas floculadas. Assim, recomenda-se que futuros trabalho na área procurem observar os diâmetros dos flocos situados neste intervalo ótimo sugerido pelos autores (25 a 50 μm), mas que também observem uma coagulação/floculação completa.

Os outros modelos citados na seção 3.4. Modelização Matemática (REALI, 1991; FUKUSHI; TAMBO, 1998; HAN; KIM; DOCKO, 2001; LEPPINEN, 1999), modelam a zona de contato tratando as colisões de forma semelhante à floculação heterogênea com partículas ou flocos colidindo com as bolhas. Apesar de diferenças entre essas modelizações matemáticas, esses autores chegaram a conclusão que as partículas floculadas com diâmetro superior a 100 μm resultam em eficiências do processo FAD maiores, semelhantemente ao que encontrado no trabalho realizado.

6. Conclusões e recomendações

Após a realização da investigação experimental apresentada na presente dissertação, para a qual foram utilizadas colunas estáticas de flotação (equipamento de bancada designado Flotatest) alimentado em regime de bateladas com água para abastecimento com cor moderada e turbidez baixa, foi possível chegar às seguintes conclusões:

- Para $G_F = 130 \text{ s}^{-1}$, a partir de 8 minutos de floculação foi observada uma curva de distribuição de tamanho dos flocos relativamente constante. Como consequência, os resultados de cor aparente, $UV_{254 \text{ nm}}$ e turbidez para essa situação apresentaram-se estatisticamente iguais a partir de 12 minutos, para $v_{\text{FLOT}} = 25 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ e de 8 minutos para $v_{\text{FLOT}} \leq 20 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$. Além disso, o sistema operado com $G_F = 130 \text{ s}^{-1}$ e $T_F \geq 8$ minutos não é influenciado pela quantidade de ar dissolvido fornecido ao sistema. Nesse valor de G_F , o diâmetro médio de Feret observado com 8 e 12 minutos teve valor próximo a $170 \mu\text{m}$ e com 16 minutos próximo a $190 \mu\text{m}$, sendo que para essa faixa de tamanho de flocos todas as frações residuais estudadas estavam situadas abaixo de 18% em relação à cor aparente e a $UV_{254 \text{ nm}}$. Para a turbidez, a fração residual situou-se ligeiramente acima de 20% em algumas condições e para as maiores v_{FLOT} . Foram detectadas outras combinação de G_F e T_F que forneceram valores similares para remoção de MON e turbidez, associadas a diâmetros maiores de flocos, como, por exemplo, $G_F = 90 \text{ s}^{-1}$ e $T_F = 12$ ou 16 min.
- Para as microbolhas de ar, todas as distribuições de tamanho analisadas (para C_b entre 6,84 a $12,96 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) tiveram o valor de diâmetro médio estatisticamente igual ($40 \pm 13 \mu\text{m}$).
- Os diâmetros médios de Feret das partículas floculadas, em geral, cresceram a medida que o tempo de floculação aumentou. Com o tempo de floculação equivalente a três minutos, o $G_F = 60 \text{ s}^{-1}$ formou os menores flocos observados, os quais cresceram à medida que o valor de G_F aumentou. Com $T_F = 5$ minutos, todos os valores de G_F formaram flocos que possuíam o mesmo diâmetro médio. Para valores de T_F maiores que 5 min, ou seja, a partir do tempo de floculação de 8 minutos, os resultados foram opostos aos observados com 3 minutos. O menor valor de G_F investigado proporcionou a formação dos maiores flocos e o maior valor, os menores.

- Com baixo tempo de floculação ($T_F = 3$ minutos), quanto maior o G_F empregado, maior foi a eficiência geral da FAD. Considerando apenas a remoção da matéria orgânica (medida indiretamente pelos parâmetros cor aparente e UV_{254}), os tempos de floculação maiores que 12 minutos ou gradientes médios de velocidade na floculação mais elevados resultaram no efluente com melhor qualidade, porém o aumento na eficiência de 12 para 16 minutos é singelo ou não significativo em termos práticos ao se considerar que a clarificação por flotação antecede sempre unidades de filtração onde ocorre o polimento final em sistemas de tratamento de água para abastecimento, sendo que para T_F de 12 min o valor mínimo de G_F para otimização da flotação esteve em torno de 90 s^{-1} . Por outro lado, considerando apenas o parâmetro turbidez, esse tempo de floculação pôde ser reduzido a 8 minutos e os valores G_F (entre 60 a 130 s^{-1}), a partir desse T_F , não apresentaram impacto considerável neste parâmetro de qualidade para a água de estudo utilizada. Portanto, se forem consideradas conjuntamente a eficiência de remoção de cor, UV_{254} e turbidez, a melhor qualidade do efluente da etapa de flotação para o tipo de água investigada (água com cor moderadamente elevada e baixa turbidez) foi obtida com a aplicação de T_F mínimo de 12 min associado a valores de G_F maiores ou iguais a 90 s^{-1} , aliadas ao fornecimento de uma concentração (em massa) de ar para a flotação na faixa de 6,8 a 9,0 g de ar por m^3 de água floculada. Nessas condições otimizadas de floculação o tamanho médio dos flocos esteve na faixa de 170 a 296 μm , e os residuais de cor e turbidez estiveram sempre menores que $8 \text{ mg Pt-Co.L}^{-1}$ e 0,9 NTU respectivamente.

- Em caráter investigativo, a aplicação do modelo White Water Blanket não caracterizou os resultados encontrados em laboratório com emprego de colunas FAD com alimentação por batelada (Flotatest). O único diâmetro analisado em laboratório ($47 \pm 13 \mu\text{m}$) que pertencia ao intervalo ótimo definido pelos autores (entre 25 e 50 μm), apresentou os piores resultados de eficiência em todas as condições analisadas. Entretanto, nas condições experimentais do estudo, como o tempo de floculação nessa situação foi abaixo (3 minutos), pode ser que a baixa eficiência observada tenha ocorrido devido à uma coagulação/floculação incompleta e não ao baixo valor do diâmetro médio de Feret das partículas floculadas. Assim, recomenda-se que futuros trabalho na área procurem observar os diâmetros dos flocos situados neste intervalo ótimo sugerido pelos autores (25 a 50 μm), mas que também observem uma coagulação/floculação completa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, J. C. **Influência da velocidade cross-flow na câmara de flotação na eficiência de unidades de flotação por ar dissolvido tratando água para abastecimento.** Tese (Mestrado)-Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

AL-THYABAT, S.; MILES, N. J. **An improved estimation of size distribution from particle profile measurements.** Powder Technology, v. 166, p. 152–160, 2006.

BRASIL. **Portaria de Consolidação nº5** de 28 de setembro de 2017.

CONSEGLIO, M. S. D. R. **Caracterização de partículas abrasivas segundo diferentes modelos de medição de fator de forma.** Curitiba: Universidade Tecnológica do Paraná, 2009.

GORCZYCA, B; ZHANG, M. **Floc Size Distributions in Dissolved Air Flotation of Winnipeg Tap Water,** Environmental Technology, 28:3, 243-254, (2007).

EDZWALD, J. K.; WALSH, J. P. **Dissolved Air Flotation: Laboratory and Pilot Plant Investigations.** USA: AWWA Research Foundation and American Water Works Association, 107p., 1992.

EDZWALD, J. K. **Dissolved Air Flotation and me.** Water Research, v.44. p. 2077-2106, 2010.

EDZWALD, J. K. **Water Quality and Treatment: A Handbook on Drinking Water.** McGraw Hill, 2011.

FUKUSHI, K.; TAMBO, N.; MATSUI, Y. **A kinetic model for dissolved air flotation in water and wastewater treatment.** Water Science and Technology, v. 31, n. 3-4, p. 37– 47, 1995.

Guidelines for Drinking Water Quality. World Health Organization. 4th edition, 2011.

GRAU, R. A.; HEISKANEN, K. **Visual technique for measuring bubble size in flotation machines.** Minerals Engineering, v. 15, p. 507–513, 2002.

HAHN, H. **Wastewater Treatment.** In: IVES, K. J. (ed.) The Scientific Basis of Flotation. Boston, USA: NATO ASI Series, Martinus Nijhoff, p. 379-413, 1984.

HAARHOFF, J.; EDZWALD, J. K. **Dissolved air flotation modeling: insights and shortcomings.** Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA, Great Britain, v. 53, n. 3, p. 127-150, 2004.

HAARHOFF, J.; EDZWALD, J. K. **Dissolved air for water clarification.** American Water Works Association. McGraw Hill, 2011.

HAARHOFF, J. **Dissolved air flotation: Progress and prospects for drinking water treatment.** In: The 5th International Conference on Flotation an Water and Wastewater, Seoul Proceedings. Seoul: International Water Association – IWA, v.1, p.1-15., 2007

HAMMER, Ø. & HARPER, D.A.T. 2006. **Paleontological Data Analysis.** Blackwell.

HAN, M.; KIM, W.; DOCKKO, S. **Collision efficiency factor of bubble and particle (α_{bp}) in DAF: theory and experimental verification.** Water Science and Technology, v. 43, n. 8, p. 139–144, 2001.

HAN, M.; KIM, T.; KIM, J. Effects of floc and bubble size on the efficiency of the dissolved air flotation (DAF) process. **Water Science and Technology**, v. 56, n. 10, p. 109–115, 2007.

