



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Faculdade de Engenharia Química

JOSÉ PEDRO THOMPSON JUNIOR

ESTUDO DOS MECANISMOS DE INTERAÇÃO BOLHA-PARTÍCULA
NO PROCESSO DE SEPARAÇÃO SÓLIDO LÍQUIDO POR FLOTAÇÃO
POR AR DISSOLVIDO.

CAMPINAS
2020

JOSÉ PEDRO THOMPSON JUNIOR

ESTUDO DOS MECANISMOS DE INTERAÇÃO BOLHA-PARTÍCULA NO
PROCESSO DE SEPARAÇÃO SÓLIDO-LÍQUIDO POR FLOTAÇÃO POR
AR DISSOLVIDO.

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de
Engenharia Química da Universidade Estadual
de Campinas como parte dos requisitos exigidos
para a obtenção do título de Doutor em
Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Vasconcelos da Silva

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À
VERSÃO FINAL DA TESE DEFENDIDA
PELO ALUNO JOSÉ PEDRO THOMPSON
JUNIOR E ORIENTADA PELO PROF. DR.
FLÁVIO VASCONCELOS DA SILVA.

CAMPINAS

2020

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

T371e Thompson Junior, José Pedro, 1978-
Estudo dos mecanismos de interação bolha-partícula no processo de separação sólido líquido por flotação por ar dissolvido / José Pedro Thompson Junior. – Campinas, SP : [s.n.], 2020.

Orientador: Flávio Vasconcelos da Silva.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Água – Flotação por ar dissolvido. 2. Tratamento de água. 3. Águas residuais – Tratamento. 4. Tratamento de efluentes industriais. 5. Controle de processo. I. Silva, Flávio Vasconcelos da, 1971-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Study of bubble-particle interaction mechanisms in the process of liquid-solid separation by dissolved air flotation

Palavras-chave em inglês:

Water – Dissolved air flotation

Water treatment

Wastewater treatment

Industrial effluent treatment

Process control

Área de concentração: Engenharia Química

Titulação: Doutor em Engenharia Química

Banca examinadora:

Flávio Vasconcelos da Silva [Orientador]

Roniérrik Pioli Vieira

Édson Aparecido Abdul Nour

André Augusto Gutierrez Fernandes Beati

Robson da Silva Rocha

Data de defesa: 05-06-2020

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Química

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0002-2481-6333>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/1711300583643158>

Folha de Aprovação da Defesa de Tese de Doutorado defendida por José Pedro Thompson Junior em 05 de junho de 2020 pela banca examinadora constituída pelos doutores.

Prof. Dr. Flavio Vasconcelos da Silva
Presidente e Orientador - FEQ / Unicamp
Videoconferência

Prof. Dr. Roniérrik Pioli Vieira
FEQ / Unicamp
Videoconferência

Prof. Dr. Édson Aparecido Abdul Nour
(FEC / UNICAMP)
Videoconferência

Dr. André Augusto Gutierrez Fernandes Beati
USF - Bragança Paulista
Videoconferência

Dr. Robson da Silva Rocha
Escola de Engenharia de Lorena EEL - USP
Videoconferência

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

*Dedico este trabalho aos meus filhos
Lucca e Caio, razões da minha vida.*

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela constante presença na minha vida;

Aos meus Pais, que me concederam a vida e sempre me apoiaram;

À minha amada esposa Juliana, pelo carinho, incentivo e paciência;

Ao meu orientador, Professor Dr. Flávio Vasconcellos da Silva, pela oportunidade, confiança, compreensão e ensinamentos;

Ao Professor Dr. Fábio Augusto do Amaral, pelo apoio e amizade;

À Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas, pela infraestrutura oferecida e disponibilidade de recursos;

À empresa TANAC pelo fornecimento de amostras de reagentes (Taninos);

Ao amigo Rodolpho Fonseca, pelo incentivo, companheirismo e colaborações neste trabalho;

Aos amigos do LCAP, Ivan Franco, Marcos Estevom e Rafael Sencio;

À Sr.^a Elenice Cavallaro Ferraz, minha estimada professora do ensino fundamental, que me encantou demonstrando a beleza e a importância da ciência;

Aos amigos Robson Bertoni e Taís Tomazela Bertoni, minha gratidão pela amizade, carinho e compreensão;

À aluna e estagiária, Núbia de Moura Dias Sousa, pela colaboração neste trabalho;

Enfim, às pessoas e instituições que, na forma de orientação, auxílio e estímulo foram fundamentais para a realização desta tese.

.

RESUMO

O presente projeto teve por objetivo principal estabelecer uma metodologia de tratamento físico-químico de duas classes de efluentes industriais, um contendo elevada e outro contendo baixa concentração de sólidos - SST com emprego de um biopolímero extraído de fonte renovável (Tanino Catiônico) como coagulante e a Flotação por Ar Dissolvido (FAD) como método de separação sólido-líquido, no qual, o protótipo de um sistema automatizado de tratamento físico-químico foi utilizado de modo a possibilitar o controle e o monitoramento de cada processo. Foi avaliada a influência da concentração de sólidos inicial do efluente na formação de aglomerados sólidos nas etapas de coagulação e floculação estabelecendo os possíveis mecanismos de interação envolvidos na formação de agregados bolhas-partículas. Também foi investigada a eficiência de diferentes pressões de saturação de ar na água de injeção no processo de FAD. Além disso, foram adicionadas diferentes percentuais de injeção de água saturada (taxa de recirculação) ao efluente previamente tratado. As condições de operação do protótipo de tratamento foram previamente determinadas pelos ensaios de jarro, onde foram obtidas as dosagens ideais do reagente a base de tanino referenciadas quimicamente pelo pH de coagulação e de acordo com a concentração da água turva, em 150 ppm/25 NTU; 280 ppm/50 NTU e 450 ppm/75 NTU, suficientes para a formação de flóculos estáveis e, conseqüentemente, favoráveis para o processo de FAD. A partir dos resultados de índice de redução de turbidez para diferentes condições experimentais e concentrações de sólidos, 25 NTU e 75 NTU, as combinações mais eficientes (% de remoção de turbidez) foram observadas nas condições de 6,85 bar/Txr 14,3%; (95,6%) e, 6,15 bar/Txr 14,3%; (93,8%), permitiu-se determinar as zonas de mecanismos de interação e captura bolha-partícula, prevendo as pressões de saturação na FAD de acordo com a quantidade de sólidos suspensos no efluente sintético produzido.

Palavras Chaves: FAD; Flotação por Ar Dissolvido; Tratamento de Efluentes Industriais, Planejamento de Experimentos.

ABSTRACT

This work had as the main objective to establish a methodology of physical-chemical treatment in two classes of industrial effluents (with a high and a low concentration of solids) using a biopolymer extracted from a renewable source (Cationic Tannin) as a coagulant. The Dissolved Air Flotation (DAF) process was used as the method of solid-liquid separation. One prototype well-automatized of the physical-chemical treatment was used in order to enable the control and the monitoring of all important process variables. It was evaluated the influence of the initial concentration of solids of the effluent in the formation of agglomerated solids in the stages of coagulation and flocculation, establishing the possible mechanisms of interaction involved in the formation of bubbles-particles aggregate. It was also investigated the efficiency of different air saturation pressures in the injection water in the process of DAF. In addition, it was added different percentages of saturated water injection (recirculation rate) to the effluent previously treated. The conditions of operation were previously determined by the jar testing assays, where it was obtained the ideal reagent dosages based on tannin from the coagulation pH and the concentration of the synthetic cloudy water (150 ppm/25 NTU; 280 ppm/50 NTU and 450 ppm/75 NTU), sufficient for the formation of stable flocculus and, consequently, favorable for the DAF process. As results, it was obtained better turbidity removal index for conditions of 6,85 bar/Txr 14,3%; (95,6%) and, 6,15 bar/Txr 14,3%; (93,8%), it permitted to determine the bubble-particle interaction and capture mechanisms zones, predicting the saturation pressures on the DAF according to the number of suspended solids on the synthetic effluent produced.

Key-Words: Dissolved Air Flotation; Industrial Effluents Treatment; Design of Experiments.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ilustração das partículas coloidais suspensas em meio aquoso. (a) Partículas eletricamente carregadas em repulsão. (b) Partículas “sem carga”, livres em processo de colisão e agregação.....	27
Figura 2. Diagrama ternário das possíveis interações entre bolha-partícula.....	33
Figura 3. Representação esquemática do <i>entrapment</i> ocasionado pela variação de tamanho de bolha para efluente com elevado teor de sólidos, resultando no aprisionamento de bolhas geradas a menores pressões nos flóculos (a) e o aprisionamento de bolhas geradas a maiores pressões nos flóculos (b).....	35
Figura 4. Representação esquemática do <i>entrapment</i> ocasionado pela variação de tamanho de bolha para efluente com baixo teor de sólidos, resultando no aprisionamento de bolhas geradas a menores pressões nos flóculos (a) e aprisionamento de bolhas geradas a maiores pressões nos flóculos (b).....	36
Figura 5. Esquema representativo das zonas hidrocínéticas presentes no mecanismo de interação bolha-partícula (B-P).....	38
Figura 6. Representação esquemática do princípio de medição da nefelometria e turbidimetria.....	42
Figura 7. Projeto com dimensões (em mm) do tanque de floculação. Representação do (a) corte longitudinal (vista frontal); (b) vista superior e (c) corte transversal.....	51
Figura 8. Ilustração parcial do tanque de floculação – primeiro estágio ou zona de mistura rápida. (a) Eletrodo do pHmetro <i>on-line</i> ; (b) tubulação de entrada de água bruta; (c) ponto de dosagem da solução de reagente Aluminato de sódio e (d) ponto de dosagem da solução reagente de Tanfloc SG	52
Figura 9. Imagem do floculador em funcionamento. Com destaque para os tipos de misturadores utilizados em cada etapa de mistura.....	53
Figura 10. Projeto do tanque de flotação em acrílico com medidas em mm. Representação do (a) corte longitudinal (vista frontal); (b) vista superior e (c) corte transversal.....	54
Figura 11. Ilustração do tanque de flotação “flotador” construído em acrílico com iluminação (<i>leds</i>) na parte externa/inferior e raspador mecânico superficial de sólidos.....	55

Figura 12. Ilustrações do tanque de flotação com (a) vista lateral da zona de contato e (b) ponto de injeção de água saturada localizada na região inferior da zona de contato.....	56
Figura 13. Imagem parcial do tanque de flotação: Evidência fotográfica da formação da “manta” de floculos recém flotados e acumulados na parte superior da zona de contato em deslocamento sentido a zona de separação.....	57
Figura 14. Registro fotográfico do tanque de flotação em operação – Imagem parcial da zona de separação com a “manta” de floculos flotados em processo de deslocamento superficial de sólidos e escoamento para a canaleta de descarte.....	58
Figura 15. Projeto do filtro de areia em acrílico com medidas em mm. Representação do (a) corte longitudinal; (b) vista superior da placa de contenção removível e (c) vista frontal.....	59
Figura 16. Imagem parcial do protótipo em funcionamento, exposto como (a) filtro de areia e (b) reservatório de água tratada (filtrada) utilizada para a alimentação da célula de saturação.....	60
Figura 17. Esboço da estrutura da célula de saturação (medidas em cm). Representação ilustrativa da vista frontal.....	61
Figura 18. a) Célula de Saturação construída para o tratamento de efluentes via FAD em modo manual; b) Célula de Saturação adaptada para o tratamento de efluentes via FAD em modo automático.....	62
Figura 19. Imagem da tela principal do SCADA.....	64
Figura 20. Imagem da tela secundária (célula de saturação) do SCADA.....	65
Figura 21. Representação esquemática do projeto proposto para o sistema de tratamento com processo de flotação por ar dissolvido (FAD).....	66
Figura 22. Ilustração geral do sistema de tratamento de águas via FAD com indicação alfabética dos principais componentes do protótipo.....	67
Figura 23. Imagem de uma placa de petri contendo amostra de argila vermelha previamente peneirada para o processo de preparação da “solução mãe”.....	72
Figura 24. Representação esquemática da vista frontal do tanque de preparação da água bruta (efluente) construído a partir de um IBC (cap. 1000 L) adaptado com sistema de agitação mecânica.....	73
Figura 25. Ilustração do pHmetro <i>on-line</i> , instalado no protótipo de tratamento.....	74

Figura 26. Imagem dos equipamentos utilizados para medição de turbidez. Expostos em (a) Turbidímetro <i>off-line</i> , marca Policontrol®, modelo AP2000. (b) Turbidímetro <i>on-line</i> , marca Scientific®, modelo Microtol 4HF.....	75
Figura 27. Ilustração da bomba dosadora peristáltica utilizada para dosagem contínua do reagente Aluminato de Sódio.....	76
Figura 28. Ilustração da bomba dosadora peristáltica utilizada para dosagem do reagente coagulante Tanfloc SG.....	77
Figura 29. Imagens dos (a) Tanques IBCs adaptados; (b) Conjunto composto por suporte (desmontável) com motor elétrico (2,0 cv), mancal, haste (700 mm) aço inox 316L e misturador tipo paleta reta prolongada com rotação linear controlada por (c) inversor de frequência.....	79
Figura 30. Registro fotográfico da etapa de coagulação. Imagem parcial do floculador em operação com flóculos em processo de formação sob agitação e suspensão.....	80
Figura 31. Imagem parcial do floculador em operação durante etapa de coagulação/floculação visando a determinação da dosagem ideal de reagentes Aluminato de Sódio e Tanfloc SG, com efluente ajustado em 25 NTU, apresentando flóculos em processo de formação sob agitação e suspensão.....	82
Figura 32. Imagem parcial do floculador em operação durante etapa de coagulação/floculação visando a determinação da dosagem ideal de reagentes Aluminato de Sódio e Tanfloc SG, com efluente ajustado em 50 NTU, apresentando flóculos em processo de formação sob agitação e suspensão.....	84
Figura 33. Imagem parcial do floculador em operação durante etapa de coagulação/floculação visando a determinação da dosagem ideal de reagentes Aluminato de Sódio e Tanfloc SG, com efluente ajustado em 75 NTU, apresentando flóculos em processo de formação sob agitação e suspensão.....	85
Figura 34. Fluxograma das etapas de preparação do efluente sintético e condicionamento do tratamento químico via processos de coagulação e floculação.....	88
Figura 35. Fluxograma geral das etapas investigadas condicionantes para o emprego da flotação por ar dissolvido (FAD).....	90
Figura 36 - Efeitos das variáveis dos níveis no tempo de desacoplamento.....	94
Figura 37 - Superfícies de resposta do tempo de desacoplamento para a turbidez de entrada, pressão de saturação e taxa de reciclo.....	96
Figura 38. Comportamento da Turbidez (média) em função do tempo de monitoramento obtidos nos experimentos (em triplicata) do Ponto Central de 50 NTU, 6,5 bar e 15% de trr (taxa de retorno) dentro do Tanque de Flotação a partir do TDH	98

(tempo de detenção hidráulica), sendo igual ao TE (tempo de estabilização), início do monitoramento da turbidez (NTU).....

Figura 39. Imagem do flotador em operação durante ensaio realizado considerando as condições previamente estabelecidas e ajustadas para o Ponto Central, sendo Turbidez: 50 NTU, Pressão: 6,5 bar e Taxa de reciclo: 15%..... 99

Figura 40. Perfil do comportamento dos valores de Turbidez (normalizada) obtidos no processo de FAD em função do tempo (s), considerando diferentes concentrações de efluentes preparados (25 e 75 NTU), sob condições operacionais previamente ajustadas em: Pressão de saturação: 6,15 bar e Taxa de reciclo: 14,3%..... 100

Figura 41. Imagem do flotador em funcionamento durante ensaio realizado considerando as condições operacionais do protótipo previamente ajustadas em Turbidez: 25 NTU, Pressão: 6,15 bar e Taxa de reciclo: 14,3%..... 102

Figura 42. Perfil do comportamento dos valores de Turbidez (normalizada) obtidos no processo de FAD em função do tempo (s), considerando diferentes concentrações de efluentes preparados (25 e 75 NTU), sob condições operacionais previamente ajustadas em: Pressão de saturação: 6,15 bar e Taxa de reciclo: 15,7%..... 103

Figura 43. Imagem do flotador em funcionamento durante ensaio realizado considerando as condições operacionais do protótipo previamente ajustadas em Turbidez: 75 NTU, Pressão: 6,15 bar e Taxa de reciclo: 15,7%..... 104

Figura 44. Perfil do comportamento dos valores de Turbidez (normalizada) obtidos no processo de FAD em função do tempo (s), considerando diferentes concentrações de efluentes preparados (25 e 75 NTU), sob condições operacionais previamente ajustadas em: Pressão de saturação: 6,85 bar e Taxa de reciclo: 14,3%..... 105

Figura 45. Imagem do flotador em funcionamento durante ensaio realizado considerando as condições operacionais do protótipo previamente ajustadas em Turbidez: 25 NTU, Pressão: 6,85 bar e Taxa de reciclo: 14,3%..... 107

Figura 46. Perfil do comportamento dos valores de Turbidez (normalizada) obtidos no processo de FAD em função do tempo (s), considerando diferentes concentrações de efluentes preparados (25 e 75 NTU), sob condições operacionais previamente ajustadas em: Pressão de saturação: 6,85 bar e Taxa de reciclo: 15,7%..... 108

Figura 47. Imagem do flotador em funcionamento durante ensaio realizado considerando as condições operacionais do protótipo previamente ajustadas em Turbidez: 75 NTU, Pressão: 6,85 bar e Taxa de reciclo: 15,7%..... 110

Figura 48. Perfil do comportamento dos valores de Turbidez (normalizada) obtidos no processo de FAD em função do tempo (s), considerando diferentes pressões de saturação (6,15 e 6,85 bar), sob condições operacionais previamente ajustadas em: 25 NTU (concentração de efluente preparado) e Taxa de reciclo: 14,3%..... 111

Figura 49. Imagens do flotador em funcionamento durante ensaios realizados considerando as condições operacionais do protótipo previamente ajustadas em Turbidez: 25 NTU, Taxa de reciclo: 14,3% e Pressão de saturação de (a) 6,15 bar e (b) 6,85 bar.....	112
Figura 50. Perfil do comportamento dos valores de Turbidez (normalizada) obtidos no processo de FAD em função do tempo (s), considerando diferentes pressões de saturação (6,15 e 6,85 bar), sob condições operacionais previamente ajustadas em: 25 NTU (concentração de efluente preparado) e Taxa de reciclo: 15,7%.....	114
Figura 51. Perfil do comportamento dos valores de Turbidez (normalizada) obtidos no processo de FAD em função do tempo (s), considerando diferentes taxas de reciclo (14,3% e 15,7%), sob condições operacionais previamente ajustadas em: 25 NTU (concentração de efluente preparado) e Pressão de saturação: 6,15 bar.....	115
Figura 52. Perfil do comportamento dos valores de Turbidez (normalizada) obtidos no processo de FAD em função do tempo (s), considerando diferentes taxas de reciclo (14,3% e 15,7%), sob condições operacionais previamente ajustadas em: 25 NTU (concentração de efluente preparado) e Pressão de saturação: 6,18 bar.....	117
Figura 53. Imagens do flotador em funcionamento durante ensaios realizados considerando as condições operacionais do protótipo previamente ajustadas em Turbidez: 25 NTU, Pressão de saturação: 6,85 bar e Taxa de reciclo: (a) 14,3% e (b) 15,7%.....	118
Figura 54. Efeito da variação (%) normalizada em relação ao Ponto Central para as diferentes condições de ensaios realizados com efluente preparado (25 NTU) em função do tempo. As regiões 1, 2 e 3 demarcadas são intervalos de tempo correspondente ao TDH.....	119
Figura 55. Perfil do comportamento dos valores de Turbidez (normalizada) obtidos no processo de FAD em função do tempo (s), considerando diferentes pressões de saturação (6,15 e 6,85 bar), sob condições operacionais previamente ajustadas em: 75 NTU (concentração de efluente preparado) e Taxa de reciclo: 14,3%.....	121
Figura 56. Imagens do flotador em funcionamento durante ensaios realizados considerando as condições operacionais do protótipo previamente ajustadas em Turbidez: 75 NTU, Taxa de reciclo: 14,3% e Pressão de saturação de (a) 6,15 bar e (b) 6,85 bar.....	122
Figura 57. Perfil do comportamento dos valores de Turbidez (normalizada) obtidos no processo de FAD em função do tempo (s), considerando diferentes pressões de saturação (6,15 e 6,85 bar), sob condições operacionais previamente ajustadas em: 75 NTU (concentração de efluente preparado) e Taxa de reciclo: 15,7%.....	123
Figura 58. Perfil do comportamento dos valores de Turbidez (normalizada) obtidos no processo de FAD em função do tempo (s), considerando diferentes taxas de reciclo	125

(14,3% e 15,7%), sob condições operacionais previamente ajustadas em: 75 NTU (concentração de efluente preparado) e Pressão de saturação: 6,15 bar.....

Figura 59. Perfil do comportamento dos valores de Turbidez (normalizada) obtidos no processo de FAD em função do tempo (s), considerando diferentes taxas de reciclo (14,3% e 15,7%), sob condições operacionais previamente ajustadas em: 75 NTU (concentração de efluente preparado) e Pressão de saturação: 6,85 bar..... 127

Figura 60. Efeito da variação (%) normalizada em relação ao Ponto Central para as diferentes condições de ensaios realizados com efluente preparado (75 NTU) em função do tempo. As regiões 1, 2 e 3 demarcadas são intervalos de tempo correspondente ao TDH..... 129

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Tipos de Flotação por diferentes métodos de geração de bolhas e seus respectivos diâmetros, vantagens e desvantagens.....	30
Tabela 2. Classificação e tipos de tratamento para o abastecimento para consumo humano de acordo com os níveis máximos permitidos de turbidez em águas doces estabelecidos pela resolução CONAMA 430/11.....	41
Tabela 3. Valores de Dosagem ideal de reagentes obtidos a partir dos ensaios de coagulação/floculação com efluentes preparados com turbidez ajustada em 25 NTU.....	81
Tabela 4. Valores de Dosagem ideal de reagentes obtidos a partir dos ensaios de coagulação/floculação com efluentes preparados com turbidez ajustada em 50 NTU.....	83
Tabela 5. Valores de dosagem ideal de reagentes obtidos a partir dos ensaios de coagulação/floculação com efluentes preparados com turbidez ajustada em 75 NTU.....	84
Tabela 6. Vazão de dosagem conforme resultados observados nos testes de aplicações de coagulantes em função da variação da turbidez.....	87
Tabela. 7. Matriz experimental adotada para o planejamento fatorial 2^3	93
Tabela 8 – Tabela de Análise da variância (ANOVA) para o ajuste de um modelo quadrático do Planejamento Experimental Fatorial realizado.....	94

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASH	<i>Air Sparget Hydrociclone</i>
atm	atmosfera
B/P	Bolha / Partícula
BAF	<i>Bubble Accelerated Flotation</i>
B-P	Bolha-Partícula
CAI	Condicionamento em Alta Densidade
cm	Centímetro
DAF	<i>Dissolved Air Flotation</i>
dp	Diâmetro de partícula
E	Eficiência na colisão
Ea	Eficiência no acoplamento
Ee	Eficiência na estabilidade do agregado bolha partícula
EPA	<i>Enviromental Protection Agency</i>
FAD	Flotação por ar dissolvido
h	Hora
Hz	Hertz
IBC	<i>Intermediate Bulk Cantainer</i>
Kgf	Kilograma força
L	Litro
LCAP	Laboratório de Controle e Automação de Processos
mm	milímetro

NaAlO ₂	Aluminato de Sódio
NTU	<i>Nephelometric Turbidity Unit</i>
P/P	Partícula / Partícula
ppm	Partes por milhão
rpm	Rotação por minuto
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Aquisition</i>
TDH	Tempo de detenção hidráulica
"	Polegada

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – Introdução Geral	21
1. Introdução	21
CAPÍTULO 2 – Fundamentação Teórica e Revisão Bibliográfica	25
2.1. Introdução	25
2.2. Partículas Coloidais	26
2.3. Coagulação	27
2.4. O Processo de Flotação	29
2.5. Formação e Tamanho de Bolha	30
2.6. Mecanismos de captura bolha-partícula sobre partículas ultrafinas	32
2.7. Flotação por Ar Dissolvido (FAD) no Tratamento de Efluentes	39
2.8. Parâmetro Analítico de Acompanhamento	40
2.8.1. Turbidez	40
2.9. Conclusões Parciais.....	43
CAPÍTULO 3 – Hipóteses e Objetivos	45
3.1. Hipóteses	45
3.1.1. Hipótese 1	45
3.1.2 Hipótese 2	45
3.1.3 Hipótese 3	45
3.2. Objetivos	46
3.2.1. Objetivo Principal	46
3.2.2 Objetivos Secundários	46
CAPÍTULO 4 – Projeto, Montagem e Automação de um Protótipo de FAD ...	47
4.1 Introdução	47
4.2. Materiais e Métodos	48

4.2.1. Projeto do Protótipo	49
4.2.2. Projeto do Tanque de Floculação	49
4.2.3. Projeto do Flotador ou Tanque de flotação	49
4.2.4. Projeto do Filtro de Areia	50
4.2.5. Montagem e Automação da Célula de Saturação	50
4.2.6. Emprego do <i>SCADA</i>	50
4.3. Resultados e Discussão.....	51
4.3.1. Montagem do Tanque de Floculação	51
4.3.2. Montagem do Flotador ou Tanque de flotação	54
4.3.3. Montagem do Filtro de Areia	58
4.3.4. Montagem e Automação da Célula de Saturação	61
4.3.5. <i>Emprego do SCADA</i>	63
4.3.6. Montagem do Protótipo	66
4.4. Conclusões Parciais	69
CAPÍTULO 5 – Determinação das Condições de Operação do Protótipo de FAD.....	70
5.1. Introdução	70
5.2. Materiais e Métodos	71
5.2.1. Preparação do Efluente Bruto	71
5.2.2. Determinação do pH	73
5.2.3. Determinação da Turbidez	74
5.2.4. Determinação da dosagem ideal do auxiliar de coagulação.	75
5.2.5. Determinação da dosagem ideal do Coagulante	76
5.2.6. Determinação da vazão de dosagem dos coagulantes	77
5.3. Resultados e Discussão	78
5.3.1. Preparação do Efluente Bruto	78
5.3.2. Dosagem do Auxiliar de Coagulação e Coagulante	79
5.4. Conclusões Parciais	87
CAPÍTULO 6 – Análise dos Mecanismos de Interações B-P no Processo de FAD	89

6.1. Introdução	89
6.2. Materiais e Métodos	90
6.2.1. Planejamento Experimental Fatorial	91
6.3. Resultados e Discussão	92
6.3.1. Planejamento Experimental	92
6.3.2. Investigação da variação da pressão da câmara de saturação na produção de microbolhas com a variação da concentração de sólidos	97
6.4. Conclusões Parciais	131
CAPÍTULO 7 - Conclusões Finais	132
CAPÍTULO 8 - Sugestões para trabalhos futuros	134
CAPÍTULO 9 - Referências Bibliográficas.....	135

CAPÍTULO 1 – Introdução Geral

1. Introdução

Em toda a história da humanidade, nunca a relação do homem com a natureza esteve tão pautada como centro das preocupações. Deixou de ser segundo plano a preocupação com os recursos naturais de nosso planeta. A exaustão de jazidas minerais, o esgotamento de fontes de energia, a pouca disponibilidade de alimentos, são apenas uma parte do problema, que não restringe a aspectos meramente econômicos. As mudanças climáticas, ainda que apenas parte sejam decorrentes dos efeitos antropológicos, surgem no horizonte como uma ameaça à sobrevivência da espécie e talvez do próprio planeta, num futuro que parece cada vez não tão distante. "Meio ambiente" deixou de ser uma expressão cândida, associada a uma postura contemplativa ou quando muito romântica em relação ao ecossistema, para ocupar o topo da agenda política mundial e as prioridades nas mais diversas áreas do conhecimento.