MATSUI, Y.; FUKUSHI, K.; TAMBO, N. **Modeling, simulation and operational parameters of dissolved air flotation.** J. Wat. SRT–AQUA, v. 47, n. 1, p. 9 -20, 1998.

MIKLI, V.; KÄERDI, H.; KULU, P.; BESTERCI, M. Characterization of powder particle morphology. **Proc. Estonian Acad. Sci. Eng.**, 2001, v. 7, n. 1, p. 22–34.

METCALF E EDDY. **Wasterwater Engineering: Treatment and Reuse.** 4a ed. International Edition. Revisadapor TCHOBANOGLIOUS, G.; BURTON, F.L.; STENSEL, H.D. New York: McGrawHill, 819 p. (MacGraw_Hill series in civil and environmental engineering), 2003

MORUZZI, R. B. **Avaliação da Influência da Distribuição de Tamanho de Partículas e do Binômio Velocidade/Tempo de Detenção na Zona de Reação no Desempenho da Flotação com Utilização de Sonda Ultrasônica e Técnica de Análise por Imagem.** Tese de doutorado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos: EESC – USP. 240p., 2005.

MORUZZI, R. B., Reali, M.A.P. **Characterization of micro-bubble size distribution and flow configuration in DAF contact zone by a non-intrusive image analysis system and tracer tests.** Water Science and Technology, 2010.

MORUZZI, R. B.; REALI, M. A. P.. **Characterization of micro-bubbles sizes distribution in DAF contact zone by a non-intruse image analysis system.** In: The 5th International Conference on Flotation In Water and Wastewater Systems – Conference Proceedings. Seoul: International Water Association – IWA, 2007, v.1, p.79-88, 2007.

LEPPINEN, D. M. **Trajectory analysis and collision efficiency during microbubble flotation.** Journal of Colloid and Interface Science, v. 212, p. 431– 442, 1999.

LEPPINEN, D. M.; DALZIEL, S. B.; LINDEN, P. **Modeling the global efficiency of dissolved air flotation.** Water Science and Technology, v. 43, n. 8, p. 159–166, 2001.

PARK, S.; KIM,T.; KIM, Y. **Effects of particle properties and bubble size on the efficiency of dissolved air flotation.** In: The 5th International Conference on Flotation in Water and Wastewater Systems, 2007. Seoul. Proceedings the 5th International Conference on Flotation in Water and Wastewater Systems, 2007.

PIOLTINE, A. ; REALI, M. A. P. **Influence of Flocculated Particles Size on the Efficiency of Dissolved Air Flotation.** In: 8th IWA Leading-Edge Conference on Water and Wastewater Technologies, 2011, Amsterdam, The Netherlands. 8th IWA Leading-Edge Conference on Water and Wastewater Technologies 6th-10th June 2011.

PIOLTINE, A. **Influência do tamanho de partículas floculadas na eficiência da clarificação de águas para abastecimento por flotação.** Tese (Doutorado em Ciências, Programa de Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2013.

PIOLTINE, Andre; REALI, Marco Antonio Penalva. **Influência do tamanho de flocos e da concentração de ar dissolvido na eficiência da flotação.** Engenharia Sanitaria e Ambiental, [s.l.], v. 20, n. 3, p.513-523, set. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-4152201502000090030>.

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, 373p. 1991. 2.v.

REALI, M. A. P.; PATRIZZI, L. J. (2007). **The influence of the contact zone configuration on the efficiency of a DAF pilot plant.** In: The 5th International Conference on Flotation In Water and Wastewater Systems – Conference Proceedings. Seoul: InternationalWaterAssociation – IWA, 2007, v.1, p.135-142.

RICHTER, C.A. **Água: Métodos e Tecnologia de Tratamento.** São Paulo: BLUCHER, 2009.

SCHOFIELD, T. **Dissolved air flotation in drinking water production.** Water Science and Technology., v.43, n.8, p.9-18, 2001.

Apêndice A – Relação entre Cor Aparente, Carbono Orgânico Total e Absorbância em 254 e 495 nm

A determinação da cor aparente e do carbono orgânico total foram feitas de maneira indireta. Buscou-se relacionar um comprimento de onda, que poderia ser medido por meio do espectrofotômetro (Hach DR 5000 em cubeta de 5 cm de caminho ótico) com a cor aparente medida a partir do colorímetro de discos (Colorímetro Orbeco, Hellige 711). Vale ressaltar que tal procedimento foi necessário, já que é requerido um volume de 50 mL para a análise da cor no colorímetro de discos, o que é inviável experimentalmente para os ensaios em batelada no Flotatest.

A medida da absorbância, para a correlação com a cor aparente e verdadeira, foi feita em comprimento de onda de 495 nm. Esse parâmetro foi retirado de Araújo (2010) e foi refeito em laboratório.

Dessa maneira, a partir do método descrito no Standart Methods (2012), foram relacionadas as medidas fornecidas pelo Colorímetro de Discos e a Absorbância medida pelo Espectrofotômetro, no comprimento de onda de 495 nm; a correlação está na Figura 58.

Além disso, a absorbância medida em 254 nm, a qual é uma medida dos orgânicos ricos em constituintes aromáticos (tal como as substâncias húmicas), foi relacionada com a cor aparente medida por meio do colorímetro de discos (Figura 59) e com o carbono orgânico total (Figura 60). Como a cor da água analisada é devido à substância húmicas (aromáticas) a medida da absorbância em 254 nm seria uma medida indireta da presença de matéria orgânica na água analisada.

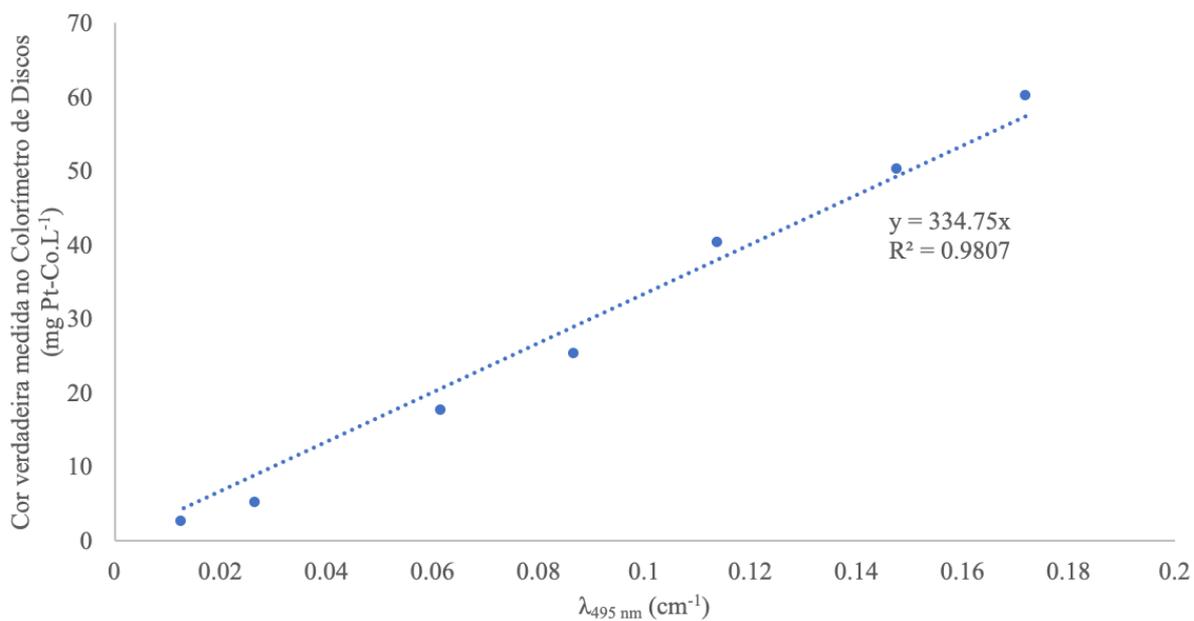


Figura 58 – Relação linear entre a Absorbância medida no comprimento de onda 495 nm e o colorímetro de discos (Colorímetro Orbeco, Hellige, 711) para oito diferentes concentrações de ácido húmico

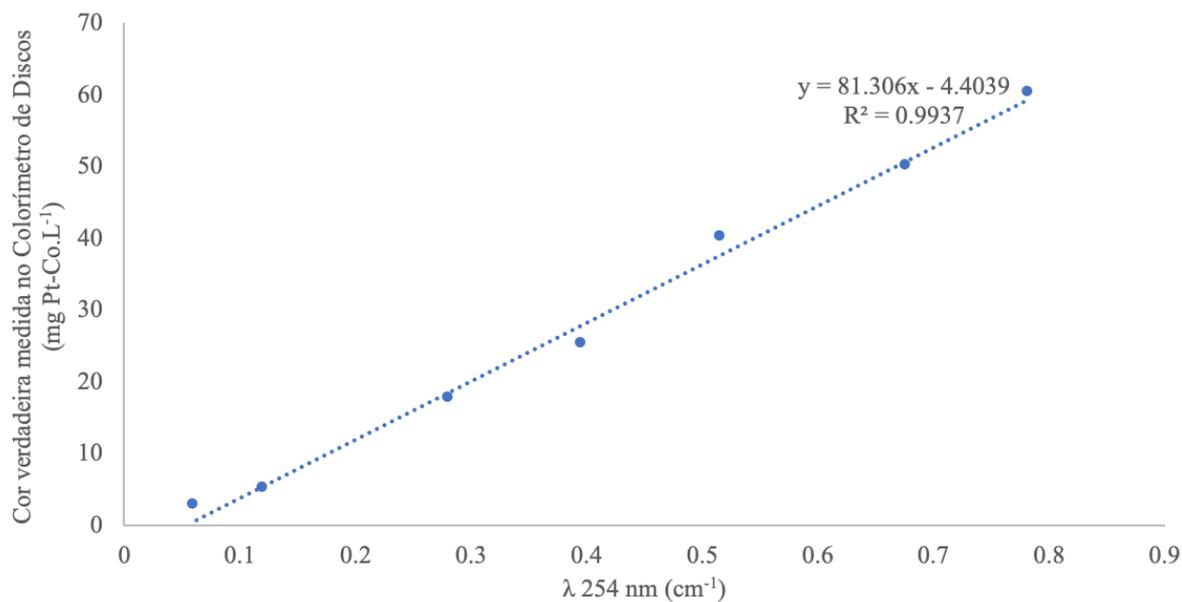


Figura 59 – Relação linear entre a Absorbância medida no comprimento de onda 254 nm e o colorímetro de discos (Colorímetro Orbeco, Hellige, 711) para oito diferentes concentrações de ácido húmico