Entre os vários tipos de recursos naturais, como os hídricos, biológicos, energéticos e minerais, a água pode ser considerada como único "bem natural" integrado com todos os aspectos da civilização humana, desde o desenvolvimento agrícola e industrial aos valores culturais e religiosos intrínseco na sociedade. É um recurso natural essencial, seja como componente bioquímico de seres vivos, como meio de vida de várias espécies vegetais e animais, como elemento representativo de valores sociais e culturais e até como matéria prima primordial para a produção de vários bens materiais de consumo intermediário e final.

Os recursos hídricos têm importância fundamental no desenvolvimento de diversas atividades econômicas. Na indústria, por exemplo, para se obter diversos produtos, a quantidade de água necessária é muitas vezes superior ao volume gerado pelas estações de tratamento de água. Exceto pelo volume de água incorporados aos produtos e pelas perdas por evaporação, geralmente a água torna-se contaminada

devido aos resíduos oriundos dos processos industriais originando assim os efluentes líquidos. Sem dúvida, a contaminação de águas naturais tem sido um dos grandes problemas da sociedade moderna.

Devido à complexidade dos efluentes industriais e a diversidade dos possíveis contaminantes encontrados nos mesmos, cada estudo de viabilidade de tratamento deve ser realizado de maneira isolada. Isto é, os processos desenvolvidos devem ser direcionados a um tipo particular de efluente, já que não existem procedimentos padronizados que possam ser aplicados no tratamento de um grande número de efluentes. Em função deste fato, muitas alternativas têm sido estudadas em busca de uma alternativa que permita, não somente a remoção das substâncias contaminantes, mas sim a sua completa adequação.

Os sistemas de tratamentos de efluentes industriais podem ser divididos em três métodos: Biológicos, físicos e químicos. O tratamento biológico fundamenta-se na utilização dos compostos poluentes de interesse como substrato para o crescimento e a manutenção de microrganismos, enquanto que o tratamento químico se baseia no emprego de reagentes específicos para a transformação dos poluentes sólidos dissolvidos em sólidos suspensos e ou sedimentáveis, para a posterior separação (método físico) das fases sólida/líquida.

O tratamento físico-químico de um efluente industrial geralmente consiste na junção das etapas químicas de coagulação e floculação, seguidas de um processo físico de separação sólido-líquido, que pode ser feito por sedimentação, decantação, flotação e em alguns casos, filtração. Basicamente, os aglomerados capturados pelas malhas poliméricas dos polieletrólitos no processo de floculação, possuem baixa estabilidade para manterem-se dispersos no meio e, devido ao aumento da densidade dos coágulos após a etapa de floculação, parte dessas estruturas já iniciam sua deposição no fundo do tanque de equalização devido a ação exclusiva da gravidade, processo esse denominado de sedimentação. Para a remoção destes sólidos do meio de dispersão, duas técnicas de separação sólido-líquido geralmente são empregadas, a decantação ou a flotação.

A decantação requer um local apropriado para ocorrência desse fenômeno, denominados tanques de decantação ou decantadores. Esses tanques são locais os quais a velocidade do efluente de alimentação, após a floculação, sofre uma diminuição para permitir a deposição dos flóculos. Geralmente têm formato retangular ou circular. O fundo tem declividade de acordo com a forma de remoção do lodo (manual ou hidráulica) e possuem dispositivos na entrada e saída, projetados para melhor distribuição do efluente a fim de evitar arraste não desejados de flóculos (TAFFAREL, 2012).

A desvantagem do emprego de decantadores está no elevado tempo gasto para ocorrência completa da sedimentação, cerca de 1,5 h – 3 h dependendo da estrutura da unidade (TAFFAREL, 2012), e o grande espaço físico necessário para alocação dos tanques de decantação, o que nos grandes centros urbanos são fatores que remetem em aumento do custo do tratamento e má utilização do espaço físico. Com base nessas características, a flotação vem ganhando destaque como método substitutivo a decantação.

A flotação é o processo de separação de misturas que ocorre pela introdução de bolhas de ar no meio de dispersão. A característica de maior distinção deste com relação a outros métodos de separação sólido-líquido é que ele representa o inverso do que ocorreria espontaneamente: a sedimentação das partículas. A ocorrência desse fenômeno se deve à tensão superficial do meio de dispersão e ao ângulo de contato formado entre as bolhas e as partículas no ato da aderência das partículas às bolhas. O resultado desse processo é a formação de uma espécie de espuma, lodo de flotação, que no caso de misturas sólido-líquido é rico em sólidos (MASSI *et al*, 2008). Apesar destas condições poderem ser estabelecidas facilmente para partículas ultrafinas de sólidos, pouco se conhece sobre as possibilidades de interação quando se trata de coágulos de efluentes industriais, provavelmente pela não homogeneidade das partículas coaguladas.

Na maior parte dos casos, o processo de separação sólido-líquido via flotação é uma alternativa geralmente empregada para o tratamento de águas que apresentam dificuldades de serem tratadas pelo processo de sedimentação convencional, como as águas com partículas de baixa densidade que possuam tendência natural para flutuar, águas ricas em nutrientes, cor elevada, baixa turbidez e águas turvas com baixo conteúdo

orgânico, que ao serem submetidas ao tratamento químico utilizando produtos normalmente empregados para coagulação, produzem flóculos com baixa velocidade de sedimentação.

Por outro lado, pelas características típicas dos efluentes industriais, sugerem o tratamento pelo processo de decantação convencional, pois, geralmente apresentam elevadas concentrações de sólidos suspensos, partículas densas e elevada turbidez.

A eficiência do processo de flotação depende das condições físico-químicas e hidrodinâmicas do sistema, para isso, este trabalho foi desenvolvido em um protótipo de uma estação de tratamento de águas e efluentes com processo de flotação por ar dissolvido (FAD), dimensionada e construída, no recém-criado segmento de pesquisas em tratamento de águas e efluentes líquidos, do Laboratório de Controle e Automação de Processos (LCAP). Os sistemas de controle e automação instalados nesta planta, foram imprescindíveis para o estudo do processo de tratamento físico-químico e das condições específicas para o emprego da flotação por ar dissolvido, de modo a investigar a viabilidade do emprego da FAD no tratamento de águas.

Circunstancialmente, os ensaios simulados e sequenciados pelo emprego da FAD, foram norteados pela tentativa de se estabelecer condições peculiares e pré-definidas do processo físico-químico de tratamento, buscando aprimorar a cinética de separação sólido-líquido, beneficiando a operação em maiores escalas de vazão, em menores espaços físicos

CAPÍTULO 2 – Fundamentação Teórica e Revisão Bibliográfica

Neste capítulo será apresentada uma revisão bibliográfica abordando as fundamentações teóricas sobre tais assuntos, de modo a esclarecer os temas mais importantes para o entendimento do projeto, destacando-se os últimos avanços tecnológicos na área

2.1. Introdução

Segundo Gregory e Zabel (1990), existem relatos de que os gregos, há mais de 2.000 anos já empregavam a técnica de flotação para a separação de minérios. A flotação por ar dissolvido (FAD) foi primeiramente utilizada no setor industrial. Na década de cinquenta, a flotação era utilizada no tratamento de águas residuárias domésticas e de algumas indústrias, como a petroquímica (Zabel, 1984). No final dos anos sessenta, a flotação passou a ser utilizada como processo de tratamento de água potável, sendo aplicada primeiramente na África do Sul e na Escandinávia (Longhurst e Graham, 1987).

No Brasil, os primeiros estudos sobre a FAD empregada em tratamento de água foram realizados no início da década de 80 na Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (Reali e Campos, 1985 e 1995). Em escala industrial, a estação de tratamento de água (ETA) de Meaípe, bairro litorâneo de Guarapari-ES, foi a primeira no Brasil a utilizar a flotação por ar dissolvido como processo de clarificação de água potável, operando desde 1994 (Lobato *et al.*, 1995).

A flotação surge como promissora alternativa para o tratamento físico-químico de águas consideradas desfavoráveis de serem tratadas pelo convencional processo de sedimentação, como por exemplo, águas com baixa concentração de sólidos suspensos

(baixa turbidez), presença de partículas de baixa densidade que ao serem submetidas ao processo de desestabilização química, geram coágulos ou flóculos com baixa velocidade de sedimentação (Gregory e Zabel, 1990; Malley e Edzwald, 1995; Reali e Campos, 1995).

O emprego da flotação por ar dissolvido no tratamento físico-químico de águas de qualquer natureza requer, além dos métodos de coagulação e floculação, também conhecimentos específicos dos mecanismos das possíveis interações bolha-partícula.

2.2. Partículas Coloidais

A efetividade da coagulação/floculação pode ser compreendida pela interações observadas entre as partículas coloidais.

Partículas que ocasionam a turbidez possuem tamanho variando de 0,01 a 100 μm aproximadamente, sendo que as frações maiores são mais propensas a sedimentar ou serem filtradas. A fração de partículas menores, ou também denominada como fração coloidal (0,01 a 5 microns), é a parte que realmente apresenta maiores dificuldades de separação, uma vez que o fator tempo de sedimentação é acentuado e, as mesmas facilmente “escapam” dos meios filtrantes.

Na água, o comportamento dos coloides é fortemente influenciado pela sua carga superficial. Individualmente, cada partícula coloidal possui uma carga, geralmente negativa, que faz com que as partículas adjacentes sejam repelidas, impedindo assim que as partículas se aglomerem, resultando que as partículas permaneçam dispersas e em suspensão no meio, como pode ser observada na Figura 1a. (RAVINA, 1993).

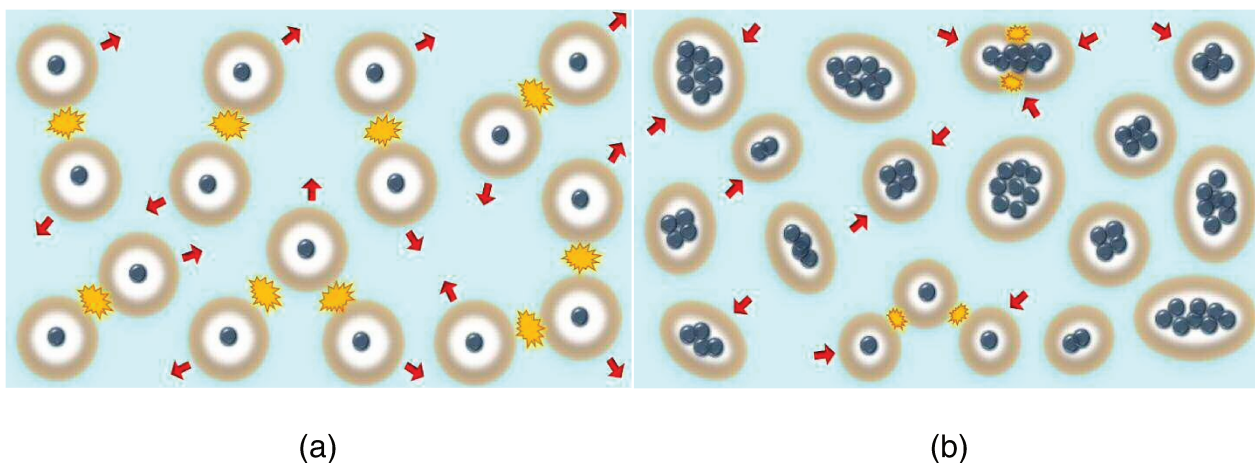


Figura 1. Ilustração das partículas coloidais suspensas em meio aquoso. (a) Partículas eletricamente carregadas em repulsão. (b) Partículas “sem carga”, livres em processo de colisão e agregação.

Fonte: O autor

Entretanto, se a carga for reduzida significativamente ou eliminada, a aglomeração poderá ocorrer, primeiramente em pequenos grupos, depois a agregados maiores e finalmente em flóculos de partículas ilustrados na Figura 1b, visíveis que sedimentam com rapidez e podem ser filtradas com facilidade (RAVINA,1993).

2.3. Coagulação

A coagulação pode ser definida como a desestabilização química das partículas coloidais, enquanto que a floculação é a agregação física dos coloides previamente desestabilizados de modo a formar flóculos.

Basicamente, a coagulação química têm por objetivo diminuir a magnitude do potencial zeta para que as forças repulsivas entre as partículas sejam inferiores que as forças atrativas de Van Der Waals. Quando o potencial zeta é reduzido para valores próximos de zero, a estabilidade de uma dispersão coloidal decresce. De acordo com Sawamura (1997), os íons de valência elevada e carga oposta às partículas emulsionadas reduzem o potencial zeta, provocando assim a ruptura da emulsão

A desestabilização química das partículas ocorre por intermédio da adição de reagentes coagulantes sob agitação do meio líquido visando a dispersão dos produtos químicos e a ocorrência de colisões entre as partículas presentes. Esta agitação do meio líquido durante a coagulação é chamada de mistura rápida. Os possíveis mecanismos de desestabilização decorrentes da adição de coagulantes são: a compressão da dupla camada elétrica; a adsorção-neutralização de cargas; a varredura; e a adsorção e formação de pontes.

Em um sistema coloidal, a compressão da dupla camada elétrica se dá pela adição de um eletrólito, aumentando assim a densidade de cargas iônicas presentes na camada difusa das partículas coloidais presentes, conseqüentemente, resultando na diminuição do volume desta, necessário para contrabalançar a carga superficial das partículas. Esta compressão reflete na distribuição de forças repulsivas presentes na vizinhança das partículas, reduzindo-as ou anulando a barreira de energia que impedia a agregação das partículas. A adsorção-neutralização de cargas ocorre quando algumas espécies químicas, capazes de serem adsorvidas na superfície das partículas coloidais, anulam suas cargas contrárias, provocando a desestabilização das mesmas. Na varredura, dependendo da quantidade de reagente coagulante adicionado, do pH e da concentração de algumas espécies de íons presentes na solução, poderá haver a formação de precipitados. As partículas coloidais comportam-se como núcleos de condensação para estes precipitados que, desta forma, poderão vir a formar flóculos, posteriormente removidos por sedimentação (MENDES, 1989).

As espécies químicas predominantemente formadas, as quais definem o mecanismo de coagulação empregado, são influenciadas pelo pH e pela dosagem de coagulante. Por exemplo, o sulfato de alumínio, muito utilizado na coagulação, atua no mecanismo de adsorção-neutralização para valores de pH e dosagens de coagulante menores que os necessários para o mecanismo de varredura.

Sánchez-Martín, Beltrán-Heredia e Solera-Hernández (2010) utilizaram um protótipo de estação de tratamento de efluentes com etapas de floculação, decantação e filtração para avaliar o uso de tanino no tratamento de quatro tipos de efluentes, sendo eles de indústria têxtil, de lavanderia, efluente doméstico e de água captada de rio. Para

os efluentes testados, este coagulante natural permitiu não apenas a remoção da turbidez, mas também a remoção de cor e surfactantes, nas ordens de 50% e 75%, respectivamente. Já Thompson Junior (2015) também empregando o tanino como coagulante na etapa química e a flotação por ar dissolvido (FAD) na etapa física de separação sólido-líquido, para o tratamento físico-químico de efluentes de lavanderias industriais, obteve resultados superiores a 95% no índice de remoção de turbidez.

Diante do exposto, os trabalhos publicados recentemente reforçam a evidente eficácia do uso de tanino no tratamento de efluentes para a remoção de partículas e redução da turbidez. Entretanto, os flóculos formados durante a floculação podem ser separados por decantação que requer tempo para ocorrer, ou por flotação que promove a rápida separação dos flóculos pela ação de microbolhas.

2.4. O Processo de Flotação

O método de separação sólido-líquido por flotação foi empregado no tratamento de efluentes industriais pela primeira vez em 1950 e desde então, as aplicações desse método vem sendo estendidas para diversas finalidades, como: no espessamento de manta de lodo, remoção de algas por oxidação das lagos de efluente, e na clarificação de água para fins potáveis em substituição a sedimentação. De modo geral, o processo de flotação envolve:

- i. a geração de bolhas de ar;
- ii. o contato entre as bolhas de ar e as partículas a serem removidas;
- iii. a flotação de partículas pela força de empuxo criada;
- iv. a remoção pela raspagem do lodo flotado;

Em práticas modernas, a flotação tem sido utilizada pela dissolução de ar em um meio, gerando assim bolhas de tamanho específico e é comumente denominada de Flotação por Ar Dissolvido, ou mais conhecida pela sigla FAD (ou, *Dissolved Air Flotation*, DAF) (HENDRICK, 2010). Diversos fatores influenciam e são fundamentais na eficiência da aplicação da FAD como: porcentagem de sólidos no meio, tamanho de partícula,

tamanho de bolha, densidade de partícula, viscosidade do meio, estrutura das partículas e forma de injeção das bolhas (WANG *et al.*, 2015), alguns desses principais fatores serão mais bem descritas nos tópicos a seguir.

2.5. Formação e Tamanho de Bolha

Nas tecnologias de flotação existentes as bolhas de ar são formadas em um meio aquoso por uma pré-saturação da água com ar a pressões acima da atmosférica. A supersaturação da água é forçada através de válvulas agulha ou orifícios no efluente, e a nuvem de bolhas, de faixa de tamanho definido segundo a pressão de saturação aplicada são produzidos imediatamente após a constrição (BRATBY, 1977). A concentração máxima de ar na água é regida pela Lei de Henry ($P_a = H \cdot x_a$, sendo H a constante de Henry, x_a a fração molar de equilíbrio do gás em solução e P_a a pressão parcial da fase gasosa), e como tal, é diretamente proporcional à pressão parcial do gás aplicada ao líquido (TAKAHASHI, MIYAHARA e MOCHIZUKI, 1979 e HENDRICKS, 2010). Com base nesses fatores, é evidente notar que a pressão de saturação é fundamental na formação das bolhas e no tamanho das mesmas. Além disso, o tamanho de bolha representa um dos primeiros fatores de significativo impacto na eficiência da flotação (LIU *et al.*, 2010) e é a própria estrutura e metodologia empregada na geração das bolhas que define seu tamanho, algumas das principais metodologias e a faixa de diâmetro das respectivas bolhas formadas seguem na Tabela 1.

Tabela 1. Tipos de Flotação por diferentes métodos de geração de bolhas e seus respectivos diâmetros, vantagens e desvantagens.

Tipos de Flotação	Diâmetro de bolha (D_b)/ μm	Vantagens (V) e Desvantagens (D)
Flotação por Ar Dissolvido (FAD)	20 - 100	(V) Espessamento de lodo, separação de matéria orgânica, remoção de íons e óleos dissolvidos, tratamento de minerais ultrafinos, remoção de compostos voláteis,

		clareamento de efluente de refinaria e recuperação de águas residuais;
Eletro-Flotação	10 - 40	(V) Clarificação do efluente; (D) Lodo de volume elevado;
Ar Induzido	50 - 1500	(V) Eficiente na remoção de óleo da água;
Condicionamento em Alta Intensidade (CAI)	10 - 100	—
Aspersão ou Nozzle	400 - 800	(V) Incorporada ao processo de ar induzido: redução do custo inicial e do uso de energia, menor manutenção e maior vida útil do equipamento (tem sido aplicada a indústria petroquímica);
Microcel	100 - 800	—
Gás Aphrons	10 - 1000	—
Jameson ou á Jato	100 - 800	(V) Grande potencial para separação de sólido / líquidos e líquido / líquido na área de processamento mineral, alta taxa de transferência, eficiência e custo moderado;
<i>Air Sparget</i> <i>Hydrociclone (ASH) e</i> <i>Bubble Accelerated</i> (BAF)	50 - 1000	(V) Aplicada a área ambiental e eficiente na remoção de óleos e graxas (vem ganhando espaço na área da pesquisa);
Flotação em Coluna	50 - 1000	(V) Eficiente na área de processamento mineral e na remoção de óleos nas águas de produção;

Fonte: Adaptado de Rubio, 2002.

A FAD geralmente emprega pressões de saturação entre 3 – 6 atm (3,1 – 6,2 kgf.cm⁻²), o que gera bolhas de diâmetro na faixa de 30 – 100 µm, denominadas de microbolhas (BRATBY, 1977) e muito desejadas em sistemas aos quais se busca maior seletividade na captura. Os numerosos relatos e estudos das suas propriedades, como o comportamento da pressão de saturação sobre o diâmetro das bolhas, auxiliam na escolha da mesma como método de separação em um dado sistema a ser tratado. Nessa propriedade, ainda foi observado que a tendência natural das bolhas de ar produzidas é de redução do diâmetro com o aumento da pressão de saturação (BURNS, YIACOUMI e TSOURIES, 1997). Com base nisso, concluiu-se que o diâmetro de bolha é inversamente proporcional a pressão de saturação.

2.6. Mecanismos de captura bolha-partícula sobre partículas ultrafinas

De acordo com Englert, Rodrigues e Rubio (2011) a captura de uma partícula por uma bolha de ar ascendente é geralmente modelada como composta de três etapas consecutivas:

- (a) colisão entre a partícula e a bolha,
- (b) união (*attachment*) ou aprisionamento (*entrapment*) da partícula com a bolha;
- (c) ascensão do agregado bolha-partícula e sua respectiva estabilidade.

Para estas três etapas determinantes, um mínimo momentum (ponto de mínimo) das partículas e a tendência de seguir as linhas de fluxo ao redor da bolha determina que a probabilidade de contato físico entre bolhas e partículas seja reduzida ou não, estabelecendo a eficácia do processo. A existência de um ponto de mínimo na eficiência de captura (coleta) bolha-partícula é função do, diâmetro da partícula (dp), evidenciando um mecanismo de captura por difusão. Quando as partículas possuem tamanho similar ao tamanho das bolhas, estas são capturadas por convecção. A natureza das partículas (hidrofóbicas ou hidrofílicas) também é fator determinante destes

mecanismos de arraste bolha-partícula, bem como o volume de água saturada a ser injetada.

Aqui há uma premissa de que dois mecanismos de interação bolha-partícula, propostos por Hendricks (2010), ambos dependentes da concentração de sólidos suspensos (partícula) e da quantidade de microbolhas formadas (bolha), possam ocorrer para efluentes que contenham diferentes concentrações de sólidos suspensos. A prevalência das formas de interação entre bolha-partícula dependem da região do diagrama em que encontram as condições experimentais (Figura 2). A flotação de efluentes industriais é um processo complexo que envolve várias fases (partículas, gotas de óleo e bolhas de ar). Estas fases interagem simultaneamente umas com as outras e com outras espécies tais como as moléculas de agentes tensoativos que envolvem tanto o efluente, quanto as microbolhas. As interações físicas ou químicas que possam se estabelecer irão determinar a eficácia ou não do processo de flotação.