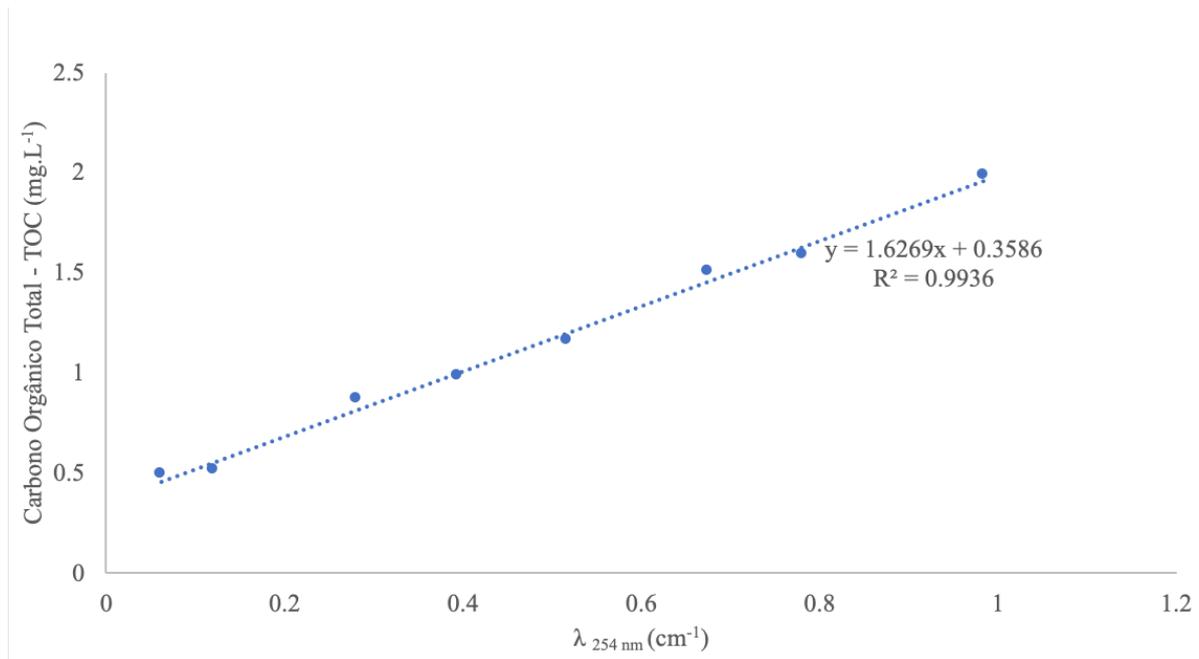


Figura 60 – Relação linear entre a Absorbância medida no comprimento de onda 254 nm e o carbônico orgânico total para oito diferentes concentrações de ácido húmico

Apêndice B – Resultados estatísticos da etapa 3

Todos os testes estatísticos desse trabalho foram realizados utilizando o programa *Past paleontological*.

O teste estatístico de *Kruskal-Wallis* é um teste não paramétrico que tem o objetivo de testar se N grupos amostrais são originárias de uma mesma distribuição. É usado para comparar duas ou mais amostras independentes, as quais podem ser de tamanhos iguais ou diferentes. O resultado do teste de *Kruskal-Wallis* indica se pelo menos uma amostra estocástica domina sobre uma outra. O teste não identifica em qual grupo essa dominância estocástica ocorre ou para quantos pares de grupos ocorre a diferença. Para tanto, é necessário a utilização do teste a posteriori “*Turkey pairwise*”.

Nessa seção o teste de *Kruskal-Wallis* foi utilizado ao invés do teste paramétrico *One-Way ANOVA*, já que a variância entre os grupos não era homogênea, o que é uma premissa para a utilização do segundo teste.

Todos os grupos de amostras analisadas possuíam a mesma distribuição de tamanho (triplicata). Dessa maneira, as hipóteses do teste foram:

H_0 : A mediana dos residuais de todos os grupos analisados é a mesma;

H_1 : Pelo menos uma mediana da população de um grupo é diferente da mediana da população de pelo menos um outro grupo.

Como resultado do teste de *Kruskal-Wallis* é fornecido um valor-p. Este valor-p é também chamado de nível de significância e é definido pelo pesquisador antes da coleta dos dados. Tradicionalmente, em muitas aplicações estatísticas, esse nível de significância (valor-p) foi fixado em 0,05. No caso do presente trabalho, em todas as análises estatísticas utilizadas em todas as seções, esse valor-p foi também fixado como 0,05. Assim, caso o valor-p $\geq 0,05$ a hipótese nula é aceita. Caso contrário, a hipótese H_0 é rejeitada e aceita-se a H_1 .

Quando o valor-p $\geq 0,05$ há fortes indícios que a mediana dos residuais de todos os grupos analisados é a mesma, logo, não há diferença na eficiência geral do processo FAD.

Todos os casos analisados na etapa 3 foram condensados na Tabela 11, na qual é descrito quais grupos foram analisados e qual o resultado estatístico para tal análise. Aponta-se que como todos os ensaios dessa etapa foram feitos em triplicata, cada grupo analisado possuía um tamanho amostral igual a três.

Tabela 11 – Resultados de todos os casos analisados que forneceram p-valor ≥ 0.05 para os resultados da etapa 3.

| Parâmetro de qualidade | Velocidade de flotação (cm.min⁻¹) | G_F (s⁻¹) | Tempo de floculação (minutos) | Valor-p (Kruskal-Wallis) |
|-------------------------------|---|---------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|
| Cor aparente | 25 | 60, 75, 90, 110 130 | 5 | 0,07 |
| Cor aparente | 20 | 60, 75, 90, 110 130 | 5 | 0,13 |
| Cor aparente | 15 | 60, 75, 90, 110 130 | 5 | 0,12 |
| Cor aparente | 10 | 60, 75, 90, 110 130 | 5 | 0,40 |
| UV _{254nm} | 25 | 60, 75, 90, 110 130 | 5 | 0,064 |
| UV _{254nm} | 20 | 60, 75, 90, 110 130 | 5 | 0,067 |
| UV _{254nm} | 15 | 60, 75, 90, 110 130 | 5 | 0,07 |
| UV _{254nm} | 10 | 60, 75, 90, 110 130 | 5 | 0,062 |
| Turbidez | 25 | 60, 75, 90, 110 130 | 5 | 0,23 |
| Turbidez | 20 | 60, 75, 90, 110 130 | 5 | 0,09 |
| Turbidez | 15 | 60, 75, 90, 110 130 | 5 | 0,051 |
| Turbidez | 10 | 60, 75, 90, 110 130 | 5 | 0,15 |
| Cor aparente | 25 | 60, 75, 90, 110 130 | 8 | 0,15 |
| Cor aparente | 20 | 60, 75, 90, 110 130 | 8 | 0,15 |
| Cor aparente | 15 | 60, 75, 90, 110 130 | 8 | 0,16 |
| Cor aparente | 10 | 60, 75, 90, 110 130 | 8 | 0,33 |
| Cor aparente | 25, 20, 15, 10 | 60, 75, 90, 110 130 | 8 | 0,001 |
| Cor aparente | 20, 15, 10 | 60, 75, 90, 110 130 | 8 | 0,061 |
| UV _{254nm} | 25 | 60, 75, 90, 110 130 | 8 | 0,051 |
| UV _{254nm} | 20 | 60, 75, 90, 110 130 | 8 | 0,052 |
| UV _{254nm} | 15 | 60, 75, 90, 110 130 | 8 | 0,0506 |
| UV _{254nm} | 10 | 60, 75, 90, 110 130 | 8 | 0,062 |

| Parâmetro de qualidade | Velocidade de flotação (cm.min⁻¹) | G_F (s⁻¹) | Tempo de floculação (minutos) | Valor-p (Kruskal-Wallis) |
|-------------------------------|---|---------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|
| Turbidez | 25 | 60, 75, 90, 110 130 | 8 | 0,19 |
| Turbidez | 20 | 60, 75, 90, 110 130 | 8 | 0,29 |
| Turbidez | 15 | 60, 75, 90, 110 130 | 8 | 0,71 |
| Turbidez | 10 | 60, 75, 90, 110 130 | 8 | 0,21 |
| Turbidez | 25, 20, 15, 10 | 60, 75, 90, 110 130 | 8 | 0,045 |
| Turbidez | 20, 15, 10 | 60, 75, 90, 110 130 | 8 | 0,23 |
| Cor aparente | 25 | 60, 75, 90, 110 130 | 12 | 0,13 |
| Cor aparente | 20 | 60, 75, 90, 110 130 | 12 | 0,31 |
| Cor aparente | 15 | 60, 75, 90, 110 130 | 12 | 0,53 |
| Cor aparente | 10 | 60, 75, 90, 110 130 | 12 | 0,05 |
| Cor aparente | 20, 15, 10 | 60, 75, 90, 110 130 | 12 | 0,07 |
| UV _{254nm} | 25 | 60, 75, 90, 110 130 | 12 | 0,06 |
| UV _{254nm} | 20 | 60, 75, 90, 110 130 | 12 | 0,10 |
| UV _{254nm} | 15 | 60, 75, 90, 110 130 | 12 | 0,12 |
| UV _{254nm} | 10 | 60, 75, 90, 110 130 | 12 | 0,11 |
| UV _{254nm} | 20, 15, 10 | 60, 75, 90, 110 130 | 12 | 0,008 |
| UV _{254nm} | 15, 10 | 60, 75, 90, 110 130 | 12 | 0,028 |
| Turbidez | 25 | 60, 75, 90, 110 130 | 12 | 0,07 |
| Turbidez | 20 | 60, 75, 90, 110 130 | 12 | 0,05 |
| Turbidez | 15 | 60, 75, 90, 110 130 | 12 | 0,15 |
| Turbidez | 10 | 60, 75, 90, 110 130 | 12 | 0,36 |
| Turbidez | 20, 15, 10 | 60, 75, 90, 110 130 | 12 | 0,01 |
| Turbidez | 15, 10 | 60, 75, 90, 110 130 | 12 | 0,11 |
| Cor aparente | 25 | 60, 75, 90, 110 130 | 16 | 0,45 |
| Cor aparente | 20 | 60, 75, 90, 110 130 | 16 | 0,13 |
| Cor aparente | 15 | 60, 75, 90, 110 130 | 16 | 0,34 |
| Cor aparente | 10 | 60, 75, 90, 110 130 | 16 | 0,82 |
| Cor aparente | 25, 20, 15, 10 | 60, 75, 90, 110 130 | 16 | 0,03 |
| Cor aparente | 20, 15, 10 | 60, 75, 90, 110 130 | 16 | 0,26 |
| UV _{254nm} | 25 | 60, 75, 90, 110 130 | 16 | 0,28 |

| Parâmetro de qualidade | Velocidade de flotação (cm.min⁻¹) | G_F (s⁻¹) | Tempo de floculação (minutos) | Valor-p (Kruskal-Wallis) |
|-------------------------------|---|---------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|
| UV _{254nm} | 20 | 60, 75, 90, 110 130 | 16 | 0,61 |
| UV _{254nm} | 15 | 60, 75, 90, 110 130 | 16 | 0,26 |
| UV _{254nm} | 10 | 60, 75, 90, 110 130 | 16 | 0,37 |
| UV _{254nm} | 25, 20, 15, 10 | 60, 75, 90, 110 130 | 16 | 0,07 |
| Turbidez | 25 | 60, 75, 90, 110 130 | 16 | 0,28 |
| Turbidez | 20 | 60, 75, 90, 110 130 | 16 | 0,053 |
| Turbidez | 15 | 60, 75, 90, 110 130 | 16 | 0,07 |
| Turbidez | 10 | 60, 75, 90, 110 130 | 16 | 0,05 |
| Turbidez | 20, 15, 10 | 60, 75, 90, 110 130 | 16 | 0,008 |
| Turbidez | 15, 10 | 60, 75, 90, 110 130 | 16 | 0,02 |
| Cor aparente | 25 | 90, 110 130 | 12, 16 | 0,23 |
| Cor aparente | 20 | 90, 110 130 | 12, 16 | 0,08 |
| Cor aparente | 15 | 90, 110 130 | 12, 16 | 0,09 |
| Cor aparente | 10 | 90, 110 130 | 12, 16 | 0,06 |
| UV _{254nm} | 25 | 90, 110 130 | 12, 16 | 0,067 |
| UV _{254nm} | 20 | 90, 110 130 | 12, 16 | 0,29 |
| UV _{254nm} | 15 | 90, 110 130 | 12, 16 | 0,09 |
| UV _{254nm} | 10 | 90, 110 130 | 12, 16 | 0,51 |
| Turbidez | 25 | 60, 75, 90, 110 130 | 8, 12 e 16 | 0,09 |
| Turbidez | 20 | 60, 75, 90, 110 130 | 8, 12 e 16 | 0,056 |
| Turbidez | 15 | 60, 75, 90, 110 130 | 8, 12 e 16 | 0,085 |
| Turbidez | 10 | 60, 75, 90, 110 130 | 8, 12 e 16 | 0,053 |

Apêndice C – Resultados estatísticos da etapa 4

Como na etapa anterior, a análise estatística utilizada para a etapa 4 foi feita por meio do teste estatístico *Kruskal-Wallis*, cuja a descrição geral está no apêndice B.

Semelhante ao que foi dito para os resultados da etapa 3, optou-se por esse teste não paramétrico em detrimento ao paramétrico, já que a variância entre os grupos, em alguns casos, não era homogênea.

Todos os casos analisados na etapa 4 foram condensados na Tabela 12, na qual é descrito quais grupos foram analisados e qual o resultado estatístico para tal análise. Vale ressaltar que como todos os ensaios dessa etapa foram feitos em triplicata, cada grupo analisado possuía um tamanho amostral igual a três.

Tabela 12 – Resultados de todos os casos analisados que forneceram valor-p ≥ 0.05 para os resultados da etapa 4.

| Parâmetro de qualidade | Velocidade de flotação (cm.min ⁻¹) | G _F (s ⁻¹) | Tempo de floculação (minutos) | R (%) | Valor-p (Kruskal-Wallis) |
|------------------------|--|-----------------------------------|-------------------------------|--------------|--------------------------|
| Cor aparente | 25 | 60, 90, 130 | 5 | 12 | 0,27 |
| UV _{254nm} | 25 | 60, 90, 130 | 5 | 12 | 0,86 |
| Turbidez | 25 | 60, 90, 130 | 5 | 12 | 0,57 |
| Cor aparente | 25 | 60, 90, 130 | 5 | 10 | 0,34 |
| UV _{254nm} | 25 | 60, 90, 130 | 5 | 10 | 0,14 |
| Turbidez | 25 | 60, 90, 130 | 5 | 10 | 0,29 |
| Cor aparente | 25 | 60, 90, 130 | 5 | 8 | 0,03 |
| UV _{254nm} | 25 | 60, 90, 130 | 5 | 8 | 0,16 |
| Turbidez | 25 | 60, 90, 130 | 5 | 8 | 0,29 |
| Cor aparente | 25 | 60, 90, 130 | 5 | 6 | 0,5 |
| UV _{254nm} | 25 | 60, 90, 130 | 5 | 6 | 0,19 |
| Turbidez | 25 | 60, 90, 130 | 5 | 6 | 0,64 |
| Cor aparente | 25 | 60, 90, 130 | 8 | 6, 8, 10, 12 | 0,08 |
| UV _{254nm} | 25 | 60, 90, 130 | 8 | 6, 8, 10, 12 | 0,056 |

| Parâmetro de qualidade | Velocidade de flotação (cm.min⁻¹) | G_F (s⁻¹) | Tempo de floculação (minutos) | R (%) | Valor-p (Kruskal-Wallis) |
|-------------------------------|---|---------------------------------------|--------------------------------------|--------------|---------------------------------|
| Turbidez | 25 | 60, 90, 130 | 8 | 6, 8, 10, 12 | 0,19 |
| Cor aparente | 25 | 60, 90, 130 | 12 | 6, 8, 10, 12 | 0,08 |
| UV _{254nm} | 25 | 60, 90, 130 | 12 | 6, 8, 10, 12 | 0,063 |
| Turbidez | 25 | 60, 90, 130 | 12 | 6, 8, 10, 12 | 0,05 |
| Cor aparente | 25 | 60, 90, 130 | 16 | 6, 8, 10, 12 | 0,21 |
| UV _{254nm} | 25 | 60, 90, 130 | 16 | 6, 8, 10, 12 | 0,14 |
| Turbidez | 25 | 60, 90, 130 | 16 | 6, 8, 10, 12 | 0,14 |
| Cor aparente | 20 | 60, 90, 130 | 5 | 12 | 0,48 |
| UV _{254nm} | 20 | 60, 90, 130 | 5 | 12 | 0,48 |
| Turbidez | 20 | 60, 90, 130 | 5 | 12 | 0,56 |
| Cor aparente | 20 | 60, 90, 130 | 5 | 10 | 0,28 |
| UV _{254nm} | 20 | 60, 90, 130 | 5 | 10 | 0,09 |
| Turbidez | 20 | 60, 90, 130 | 5 | 10 | 0,49 |
| Cor aparente | 20 | 60, 90, 130 | 5 | 8 | 0,069 |
| UV _{254nm} | 20 | 60, 90, 130 | 5 | 8 | 0,0502 |
| Turbidez | 20 | 60, 90, 130 | 5 | 8 | 0,06 |
| Cor aparente | 20 | 60, 90, 130 | 5 | 6 | 0,66 |
| UV _{254nm} | 20 | 60, 90, 130 | 5 | 6 | 0,42 |
| Turbidez | 20 | 60, 90, 130 | 5 | 6 | 0,29 |
| Cor aparente | 20 | 60, 90, 130 | 8 | 6,8,10,12 | 0,35 |
| UV _{254nm} | 20 | 60, 90, 130 | 8 | 6,8,10,12 | 0,17 |
| Turbidez | 20 | 60, 90, 130 | 8 | 6,8,10,12 | 0,52 |
| Cor aparente | 20 | 60, 90, 130 | 12 | 6,8,10,12 | 0,12 |
| UV _{254nm} | 20 | 60, 90, 130 | 12 | 6,8,10,12 | 0,067 |
| Turbidez | 20 | 60, 90, 130 | 12 | 6,8,10,12 | 0,068 |
| Cor aparente | 20 | 60, 90, 130 | 16 | 6,8,10,12 | 0,30 |
| UV _{254nm} | 20 | 60, 90, 130 | 16 | 6,8,10,12 | 0,12 |
| Turbidez | 20 | 60, 90, 130 | 16 | 6,8,10,12 | 0,34 |
| Turbidez | 20 | 60,90,130 | 8,12,16 | 6,8,10,12 | 0,10 |
| Cor aparente | 20 | 130 | 8,12,16 | 6,8,10,12 | 0,16 |
| UV _{254nm} | 20 | 130 | 8,12,16 | 6,8,10,12 | 0,056 |