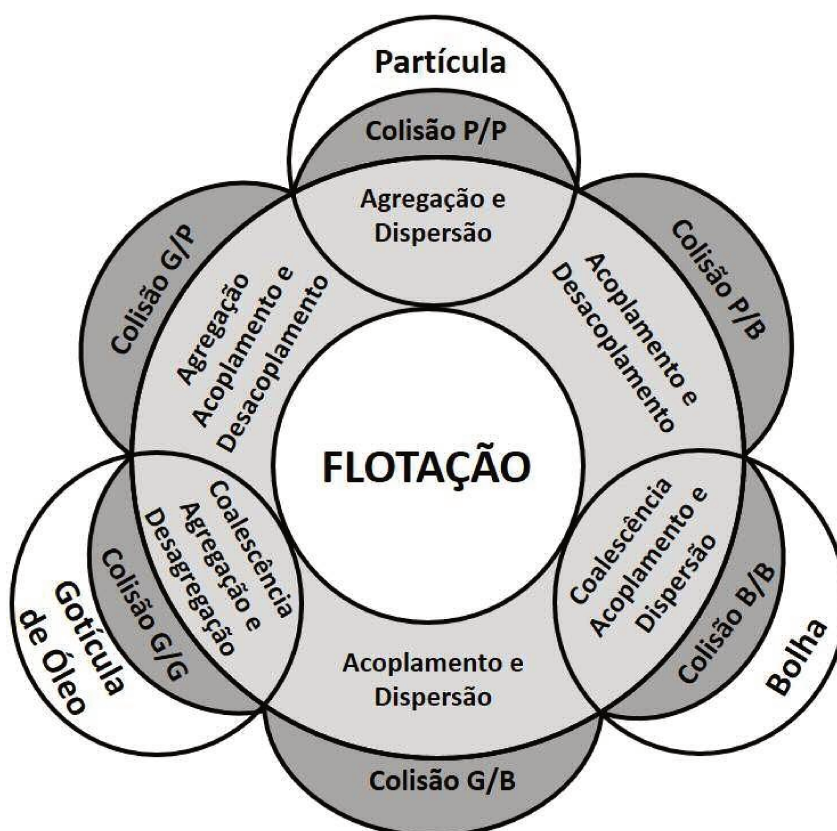


Figura 2. Diagrama ternário das possíveis interações entre bolha-partícula.

Fonte: Adaptado de Leite, 2015.

Sabendo-se que os mecanismos de *Entrapment* (por união ou aprisionamento) ou *Attachment* (por ligação) são dependentes das regiões estabelecidas no diagrama da Figura 2, consequentemente são dependentes da natureza do efluente em questão.

Para efluentes em que os flóculos formados sejam maiores e mais abertos, espera-se que prevaleça a zona do mecanismo “*entrapment*” (aprisionamento), e que as pressões de saturação na câmara de saturação quando forem menores o facilitem, uma vez nestas condições geram-se bolhas maiores e mais favoráveis ao arraste de aglomerados maiores (pois estes possuem maior quantidade de ar tornando o aglomerado menos denso). Além do efeito da variação da pressão de saturação na câmara, a adição de tensoativos na câmara de saturação deveria neste sentido alterar tais regiões do diagrama, deslocando as interfaces referentes aos dois mecanismos citados, já que influencia diretamente no tamanho e estabilidade das microbolhas formadas.

Laskowski e Ralston (1992) ao investigar o efeito da adição de agentes tensoativos sobre a formação de microbolhas de ar observou a formação de zonas de coalescência. Neste caso, a formação dos flóculos com estrutura menor e menos abertos, são por sua vez, ideais para ocorrência do mecanismo de “*attachment*” (ligação), e como nesse tipo de mecanismo o fundamental é a ocorrência de ligação bolha-partícula o tamanho das bolhas em diferentes pressões não deveria influenciar consideravelmente o arraste da bolha. No entanto com adição de diferentes concentrações de surfactante a remoção deve ser comprometida, o que pode estar diretamente relacionado com a mudança da atmosfera iônica na superfície da bolha de ar desfavorecendo o acoplamento bolha-partícula (JAFELLICI JUNIOR e VARANDA, 1999).

Segundo Hendrick (2010), o mecanismo de *attachment* ocorre pela colisão bolha-partícula causada pela turbulência e/ou atração de cargas resultando numa possível ligação. Isto posto, a premissa segue. Com relação à quantidade de sólidos suspensos presentes no efluente, uma proposta de ocorrência de ambos os mecanismos é mostrada nas Figuras 3 e 4, sendo representada com relação às possíveis interações e capturas dos flóculos formados. Na Figura 3 é mostrado um mecanismo para a interação bolha-

partícula para efluente com elevado teor de sólidos, enquanto na Figura 4 é mostrado o mecanismo proposto para a interação bolha partícula para efluente com baixo teor de sólidos. Cabe ressaltar que tais mecanismos são suposições de explicações e necessitam portanto de comprovações experimentais, proposta deste projeto de doutorado.

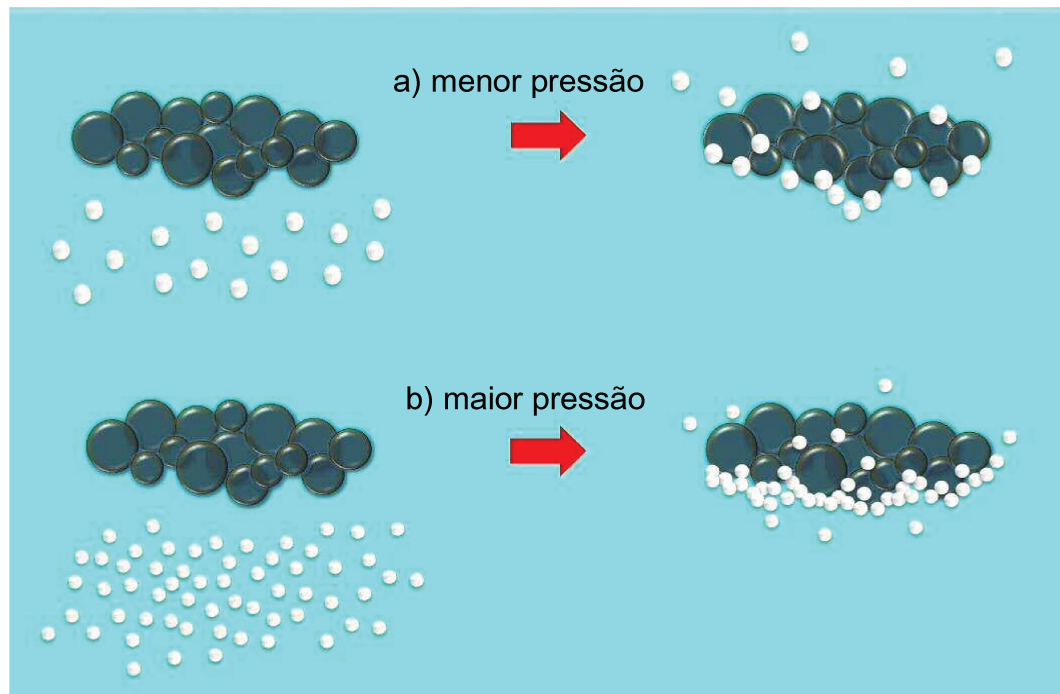


Figura 3. Representação esquemática do *entrapment* ocasionado pela variação de tamanho de bolha para efluente com elevado teor de sólidos, resultando no aprisionamento de bolhas geradas a menores pressões nos flóculos (a) e o aprisionamento de bolhas geradas a maiores pressões nos flóculos (b).

Fonte: Adaptado de Leite, 2015

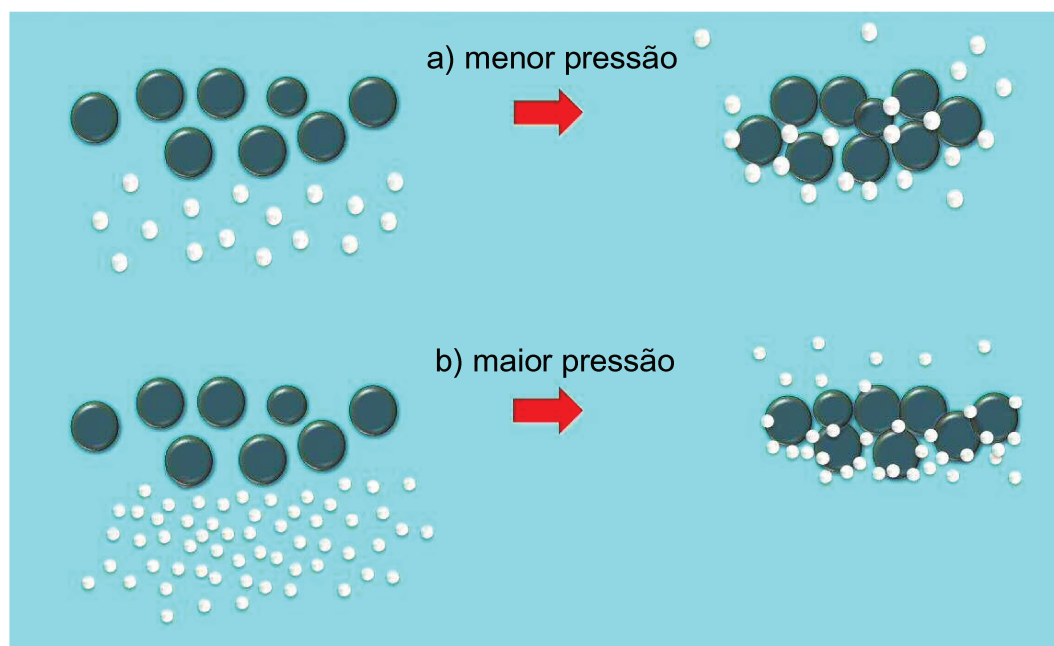


Figura 4. Representação esquemática do *entrapment* ocasionado pela variação de tamanho de bolha para efluente com baixo teor de sólidos, resultando no aprisionamento de bolhas geradas a menores pressões nos flóculos (a) e aprisionamento de bolhas geradas a maiores pressões nos flóculos (b).

Fonte: Adaptado de Leite, 2015.

A interação bolha-partícula durante a colisão é um processo dinâmico e um fenômeno bastante complexo. Há simultaneamente interação entre três fases diferentes: gás, líquido e sólido. E para que ocorra essa interação de modo eficiente, não só a bolha de ar deve ser estável o suficiente para a colisão, como também as propriedades do sólido como grau de hidrofobicidade, homogeneidade, aspereza, carga elétrica, etc (KRASOWSKA e MALYSA, 2007), devem ser favoráveis. Com base nisso, as características da partícula a ser flotada são fundamentais para o entendimento do processo.

A hidrofobicidade é a tendência natural de algo em não interagir com a água e a hidrofiliabilidade é a tendência natural de algo em interagir com essa molécula, isso recai na propriedade de carga elétrica das substâncias. A molécula de água, meio comum ao qual ocorre a flotação, possui um dipolo permanente, consequentemente, classificada como uma molécula polar. Portanto, para que substâncias não tenham tendência a interagir com a água, elas devem ser constituídas de moléculas sem carga, ou seja,

moléculas apolares. Como exemplo de moléculas apolares está a maior parte dos gases que compõe o ar, que é o preenchimento interno das bolhas gasosas geradas na flotação. No entanto, como já citado anteriormente, a flotação originou-se e até hoje é amplamente empregada em mineração, mas os minérios a serem separados do meio são em sua maioria moléculas polares. O pequeno número de minerais naturalmente hidrofóbicos é indicativo de uma gama restrita de aplicações da flotação. A vastíssima aplicação industrial e laboratorial da técnica se deve então ao fato de que minerais naturalmente hidrofílicos podem ter sua superfície tornada hidrofóbica através da adsorção (concentração na superfície) de reagentes conhecidos como coletores ou auxiliares de flotação. Portanto, a seletividade do acoplamento do sólido é determinada pela carga das partículas hidrofóbicas e hidrofílicas.

Ainda no processo de flotação de minério, para que ocorra interação eficiente entre a bolha e a partícula, o fator crucial é que eles tenham primeiramente proximidade suficiente para o encontro, processo controlado pela hidrodinâmica e diretamente dependente do meio ao qual eles estão imersos (RALSTON, 1999). A partir do momento em que a faixa de proximidade se torna pequena, o alcance das forças atrativas de superfície predomina entre a superfície modificada do minério (agora apolar) e o gás interno da bolha, ocorrendo à drenagem parcial do filme líquido da bolha até uma espessura crítica, espessura limite para ocorrência de acomodação da partícula na bolha, também chamada de ruptura. Nesse processo ocorre o movimento de três fases em contato (a fronteira entre a superfície da partícula sólida, recuando a fase líquida e avançando a fase gasosa) até que uma umectagem estável seja estabelecida. Esta sequência de drenagem, ruptura e movimentação da linha de contato é a segunda etapa no mecanismo de interação. A partícula acoplada à bolha pode apenas ser desacoplada deste estado se for fornecida energia cinética suficiente para igualar ou superar a energia de acoplamento (RALSTON, 1999).

A eficiência de captura E de uma bolha e uma partícula pode ser definida então, segundo a Equação 1.

$$E = E_c \cdot E_a \cdot E_e$$

(Equação 1)

Sendo E_c a eficiência na colisão, E_a a eficiência no acoplamento e E_e a eficiência na estabilidade do agregado bolha-partícula (DERJAGUIN e DUKHIN, 1960). Quanto maior o produto das três etapas de eficiências, maior é a ocorrência da remoção do sólido, por esse motivo se alguma das etapas do processo for comprometida o resultado final pode ser afetado na mesma proporção que todas as outras etapas.

De modo geral a estrutura do mecanismo de interação bolha-partícula gera três zonas fundamentais, A) a zona de interação hidrodinâmica a qual ocorre a interação da bolha com o fluido em que está imerso, B) a zona de difusão forética, uma região onde o efeito de difusão é importante e no qual, um forte campo elétrico resultante dá origem a um fluxo tangencial que destrói a distribuição de íons adsorvidos, varrendo o coletor (tensoativo) disperso da parte superior para a inferior da bolha, gerando um gradiente de concentração e C) a zona de interação bolha-partícula (B-P) propriamente dita, que é a superfície líquida da bolha (DERJAGUIN e DUKHIN, 1960). Essas três zonas estão mais bem representadas na Figura 5.

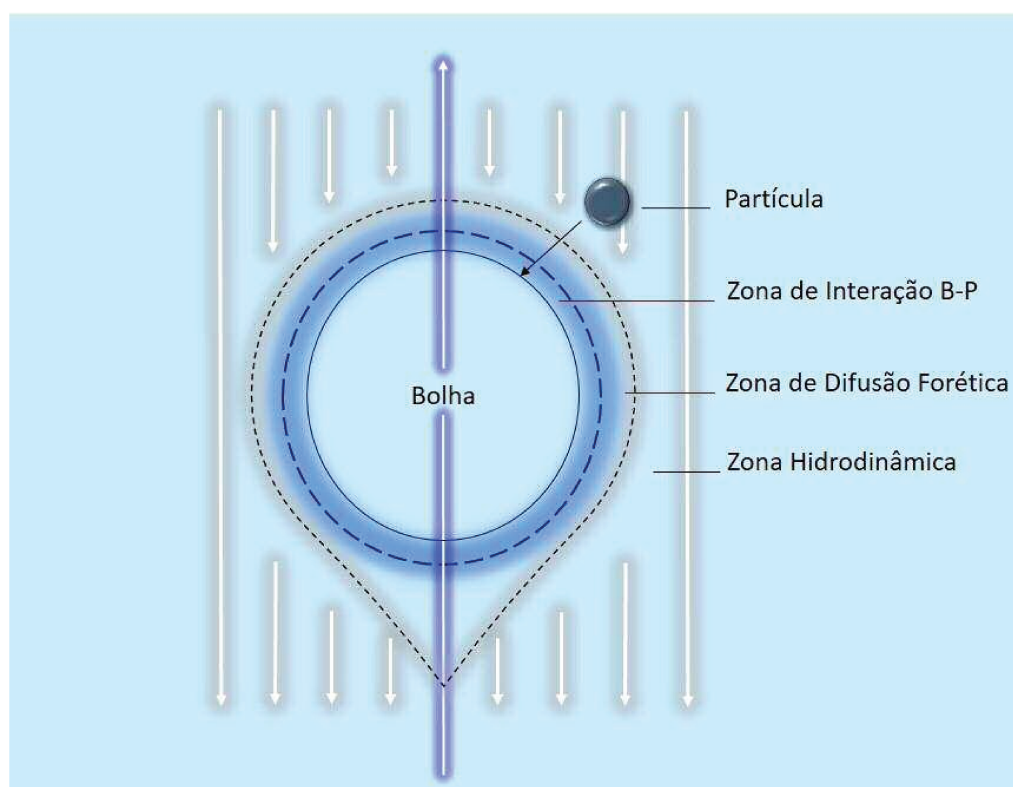


Figura 5. Esquema representativo das zonas hidrodinâmicas presentes no mecanismo de interação bolha-partícula (B-P)

Fonte: Adaptado de Derjaguin e Dukhin, 1960

Portanto, serão as propriedades de superfície das partículas sólidas, as características das bolhas geradas e do meio em que as bolhas e as partículas se encontram que promoverão a ocorrência dos diferentes mecanismos de interação, e favorecerá o predomínio de um deles.

2.7. Flotação por Ar Dissolvido (FAD) no Tratamento de Efluentes

No tratamento de efluentes, a maior parte das partículas dispersas são sólidos carregados eletricamente recobertos por polieletrólitos, gerando assim uma estrutura (flocos) também polar, o que teoricamente, com base nas propriedades e mecanismo descritos na flotação de minério, dificultaria a remoção dessas partículas pela FAD (sem uso de auxiliares). No entanto, experimentalmente a aplicação da flotação nessas condições ocorre e tem sido relatada por vários pesquisadores como na clarificação de águas que apresentam elevada turbidez (REALI, MORUZZI e PATRIZZI, 2003). Os quais registraram que a relação quantidade de ar fornecida e quantidade de sólidos suspensos totais caracteriza melhor o processo de FAD do que a relação massa de ar fornecida e unidade de volume de água bruta a ser tratada.

No tratamento de efluentes de abatedouros, por exemplo, são gerados efluentes com elevada quantidade de matéria orgânica e que associado a processos de coagulação e flotação, alcançam mais de 85% de redução de orgânicos, óleos e graxas (SENA, MOREIRA e JOSÉ, 2008).

Liu *et al.* (2010), estudando o tratamento via FAD de efluentes contaminados por corantes, concluíram que um tratamento associado de coagulação e flotação com microbolhas reduziu a necessidade de pré-tratamento no efluente e as dosagens dos reagentes empregados através de um aumento da biodegradabilidade. Já no auxílio do tratamento de efluente de refinaria de petróleo em Portugal, Santo (2012), através da otimização do processo de coagulação-floculação seguida de flotação, relatou que o pH é fator determinante para boa atuação dos coagulantes e floculantes para remoção de matéria orgânica, óleos e graxas.

Além disso, novas metodologias de tratamento vêm sendo estudadas aplicando a FAD com modificações estruturais dos equipamentos, tais como, a utilização de FAD combinada com a etapa de floculação, a implantação de controle e automação de equipamentos e sistemas de FAD, visando aumentar a eficiência do processo (MATIOLO e RUBIO, 2003).

Segundo Carvalho *et al.*, 1994; Vieira; Sousa; Durão, 2005; Yinfei *et al.*, 2011; Xiaoping; Aldrich, 2013, *apud* Fonseca, 2017, encontram-se na literatura vários trabalhos publicados em controle e automação de processos aplicados a sistemas de flotação, mas restritos à coluna de flotação, que é comumente utilizada em processos da indústria de minérios, porém pouco aplicada no tratamento de águas.

Tais estudos evidenciam a grande necessidade do desenvolvimento de novas tecnologias em FAD e conhecimento a respeito dos mecanismos envolvidos neste tipo de tratamento físico-químico.

2.8. Parâmetro Analítico de Acompanhamento

2.8.1. Turbidez

A turbidez pode ser considerada como uma das principais referências para os processos de tratamento de águas e efluentes, assim como também na avaliação qualitativa e quantitativa dos índices de eficiências das águas tratadas. A determinação da turbidez permite evidenciar alterações na água quanto a concentração de sólidos suspensos. A água que possui turbidez faz com que as partículas em suspensão reflitam a luz, fazendo com que a esta não chegue aos organismos aquáticos. O tamanho da partícula em suspensão está diretamente associado a turbidez, pois as partículas menores permanecem em suspensão e as maiores tendem a decantar gradativamente (LOCH, 2019 *apud* CHAGAS, 2015).

Os níveis permitidos de turbidez são determinados pela Resolução CONAMA 430/11. Cada classe, de acordo com a classificação da água doce dada por esta

resolução tem uma quantidade máxima de turbidez tolerada como pode ser visto na Tabela 2 abaixo.

Tabela 2. Classificação e tipos de tratamento para o abastecimento para consumo humano de acordo com os níveis máximos permitidos de turbidez em águas doces estabelecidos pela resolução CONAMA 430/11.

Classe	Tipo de tratamento de água	Nível máximo de Turbidez permitido
Classe I	Simplificado	Até 40 NTU
Classe II	Convencional	Até 100 NTU
Classe III	Convencional ou avançado	Até 100 NTU

Fonte: Adaptado de CONAMA 430/11

É possível mensurar o índice de turbidez de modo direto via turbidimetria, esta técnica analítica baseia-se na dispersão da radiação de solução que contém partículas suspensas. De acordo com Martins (2012), a turbidimetria é uma técnica analítica de espectroscopia baseada na dispersão da radiação de uma solução contendo partículas suspensas. De maneira mais simples, um feixe de luz passa através de um fluido contendo partículas sólidas suspensas, interagindo com elas. Essas partículas absorvem a luz e a dispersam em todas as direções, dando uma aparência turva à mistura. A diminuição da radiação que passa através do meio é a base para a medida turbidimétrica.

Como pode ser observado na Figura 6, as análises de turbidez requerem uma fonte de luz que pode ser uma lâmpada incandescente ou um diodo emissor de luz, e um detector para mensurar a luz dispersa. O detector de luz espalhada é localizado a um ângulo de 90° da fonte de luz, e a turbidez tem seu valor aumentado à medida que a dispersão da luz também aumenta, sendo sua unidade expressa em NTU (*Nephelometric Turbidity Unit*).

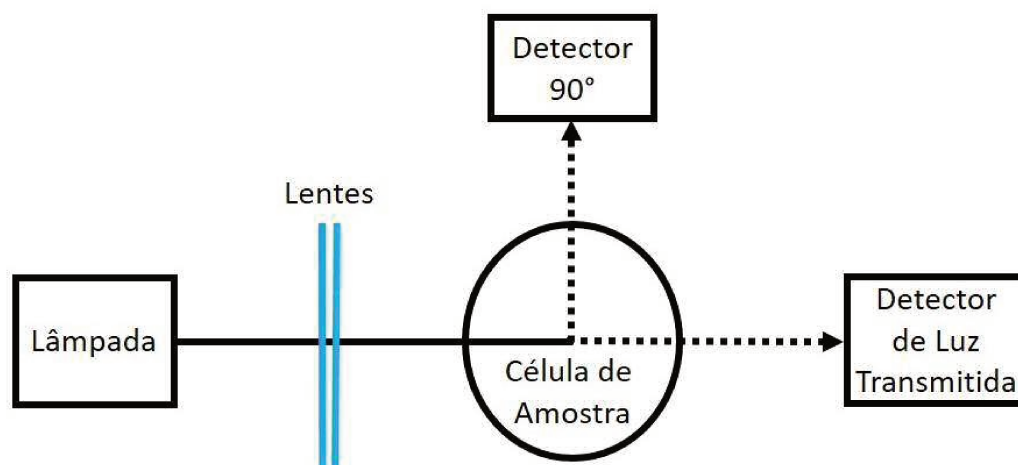


Figura 6. Representação esquemática do princípio de medição da nefelometria e turbidimetria.

Fonte: Adaptado de Larsson (2003)

O equipamento utilizado, denominado como turbidímetro, é composto por: uma fonte de luz, recipiente para abrigar a amostra e fotodetectores para capturar a luz dispersada. Dentre os vários modelos existentes de turbidímetros apenas três são aprovados pela EPA (*Environmental Protection Agency*) - agência que regulamenta os detalhes técnicos, operacionais e legais sobre o uso e a interação do indivíduo com o meio-ambiente), o modelo de feixe único, de razão e de quatro feixes modulados.

O modelo de feixe único é o mais básico e amplamente utilizado, porém tem eficiência em amostras com baixa turbidez (até 40 NTU) e também possui baixo desempenho com amostras coloridas. No modelo de razão são incluídos fotodetectores adicionais em várias angulações com isso é possível utilizá-lo com altas taxas de turbidez, este modelo apresenta o resultado da turbidez combinando matematicamente os sinais detectados da amostra além disso também possui um melhor desempenho em amostras coloridas. Já o turbidímetro de quatro feixes modulados possui duas fontes de luz e dois fotodetectores atuando em amostras com maior turbidez estendendo sua eficiência até 100 NTU, é um turbidímetro bastante preciso, pois, o algoritmo relacional utilizado cancela os possíveis erros devido a interferências na emissão de luz. Este equipamento além dos modelos também pode ser classificado quanto ao tipo. Os modelos de bancada (*off-line*) podem ser usados em amostras altamente coloridas, com

altos níveis de turbidez, podem ser de razão ou feixe único e trabalham com amostras coletadas e com cubetas de vidro para armazenagem da amostra. Turbidímetros portáteis são muito parecidos com os de bancada, porém possuem bateria e não ficam em um lugar fixo, são utilizados para análises rápidas em campo e não são bons para baixos níveis de turbidez. Os turbidímetros “*on-line*” apresentam-se tanto no modelo de feixe único quando no modelo de quatro feixes modulados, são utilizados para amostragens do líquido em linhas de produção ou em algum desvio da mesma e podem ser conectados a sistemas remotos para supervisão (FERREIRA, 2012). Sabendo de todas as características do equipamento e quando utilizá-lo cabe escolher aquele que melhor se adequará a amostra a ser analisada.