| Parâmetro de qualidade | Velocidade de flotação (cm.min⁻¹) | G_F (s⁻¹) | Tempo de floculação (minutos) | R (%) | Valor-p (Kruskal-Wallis) |
|-------------------------------|---|---------------------------------------|--------------------------------------|--------------|---------------------------------|
| Cor aparente | 20 | 90 | 12,16 | 6,8,10,12 | 0,19 |
| UV _{254nm} | 20 | 90 | 12,16 | 6,8,10,12 | 0,14 |
| Cor aparente | 15 | 60, 90, 130 | 5 | 6,8,10,12 | 0,12 |
| UV _{254nm} | 15 | 60, 90, 130 | 5 | 12 | 0,18 |
| UV _{254nm} | 15 | 60, 90, 130 | 5 | 10 | 0,09 |
| UV _{254nm} | 15 | 60, 90, 130 | 5 | 8 | 0,052 |
| UV _{254nm} | 15 | 60, 90, 130 | 5 | 6 | 0,24 |
| Turbidez | 15 | 60, 90, 130 | 5 | 10, 12 | 0,07 |
| Turbidez | 15 | 60, 90, 130 | 5 | 6 | 0,13 |
| Turbidez | 15 | 60, 90, 130 | 5 | 8 | 0,21 |
| Cor aparente | 15 | 60, 90, 130 | 8 | 6,8,10,12 | 0,26 |
| UV _{254nm} | 15 | 60, 90, 130 | 8 | 6,8,10,12 | 0,26 |
| Turbidez | 15 | 60, 90, 130 | 8 | 6,8,10,12 | 0,84 |
| UV _{254nm} | 15 | 60, 90, 130 | 12 | 6,8,10,12 | 0,09 |
| UV _{254nm} | 15 | 60, 90, 130 | 16 | 6,8,10,12 | 0,17 |
| Cor aparente | 15 | 60, 90, 130 | 12, 16 | 6,8,10,12 | 0,21 |
| Turbidez | 15 | 60, 90, 130 | 8, 12, 16 | 6,8,10,12 | 0,32 |
| Cor aparente | 15 | 130 | 8, 12, 16 | 6, 8, 10, 12 | 0,15 |
| UV _{254nm} | 15 | 130 | 8, 12, 16 | 6, 8, 10, 12 | 0,07 |
| Cor aparente | 10 | 60 | 3 | 6, 8, 10, 12 | 0,25 |
| Cor aparente | 10 | 90 | 3 | 6, 8, 10, 12 | 0,06 |
| Cor aparente | 10 | 130 | 3 | 6, 8, 10, 12 | 0,17 |
| UV _{254nm} | 10 | 60 | 3 | 6, 8, 10, 12 | 0,32 |
| UV _{254nm} | 10 | 90 | 3 | 6, 8, 10, 12 | 0,10 |
| UV _{254nm} | 10 | 130 | 3 | 6, 8, 10, 12 | 0,07 |
| Turbidez | 10 | 60 | 3 | 6, 8, 10, 12 | 0,93 |
| Turbidez | 10 | 90 | 3 | 6, 8, 10, 12 | 0,26 |
| Turbidez | 10 | 130 | 3 | 6, 8, 10, 12 | 0,92 |
| Cor aparente | 10 | 60, 90, 130 | 5 | 6, 8, 10, 12 | 0,19 |
| UV _{254nm} | 10 | 60, 90, 130 | 5 | 10, 12 | 0,15 |
| UV _{254nm} | 10 | 60, 90, 130 | 5 | 8 | 0,10 |

| Parâmetro de qualidade | Velocidade de flotação (cm.min⁻¹) | G_F (s⁻¹) | Tempo de floculação (minutos) | R (%) | Valor-p (Kruskal-Wallis) |
|-------------------------------|---|---------------------------------------|--------------------------------------|--------------|---------------------------------|
| UV _{254nm} | 10 | 60, 90, 130 | 5 | 6 | 0,22 |
| Turbidez | 10 | 60, 90, 130 | 5 | 6, 8, 10, 12 | 0,37 |
| Cor aparente | 10 | 60, 90, 130 | 8 | 6, 8, 10, 12 | 0,11 |
| Cor aparente | 10 | 60, 90, 130 | 12, 16 | 6, 8, 10, 12 | 0,15 |
| UV _{254nm} | 10 | 60, 90, 130 | 8 | 6, 8, 10, 12 | 0,15 |
| UV _{254nm} | 10 | 60, 90, 130 | 12, 16 | 6, 8, 10, 12 | 0,06 |
| Turbidez | 10 | 60, 90, 130 | 8, 12, 16 | 6, 8, 10, 12 | 0,36 |
| Cor aparente | 10 | 130 | 8, 12, 16 | 6, 8, 10, 12 | 0,14 |
| UV _{254nm} | 10 | 130 | 8, 12, 16 | 6, 8, 10, 12 | 0,06 |

Apêndice D – Resultados estatísticos da etapa 5

Na etapa 5, a qual é referente à análise de imagem para os diâmetros médios das partículas e das microbolhas de ar, foram feitos dois testes estatísticos: o teste de *Shapiro-Wilk* e o teste *One-Way ANOVA*.

O teste de *Shapiro-Wilk* é o teste mais utilizado para verificar se uma distribuição de dados possui caráter normal. As hipóteses desses testes de normalidade estão expostas abaixo:

H₀: O grupo amostral analisado apresenta distribuição normal;

H₁: O grupo amostral analisado não apresenta distribuição normal.

Como resultado do teste de *Shapiro-Wilk* é fornecido um valor-p. Caso o valor-p $\geq 0,05$ a hipótese nula é aceita. Caso contrário, a hipótese H₀ é rejeitada e aceita-se a H₁. No caso da análise dos diâmetros médios tanto das microbolhas quanto das partículas floculadas, se o valor fornecido pelo teste for $\geq 0,05$, a distribuição não é diferente significativamente de uma normal.

Para a comparação de três ou mais grupos amostrais independentes foi utilizado o teste *One-Way ANOVA*. Este teste é um teste paramétrico, unidirecional que compara a variação nas médias do grupo, considerando apenas uma variável ou fator independente. Como premissas desse teste é necessário que os dados sejam normalmente distribuídos, com o mesmo tamanho amostral e com variância homogênea.

Para verificar se os objetos (flocos ou microbolhas) estudados possuem o mesmo diâmetro médio, levantou-se as hipóteses:

H₀: Não há diferença entre os grupos analisados; a média dos diâmetros médios analisados é igual para os grupos em análise.

$$(\mu_d^1 = \mu_d^2 = \dots = \mu_d^N);$$

H₁: Há diferença na média do diâmetro analisado em pelo menos um grupo.

Similarmente ao já escrito anteriormente, nesse teste também é definido um valor-p. Caso o valor-p $\geq 0,05$ a hipótese nula é aceita. Caso contrário, a hipótese H₀ é rejeitada e aceita-se a

H₁. Dessa maneira, quando o valor-p $\geq 0,05$ há fortes indícios que a média dos diâmetros das partículas floculadas ou das microbolhas das distribuições em análise é a mesma.

Na Tabela 13 estão os resultados do teste de normalidade de *Shapiro-Wilk* para os diâmetros médio de Feret das partículas floculadas. Como pode ser visto, todos os diâmetros das partículas floculadas foram normalmente distribuídos. Nesses casos cada condição tinha um tamanho amostral igual a 100.

Na Tabela 14 estão os resultados do teste de normalidade de *Shapiro-Wilk* para os diâmetros médio das microbolhas de ar. Semelhantemente ao das partículas floculadas, todas as distribuições dos diâmetros das microbolhas de ar foram normalmente distribuídos. Cada condição tinha um tamanho amostral igual a 300.

Tabela 13 - Relação entre cada condição de floculação (Gradiente médio de velocidade e Tempo de Floculação), o diâmetro médio de Feret da condição e o valor-p fornecido pelo teste de normalidade de *Shapiro-Wilk*

| G_F (s⁻¹) | T_F (minutos) | Diâmetro médio de Feret (μm) | Valor-p (Shapiro-Wilk) |
|---------------------------------------|--------------------------------|---|-------------------------------|
| 60 | 3 | 47 | 0,10 |
| 60 | 5 | 97 | 0,14 |
| 60 | 8 | 293 | 0,54 |
| 60 | 12 | 314 | 0,054 |
| 60 | 16 | 370 | 0,76 |
| 90 | 3 | 57 | 0,50 |
| 90 | 5 | 106 | 0,06 |
| 90 | 8 | 231 | 0,31 |
| 90 | 12 | 261 | 0,23 |
| 90 | 16 | 296 | 0,15 |
| 130 | 3 | 77 | 0,08 |
| 130 | 5 | 105 | 0,19 |
| 130 | 8 | 174 | 0,20 |
| 130 | 12 | 170 | 0,08 |
| 130 | 16 | 193 | 0,67 |

Tabela 14 - Relação entre cada condição de recirculação pressurizada, o diâmetro médio das microbolhas e o valor-p fornecido pelo teste de normalidade de Shapiro-Wilk

| R (%) | Diâmetro médio das microbolhas (μm) | Valor-p (<i>Shapiro Wilk</i>) |
|-------|--|---------------------------------|
| 6 | 39 | 0,91 |
| 8 | 40 | 0,83 |
| 10 | 39 | 0,94 |
| 12 | 40 | 0,83 |

Para $T_F = 5$ minutos, para a comparação das três condições ($G_F = 60 \text{ s}^{-1}$, $G_F = 90 \text{ s}^{-1}$ e $G_F = 130 \text{ s}^{-1}$) de diâmetros das partículas floculadas foi feito o teste *One-Way ANOVA*, o qual teve resultado do valor-p = 0,20. Neste caso, o valor do teste de homogeneidade da variância de *Levene* tem valor-p = 0,32. Dessa maneira, é possível inferir que não há diferença significativa na média desses três diâmetros estudados.

Para $G_F = 130 \text{ s}^{-1}$, o resultado do teste *One-Way ANOVA*, para $T_F = 8, 12$ e 16 minutos, foi de valor-p = 0,014. Neste caso, o valor do teste de homogeneidade da variância de *Levene* tem valor-p = 0,51. Dessa maneira, é possível concluir que há diferença na média do diâmetro analisado em pelo menos um grupo. Nesse caso, por meio do teste de Mann-Whitney (teste a posteriori), é visto que o diâmetro médio para $T_F = 8$ minutos é igual ao diâmetro para $T_F = 12$ minutos (valor-p = 0,884), porém ambos são diferentes do diâmetro para $T_F = 16$ minutos.

Para a comparação das quatro condições de diâmetros das microbolhas de ar ($R = 6, 8, 10$ e 12%) também foi feito o teste *One-Way ANOVA*. Neste caso, o valor-p resultou em 0,11, sendo que o valor do teste de homogeneidade da variância de *Levene* tem valor-p = 0,86. Dessa maneira, é possível inferir que não há diferença significativa na média desses quatro diâmetros analisados.

Apêndice E – Relação entre cada condição de floculação estudada (G_F , T_F e Diâmetro médio de Feret) para cada v_{FLOT} e cada parâmetro de qualidade

Tabela 15 – Eficiência de Remoção da Cor Aparente para $v_{FLOT} = 25$ e 20 cm.min^{-1} e para condição de floculação (G_F , T_F e Diâmetro médio de Feret)

| G_F (s^{-1}) | T_F (minutos) | Diâmetro médio de Feret (μm) | Eficiência de Remoção da Cor Aparente (%) | | | | | | | |
|--------------------|-----------------|---|---|--------|--------|--------|-------------------------------------|--------|--------|--------|
| | | | $v_{FLOT} = 25 \text{ cm.min}^{-1}$ | | | | $v_{FLOT} = 20 \text{ cm.min}^{-1}$ | | | |
| | | | 12% | 10% | 8% | 6% | 12% | 10% | 8% | 6% |
| 60 | 3 | 47 ± 19 | 67 ± 5 | 62 ± 6 | 61 ± 8 | 53 ± 6 | 69 ± 5 | 66 ± 5 | 64 ± 8 | 59 ± 2 |
| 60 | 5 | 97 ± 35 | 83 ± 4 | 82 ± 1 | 79 ± 1 | 76 ± 4 | 86 ± 1 | 84 ± 1 | 81 ± 1 | 80 ± 2 |
| 60 | 8 | 293 ± 89 | 87 ± 2 | 87 ± 2 | 82 ± 2 | 83 ± 4 | 88 ± 4 | 89 ± 0 | 83 ± 8 | 86 ± 2 |
| 60 | 12 | 314 ± 104 | 91 ± 0 | 87 ± 7 | 88 ± 1 | 88 ± 0 | 93 ± 1 | 92 ± 1 | 89 ± 0 | 87 ± 3 |
| 60 | 16 | 370 ± 108 | 90 ± 3 | 92 ± 2 | 92 ± 2 | 88 ± 6 | 89 ± 5 | 93 ± 2 | 94 ± 0 | 91 ± 2 |
| 90 | 3 | 57 ± 18 | 78 ± 5 | 71 ± 4 | 70 ± 0 | 56 ± 4 | 80 ± 5 | 73 ± 3 | 74 ± 1 | 63 ± 4 |
| 90 | 5 | 106 ± 40 | 84 ± 3 | 82 ± 5 | 81 ± 0 | 77 ± 2 | 84 ± 2 | 83 ± 5 | 83 ± 1 | 79 ± 2 |
| 90 | 8 | 231 ± 68 | 87 ± 1 | 88 ± 3 | 86 ± 1 | 84 ± 2 | 87 ± 6 | 89 ± 3 | 89 ± 1 | 85 ± 3 |
| 90 | 12 | 261 ± 72 | 92 ± 1 | 87 ± 3 | 90 ± 1 | 89 ± 6 | 92 ± 2 | 89 ± 3 | 91 ± 0 | 90 ± 6 |
| 90 | 16 | 296 ± 94 | 93 ± 3 | 94 ± 2 | 92 ± 1 | 92 ± 3 | 93 ± 4 | 96 ± 2 | 95 ± 2 | 93 ± 5 |
| 130 | 3 | 77 ± 29 | 81 ± 2 | 78 ± 3 | 77 ± 0 | 71 ± 5 | 82 ± 1 | 77 ± 7 | 77 ± 1 | 75 ± 4 |
| 130 | 5 | 105 ± 40 | 86 ± 2 | 85 ± 2 | 83 ± 1 | 80 ± 4 | 86 ± 1 | 87 ± 3 | 84 ± 0 | 82 ± 4 |
| 130 | 8 | 174 ± 56 | 92 ± 1 | 89 ± 5 | 87 ± 1 | 87 ± 6 | 92 ± 3 | 91 ± 4 | 88 ± 1 | 89 ± 5 |
| 130 | 12 | 170 ± 61 | 91 ± 3 | 95 ± 0 | 90 ± 0 | 89 ± 4 | 92 ± 3 | 95 ± 0 | 91 ± 1 | 88 ± 6 |
| 130 | 16 | 193 ± 56 | 95 ± 1 | 93 ± 2 | 91 ± 2 | 93 ± 0 | 94 ± 3 | 93 ± 6 | 92 ± 3 | 95 ± 1 |

Tabela 16 – Eficiência de Remoção da Cor Aparente para $v_{FLOT} = 15$ e 10 cm.min^{-1} e para condição de floculação (G_F , T_F e Diâmetro médio de Feret)