2.9. Conclusões Parciais

Diante do conteúdo abordado neste capítulo, pode-se concluir parcialmente que a flotação se trata de um processo físico de separação gravitacional de fases sólido-líquido, no qual bolhas de gás entram em contato com as partículas sólidas em suspensão, resultando em um aglomerado floco-bolha de densidade aparente inferior à do líquido. A diferença de densidade ocasiona o aumento da força de empuxo do material aglomerado, que flutua até a superfície do líquido, onde se acumula em forma de “lodo” para ser removido posteriormente.

Comparativamente, dos métodos convencionais e disponíveis de flotação, a FAD é processo mais vantajoso para o tratamento de águas por não ocasionar acentuada agitação, favorecer o controle da geração de bolhas de ar, que está diretamente relacionada com a diferença entre a pressão de saturação e a atmosférica; dispensar o uso de tensoativos ou produtos espumantes (interferentes na qualidade da água tratada).

A turbidimetria é uma técnica analítica de espectroscopia confiável e bastante empregada em monitoramentos qualitativos de processos de tratamento físico-químicos de águas, especificamente, para a determinação da efetividade das etapas de pré-

tratamento (equalização da água bruta) e pós tratamento (saída do sistema), neste último, como parâmetro avaliativo da eficiência do processo de separação-sólido-líquido via FAD.

Para a elaboração do projeto, construção do protótipo utilizado e desenvolvimento deste estudo, previamente foram realizadas inúmeras pesquisas na literatura de trabalhos técnico-científicos sobre processos e tecnologias, até então, disponíveis de FAD aplicados em sistemas de tratamento de águas potáveis ou efluentes líquidos. A partir desta laboriosa busca, constatou-se que existem apenas trabalhos publicados sobre as técnicas de separação sólido-líquido via flotação por batelada, no entanto, em sua grande maioria, tais estudos visam somente a compreensão das relações existentes entre as diferentes alternativas de produção de bolhas, tais como a flotação por ar disperso ou induzido, flotação eletrolítica ou eletro flotação, flotação por aspersão ou *nozzle*, flotação por coluna, etc..., comumente aplicadas na remoção de um tipo específico de sólidos suspensos ou contaminante. Nestes trabalhos, a água tratada (pós flotação) é analisada periodicamente em modo *off-line* e as variáveis de operação do flotador e vaso saturador são mantidas nas condições de projeto através de sistemas simples de controle *ON/OFF*, sem que seja adotada uma lógica de controle que permita correlacionar seus parâmetros de processo.

Isto posto, notou-se uma carência muito grande de trabalhos de tratamento de águas e efluentes desenvolvidos em modo contínuo, utilizando tecnologia de controle e automação no processo de FAD em escala laboratorial.

CAPÍTULO 3 – Hipóteses e Objetivos

3.1. Hipóteses

O desenvolvimento deste trabalho parte das seguintes hipóteses:

3.1.1. Hipótese 1

Em um efluente contendo maior concentração de sólidos ocorre coagulação sob mecanismo por formação de pontes/varredura, enquanto que em um efluente contendo menor concentração de sólidos ocorre, preferencialmente, por neutralização de cargas/varredura e que estes diferentes mecanismos permitem formação de flóculos expansivos e compactos, respectivamente.

3.1.2 Hipótese 2

A formação de flóculos expansivos favorece a ocorrência de mecanismo de interação bolha-partícula por *entrapment* (aprisionamento), enquanto que a formação de flóculos compactos favorece o mecanismo por *attachment* (ligação/interação).

3.1.3 Hipótese 3

O controle da pressão de saturação na câmara de saturação e a vazão de água saturada com ar dissolvido (taxa de reciclo), aumentam a eficiência de remoção de turbidez do efluente e da redução da concentração de sólidos em diferentes condições de efluentes.

3.2. Objetivos

Diante do exposto, para que as hipóteses sejam comprovadas, tem-se como objetivos deste projeto:

3.2.1. Objetivo Principal:

Estabelecer uma correlação entre os mecanismos de interação bolha-partícula da etapa de separação sólido-líquido via FAD com a quantidade de sólidos suspensos e com o tipo de coágulo formado na etapa de coagulação.

3.2.2 Objetivos Secundários:

- Avaliar a influência da concentração de sólidos inicial no efluente na formação das estruturas sólidas nas etapas de coagulação e floculação;
- Avaliar a influência da estrutura dos flóculos formados nos mecanismos possíveis de interação bolha-partícula na aplicação da FAD;
- Avaliar a eficiência de diferentes pressões de saturação de ar na água de injeção no processo de aplicação da FAD;
- Avaliar os efeitos da variação da pressão de saturação, da concentração de sólidos suspensos sobre os mecanismos de interação bolha-partícula;
- Verificar a existências de padrões de comportamento no mecanismo de interação bolha partícula dos efluentes com características extremas (alta e baixa concentração de sólidos suspensos) frente a metodologia de flotação.

CAPÍTULO 4 – Projeto, Montagem e Automação de um Protótipo de FAD

Visando o desenvolvimento deste estudo, neste capítulo serão apresentados os projetos, montagens e automação do protótipo de um sistema de tratamento de águas, constituído pelas principais etapas de uma estação de tratamento físico-química, tais como: coagulação, floculação, flotação por ar dissolvido e filtração.

4.1 Introdução

A água é uma substância química essencial para a existência e sobrevivência das diferentes formas de vida. O planeta Terra possui 1,386 bilhões de Km^3 de água e apesar deste volume abundante, apenas 2,5% desse volume corresponde a água doce. As águas disponíveis para o consumo humano estão concentradas nos rios, lagos e reservatórios e correspondem somente a 0,26% desse percentual. Daí a necessidade de preservação dos recursos hídricos. No mundo, em média, 10% da utilização da água vai para o abastecimento público, 23% para a indústria e 67% para a agricultura.

A redução no consumo de recursos naturais, em direção ao desenvolvimento sustentável, requer o investimento em técnicas que viabilizem a reutilização de recursos hídricos, ou mesmo promovam o tratamento de rios poluídos e de esgotos com maior eficácia. Devido a isso, atualmente os projetos que visam o reaproveitamento de recursos hídricos têm grande relevância.

Nos municípios e segmentos industriais, para as adequações físicas e químicas das águas superficiais, são utilizadas estações de tratamento de águas (ETAs) ou estações de tratamento de efluentes (ETEs), que geralmente são sistemas providos de processos físico-químicos para que a água adquira as propriedades desejadas que a

tornem própria para o consumo humano ou lançamento em corpos receptores, podendo-se destacar os métodos de tratamentos de natureza física, cuja característica é o processo de separação de fases. São eles: sedimentação, decantação, filtração, centrifugação ou flotação.

É de fundamental importância que a funcionalidade de uma ETA ou ETE, sejam totalmente referenciadas em dados reais mensuráveis, o que leva a economia de energia e insumos químicos, segurança operacional, agilidade na tomada de decisões e a padronização dos procedimentos operacionais e processos. Alguns dos principais parâmetros de controle são pH, turbidez, pressão e vazão, a partir das quais derivam todas as ações de controle.

A padronização dos processos de tratamento de águas e efluentes visa garantir a assertividade das suas operações. Além disso, existem outros benefícios, tais como o aumento da qualidade e a redução de custos, por exemplo. Uma alternativa para obter as padronizações dos procedimentos, e conseqüentemente da água tratada, é promover a automação do processo com sistemas de controle que o regulem para operar de modo desejável, independentemente das perturbações impostas ao longo do processo.

4.2. Materiais e Métodos

Para o desenvolvimento deste projeto, foi projetado e construído um protótipo de um sistema de tratamento físico-químico de águas e efluentes, considerando as etapas de equalização, coagulação, floculação, flotação e filtração em escala laboratorial, automatizado e monitorado via sistema supervisor de controle e aquisição de dados (SCADA). Os materiais e métodos adotados, assim como os resultados da montagem deste protótipo e ensaios de tratamento físico-químico provido de FAD são apresentado a seguir.

4.2.1. Projeto do Protótipo

Para a etapa de separação sólido-líquido, este protótipo contou com um tanque de homogeneização, um tanque de flotação com raspador mecânico de lodo e filtro de areia, todos construídos em acrílico. A célula de produção de água saturada com ar, foi constituída por um vaso cilíndrico de aço inoxidável com estanqueidade até 10 bar, um reservatório (IBC) com capacidade de 1000 L de armazenamento, bomba centrífuga para recalque do efluente bruto e bomba magnética de engrenagem para alimentação do vaso de saturação. De modo a possibilitar o controle e o monitoramento de cada processo, este protótipo foi totalmente adaptado com equipamentos referentes à automação, como instrumentos de medição de temperatura, vazão, pressão, turbidez e válvulas de controle.

4.2.2. Projeto do Tanque de Floculação

Além do recebimento do efluente bruto “preparado”, este tanque foi dimensionado para realização da etapa química do tratamento proposto. Com três misturadores alocados em cada estágio do tanque, sob agitação controlada, visando a manutenção dos sólidos em modo suspenso durante todo o processo de reação. O material escolhido foi o acrílico, permitindo a melhor visualização das gradativas etapas de formação dos coágulos e flóculos.

4.2.3. Projeto do Flotador ou Tanque de flotação

Para a etapa de separação sólido-líquido, um tanque de flotação foi dimensionado e projetado totalmente em acrílico permitindo, por sua transparência, a melhor visualização do processo de separação dos sólidos suspensos pela ação das microbolhas. Também foi desenhado com uma zona de contato e uma zona de separação, além da calha colhedora do material flotado.

4.2.4. Projeto do Filtro de Areia

Para retenção dos sólidos suspensos arrastados pelo fluxo hidrodinâmico da água tratada pela saída inferior da zona de separação, foi projetado um filtro de areia, totalmente em acrílico permitindo visualização do escoamento do efluente tratado e transferência para o tanque pulmão.

4.2.5. Montagem e Automação da Célula de Saturação

A célula de saturação deste projeto consistiu basicamente no aproveitamento da mesma estrutura construída e utilizada por Thompson Junior, 2015, um vaso cilíndrico confeccionado em aço inox 316L (4,0 mm), sem costura, com pontos de admissão de água, ar comprimido e retirada de água saturada, no entanto, de modo a possibilitar o controle e o monitoramento, este protótipo foi adaptado com equipamentos referentes à automação, como instrumentos de medição de temperatura, vazão, pressão, turbidez e válvulas de controle.

4.2.6. Emprego do SCADA

Para a supervisão do protótipo de tratamento de água por flotação, foi utilizado o SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) no software Indusoft®. Neste sistema supervisório desenvolvido por Fonseca (2017), é possível visualizar em tempo real os valores das variáveis de processo como vazão, pressão e turbidez, como também, intervir na operação do sistema variando a atuação dos elementos finais de controle, como válvulas e bombas.

4.3. Resultados e Discussão

4.3.1. Montagem do Tanque de Floculação

Como pode ser observado na Figura 7, este tanque foi desenhado considerando duas chicanas ou divisórias internas, tendo em vista a separação do tratamento por estágios distintos.

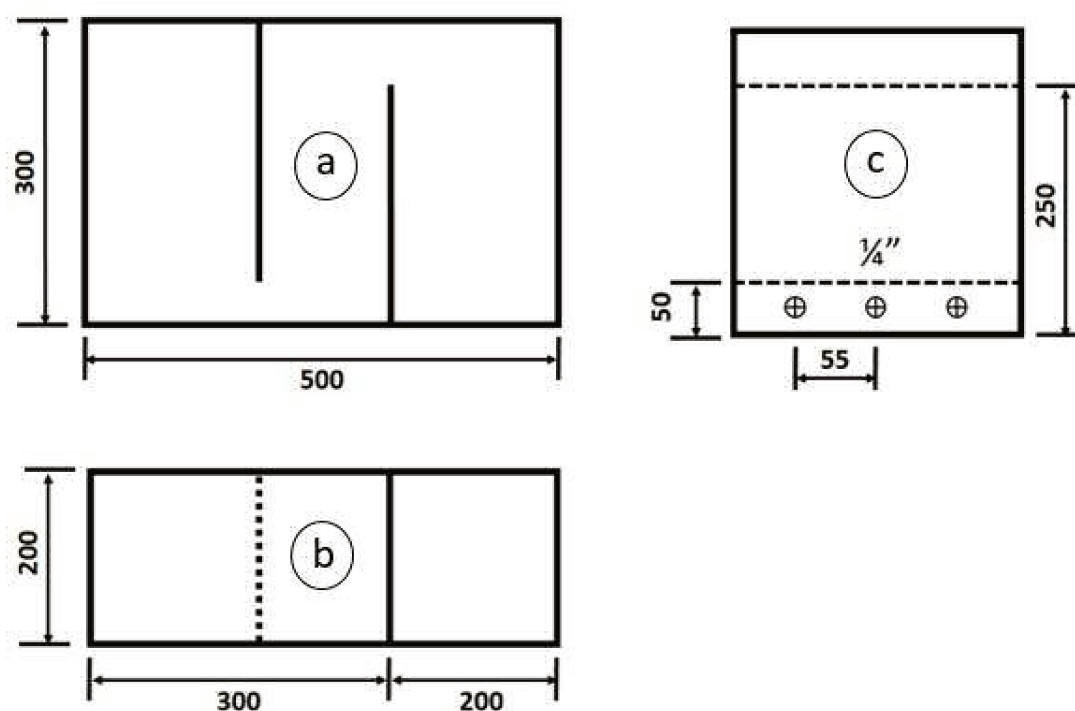


Figura 7. Projeto com dimensões (em mm) do tanque de floculação. Representação do (a) corte longitudinal (vista frontal); (b) vista superior e (c) corte transversal.

Fonte: O Autor

Como pode ser observada na Figura 8, no primeiro estágio do floculador, sob constante leitura do pH (a), ocorre a etapa de mistura rápida entre o efluente bruto (b), o reagente Aluminato de sódio (c) e o Tanfloc SG (d), continuamente dosados pelas bombas dosadoras peristálticas ilustradas mais adiante, nas Figuras 27 e 28, respectivamente, ocasionando os processos químicos de coagulação e floculação. No segundo e terceiro estágio, as velocidades rotacionais dos misturadores são ajustadas

(reduzidas) para que os flóculos recém formados não sejam quebrados, permaneçam estáveis e suspensos, até a transferência para o flotador.



Figura 8. Ilustração parcial do tanque de floculação – primeiro estágio ou zona de mistura rápida. (a) Eletrodo do pHmetro *on-line*; (b) tubulação de entrada de água bruta; (c) ponto de dosagem da solução de reagente Aluminato de sódio e (d) ponto de dosagem da solução reagente de Tanfloc SG.

Fonte: O Autor

A Figura 9 ilustra o floculador construído e já em funcionamento na planta piloto. Nota-se os três misturadores acionados e, pela foto também é possível observar que os misturadores alocados no primeiro estágio é do tipo pás inclinadas e no segundo e terceiro estágio, são misturadores tipo hélice.

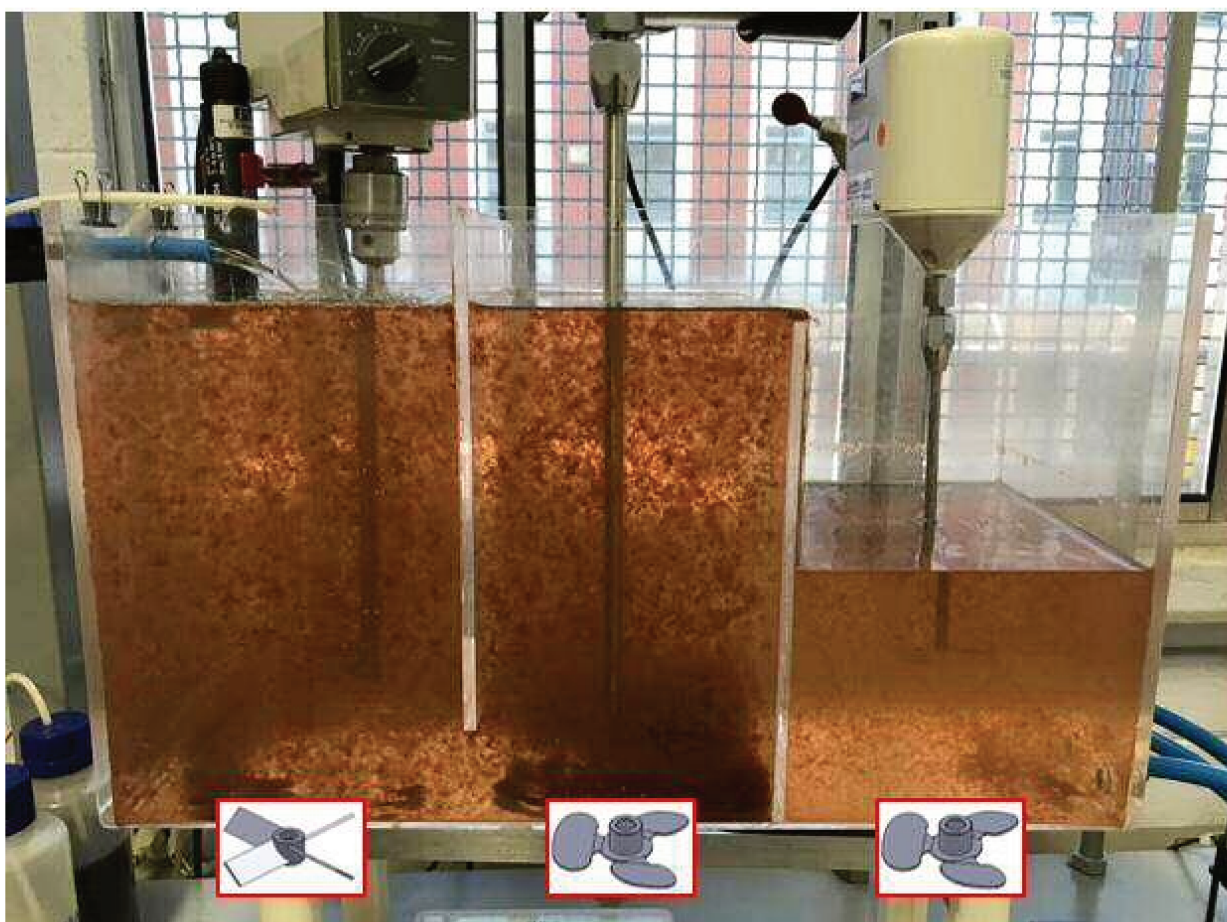


Figura 9. Imagem do floculador em funcionamento. Com destaque para os tipos de misturadores utilizados em cada etapa de mistura.

Fonte: O Autor

No primeiro estágio, a rotação está ajustada em 100 rpm (mistura rápida) e os dois estágios seguintes, sob rotação constante ajustada em 50 rpm (mistura lenta).

O tanque de floculação, também chamado de floculador, foi dimensionado para capacidade volumétrica de 30 litros, disposto de modo que o efluente seja transferido entre a entrada (estágio de mistura e coagulação) até a saída, ou transferência para o flotador, por influência da gravidade sem que se faça necessário o uso de uma bomba. Para isso, o tanque foi alocado sobre um suporte elevatório, construído para elevar o floculador em relação ao tanque de flotação ou flotador.

4.3.2. Montagem do Flotador ou Tanque de flotação

Na Figura 10 é mostrado o desenho do flotador que foi dimensionado e utilizado no projeto.

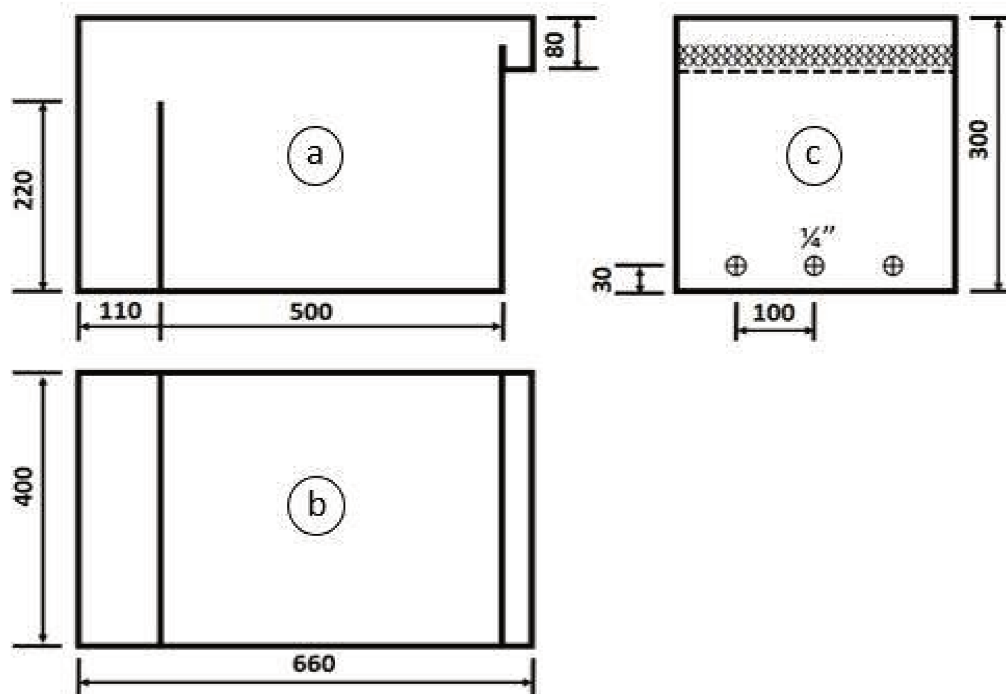


Figura 10. Projeto do tanque de flotação em acrílico com medidas em mm. Representação do (a) corte longitudinal (vista frontal); (b) vista superior e (c) corte transversal.

Fonte: O Autor

A transferência dos efluentes para o flotador foi realizada por intermédio de três furos (1/4") com engate rápido localizados na zona de contato, de modo a auxiliar na distribuição dos efluentes previamente floculados. Uma válvula agulha foi instalada na tubulação próxima ao flotador proporcionando a queda de pressão, de modo a impedir a coalescência das microbolhas.

Para a etapa de separação sólido-líquido via FAD, foi construído um tanque de flotação de acrílico com capacidade volumétrica nominal de 67,2 litros, provido de um

raspador superficial de lodo flotado e sistema de iluminação (*leds*) na parte externa/inferior, conforme ilustrado na Figura 11.

Dividido em duas partes com funções distintas, o flotador dispõe de um primeiro estágio classificado como “zona de contato”, onde ocorre a mistura e principais possíveis interações partícula/bolha, envolvendo os flóculos gerados na etapa química, com as microbolhas oriundas da célula de saturação. Tais interações e respectivos mecanismos proporcionam a redução da densidade mássica dos materiais particulados suspensos (flóculos) e, por consequência, a separação sólido-líquido denominada flotação.

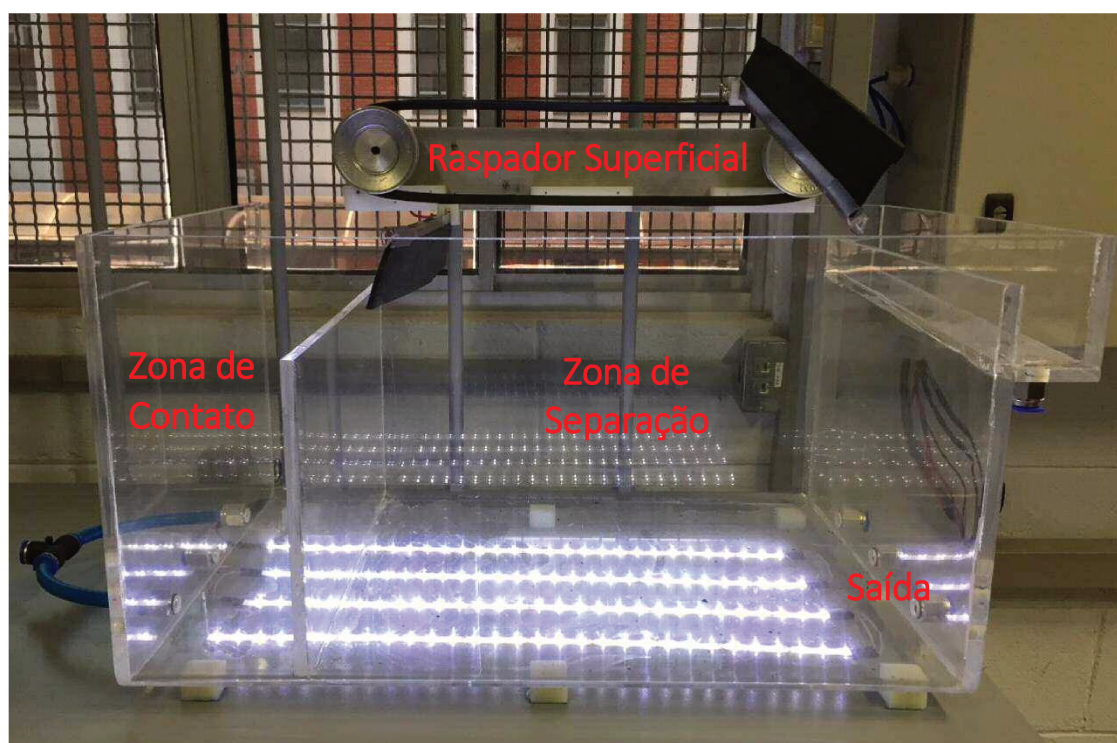


Figura 11. Ilustração do tanque de flotação “flotador” construído em acrílico com iluminação (*leds*) na parte externa/inferior e raspador mecânico superficial de sólidos.