| G_F (s^{-1}) | T_F (minutos) | Diâmetro médio de Feret (μm) | Eficiência de Remoção da Cor Aparente (%) | | | | | | | |
|--------------------|-----------------|---|---|--------|--------|--------|-------------------------------------|--------|--------|--------|
| | | | $v_{FLOT} = 15 \text{ cm.min}^{-1}$ | | | | $v_{FLOT} = 10 \text{ cm.min}^{-1}$ | | | |
| | | | 12% | 10% | 8% | 6% | 12% | 10% | 8% | 6% |
| 60 | 3 | 47 ± 19 | 76 ± 3 | 71 ± 5 | 69 ± 6 | 66 ± 3 | 78 ± 3 | 74 ± 4 | 72 ± 6 | 71 ± 3 |
| 60 | 5 | 97 ± 35 | 86 ± 1 | 85 ± 1 | 83 ± 2 | 83 ± 2 | 87 ± 1 | 86 ± 2 | 84 ± 2 | 85 ± 1 |
| 60 | 8 | 293 ± 89 | 89 ± 4 | 89 ± 0 | 84 ± 7 | 88 ± 1 | 91 ± 3 | 90 ± 0 | 86 ± 6 | 89 ± 3 |
| 60 | 12 | 314 ± 104 | 92 ± 1 | 93 ± 1 | 91 ± 1 | 90 ± 4 | 93 ± 3 | 94 ± 2 | 91 ± 1 | 91 ± 3 |
| 60 | 16 | 370 ± 108 | 91 ± 4 | 94 ± 1 | 93 ± 2 | 92 ± 2 | 91 ± 4 | 94 ± 2 | 94 ± 2 | 91 ± 3 |
| 90 | 3 | 57 ± 18 | 82 ± 4 | 76 ± 2 | 77 ± 1 | 67 ± 3 | 83 ± 3 | 78 ± 1 | 79 ± 1 | 74 ± 4 |
| 90 | 5 | 106 ± 40 | 86 ± 2 | 82 ± 2 | 83 ± 0 | 81 ± 2 | 87 ± 1 | 85 ± 5 | 86 ± 1 | 83 ± 2 |
| 90 | 8 | 231 ± 68 | 88 ± 6 | 89 ± 2 | 89 ± 1 | 86 ± 2 | 87 ± 5 | 90 ± 3 | 91 ± 0 | 87 ± 2 |
| 90 | 12 | 261 ± 72 | 93 ± 1 | 91 ± 2 | 92 ± 1 | 91 ± 4 | 93 ± 1 | 91 ± 2 | 93 ± 0 | 92 ± 4 |
| 90 | 16 | 296 ± 94 | 94 ± 3 | 95 ± 1 | 95 ± 1 | 92 ± 6 | 93 ± 3 | 95 ± 1 | 95 ± 1 | 95 ± 0 |
| 130 | 3 | 77 ± 29 | 84 ± 1 | 79 ± 5 | 80 ± 1 | 78 ± 3 | 85 ± 1 | 81 ± 4 | 81 ± 1 | 80 ± 4 |
| 130 | 5 | 105 ± 40 | 87 ± 2 | 87 ± 3 | 85 ± 1 | 85 ± 2 | 89 ± 1 | 89 ± 3 | 85 ± 1 | 86 ± 1 |
| 130 | 8 | 174 ± 56 | 93 ± 2 | 92 ± 3 | 89 ± 1 | 91 ± 5 | 94 ± 2 | 92 ± 2 | 91 ± 1 | 92 ± 3 |
| 130 | 12 | 170 ± 61 | 91 ± 4 | 96 ± 0 | 92 ± 1 | 90 ± 4 | 93 ± 2 | 96 ± 0 | 92 ± 0 | 93 ± 1 |
| 130 | 16 | 193 ± 56 | 95 ± 4 | 93 ± 3 | 92 ± 3 | 95 ± 1 | 94 ± 4 | 95 ± 2 | 94 ± 2 | 95 ± 0 |

Tabela 17 – Eficiência de Remoção da UV_{254 nm} para v_{FLOT} = 25 e 20 cm.min⁻¹ e para condição de floculação (G_F, T_F e Diâmetro médio de Feret)

| G _F (s ⁻¹) | T _F (minutos) | Diâmetro médio de Feret (μm) | Eficiência de Remoção da UV _{254 nm} (%) | | | | | | | |
|-----------------------------------|--------------------------|------------------------------|---|--------|--------|--------|---|--------|--------|--------|
| | | | v _{FLOT} = 25 cm.min ⁻¹ | | | | v _{FLOT} = 20 cm.min ⁻¹ | | | |
| | | | 12% | 10% | 8% | 6% | 12% | 10% | 8% | 6% |
| 60 | 3 | 47 ± 19 | 68 ± 5 | 64 ± 5 | 61 ± 7 | 58 ± 1 | 70 ± 4 | 67 ± 2 | 64 ± 6 | 61 ± 2 |
| 60 | 5 | 97 ± 35 | 82 ± 1 | 80 ± 1 | 77 ± 1 | 76 ± 2 | 83 ± 1 | 82 ± 0 | 78 ± 1 | 79 ± 1 |
| 60 | 8 | 293 ± 89 | 86 ± 2 | 85 ± 2 | 83 ± 1 | 82 ± 2 | 87 ± 3 | 87 ± 1 | 82 ± 7 | 85 ± 1 |
| 60 | 12 | 314 ± 104 | 89 ± 0 | 86 ± 6 | 87 ± 0 | 85 ± 1 | 90 ± 1 | 90 ± 0 | 88 ± 0 | 86 ± 3 |
| 60 | 16 | 370 ± 108 | 88 ± 2 | 90 ± 2 | 90 ± 1 | 86 ± 5 | 88 ± 4 | 91 ± 2 | 91 ± 0 | 89 ± 1 |
| 90 | 3 | 57 ± 18 | 77 ± 4 | 70 ± 5 | 71 ± 0 | 58 ± 5 | 78 ± 4 | 72 ± 4 | 75 ± 1 | 64 ± 5 |
| 90 | 5 | 106 ± 40 | 82 ± 1 | 80 ± 5 | 80 ± 0 | 78 ± 2 | 83 ± 2 | 81 ± 4 | 82 ± 1 | 79 ± 2 |
| 90 | 8 | 231 ± 68 | 84 ± 2 | 87 ± 2 | 86 ± 1 | 84 ± 2 | 86 ± 4 | 88 ± 2 | 88 ± 1 | 85 ± 2 |
| 90 | 12 | 261 ± 72 | 91 ± 0 | 87 ± 3 | 88 ± 1 | 88 ± 3 | 91 ± 0 | 88 ± 3 | 89 ± 1 | 89 ± 3 |
| 90 | 16 | 296 ± 94 | 91 ± 1 | 92 ± 1 | 90 ± 2 | 91 ± 2 | 91 ± 2 | 93 ± 1 | 91 ± 1 | 91 ± 3 |
| 130 | 3 | 77 ± 29 | 80 ± 1 | 76 ± 1 | 76 ± 1 | 71 ± 5 | 81 ± 2 | 76 ± 4 | 78 ± 1 | 73 ± 4 |
| 130 | 5 | 105 ± 40 | 85 ± 1 | 85 ± 2 | 83 ± 0 | 80 ± 4 | 86 ± 2 | 86 ± 2 | 84 ± 0 | 82 ± 4 |
| 130 | 8 | 174 ± 56 | 90 ± 1 | 88 ± 3 | 87 ± 1 | 85 ± 6 | 90 ± 2 | 89 ± 3 | 88 ± 1 | 87 ± 5 |
| 130 | 12 | 170 ± 61 | 88 ± 4 | 92 ± 0 | 90 ± 0 | 88 ± 3 | 90 ± 3 | 93 ± 1 | 91 ± 0 | 88 ± 4 |
| 130 | 16 | 193 ± 56 | 93 ± 0 | 92 ± 1 | 91 ± 1 | 92 ± 0 | 93 ± 1 | 91 ± 4 | 91 ± 3 | 93 ± 0 |

Tabela 18 – Eficiência de Remoção da UV_{254 nm} para v_{FLOT} = 15 e 10 cm.min⁻¹ e para condição de floculação (G_F, T_F e Diâmetro médio de Feret)

| G _F (s ⁻¹) | T _F (minutos) | Diâmetro médio de Feret (μm) | Eficiência de Remoção da UV _{254 nm} (%) | | | | | | | |
|-----------------------------------|--------------------------|------------------------------|---|--------|--------|--------|---|--------|--------|--------|
| | | | v _{FLOT} = 15 cm.min ⁻¹ | | | | v _{FLOT} = 10 cm.min ⁻¹ | | | |
| | | | 12% | 10% | 8% | 6% | 12% | 10% | 8% | 6% |
| 60 | 3 | 47 ± 19 | 68 ± 5 | 64 ± 5 | 61 ± 7 | 58 ± 1 | 73 ± 3 | 71 ± 2 | 67 ± 5 | 66 ± 4 |
| 60 | 5 | 97 ± 35 | 82 ± 1 | 80 ± 1 | 77 ± 1 | 76 ± 2 | 84 ± 1 | 84 ± 0 | 80 ± 2 | 81 ± 2 |
| 60 | 8 | 293 ± 89 | 86 ± 2 | 85 ± 2 | 83 ± 1 | 82 ± 2 | 88 ± 3 | 87 ± 0 | 83 ± 6 | 86 ± 0 |
| 60 | 12 | 314 ± 104 | 89 ± 0 | 86 ± 6 | 87 ± 0 | 85 ± 1 | 91 ± 1 | 91 ± 1 | 89 ± 1 | 87 ± 3 |
| 60 | 16 | 370 ± 108 | 88 ± 2 | 90 ± 2 | 90 ± 1 | 86 ± 5 | 89 ± 4 | 91 ± 2 | 91 ± 1 | 89 ± 2 |
| 90 | 3 | 57 ± 18 | 77 ± 4 | 70 ± 5 | 71 ± 0 | 58 ± 5 | 80 ± 3 | 74 ± 3 | 77 ± 1 | 68 ± 6 |
| 90 | 5 | 106 ± 40 | 82 ± 1 | 80 ± 5 | 80 ± 0 | 78 ± 2 | 82 ± 5 | 80 ± 1 | 83 ± 0 | 81 ± 2 |
| 90 | 8 | 231 ± 68 | 84 ± 2 | 87 ± 2 | 86 ± 1 | 84 ± 2 | 87 ± 4 | 88 ± 2 | 88 ± 0 | 86 ± 3 |
| 90 | 12 | 261 ± 72 | 91 ± 0 | 87 ± 3 | 88 ± 1 | 88 ± 3 | 92 ± 0 | 89 ± 2 | 91 ± 0 | 90 ± 2 |
| 90 | 16 | 296 ± 94 | 91 ± 1 | 92 ± 1 | 90 ± 2 | 91 ± 2 | 92 ± 2 | 93 ± 0 | 92 ± 1 | 91 ± 3 |
| 130 | 3 | 77 ± 29 | 80 ± 1 | 76 ± 1 | 76 ± 1 | 71 ± 5 | 82 ± 1 | 78 ± 3 | 80 ± 1 | 76 ± 3 |
| 130 | 5 | 105 ± 40 | 85 ± 1 | 85 ± 2 | 83 ± 0 | 80 ± 4 | 86 ± 1 | 87 ± 2 | 85 ± 1 | 84 ± 2 |
| 130 | 8 | 174 ± 56 | 90 ± 1 | 88 ± 3 | 87 ± 1 | 85 ± 6 | 91 ± 2 | 90 ± 2 | 89 ± 0 | 89 ± 4 |
| 130 | 12 | 170 ± 61 | 88 ± 4 | 92 ± 0 | 90 ± 0 | 88 ± 3 | 90 ± 3 | 93 ± 0 | 91 ± 1 | 89 ± 3 |
| 130 | 16 | 193 ± 56 | 93 ± 0 | 92 ± 1 | 91 ± 1 | 92 ± 0 | 93 ± 2 | 92 ± 2 | 91 ± 2 | 93 ± 0 |