Fonte: O Autor

O segundo estágio denominado “zona de separação”, conforme detalhado na Figura 11 é a região do flotador onde ocorre a continuidade do processo físico de separação, no entanto, nesta parte os agregados bolha/partícula (ainda em processo de agregação) e que se encontram dispersos na água, são flotados. Por gravidade, o

efluente tratado é transferido para o filtro de areia via orifícios localizados na parte inferior (saída) do tanque de flotação.

A Figura 12 ilustra a parte inferior da zona de contato, destacando o ponto de injeção de água saturada com e ar e formação das microbolhas, típicas do processo de flotação por ar dissolvido.



(a)



(b)

Figura 12. Ilustrações do tanque de flotação com (a) vista lateral da zona de contato e (b) ponto de injeção de água saturada localizada na região inferior da zona de contato.

Fonte: O Autor

Observou-se que a separação sólido-líquido via flotação por ar dissolvido foi iniciada pela elevação dos materiais aglutinados ainda na zona de contato, como pode ser observado na Figura 13. O acúmulo dos sólidos flotados nesta região implica na necessidade da remoção mecânica periódica com o acionamento do raspador superficial de lodo, evitando preventivamente a formação de uma barreira de lodo empacotado, impedindo a passagem de efluentes entre a zona de contato e a zona de separação.



Figura 13. Imagem parcial do tanque de flotação: Evidência fotográfica da formação da “manta” de floculos recém flotados e acumulados na parte superior da zona de contato em deslocamento sentido a zona de separação.

Fonte: O autor

Na Figura 13 é possível observar o acúmulo de lodo flotado na região superior da zona de contato. Em detalhe, a formação da camada com diferentes espessuras, maior na superfície da zona de contato e reduzindo sobre a zona de separação. Condição considerada ideal para o processo de flotação.

Na parte superior oposta a zona de contato, como pode ser observada na Figura 14, os sólidos flotados são conduzidos pelo fluxo hidrodinâmico do tanque de flotação, sentido a canaleta de escoamento do “lodo flotado”. Estes resíduos são transferidos gravitacionalmente para um tanque específico de descarte.



Figura 14. Registro fotográfico do tanque de flotação em operação – Imagem parcial da zona de separação com a “manta” de floculos flotados em processo de deslocamento superficial de sólidos e escoamento para a canaleta de descarte.

Fonte: O Autor

4.3.3. Montagem do Filtro de Areia

A principal funcionalidade do filtro de areia é a retenção dos sólidos e materiais particulados arrastados na transferência do efluente tratado vindo do tanque de flotação. Portanto, este sistema de filtração pode ser considerado como um recurso físico para o polimento do efluente tratado, assegurando a qualidade dos despejos líquidos nos corpos receptores, como também, o condicionamento da água recuperada para a reposição da célula de saturação. A Figura 15 apresenta o projeto do filtro de areia desenvolvido em acrílico

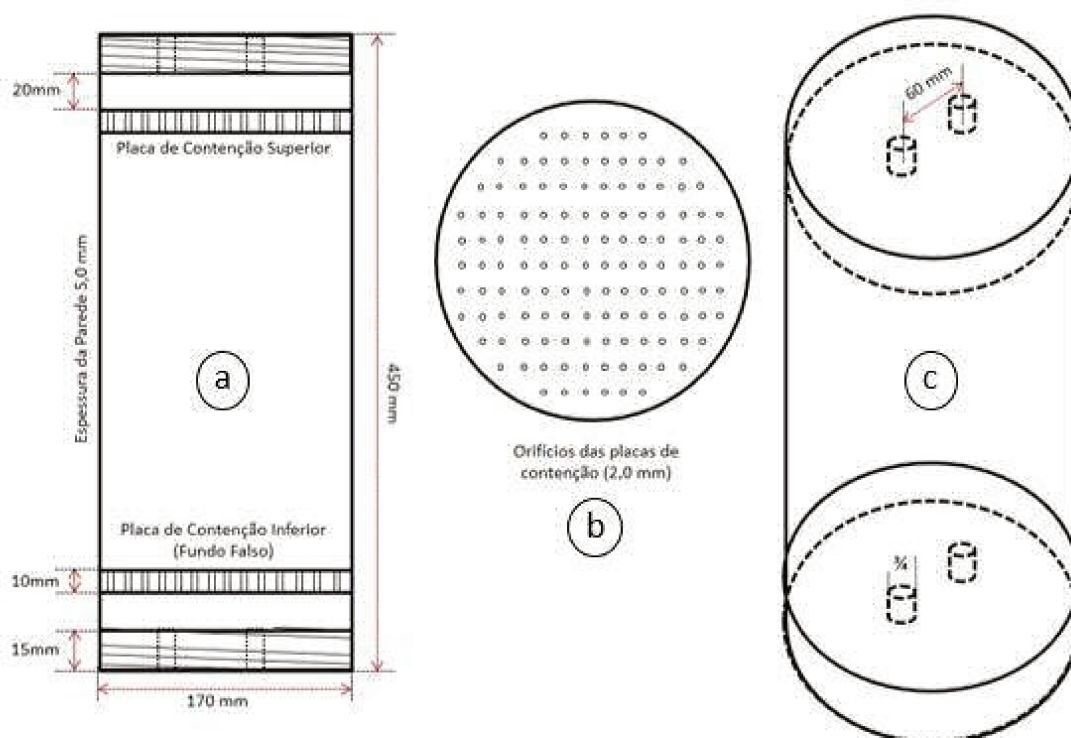


Figura 15. Projeto do filtro de areia em acrílico com medidas em mm. Representação do (a) corte longitudinal; (b) vista superior da placa de contenção removível e (c) vista frontal.

Fonte: O autor

A contenção dos elementos filtrantes (areia), foi provido por duas bases perfuradas com 126 orifícios de 2,0 mm de diâmetro. Uma placa alocada na parte inferior e a outra na parte superior como “fundo falso”.

A água tratada oriunda do flotador é transferida por gravidade para o filtro de areia cilíndrico, totalmente construído em acrílico, como ilustrado na Figura 16.

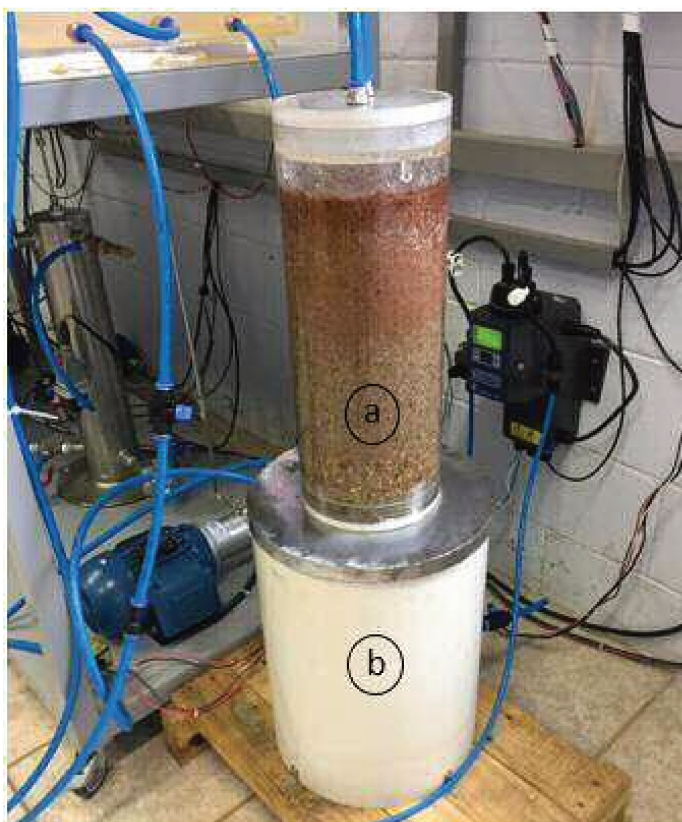


Figura 16. Imagem parcial do protótipo em funcionamento, exposto como (a) filtro de areia e (b) reservatório de água tratada (filtrada) utilizada para a alimentação da célula de saturação.

Fonte: O Autor

O filtro foi construído considerando o preenchimento dos elementos filtrantes compostos por três camadas de areias com granulometria diferentes. A camada superior, com 20 cm de profundidade, foi preenchida com areia fina de granulometria entre 0,4 e 0,7 mm. A camada intermediária, com 20 cm de profundidade, foi preenchida com areia média de granulometria entre 0,8 e 1,7 mm. Já a camada inferior com 5 cm de profundidade, foi preenchida com areia grossa de granulometria entre 2,35 e 4,75 mm. Esta disposição da areia em camadas permite que o material não flotado seja retido inicialmente na primeira camada (areia fina), e com o tempo, por eluição ocorre a saturação das outras camadas até que se faz necessária uma retro lavagem para limpeza do filtro (TCHOBANOGLOUS, 1991 *apud* FONSECA, 2017).

Todo efluente filtrado é armazenado em um reservatório de PVC, com capacidade volumétrica de 30 litros alocado sob o filtro de areia. Este tanque, além de servir como

base para o filtro de areia, também funciona como “tanque pulmão” para a alimentação do vaso saturador na linha de reciclo.

4.3.4. Montagem e Automação da Célula de Saturação

Para a viabilização da etapa de geração de microbolhas a partir da saturação da água com ar, foi utilizado o corpo da célula de saturação (a), desenvolvido por Thompson Junior (2015), construído em aço inox 316L, com seção transversal circular de diâmetro interno de 100 mm, espessura de parede de 4,5 mm e altura de 400 mm, resultando volume útil de 3,14 L, como pode ser observado no esboço da estrutura ilustrada na Figura 17.

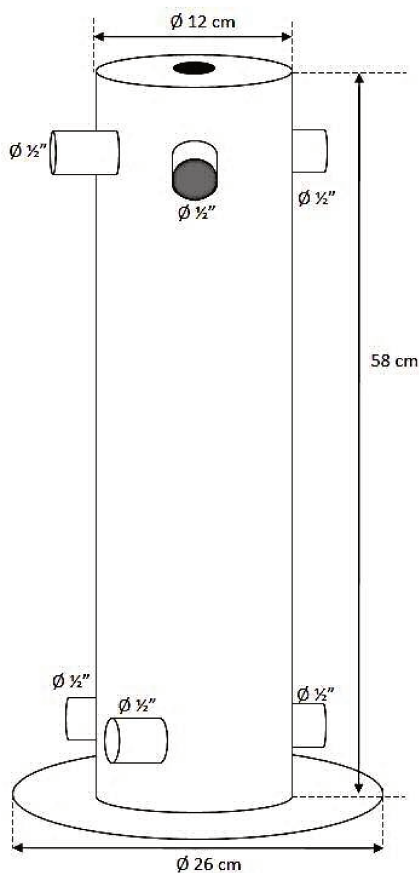


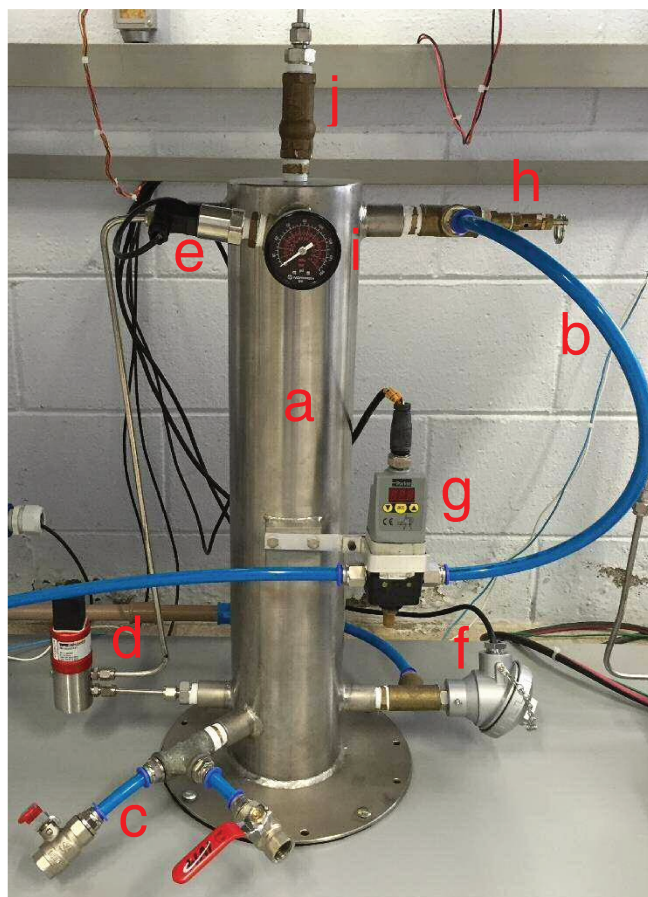
Figura 17. Esboço da estrutura da célula de saturação (medidas em cm). Representação ilustrativa da vista frontal.

Fonte: O Autor

Para o bom funcionamento do saturador é preciso que ele apresente estanqueidade nas pressões de trabalho e em caso de aumento indesejado da pressão, seja capaz de aliviar a pressão interna. Por isto, como pode ser observado na Figura 18, o projeto deste equipamento contou com uma válvula de segurança para o caso de pressão maior que 8,0 bar. Além desta válvula, o saturador possui também um manômetro analógico, por motivo de segurança.



(a)



(b)

Figura 18. a) Célula de Saturação construída para o tratamento de efluentes via FAD em modo manual; b) Célula de Saturação adaptada para o tratamento de efluentes via FAD em modo automático.

Fonte: O Autor

Na montagem foram empregadas tubulações em poliuretano (b) com resistência a pressão de 10 bar e conexões de engate rápido (c) para facilitar a limpeza e manutenção do equipamento. Para este projeto, conforme ilustrado na Figura 18b, a célula foi instrumentada por Fonseca (2017), com sensor de pressão diferencial (d)

modelo 692900007141, marca Huba Control® cap. 0 - 100 mbar; Transmissor de pressão absoluta (e) modelo PT100 NP430D Novus®; cap. 0 - 20 bar; Sensor de temperatura (f) modelo PT-100 - TxMiniBlock Novus®, cap. 200 – 650°; válvula reguladora de pressão (g) modelo P3HPA12AD2VD1A Parker®, cap. 0 - 10 bar e, dispositivos de monitoramento e segurança, como a válvula de segurança (H) ou alívio (ajustável) cap. 9,3 bar, modelo VSS-135, marca Schweers e manômetro analógico (I) Marca Ashcroft® cap. 160 psi.

Conforme previsto no projeto, a alimentação da célula de saturação localizada na parte superior do vaso, foi instalada uma válvula de retenção (J) vertical ½" (latão).

Para a produção de água saturada com ar, a célula é pressurizada com ar comprimido, utilizando uma válvula reguladora de pressão e serve para promover a dissolução sob pressão de ar em água para geração de microbolhas. Todas as possíveis vias de alimentação de água na célula de saturação, possuem válvulas de retenção, precavendo a ocorrência de contra fluxo, quando as bombas de alimentações estiverem desligadas.

4.3.5. Emprego do SCADA

O SCADA foi desenvolvido com o propósito de tornar fácil e intuitiva a operação do protótipo, por isso as telas de navegação/supervisão foram projetadas para permitir ao operador conseguir visualizar o processo tanto de forma geral como específica (FONSECA, 2017).

A Figura 19 apresenta a tela de supervisor desenvolvida para o protótipo de tratamento de água, onde é possível monitorar todas as variáveis do processo.

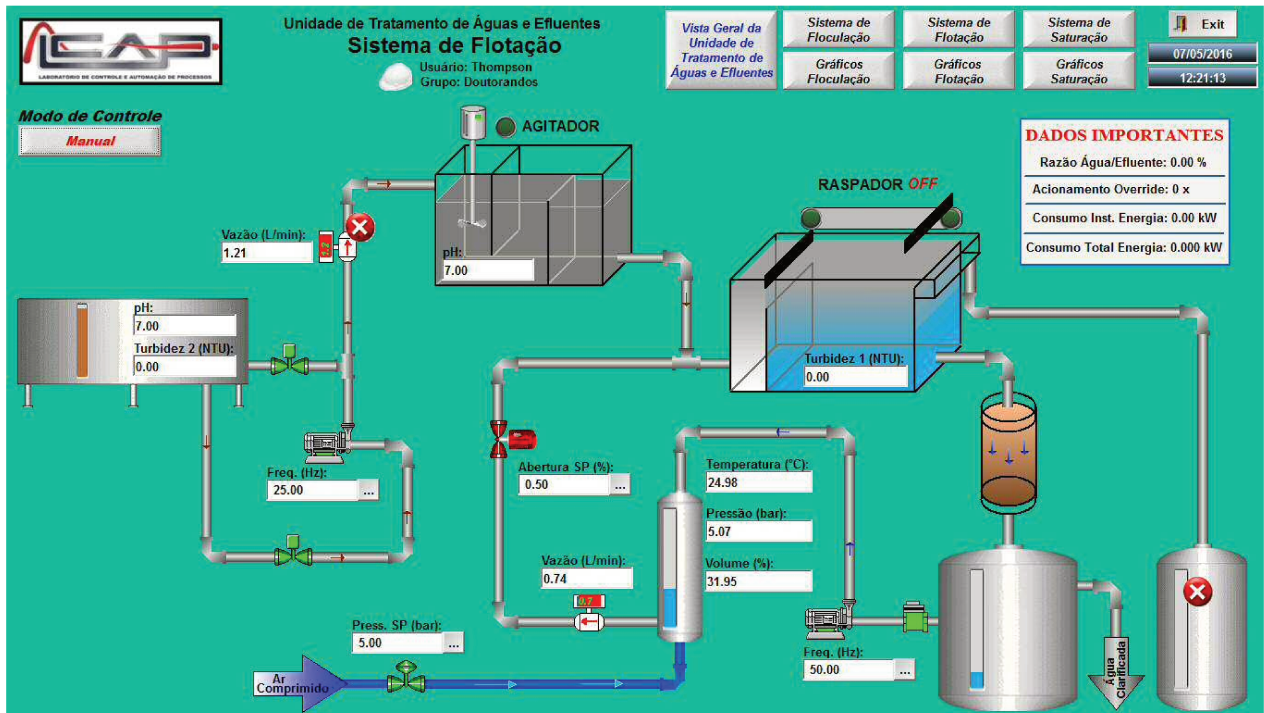


Figura 19. Imagem da tela principal do SCADA

Fonte: O Autor

Tanto na tela principal como nas telas secundárias, foram configurados objetos com função de entrada e saída de valores para a manipulação dos atuadores em malha aberta e/ou configuração dos *setpoints* das variáveis de processo em malha fechada.

A Figura 20 apresenta uma visão específica da célula de saturação com gráficos de tendências para suas variáveis de operação.

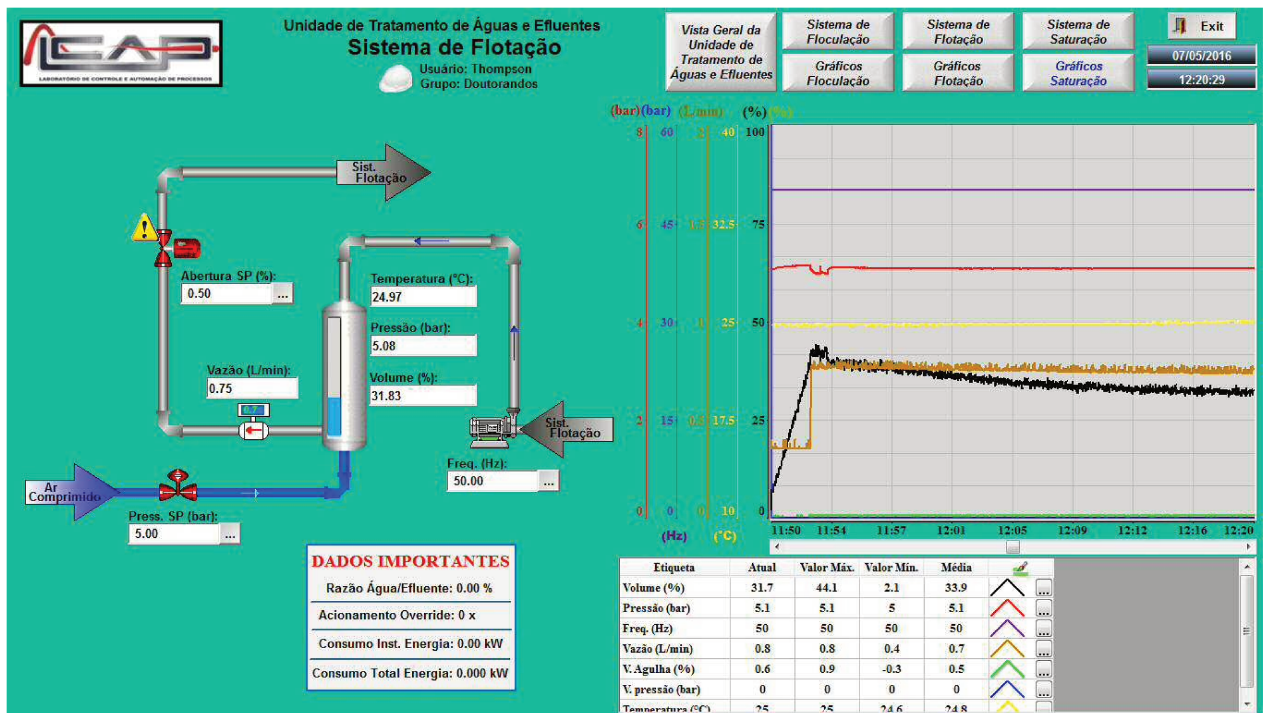


Figura 20. Imagem da tela secundária (célula de saturação) do SCADA

Fonte: O Autor

Para o maior detalhamento quanto ao comportamento dinâmico do processo, neste sistema supervisório foram atribuídas telas secundárias, usando gráficos de tendência que apresentam o histórico recente dos valores das variáveis de processo específicas da etapa apresentada na tela. Todos os dados apresentados nos gráficos de tendência são adquiridos pelo SCADA e armazenados em tempo real em um banco de dados com formato (.mds) previamente configurado no sistema supervisório, de modo que após os experimentos foi possível analisar o comportamento dinâmico das variáveis manipuladas e de processo da planta de FAD.

4.3.6. Montagem do Protótipo

Concluídas as montagens dos componentes e aquisições dos equipamentos previstos no projeto, foram realizadas as montagens do protótipo de tratamento físico-químico de águas e efluentes provido de flotação por ar dissolvido. Sequencialmente, todas as etapas pertinentes aos processos conduzidos neste projeto estão apresentados na Figura 21, a seguir.

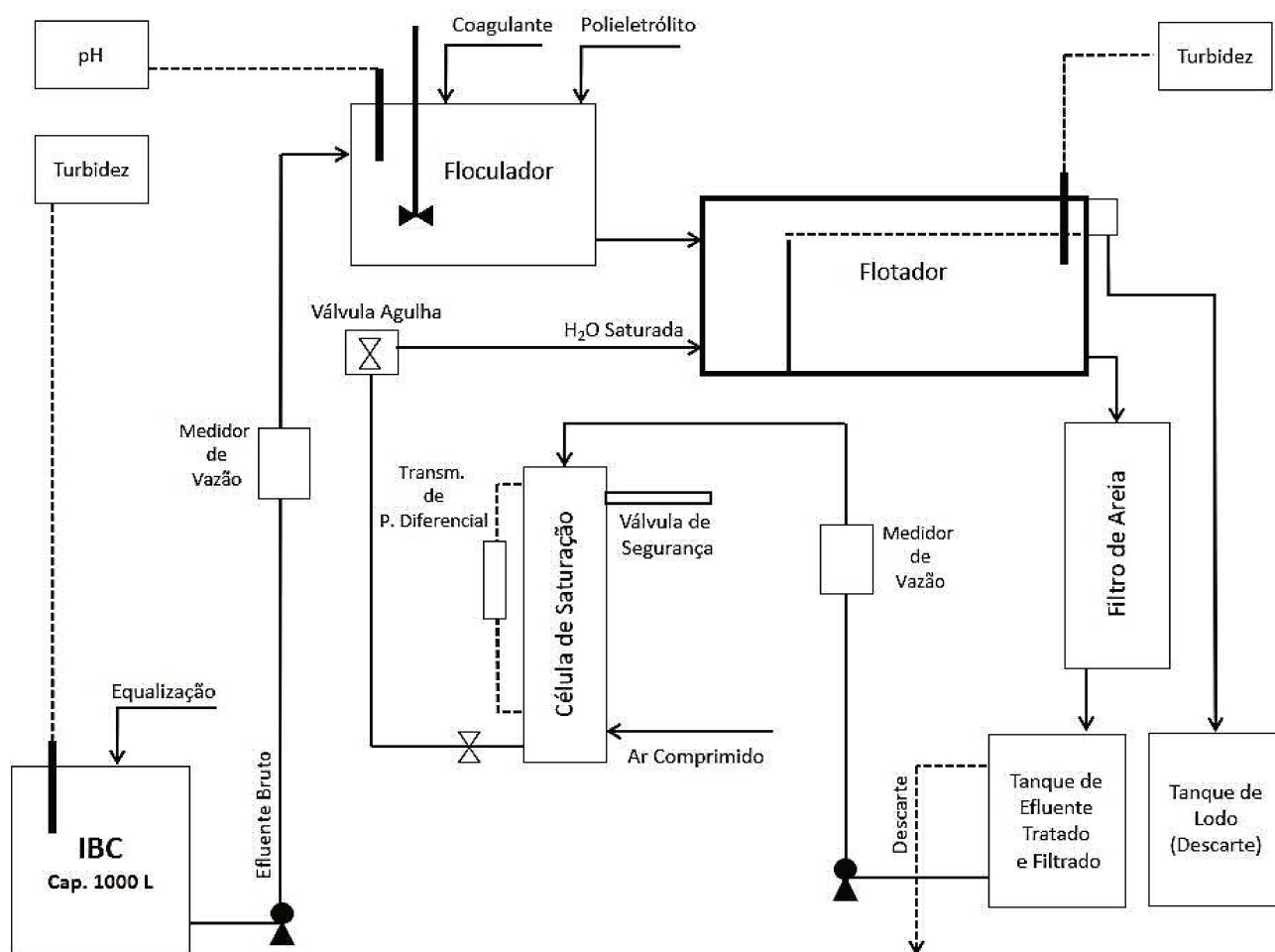


Figura 21. Representação esquemática do projeto proposto para o sistema de tratamento com processo de flotação por ar dissolvido (FAD)

Fonte: o autor

Como pode ser observado na Figura 22, o protótipo foi montado em uma estrutura de aço galvanizado reforçado (o), com rodízios e pintura eletrostática para melhor conservação. O acionamento dos equipamentos de automação instalados nesta planta, foram alocados no quadro de comandos (a).

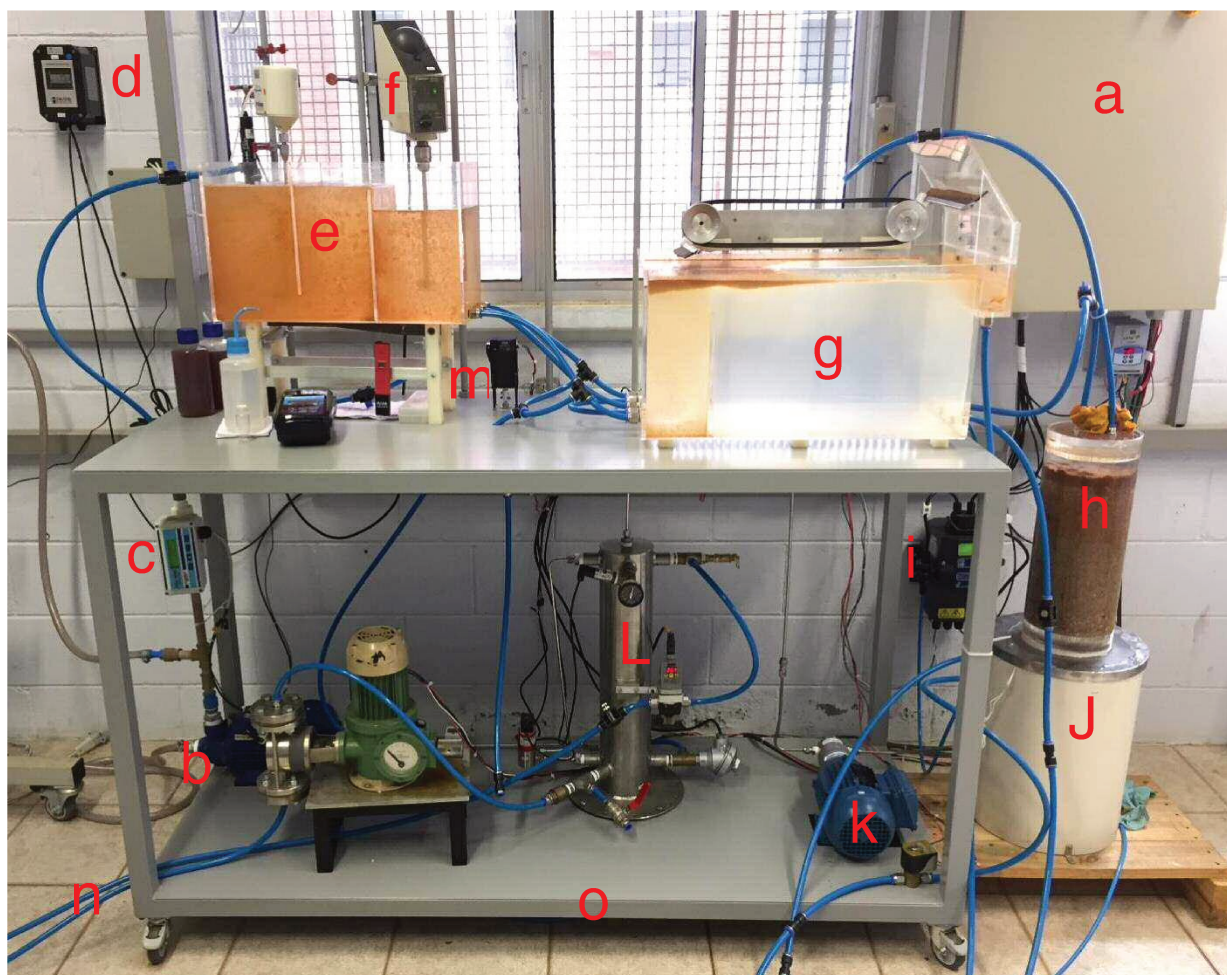


Figura 22. Ilustração geral do sistema de tratamento de águas via FAD com indicação alfabética dos principais componentes do protótipo.

Fonte: O Autor

A transferência dos efluentes preparados nos IBCs (alocados na parte externa do LCAP), para o flocculador (e), é realizada por uma bomba centrífuga (b) com motor trifásico de $\frac{1}{2}$ hp e, tendo a medição da vazão de alimentação de efluente a ser tratado no sistema pelo medidor de vazão vertical (c) volumétrico, tipo eletromagnético.

Para o tratamento químico dos efluentes, o tanque de floculação (d) foi construído em acrílico, com capacidade volumétrica de 30 litros, provido de agitadores mecânicos (f), imprescindíveis para os processos de coagulação e floculação. Tais processos, são parametrizados pelo pHmetro (d), com a imersão do eletrodo (fixado no primeiro estágio deste tanque) no efluente.

Na sequência, para a etapa de separação sólido-líquido, este protótipo foi contemplado com um tanque de flotação (g), também construído em acrílico, com capacidade volumétrica de 67,2 litros (com raspador superficial de lodo flotado). Todo efluente transferido por gravidade para o filtro de areia (h), alocado sobre o tanque pulmão (J) de efluente tratado (filtrado). Simultaneamente, parte do efluente tratado (não filtrado) é monitorado, pelo turbidímetro on-line (i), instalado na saída do flotador.

O vaso de saturação (L), constituído de um tanque cilíndrico de aço inoxidável, (sem costura), com pontos de admissão de água, ar comprimido (n) e retirada de água saturada, no entanto, de modo a possibilitar o controle e o monitoramento, esta célula foi adaptada, com equipamentos referentes à automação, como instrumentos de medição de temperatura, vazão, pressão e válvulas de controle. Este tanque é alimentado de efluentes tratados filtrados, transferidos por uma bomba de engrenagens magnéticas (k) com motor trifásico de $\frac{1}{2}$ hp.

Para o controle da vazão de injeção de água saturada no tanque de flotação, de modo que seja possível a regulação, sem interferir na qualidade das microbolhas, uma válvula agulha foi instalada conjuntamente com o motor de passo (m), possibilitando maior precisão quanto a regulação da vazão de reciclo que alimenta o vaso saturador.

4.4. Conclusões Parciais

O conjunto de tanques (equalização, floculador, flotador e filtração) projetado e construído demonstrou satisfatória funcionalidade para simulações de tratamento físico-químico de águas e efluentes em modo contínuo. Permitindo também maior amplitude experimental, em relação aos equipamentos convencionais que atuam por batelada, tais como Jar Test, Flotest, Flotatest, etc. Assim, é possível afirmar que o emprego deste sistema, pode trazer uma redução no tempo de ensaios e maior aquisição de dados, principalmente quando comparado ao funcionamento isolado das etapas de floculação e flotação.

O projeto e montagem do flotador está em conformidade com as premissas técnicas de que a largura do tanque de flotação é limitada pelo equipamento de remoção do lodo, e o comprimento do tanque está associado à distância necessária para que o aglomerado floco-bolha atinja a superfície

Neste estudo conseguimos evidenciar de forma clara e objetiva que é possível implementar um sistema avançado de controle e automação em um protótipo de uma estação de tratamento de águas e efluentes via FAD monitorada via *Supervisory Control And Data Acquisition* (SCADA).

A planta experimental de tratamento de águas via flotação por ar dissolvido projetada e montada no Laboratório de Controle e Automação de Processos – LCAP possibilitou o desenvolvimento dos procedimentos de preparação de efluentes, ensaios de coagulação, floculação, além da simulação de todas as condições e variáveis experimentais previstas para os ensaios de flotação por ar dissolvido permitindo a observação dos mecanismos de interações existentes entre bolha e partículas.

CAPÍTULO 5 – Determinação das Condições de Operação do Protótipo de FAD

5.1. Introdução

Em linhas gerais, as características das águas podem sofrer variações ao longo do tempo, de acordo com a época do ano, regime das chuvas ou utilidade industrial. Nas superfícies, a variação da qualidade da água dos grandes rios é mais lenta que a dos pequenos rios, cuja turbidez, por exemplo, pode variar entre largos limites e em curto espaço de tempo. Mesmo a qualidade da água dos corpos receptores de efluentes líquidos industriais sofrem abruptas variações com o decorrer do tempo.

Embora o tratamento físico-químico de águas e efluentes convencionalmente seja composto pelas etapas de equalização, coagulação/floculação, decantação ou flotação e filtração, a efetividade da fundamental etapa de floculação é atribuída como consequência da coagulação e, por esta razão é incorporada no fluxograma dos processos de uma estação de tratamento de água, principalmente quando a etapa de separação sólido-líquido é a flotação por ar dissolvido. Constitui-se basicamente numa etapa de mistura lenta com objetivo de acelerar a taxa de colisão das partículas previamente equalizadas, aumentando suas chances de contato, com adição de substâncias químicas suplementares, como os auxiliares de coagulação ou floculação, de modo que ocorra a agregação dessas, com formação de flóculos.

A coagulação pode ser definida como a desestabilização das cargas superficiais das partículas coloidais e em suspensão, por meio da adição do reagente coagulante. Esse processo permite que impurezas de pequenas dimensões se combinem formando agregados maiores, que são mais facilmente removidos em processos de separação sólido-líquido, como a sedimentação, filtração ou flotação.

Tão importante quanto a seleção dos reagentes mais adequados para cada tipo de água, a padronização do método de dosagem dos coagulantes e auxiliares é

fundamental para a obtenção de flóculos favoráveis ao processo de flotação e, dependem diretamente de alguns fatores como a natureza dos sólidos suspensos e as características químicas da água.

5.2. Materiais e Métodos

Para a realização desta etapa da pesquisa, a água de estudo foi preparada e estocada em quantidade suficiente para realizar todo o procedimento, de forma a minimizar os efeitos da variação do efluente. Periodicamente, antes de iniciar os ensaios, além de ser verificada a turbidez inicial, foram feitos testes com a água de estudo simulando a fase de mistura rápida e coletas de amostras para estabelecer as dosagens ideais dos reagentes adotados neste estudo.

5.2.1. Preparação do Efluente Bruto

Os efluentes utilizados neste trabalho foram preparados sinteticamente simulando as concentrações críticas de sólidos suspensos das águas residuárias ou leitos de rios desta região. Para tal, foi processada uma mistura de água com terra vermelha peneirada a 2,0 mm de granulometria (Figura 23). Assim como todas as demais etapas do tratamento, para a preparação do efluente, foi utilizada “água limpa”, ou simplesmente potável, oriunda da rede pública de abastecimento, disponível na torneira do laboratório LCAP.



Figura 23. Imagem de uma placa de petri contendo amostra de argila vermelha previamente peneirada para o processo de preparação da “solução mãe”.

Fonte: O Autor

O procedimento para o preparo dos efluentes, consistiu basicamente na dissolução de aproximadamente 250 g de argila vermelha (peneirada) em 5,0 L de água, avolumada em um béquer de plástico e, manualmente, com um bastão, esta mistura foi parcialmente homogeneizada, até a obtenção de uma “solução mãe” saturada, com uma parte de sólidos sedimentados. A outra fração desta solução, composta por sólidos suspensos, posteriormente foi utilizada para a preparação dos efluentes, pela gradativa dosagem diretamente no tanque IBC (*intermediate Bulk Container*), parcialmente abastecido com “água limpa” enquanto que, simultaneamente, o índice de turbidez foi monitorado e ajustado de acordo com o planejamento do respectivo ensaio.

Na Figura 24 é possível observar o esquema utilizado para a adaptação do IBC com capacidade volumétrica de 1000 litros, para a preparação, armazenamento e abastecimento do protótipo com efluente bruto.

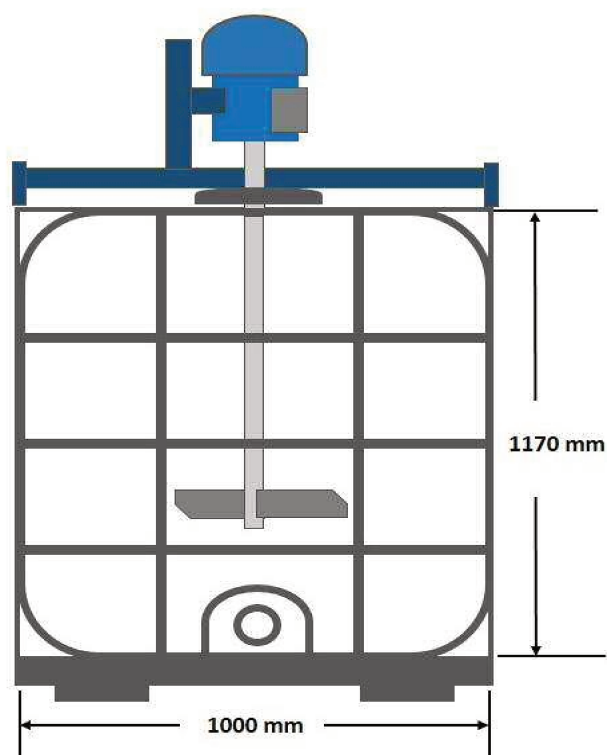


Figura 24. Representação esquemática da vista frontal do tanque de preparação da água bruta (efluente) construído a partir de um IBC (cap. 1000 L) adaptado com sistema de agitação mecânica.

Fonte: O Autor

O projeto do sistema piloto de tratamento foi provido de dois reservatórios, ambos alocados na parte externa do laboratório (LCAP).

5.2.2 Determinação do pH

Para a referência quantitativa das dosagens do auxiliar de alcalinização e coagulante, as medidas de pH foram efetuadas utilizando um eletrodo combinado de vidro e prata/cloreto de prata. O pHmetro *on-line* (modelo HI8614L, marca Hanna®), ilustrado na Figura 25, foi calibrado diariamente ou antes de cada ensaio, com soluções tampão de pH 4,0; 7,0 e 10,0; conforme indicado por *Standard Methods for the*

Examination of Water and Wastewater (AWWA,2017). As medições de pH foram realizadas no tanque de floculação.



Figura 25. Ilustração do pHmetro *on-line*, instalado no protótipo de tratamento.

Fonte: O Autor

As calibrações foram efetuadas com três padrões de soluções tampão, pH de 4,00 ($\pm 0,02$); 7,00 ($\pm 0,02$) e 10,00 ($\pm 0,02$).

5.2.3 Determinação da Turbidez

Visando a determinação das medidas de turbidez, foram utilizados dois turbidímetros, um *off-line*, marca Policontrol®, modelo AP2000 (0 - 1000 NTU), ilustrado na Figura 26a, para aferição da turbidez do efluente bruto preparado, e um *on-line*, marca Scientific®, modelo Microtol 4HF (0 - 1000 NTU), Figura 26b, instalado na saída do tanque de flotação.



a-)



b-)

Figura 26. Imagem dos equipamentos utilizados para medição de turbidez. Expostos em (a) Turbidímetro *off-line*, marca Policontrol®, modelo AP2000. (b) Turbidímetro *on-line*, marca Scientific®, modelo Microtol 4HF.

Fonte: O Autor

Para as calibrações foram adotados padrões de 0,02 NTU, 10 NTU e 100 NTU, considerando a periodicidade semanal, para o turbidímetro *off-line* e “quando solicitado” conforme o mostrado no display do turbidímetro *on-line*.

5.2.4. Determinação da dosagem ideal do auxiliar de coagulação

Nesta etapa, seguindo a metodologia estabelecida por Thompson Junior (2015), foram realizados testes de aplicação e concentrações de dosagens do reagente Aluminato de Sódio (NaAlO_2). A solução do alcalinizante foi adicionado simultaneamente ao coagulante, com o gradiente de velocidade médio dos agitadores ajustadas em 50 s^{-1}

em modo contínuo de trabalho. Foi considerada como dosagem ótima do Aluminato de Sódio, a condição pela qual o efluente tratado apresentou (juntamente com o coagulante catiônico) o menor índice de turbidez.

Para a dosagem da solução reagente em modo contínuo, foi utilizado a bomba dosadora peristáltica *off-line*, marca Masterflex®, modelo 7016-52 (cap. Vazão max. 0,8 L.min⁻¹), ilustrada na Figura 27.



Figura 27. Ilustração da bomba dosadora peristáltica utilizada para dosagem contínua do reagente Aluminato de Sódio.

Fonte: O Autor

5.2.5. Determinação da dosagem ideal do Coagulante

Com o objetivo se obter a condição ótima de coagulação, nesta etapa foi utilizado o reagente Tanfloc SG, um polímero natural de caráter catiônico derivado da modificação do extrato aquoso vegetal da casca da Acácia Negra que apresenta ação fortemente coagulante atuante em sistema de partículas coloidais.

A exemplo do reagente alcalinizante, a aplicação deste reagente coagulante, também foi realizada continuamente no primeiro estágio do tanque de floculação via

bomba dosadora, peristáltica *off-line*, ilustrada na Figura 28, marca Masterflex®, modelo 7014-52 (cap. vazão max. 0,5 L.min⁻¹).

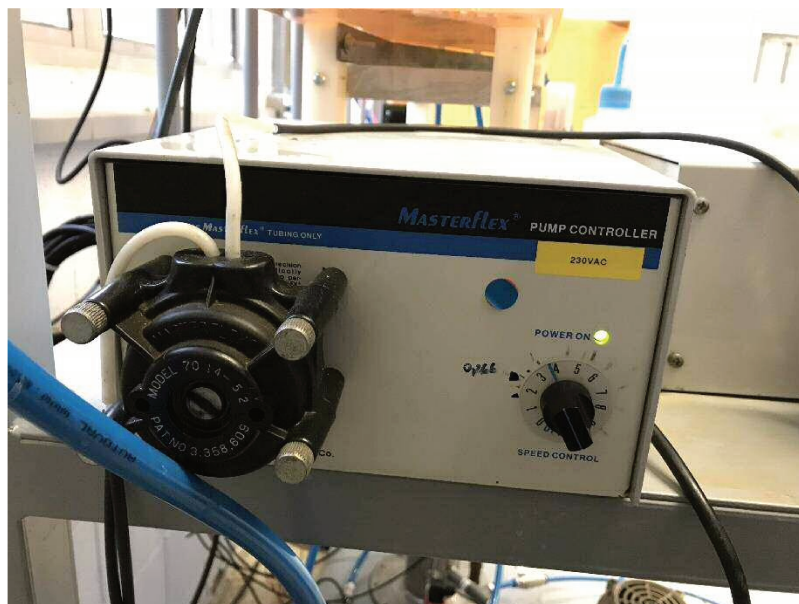


Figura 28. Ilustração da bomba dosadora peristáltica utilizada para dosagem do reagente coagulante Tanfloc SG.

Fonte: O Autor

5.2.6. Determinação da vazão de dosagem dos coagulantes

Segundo Thompson Junior (2015), as dosagens típicas de coagulantes para o tratamento do efluentes industriais podem variar de 100 a 1.000 ppm. Assim, perante esta ampla faixa e possíveis características do efluente a ser tratado, optou-se por ensaios de tratamento considerando uma faixa de concentração previamente estabelecida por testes e simulações de bancada (*Jar Test*),

A vazão (q) da solução de coagulante adicionado, determinada pela obtenção da dosagem ótima deste reagente, estabelecida pela Equação 2

$$q = \frac{Q \cdot d}{C} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

C = Concentração da solução de tanino (g.L^{-1})

Q = Vazão de entrada de água no sistema (L.min^{-1})

d = Dosagem ótima de coagulante (g.L^{-1})

q = Vazão da solução do coagulante adicionado (L.min^{-1})

5.3. Resultados e Discussão

5.3.1. Preparação do Efluente Bruto

Visando a suspensão dos sólidos e, conseqüentemente, a estabilização das concentrações adotadas nos ensaios, estes tanques adaptados (a) e apresentados na Figura 29, foram providos de um agitador mecânico (b) com rotação linear controlada por um inversor de frequência (c), acionado e ajustado manualmente a 27 Hz para a estabilização da turbidez do ensaio.



Figura 29. Imagens dos (a) Tanques IBCs adaptados; (b) Conjunto composto por suporte (desmontável) com motor elétrico (2,0 cv), mancal, haste (700 mm) aço inox 316L e misturador tipo paleta reta prolongada com rotação linear controlada por (c) inversor de frequência.

Fonte: O Autor

Os índices de turbidez adotados como parâmetros para as preparações dos efluentes brutos foram de 25, 50 e 75 NTUs, conforme previsto no planejamento experimental fatorial aplicado. As aferições analíticas do índice de turbidez, sempre foram efetuadas pontualmente no acesso localizado entre o tanque de equalização IBC e o tanque de floculação, onde ocorreram as etapas de alcalinização, coagulação e floculação.

5.3.2. Dosagem do Auxiliar de Coagulação e Coagulante

A seleção do reagente mais adequado para tais condições de processo, é de fundamental importância para a manutenção de um esquema de coagulação eficiente ao longo da gama normal de variação das características da suspensão. Assim, seguindo a metodologia proposta por Thompson Junior (2015), na etapa química deste projeto, os reagentes que se apresentaram mais efetivos no processo de coagulação foram o

Tanfloc SG e Aluminato de Sódio. Para a determinação do pH e dosagem ideal de reagentes Aluminato de Sódio e Tanfloc SG, foram conduzidos testes aplicando diversas dosagens do mesmo. Após a determinação do pH ótimo de coagulação, foram realizados novos ensaios de coagulação-floculação, fixando-se o valor de pH ótimo e utilizando-se a dosagem de Aluminato no mesmo ponto, variando-se apenas as dosagens de Tanfloc.

Conforme ilustrado na Figura 30, o coagulante Tanfloc SG foi adicionado com o gradiente de velocidade médio dos agitadores ajustados a 100 rpm, durante 60 segundos e, seguindo o critério avaliativo da performance e estabilidade observada na etapa de formação do coágulo.



Figura 30. Registro fotográfico da etapa de coagulação. Imagem parcial do floculador em operação com flóculos em processo de formação sob agitação e suspensão.

Fonte: O Autor

Os ensaios para a determinação da dosagem ideal de coagulação foram realizados simultaneamente no tanque de floculação e, as principais referências adotadas para avaliação do processo de coagulação, foram a faixa de pH (estabelecida pela adição prévia do Aluminato de sódio), a formação de coágulos na etapa de mistura rápida, a qualidade da floculação observada na etapa de mistura lenta e a turbidez final, mensurada na amostragem coletada no terceiro estágio do floculador, (entre o tanque de

floculação e o flotador), após a decantação dos sólidos e particulados sedimentáveis, especificamente, na lâmina superior (sobrenadante) do recipiente utilizado.

Diferentemente do Jar test, onde os jarros apresentam volumes definidos e, consequentemente, limitando os testes apenas por bateladas, pelo protótipo, a determinação das dosagens dos reagentes puderam ser efetuadas em modo contínuo, possibilitado os ajustes necessários para a obtenção das condições ideais de cada tipo de efluente, quanto a coagulação, floculação e pH

Os valores (médios) de dosagens obtidos em triplicatas nos ensaios rodados com efluentes preparados com turbidez ajustada em 25 NTU, são apresentados na Tabela 3, a seguir.

Tabela 3. Valores de Dosagem ideal de reagentes obtidos a partir dos ensaios de coagulação/floculação com efluentes preparados com turbidez ajustada em 25 NTU.

Ensaio com Efluente - Turbidez Inicial 25 NTU				
Reagente	Densidade	Dosagem Ideal		
		Solução (v/v)	g.L ⁻¹	ppm
Aluminato de Sódio	1,50 g.mL ⁻¹	2,0%	0,12	120
Tanfloc SG	1,10 g.mL ⁻¹	2,0%	0,15	150
Turbidez Final	1,28 NTU			

Fonte: O Autor

Nos resultados obtidos nos ensaios efetuados visando a determinação das dosagens ideais para o tratamento químico do efluente preparado a 25 NTU, observou-se que, quanto ao índice de remoção de turbidez (final), foi atingido o valor (médio) de 1,28 NTU, consequentemente, a eficiência do processo de floculação, adquirida pela remoção da turbidez, foi de 94,9%, indicando a uma satisfatória performance dos

reagentes aplicados e testadas para esta condição de efluente (25 NTU). O pH (médio), nesta remessa de ensaios foi de 6,58, na floculação.

Na Figura 31, do ensaio de tratamento com efluente ajustado em 25 NTU, é possível observar a formação de flóculos expansivos e estáveis, tanto na etapa de mistura rápida (coagulação), quanto na etapa de mistura lenta (floculação).



Figura 31. Imagem parcial do floculador em operação durante etapa de coagulação/floculação visando a determinação da dosagem ideal de reagentes Aluminato de Sódio e Tanfloc SG, com efluente ajustado em 25 NTU, apresentando flóculos em processo de formação sob agitação e suspensão.