Tabela 19 – Eficiência de Remoção da Turbidez para $v_{FLOT} = 25$ e 20 cm.min^{-1} e para condição de floculação (G_F , T_F e Diâmetro médio de Feret)

| G_F (s^{-1}) | T_F (minutos) | Diâmetro médio de Feret (μm) | Eficiência de Remoção da Turbidez (%) | | | | | | | |
|--------------------|-----------------|---|---------------------------------------|--------|--------|--------|-------------------------------------|--------|--------|--------|
| | | | $v_{FLOT} = 25 \text{ cm.min}^{-1}$ | | | | $v_{FLOT} = 20 \text{ cm.min}^{-1}$ | | | |
| | | | 12% | 10% | 8% | 6% | 12% | 10% | 8% | 6% |
| 60 | 3 | 47 ± 19 | 66 ± 4 | 61 ± 6 | 61 ± 8 | 52 ± 3 | 68 ± 5 | 63 ± 7 | 57 ± 4 | 56 ± 1 |
| 60 | 5 | 97 ± 35 | 81 ± 3 | 80 ± 1 | 74 ± 4 | 73 ± 5 | 84 ± 3 | 81 ± 1 | 79 ± 0 | 82 ± 0 |
| 60 | 8 | 293 ± 89 | 86 ± 2 | 83 ± 4 | 76 ± 1 | 80 ± 7 | 87 ± 3 | 85 ± 5 | 77 ± 4 | 85 ± 2 |
| 60 | 12 | 314 ± 104 | 89 ± 2 | 82 ± 5 | 77 ± 2 | 85 ± 1 | 89 ± 1 | 88 ± 3 | 82 ± 2 | 85 ± 1 |
| 60 | 16 | 370 ± 108 | 84 ± 4 | 87 ± 5 | 83 ± 3 | 80 ± 6 | 85 ± 5 | 87 ± 3 | 87 ± 1 | 88 ± 1 |
| 90 | 3 | 57 ± 18 | 75 ± 4 | 68 ± 5 | 64 ± 2 | 52 ± 3 | 76 ± 6 | 72 ± 3 | 72 ± 6 | 63 ± 3 |
| 90 | 5 | 106 ± 40 | 80 ± 3 | 77 ± 4 | 77 ± 2 | 77 ± 1 | 81 ± 5 | 79 ± 4 | 82 ± 4 | 78 ± 2 |
| 90 | 8 | 231 ± 68 | 80 ± 1 | 83 ± 3 | 79 ± 1 | 79 ± 3 | 84 ± 7 | 87 ± 4 | 81 ± 2 | 81 ± 4 |
| 90 | 12 | 261 ± 72 | 86 ± 2 | 84 ± 4 | 77 ± 2 | 84 ± 4 | 87 ± 1 | 85 ± 3 | 80 ± 2 | 85 ± 4 |
| 90 | 16 | 296 ± 94 | 86 ± 5 | 90 ± 3 | 81 ± 2 | 87 ± 2 | 88 ± 4 | 90 ± 3 | 84 ± 3 | 87 ± 5 |
| 130 | 3 | 77 ± 29 | 77 ± 0 | 72 ± 3 | 74 ± 3 | 69 ± 8 | 74 ± 5 | 75 ± 7 | 75 ± 7 | 72 ± 7 |
| 130 | 5 | 105 ± 40 | 82 ± 4 | 82 ± 5 | 79 ± 3 | 76 ± 6 | 83 ± 4 | 84 ± 6 | 85 ± 2 | 78 ± 5 |
| 130 | 8 | 174 ± 56 | 86 ± 2 | 82 ± 6 | 84 ± 4 | 81 ± 8 | 86 ± 1 | 83 ± 7 | 83 ± 4 | 85 ± 5 |
| 130 | 12 | 170 ± 61 | 84 ± 3 | 88 ± 1 | 76 ± 4 | 80 ± 7 | 85 ± 6 | 89 ± 1 | 86 ± 3 | 81 ± 8 |
| 130 | 16 | 193 ± 56 | 89 ± 2 | 86 ± 3 | 84 ± 3 | 84 ± 5 | 87 ± 3 | 86 ± 7 | 79 ± 6 | 89 ± 2 |

Tabela 20 – Eficiência de Remoção da Turbidez para $v_{FLOT} = 15$ e 10 cm.min^{-1} e para condição de floculação (G_F , T_F e Diâmetro médio de Feret)

| G_F (s^{-1}) | T_F (minutos) | Diâmetro médio de Feret (μm) | Eficiência de Remoção da Turbidez (%) | | | | | | | |
|--------------------|-----------------|---|---------------------------------------|--------|--------|--------|-------------------------------------|--------|--------|--------|
| | | | $v_{FLOT} = 15 \text{ cm.min}^{-1}$ | | | | $v_{FLOT} = 10 \text{ cm.min}^{-1}$ | | | |
| | | | 12% | 10% | 8% | 6% | 12% | 10% | 8% | 6% |
| 60 | 3 | 47 ± 19 | 73 ± 3 | 68 ± 4 | 69 ± 4 | 62 ± 2 | 74 ± 5 | 71 ± 7 | 70 ± 9 | 70 ± 1 |
| 60 | 5 | 97 ± 35 | 84 ± 3 | 83 ± 3 | 80 ± 2 | 80 ± 1 | 84 ± 4 | 83 ± 6 | 83 ± 2 | 82 ± 1 |
| 60 | 8 | 293 ± 89 | 86 ± 4 | 85 ± 4 | 80 ± 5 | 86 ± 1 | 89 ± 3 | 88 ± 4 | 82 ± 4 | 85 ± 4 |
| 60 | 12 | 314 ± 104 | 89 ± 3 | 89 ± 1 | 83 ± 1 | 84 ± 3 | 91 ± 1 | 91 ± 2 | 88 ± 1 | 86 ± 1 |
| 60 | 16 | 370 ± 108 | 86 ± 5 | 88 ± 1 | 83 ± 3 | 88 ± 3 | 88 ± 4 | 89 ± 1 | 85 ± 2 | 88 ± 4 |
| 90 | 3 | 57 ± 18 | 78 ± 6 | 74 ± 1 | 70 ± 3 | 65 ± 2 | 82 ± 5 | 78 ± 1 | 75 ± 4 | 74 ± 4 |
| 90 | 5 | 106 ± 40 | 83 ± 3 | 76 ± 2 | 81 ± 1 | 81 ± 1 | 86 ± 2 | 82 ± 5 | 82 ± 1 | 82 ± 0 |
| 90 | 8 | 231 ± 68 | 85 ± 4 | 87 ± 1 | 84 ± 3 | 84 ± 4 | 86 ± 5 | 88 ± 3 | 87 ± 4 | 85 ± 4 |
| 90 | 12 | 261 ± 72 | 89 ± 2 | 87 ± 3 | 82 ± 1 | 87 ± 5 | 89 ± 1 | 89 ± 4 | 84 ± 4 | 90 ± 3 |
| 90 | 16 | 296 ± 94 | 90 ± 3 | 90 ± 1 | 84 ± 3 | 89 ± 5 | 88 ± 3 | 90 ± 2 | 87 ± 1 | 92 ± 3 |
| 130 | 3 | 77 ± 29 | 80 ± 5 | 76 ± 5 | 79 ± 1 | 74 ± 7 | 80 ± 6 | 80 ± 5 | 80 ± 2 | 79 ± 7 |
| 130 | 5 | 105 ± 40 | 84 ± 4 | 87 ± 1 | 79 ± 2 | 83 ± 2 | 88 ± 2 | 87 ± 2 | 85 ± 4 | 82 ± 4 |
| 130 | 8 | 174 ± 56 | 87 ± 2 | 85 ± 4 | 84 ± 2 | 87 ± 7 | 89 ± 2 | 86 ± 1 | 85 ± 2 | 88 ± 5 |
| 130 | 12 | 170 ± 61 | 85 ± 5 | 89 ± 3 | 85 ± 4 | 83 ± 6 | 88 ± 3 | 91 ± 4 | 87 ± 2 | 86 ± 3 |
| 130 | 16 | 193 ± 56 | 89 ± 2 | 85 ± 7 | 79 ± 4 | 90 ± 2 | 89 ± 1 | 88 ± 2 | 86 ± 3 | 90 ± 4 |