Fonte: O Autor

Os valores (médios) de dosagens obtidos em triplicatas nos ensaios rodados com efluentes preparados com turbidez ajustada em 50 NTU, são apresentados na Tabela 4, a seguir.

Tabela 4. Valores de Dosagem ideal de reagentes obtidos a partir dos ensaios de coagulação/floculação com efluentes preparados com turbidez ajustada em 50 NTU

Ensaio com Efluente – Turbidez Inicial 50 NTU – Ponto Central				
Reagente	Densidade	Dosagem Ideal		
		Solução (v/v)	g.L ⁻¹	ppm
Aluminato de Sódio	1,50 g.mL ⁻¹	2,0%	0,23	230
Tanfloc SG	1,10 g.mL ⁻¹	2,0%	0,28	280
Turbidez Final	2,16 NTU			

Fonte: O Autor

Diante do exposto, as dosagens dos reagentes combinados para o tratamento químico deste efluente (50 NTU), quanto ao pH de floculação e índice de remoção de turbidez (final), foram obtidos resultados da ordem de 6,77 upH e 2,16 NTU, respectivamente. Com isso, a eficiência do processo de floculação, adquirida pela remoção da turbidez, foi de 94,5%, indicando que as dosagens testadas para esta condição de efluente (50 NTU) apresentaram desempenhos quimicamente efetivos e, portanto, satisfatórios.

Na Figura 32 do ensaio de tratamento com efluente ajustado em 50 NTU (ponto central), observa-se a formação de flóculos expansivos, porém apresentando maior densidade, devido a maior concentração de sólidos, Apesar da expansividade, permaneceram resistentes em ambas etapas de misturas (rápidas e lentas).



Figura 32. Imagem parcial do floculador em operação durante etapa de coagulação/floculação visando a determinação da dosagem ideal de reagentes Aluminato de Sódio e Tanfloc SG, com efluente ajustado em 50 NTU, apresentando flóculos em processo de formação sob agitação e suspensão.

Fonte: O Autor

Os valores (médios) de dosagens obtidos em triplicatas nos ensaios rodados com efluentes preparados com turbidez ajustada em 75 NTU, são apresentados na Tabela 5, a seguir.

Tabela 5. Valores de dosagem ideal de reagentes obtidos a partir dos ensaios de coagulação/floculação com efluentes preparados com turbidez ajustada em 75 NTU

Ensaio com Efluente - Turbidez Inicial 75 NTU				
Reagente	Densidade	Dosagem Ideal		
		Solução (v/v)	g.L ⁻¹	ppm
Aluminato de Sódio	1,50 g.mL ⁻¹	2,0%	0,38	380
Tanfloc SG	1,10 g.mL ⁻¹	2,0%	0,45	450
Turbidez Final	2,93 NTU			

Fonte: O Autor

Para esta condição investigada (75 NTU), os resultados obtidos nos ensaios de tratamento químico aplicados, quanto ao índice de remoção de turbidez (final), atingiu-se o valor de 2,93 NTU, conseqüentemente, a eficiência do processo de floculação, adquirida pela remoção da turbidez, foi de 96,1%, indicando a satisfatória performance dos reagentes aplicados. Na etapa de coagulação, estabilizada na floculação, o pH observado neste estágio foi de 6,18.

Na Figura 33 do ensaio de tratamento com efluente ajustado em 75 NTU, observa-se a formação de flóculos expansivos, porém apresentando maior densidade, devido a maior concentração de sólidos. Apesar da expansividade, permaneceram resistentes em ambas etapas de misturas (rápidas e lentas).



Figura 33. Imagem parcial do floculador em operação durante etapa de coagulação/floculação visando a determinação da dosagem ideal de reagentes Aluminato de Sódio e Tanfloc SG, com efluente ajustado em 75 NTU, apresentando flóculos em processo de formação sob agitação e suspensão.

Fonte: O Autor

Analizando as imagens destacadas nas Figuras 31, 32 e 33, é possível observar que em todos os ensaios apresentaram resultados satisfatórios quanto a coagulação e floculação, habilitando assim, todas as dosagens ajustadas para os tratamentos químicos aplicados (25 NTU, 50 NTU e 75 NTU) ao processo de flotação por ar dissolvido.

Ainda sobre os resultados ilustrados nas Figuras 31, 32 e 33, pode-se observar que os flocos originados nestes ensaios, utilizando o coagulante Tanfloc SG combinado com aluminato e sódio, apresentaram diferentes formatos de flocos, a menor proporção de flocos observados com formatos bem definidos e aglutinados e a maior proporção gerada, composta por flocos mais abertos, com superfícies relativamente maiores, proporcionando conseqüentemente maiores áreas de contatos. Isso pode ser compreendido pelos distintos mecanismos de coagulação dos coagulantes utilizados pois, o Aluminato de sódio atua desestabilizando as partículas coloidais, que são envolvidas pelos precipitados $\text{Al}(\text{OH})_3$ (hidrólise do aluminato). Este mecanismo conhecido por “varredura” é intensamente utilizado nas estações de tratamento pois os flocos resultantes são grandes e apresentam velocidades de sedimentação relativamente maiores do que os flocos obtidos com outros mecanismos de coagulação (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

Por outro lado, o Tanfloc SG (tanino catiônico) atua pela adsorção e formação de pontes. Este mecanismo ocorre por intermédio da presença dos sítios ionizáveis ao longo de sua estrutura orgânica, resultando em flocos geralmente de maior tamanho do que os flocos obtidos com outros mecanismos de coagulação.

Ao passo que foram determinadas as condições ideais de dosagens, concomitantemente, foram obtidos demais dados imprescindíveis para a operação do protótipo, tais como, concentração das soluções preparadas e vazão de dosagem de cada reagente.

Considerando a vazão de alimentação (efluente bruto) do protótipo ajustado e estabilizado em $2,5 \text{ L.min}^{-1}$, os valores das vazões de dosagens das soluções estabelecidas a partir dos resultados de dosagens ideais dos reagentes são apresentadas na Tabela 6

Tabela 6. Vazão de dosagem conforme resultados observados nos testes de aplicações de coagulantes em função da variação da turbidez.

Efluente Elaborado	Turbidez (NTU)	Vazão de Dosagem (L.min ⁻¹)		Dosagem Ideal (ppm)	
		Tanfloc SG	Aluminato de Sódio	Tanfloc SG	Aluminato de Sódio
Tipo 1	25	0,017	0,010	150	120
Tipo 2	50	0,032	0,019	280	230
Tipo 3	75	0,051	0,032	450	380

Fonte: O Autor

5.4. Conclusões Parciais

Dos dados obtidos neste capítulo, podem ser delineadas as conclusões parciais listadas a seguir:

O emprego de misturador mecânico na etapa de equalização dos efluentes preparados, possibilitou a homogenização e assegurou a estabilidade do parâmetro Turbidez no ponto de admissão contínua de água do protótipo (tanque de floculação), possibilitando a padronização do ajuste de dosagem dos reagentes responsáveis pela coagulação e floculação, conforme previsto nos ensaios de jarro.

As dosagens de reagente coagulante referenciadas e quimicamente pelo pH, obtidos previamente através dos ensaios de jarro, foram fundamentais e influenciadores das características qualitativas dos flóculos obtidos ao longos dos experimentos de FAD desenvolvidos e apresentados neste capítulo.

Resumidamente, a metodologia adotada para o processo de tratamento, a partir da preparação da água, seguido das etapas de alcalinização e coagulação está ilustrado na Figura 34

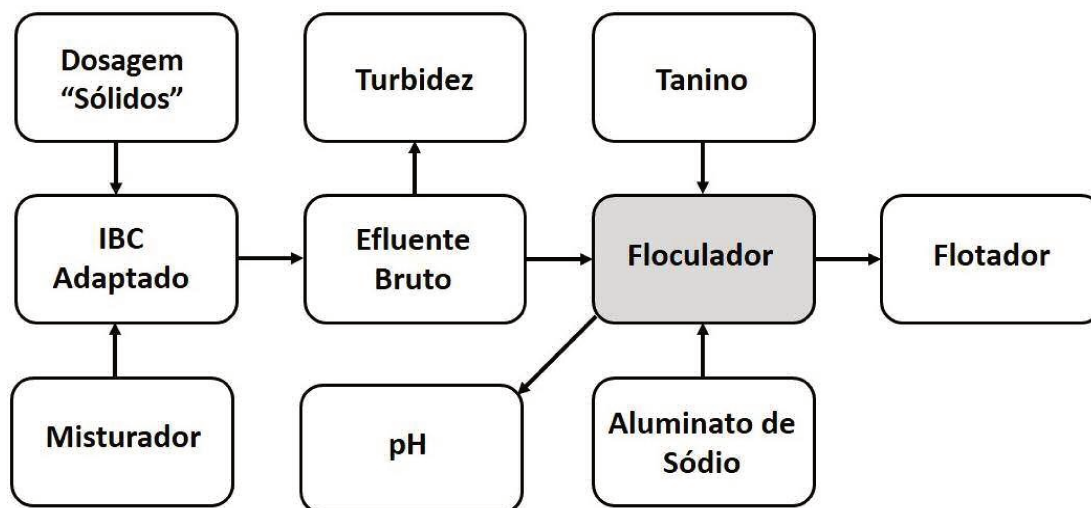


Figura 34. Fluxograma das etapas de preparação do efluente sintético e condicionamento do tratamento químico via processos de coagulação e floculação.

Fonte: O Autor

CAPÍTULO 6 – Análise dos Mecanismos de Interações B-P no Processo de FAD

6.1. Introdução

No processo de FAD, os mecanismos de agregação e interação, entre outros como a adesão comum (forças hidrofóbicas) são propostos, tais como, o mecanismo denominado “fenômeno de nucleação” pela superfície do sólido, o “aprisionamento” das bolhas dentro dos flóculos e o arraste de agregados pelo aumento ou diminuição do tamanho das bolhas (nuvens), este corresponde a partículas físicas (agregados) carregados sobre as bolhas (atacadas ou não por partículas) e depende somente da hidrodinâmica e da distribuição dos tamanhos das bolhas. Os dois primeiros mecanismos (fenômeno de nucleação e aprisionamento) são comuns de processos de separação sólido-líquido com micro bolhas, onde a camada de sólidos flutuantes é estável tende a ser estável na zona superior do flotador. No entanto, entre a efetividade dos fenômenos supracitados e a finalizada formação da camada ou “manta” de sólidos flotados, alguns possíveis eventos físicos podem ocorrer de modo a comprometer diretamente a estabilidade do processo, tais como, o mecanismo de desacoplamento das bolhas aderidas superficialmente nas estruturas das partículas e flóculos. Tal mecanismo é dependente da hidrodinâmica e da distribuição dos tamanhos das bolhas geradas no processo de saturação. Isto posto, as variáveis relativas a pressão de saturação e vazão de injeção de água saturada, são fatores de controle fundamentais para a distribuição do tamanho de microbolhas de ar na FAD e, conseqüentemente, pela hidrodinâmica do processo.

Para o direcionamento estratégico experimental deste trabalho, escolha dos níveis das variáveis e definição dos níveis (valores) de cada experimento, foi adotado o planejamento experimental fatorial, permitindo o estudo simultâneo de vários fatores, variando um fator de cada vez. Neste caso, foram estabelecidos como fatores de controle (variáveis independentes) os parâmetros Turbidez de entrada, Pressão de saturação e

Taxa de reciclo (de água tratada e filtrada reutilizada na alimentação da célula de saturação).

Dentre os planejamentos experimentais existentes destacam-se os planejamentos fatoriais, os quais são amplamente utilizados em experimentos em que é necessário estudar os efeitos de interação dos fatores sobre a resposta. Como o próprio nome indica, essa técnica exige um planejamento prévio dos experimentos, que inclui a escolha das variáveis (fatores) e dos valores que estas assumirão nas corridas experimentais (níveis).

6.2. Materiais e Métodos

Nesta etapa do estudo, pressões diferentes de saturação foram investigadas visando a produção de água saturada com ar, variando a faixa de 6,15; 6,50 e 6,85 bar, a Figura 35 apresenta o fluxograma geral das etapas investigadas para o emprego da FAD.

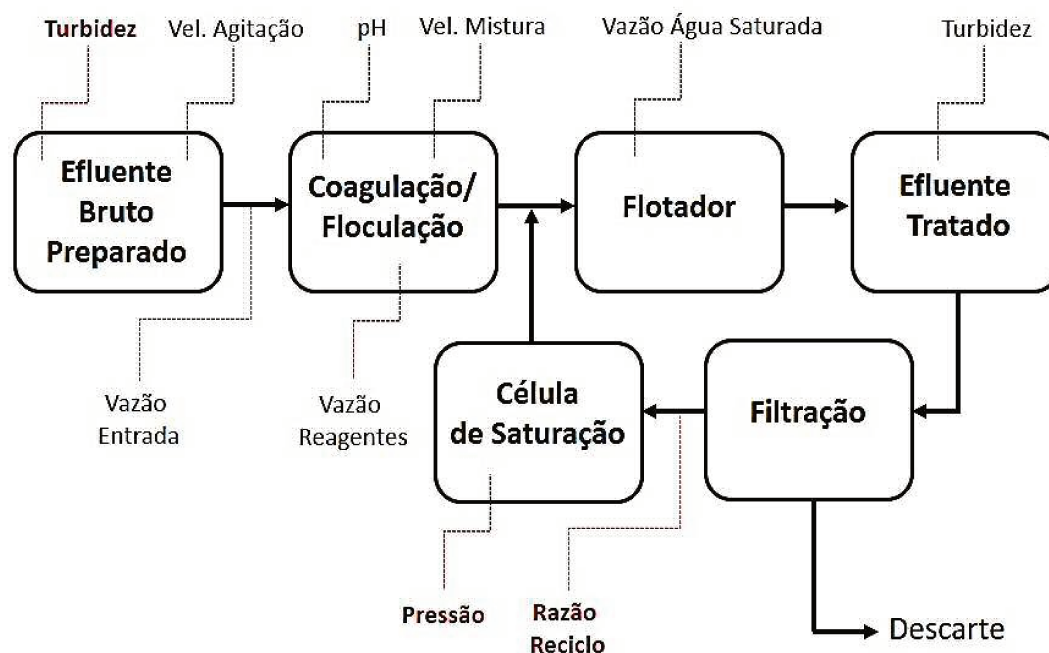


Figura 35. Fluxograma geral das etapas investigadas condicionantes para o emprego da flotação por ar dissolvido (FAD).

Fonte: O Autor

6.2.1. Planejamento Experimental Fatorial

Nesta etapa do trabalho o objetivo, além de verificar a influência das variáveis já em estudo, foi também verificar o tempo de estabilidade do processo de flotação, compreendido pelo tempo de desacoplamento das microbolhas em relação ao flóculos formados.

Com o desenvolvimento do planejamento experimental fatorial foi possível a obtenção e o entendimento das correlações multivariáveis e dos efeitos e interações das variáveis a partir de ensaios aleatórios com valores definidos (níveis), possibilitando uma análise estatística da variável-resposta.

Um planejamento fatorial de dois níveis foi realizado para o estudo dos efeitos das variáveis na variável resposta. As variáveis de estudo foram fixadas em um valor máximo (+1) e um valor mínimo (-1) denominados níveis. Os níveis são correlacionados com um nível central de referência (nível 0).

A quantidade de ensaios realizados no planejamento experimental foi definida aplicando-se a expressão 2^n , onde o valor de n representa a quantidade de variáveis (fatores) estudados.

A significância estatística dos resultados obtidos foi avaliada por meio da realização do teste “F” e sua comparação com o valor tabelado no intervalo de confiança adotado. O valor do teste “F” calculado no planejamento deve ser aproximadamente cinco vezes maior que o valor do “F” tabelado (Neto *et al.*, 1996).

6.3. Resultados e Discussão

6.3.1. Planejamento Experimental

O planejamento experimental fatorial, adotado possibilitou o estudo simultâneo de vários fatores, variando um fator de cada vez. Foram estabelecidos como fatores de controle (variáveis independentes) os parâmetros X_1 : Turbidez de entrada (NTU), X_2 : Pressão de saturação (bar) e X_3 : Taxa de reciclo (%), para a sequência dos ensaios, as variáveis destes parâmetros foram dimensionadas por transformações lineares conforme mostrada na Equação 3.

$$X_1 = \left[\frac{X'_1 - 50}{25} \right] \quad X_2 = \left[\frac{X'_2 - 6,5}{0,35} \right] \quad X_3 = \left[\frac{X'_3 - 15}{0,70} \right] \quad (\text{Equação 3})$$

Conforme apresentado na Tabela 7, nesta matriz experimental fatorial 2^3 há 3 fatores de controle e 2 níveis (mínimo e máximo) pré-estabelecidos para cada fator. Portanto, foram consideradas: Planejamento fatorial $2^3 + 3$ pontos (central), totalizando 11 experimentos.

Tabela 7. Matriz experimental adotada para o planejamento fatorial 2^3

Experimento	X_1	X_2	X_3	Tempo de Desacoplamento (s)
1a	-1 (25)	-1 (6,15)	-1 (14,30)	2.705
2a	+1 (75)	-1 (6,15)	-1 (14,30)	2.310
3a	-1 (25)	+1 (6,85)	-1 (14,30)	> 4.000
4a	+1 (75)	+1 (6,85)	-1 (14,30)	2.360
5a	-1 (25)	-1 (6,15)	+1 (15,70)	2.540
6a	+1 (75)	-1 (6,15)	+1 (15,70)	2.250
7a	-1 (25)	+1 (6,85)	+1 (15,70)	> 4.000
8a	+1 (75)	+1 (6,85)	+1 (15,70)	1.470
9b	0 (50)	0 (6,5)	0 (15)	3.431
10b	0 (50)	0 (6,5)	0 (15)	3.516
11b	0 (50)	0 (6,5)	0 (15)	3.492

(a) Fatorial completo em dois níveis; (b) Ponto Central/Triplicata;

Fonte: O Autor

Quanto às medidas de tempo de desacoplamento apresentados na Tabela 7, referentes aos experimentos considerando as variáveis do ponto central (Turbidez de entrada: 50 NTU, Pressão de saturação: 6,5 bar e Taxa de reciclo: 15%), foram ignorados os valores relativos ao tempo de detenção hidráulica (TDH).

Os efeitos individuais e de interações das variáveis (turbidez de entrada, pressão de saturação e taxa de reciclo) foram determinados e representados na Figura 36.

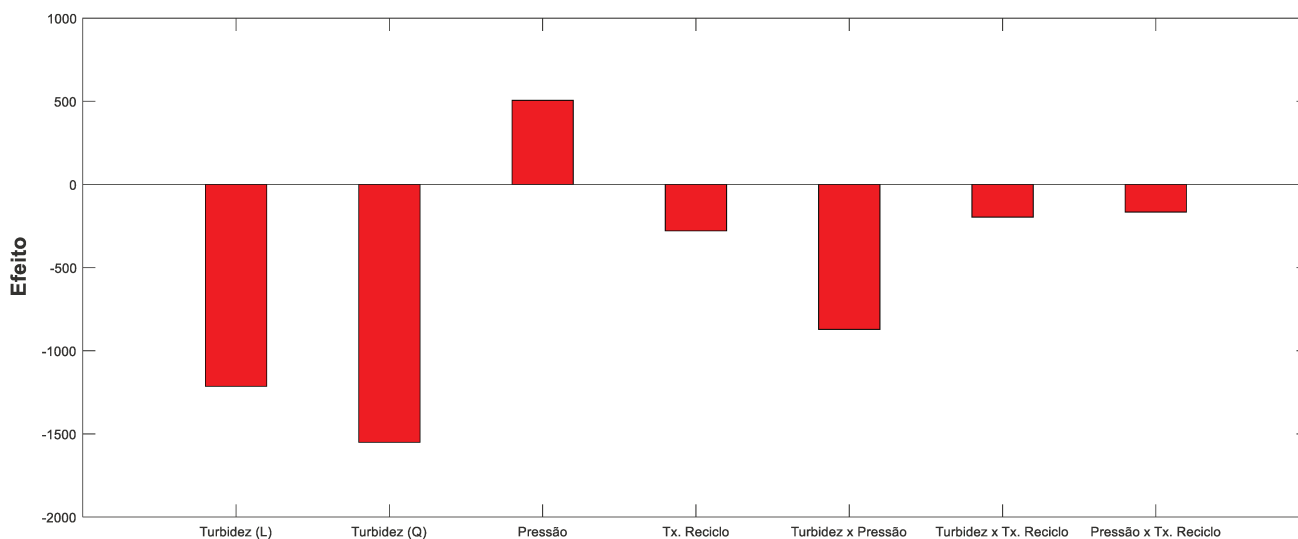


Figura 36 - Efeitos das variáveis dos níveis no tempo de desacoplamento.

Todos os níveis estudados no planejamento e suas interações apresentaram efeitos estatisticamente significativos (com um nível de confiança de 95%). Observou-se também efeito quadrático apenas na variável turbidez de entrada.

Na Tabela 8 é apresentado o tratamento estatístico (Tabela ANOVA) do planejamento fatorial realizado.

Tabela 8 – Tabela de Análise da variância (ANOVA) para o ajuste de um modelo quadrático do Planejamento Experimental Fatorial realizado.

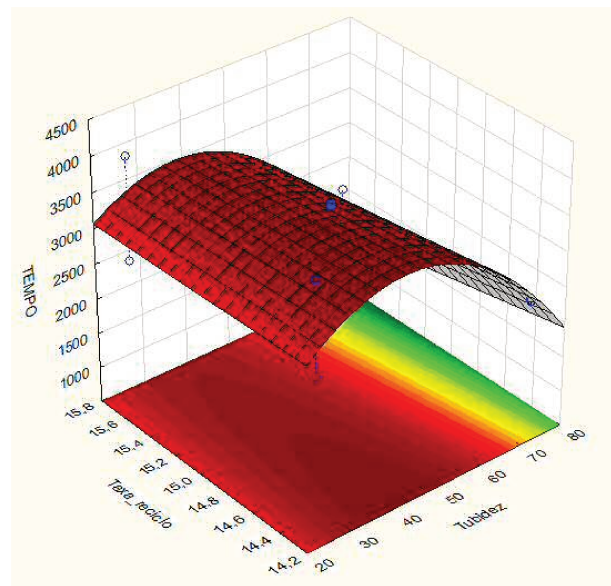
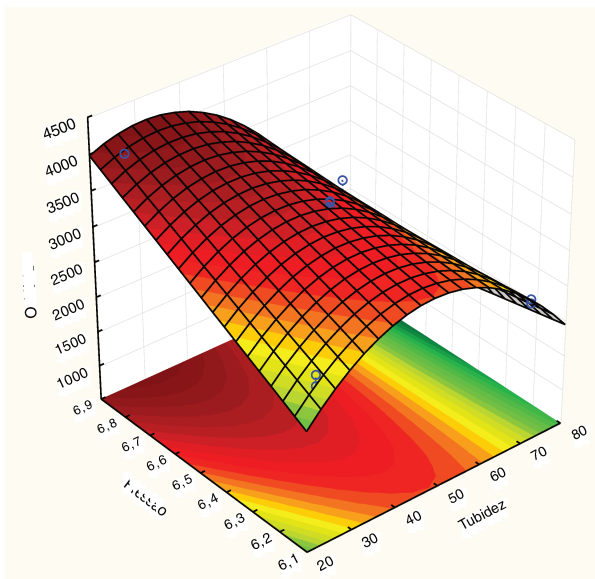
Fonte de Variância	Soma Quadrática	Número de Graus de Liberdade	Média Quadrática
Regressão	6576260,0	7	939465,7
Resíduos	127594,0	3	42531,3
Falta de Ajuste	123753,0	1	123753,0
Erro Puro	3841	2	1920,5
Total	6703854	10	
R ²	0,98097		

(Equação 4)

O modelo quadrático foi utilizado pois apresentou maior coeficiente de determinação (R^2) entre o tempo de desacoplamento e as variáveis estudada. O valor do teste F calculado é aproximadamente 2,5 vezes maior que o teste F tabelado, garantindo que o planejamento é estatisticamente significativo. Entretanto, o modelo obtido não pode ser utilizado para fins de predição.

Como o objetivo principal da utilização da metodologia é obter conhecimento do mecanismo da flotação por ar dissolvido sem a necessidade de obter valores matematicamente precisos, o modelo pode ser usado para a construção de superfícies de resposta que auxiliarão na construção da base de conhecimento do fenômeno.

O comportamento e tendências do processo para as condições do planejamento podem ser facilmente observados através das superfícies de resposta (Figura 37) que foram construídas dentro de cada faixa estudada obedecendo ao modelo escolhido.



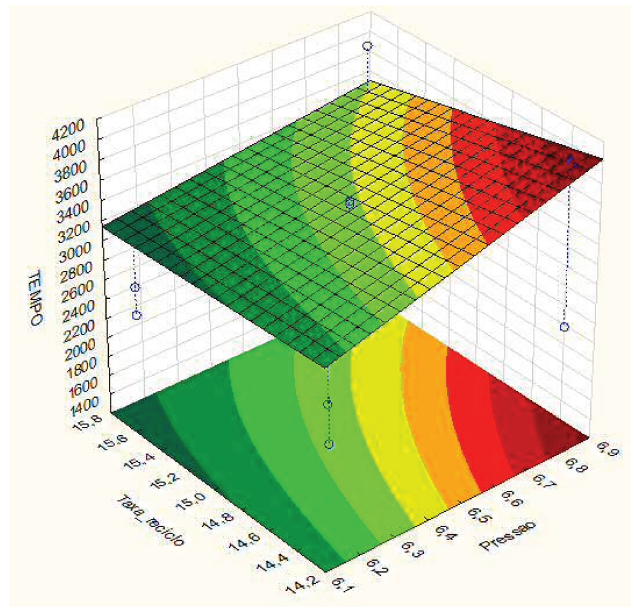


Figura 37 - Superfícies de resposta do tempo de desacoplamento para a turbidez de entrada, pressão de saturação e taxa de reciclo.

É possível observar que a alteração da pressão ajustada na célula de saturação exerce influência direta na estabilidade do processo de FAD, de modo a se constatar, pelo aumento do tempo de desacoplamento observado a partir da região de pressão intermediária. Verifica-se também, pela variação da turbidez de entrada, que a pressão de saturação é bastante determinante na resultante do tempo de desacoplamento.

Quanto ao tempo mensurado em função da taxa percentual de reciclo, diante da Figura 37 nota-se novamente que a pressão de saturação ocasiona efeito direto na estabilidade do processo, provavelmente pelas relações existentes entre as características qualitativas de microbolhas geradas e, pelo visto, praticamente independente da vazão de água saturada injetada nas zonas de contato e separação.

6.3.2. Investigação da variação da pressão da câmara de saturação na produção de microbolhas com a variação da concentração de sólidos

A determinação do tempo de detenção hidráulica (TDH) pela Equação 4 e Figura 36, também comprovada empiricamente, pela oscilação observada na leitura *on-line* da turbidez na saída do tanque de flotação, uma vez que este tanque se encontrava totalmente preenchido com água da rede pública, sugerindo a possível presença de sólidos suspensos, oriundo do efluente tratado.

$$TDH = \frac{\text{Volume do Flotador}}{\text{Vazão do Efluente}} \quad (\text{Equação 5})$$

Considerando a obtenção do TDH em 1440 segundos, a partir da Figura 38 é possível observar na região I, a manutenção da estabilidade do sistema por mais 3480 segundos. Sugere-se que este período de estabilidade seja decorrente das condições experimentais adotadas para este ensaio (pressão e taxa de reciclo). A partir de 4920 segundos observou-se o aumento gradativo da turbidez em quatro momentos distintos identificados na Figura 38 como regiões II, III, IV e V. A região II refere-se possivelmente ao primeiro estágio de desacoplamento bolha-partícula na interface dos sólidos suspensos e do efluente tratado, já a região III apresenta o período de 438 segundos da manutenção da interação bolha-partícula (B/P) pela permanência das forças resultantes do efeito *carrier* (efeito de carregamento das partículas pelas microbolhas). A exemplo da região II, a região IV também apresenta a ocorrência do mesmo comportamento bolha-partícula na interface dos sólidos suspensos, no entanto, a velocidade média deste desacoplamento foi da ordem de $4,7 \text{ mNTU.s}^{-1}$ e $4,9 \text{ mNTU.s}^{-1}$, respectivamente. A região V permite observar a diminuição da turbidez possivelmente pela predominância da interação partícula-partícula, uma vez que ocorra a diminuição do efeito bolha-partícula, mesmo perante a presença de microbolhas residuais.

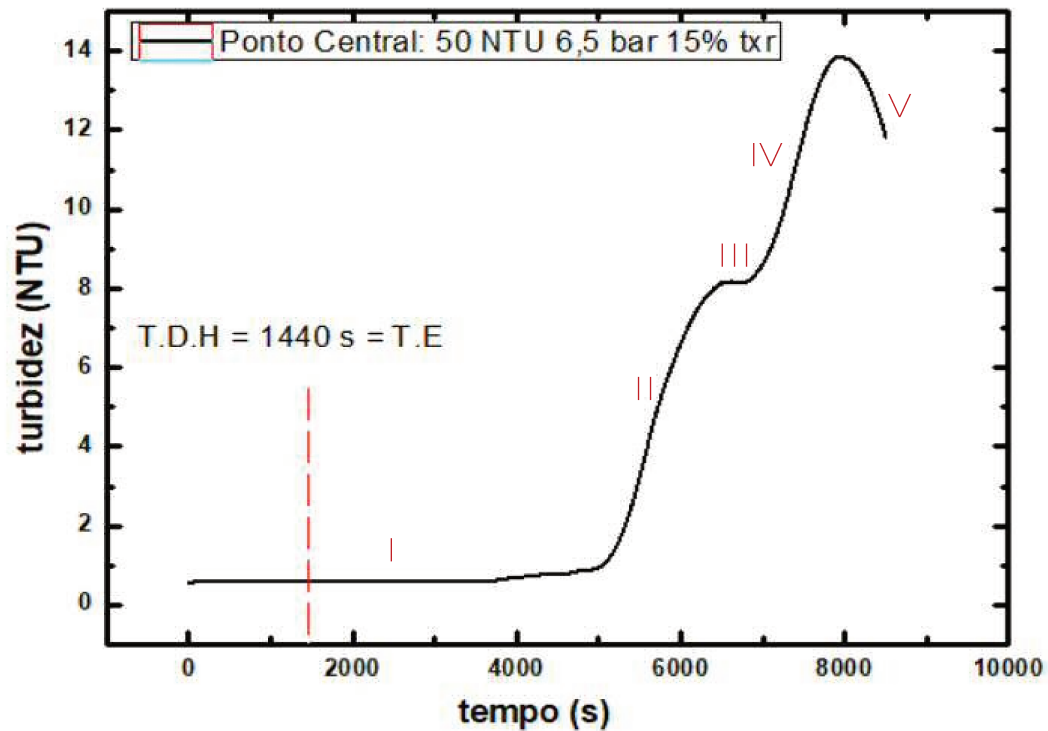


Figura 38. Comportamento da Turbidez (média) em função do tempo de monitoramento obtidos nos experimentos (em triplicata) do Ponto Central de 50 NTU, 6,5 bar e 15% de t_{rx} (taxa de retorno) dentro do Tanque de Flotação a partir do TDH (tempo de detenção hidráulica), sendo igual ao TE (tempo de estabilização), início do monitoramento da turbidez (NTU).

Fonte: O Autor

De acordo com a análise da Figura 39 é possível observar as regiões delimitadas na Figura 38

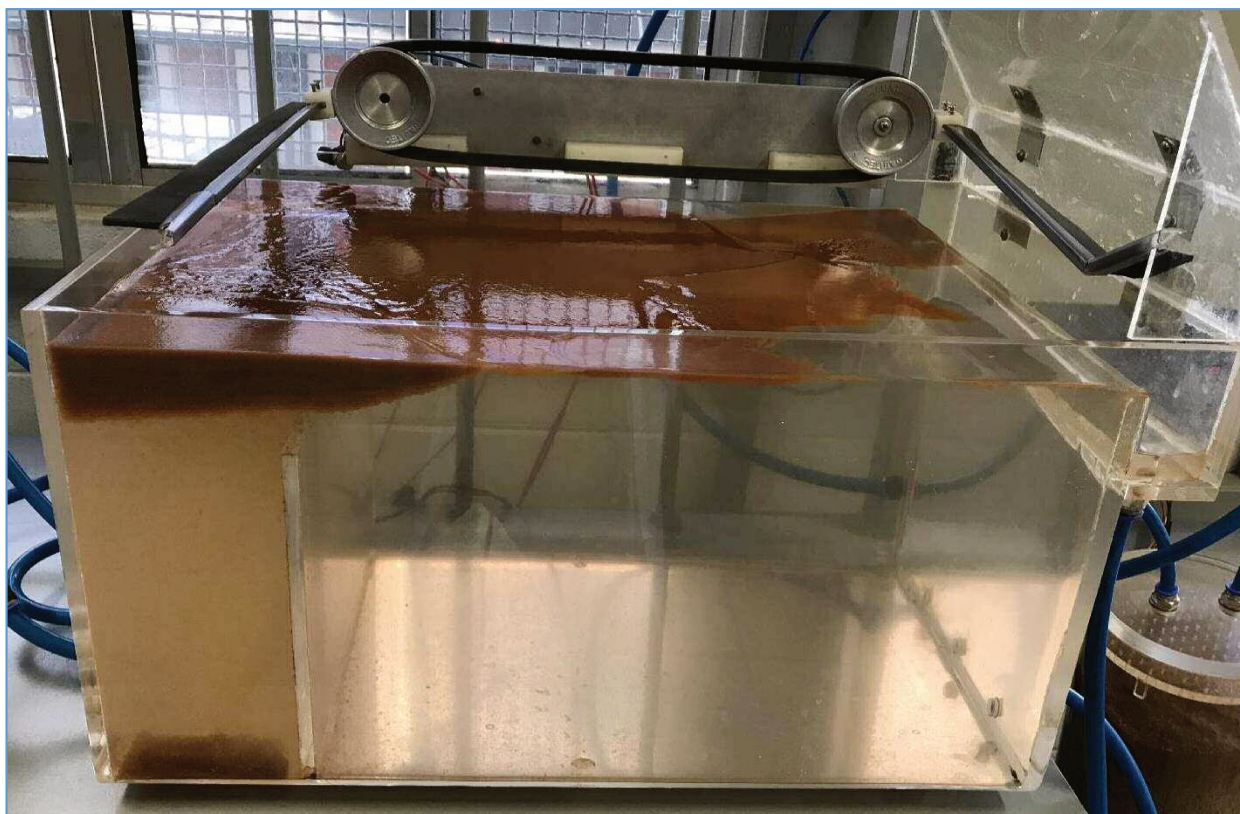


Figura 39. Imagem do flotador em operação durante ensaio realizado considerando as condições previamente estabelecidas e ajustadas para o Ponto Central, sendo Turbidez: 50 NTU, Pressão: 6,5 bar e Taxa de reciclo: 15%.

Fonte: O Autor

Diante do exposto, todos os demais ensaios foram iniciados desconsiderando o TDH inicial, portanto, reestabelecendo um novo marco teórico inicial. Além disso, como pode ser observado na Figura 40, a dinâmica do processo de preparação prévia do tratamento pode apresentar comportamentos intermediários entre a região de estabilidade (início do processo) e a região com potencial de desacoplamento, sugerindo que todo volume de água de abastecimento adotada inicialmente já tenha sido substituída, uma vez que a premissa deste processo de tratamento seja a reutilização da própria água tratada (filtrada) na alimentação do vaso de saturação.

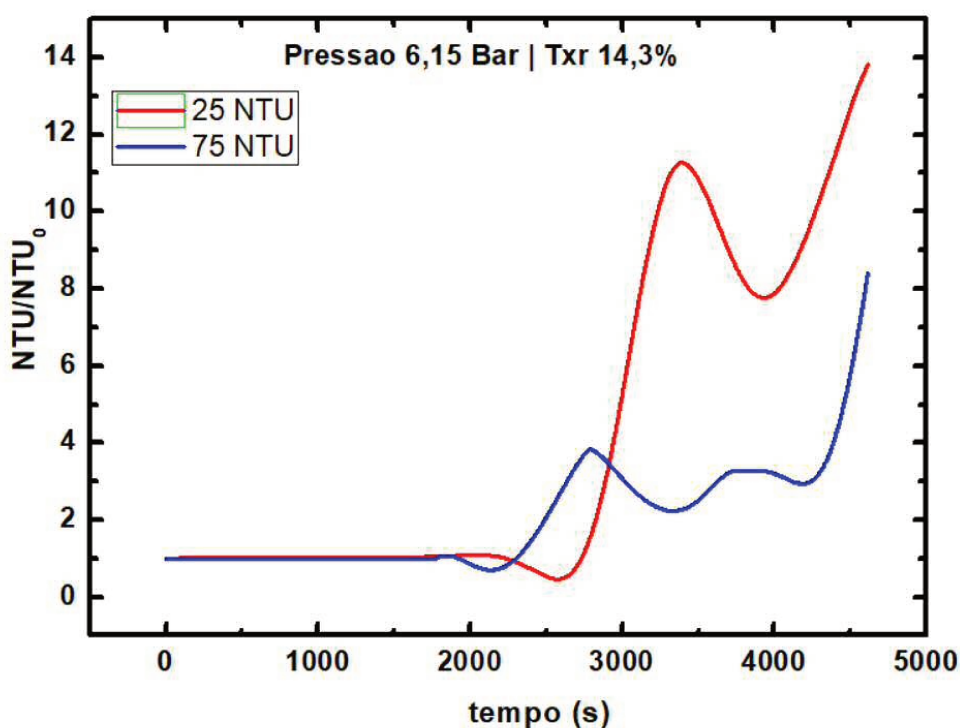


Figura 40. Perfil do comportamento dos valores de Turbidez (normalizada) obtidos no processo de FAD em função do tempo (s), considerando diferentes concentrações de efluentes preparados (25 e 75 NTU), sob condições operacionais previamente ajustadas em: Pressão de saturação: 6,15 bar e Taxa de reciclo: 14,3%.

Fonte: O Autor

Observando a Figura 40, nota-se que os ensaios efetuados a 75 NTU e 25 NTU, ambas apresentaram comportamentos semelhantes quanto a estabilidade, findados nos intervalos tempo de 1900 s e 2250 s, respectivamente.

Comparativamente ao ponto central (NTU=50 / Txr =15% / P= 6,50 bar), é possível observar que ambos os ensaios apresentaram comportamentos semelhantes entre si, no entanto, no ensaio com 75 NTU nota-se ocorrência de desacoplamento iniciado em aproximadamente 2300 s, posterior a diluição seguido de rápido reacoplamento, em torno de 2800 s, em decorrência da maior massa e, conseqüentemente, redimensionamento dos flóculos (observado também pelo menor desacoplamento na região anterior. Entre os picos de turbidez (2300 s e 4200 s), embora sejam observadas duas séries de reacoplamentos com o mesmo intervalo de tempo (500

s), percebe-se que a segunda, apresentou menor intensidade, comparada ao primeiro. Ainda no intervalo de tempo 4000 s – 4200 s, ambos os ensaios com 25 e 75 NTUs apresentaram comportamentos semelhantes de instabilidade, observado pela elevação dos índices de turbidez, provavelmente devido à perda definitiva das interações B/P.

Quanto ao ensaio de 25 NTU, nota-se o mesmo efeito consequente do desacoplamento ocasionado posterior a diluição, no entanto, neste ensaio houve maior estabilidade, comparado ao ensaio de 75 NTU, com uma diferença superior de 450 s. A partir das equações de regressão linear aplicada no processo de desacoplamento obtido no intervalo de 2700 s a 3300 s, apresentou uma velocidade de $1,35 \times 10^{-2} \text{ NTU.s}^{-1}$ de pseudo ordem zero, uma vez que a condição do sistema nesta região é praticamente constante. O potencial de reacoplamento observado no intervalo de tempo de 3300 s até 3900 s apresentou uma velocidade de $-6,18 \times 10^{-3} \text{ NTU.s}^{-1}$, sendo esta inferior à região de desacoplamento, condição pela qual permite supor que a velocidade do escoamento do fluxo sobrepõe a força de sedimentação. Tal fenômeno hidrodinâmico mostra que o arraste dos flóculos ocasionados na região superior do flotador, passam a exercer uma ligeira influência, embora superior, comparada à pressão do sistema (Figura 41), ou seja, a região de acoplamento é composta por uma fase de transição de velocidades (pseudo ordem zero – 1ª ordem).

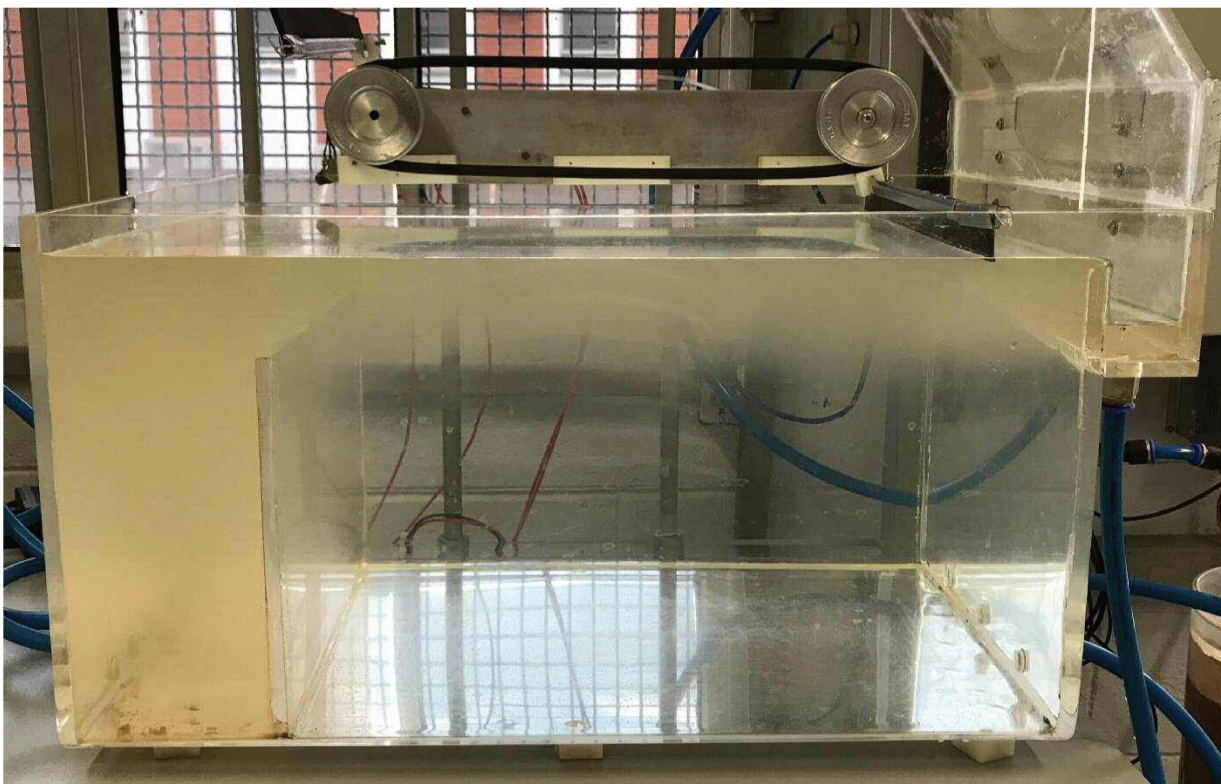


Figura 41. Imagem do flotador em funcionamento durante ensaio realizado considerando as condições operacionais do protótipo previamente ajustadas em Turbidez: 25 NTU, Pressão: 6,15 bar e Taxa de reciclo: 14,3%.

Fonte: O Autor

A Figura 42 ilustra o comportamento do flóculo em função das condições hidrodinâmicas da zona de flotação em função do arraste.

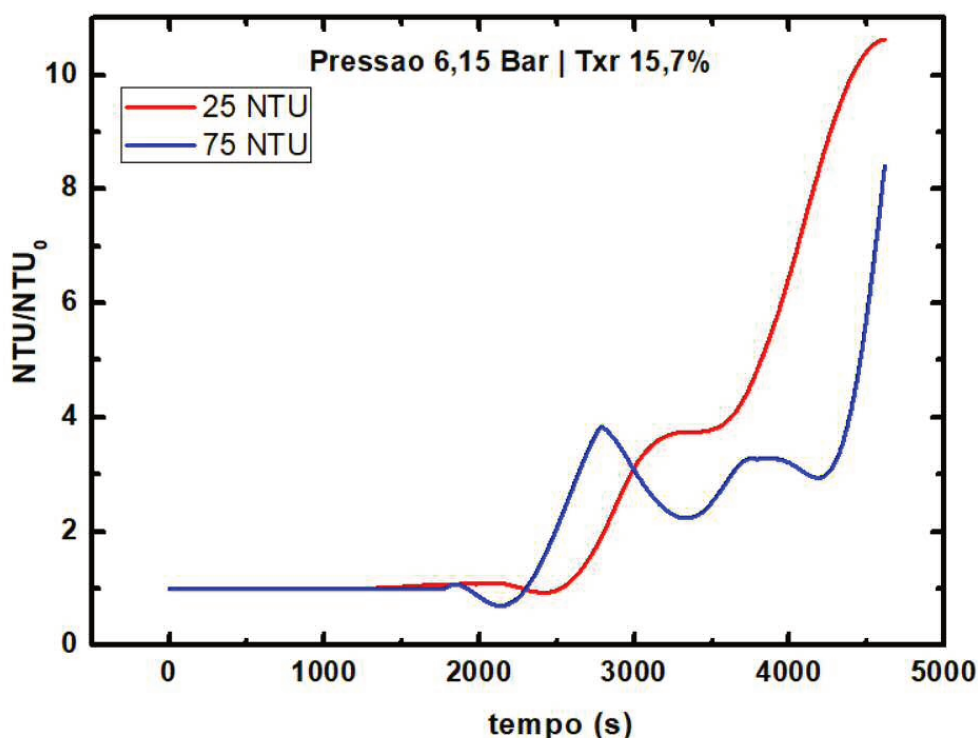


Figura 42. Perfil do comportamento dos valores de Turbidez (normalizada) obtidos no processo de FAD em função do tempo (s), considerando diferentes concentrações de efluentes preparados (25 e 75 NTU), sob condições operacionais previamente ajustadas em: Pressão de saturação: 6,15 bar e Taxa de reciclo: 15,7%.

Fonte: O autor

Como observado na Figura 42, nota-se que o aumento da taxa de reciclo não ocasionou significativa alteração no índice de turbidez do ensaio realizado a 75 NTU, propondo a independência da concentração de sólidos (flóculos), com a vazão de água saturada injetada.

No entanto, analisando também comparativamente (Figura 40 e Figura 42), os resultados apresentados nos ensaios com 25 NTU e 6,15 bar, com taxas de reciclos da ordem de 14,3% e 15,7%, respectivamente, é possível observar que a velocidade de desacoplamento é inferior devido à taxa de reciclo, sugerindo, que este efeito está diretamente relacionado à vazão de água saturada (maior concentração de microbolhas),

indicando um aumento de área na interação bolha-partícula, uma vez que o dimensionamento das bolhas permaneceram inalteradas devido a manutenção da pressão de saturação.

O registro fotográfico do experimento efetuado com 15,7% de fração de reciclo de água saturada produzida com 6,15 bar, ilustrado na Figura 43, para este perfil de efluente (75 NTU), mostra que na fase inicial do ensaio, houve decantação parcial dos sólidos suspensos, resultante da instabilidade do processo de separação ocorrida na região transitória entre a zona de contato e a zona de separação.

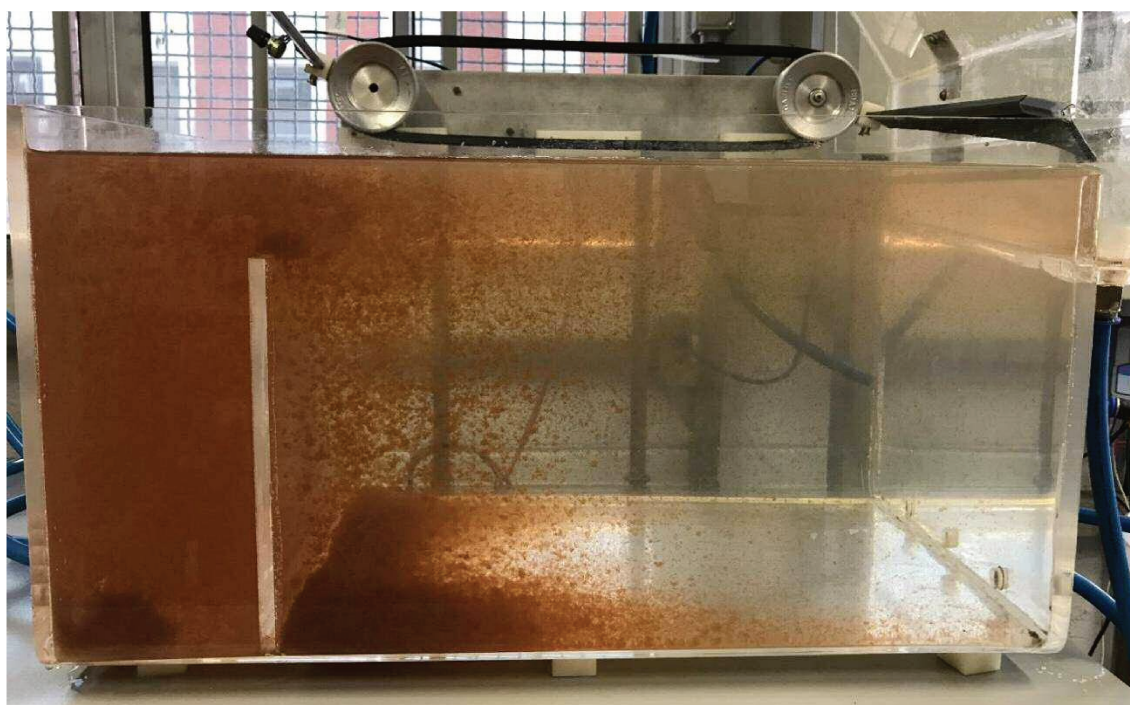


Figura 43. Imagem do flotador em funcionamento durante ensaio realizado considerando as condições operacionais do protótipo previamente ajustadas em Turbidez: 75 NTU, Pressão: 6,15 bar e Taxa de reciclo: 15,7%.

Fonte: O Autor

No período inicial do processo de agregação bolha-partícula, a ocupação prévia ou “preenchimento” total da zona de contato com água saturada, é fundamental para que haja uma “condição mínima” quanto a concentração de microbolhas para possibilitar as linhas de fluxo ao redor do floco e demais partículas suspensas, isto é, o condicionamento da zona de contato para a admissão de efluente (floculado) de modo

que a probabilidade de contato físico entre as bolhas e partículas seja maior, estabelecendo a eficácia inicial do processo.

A Figura 44 apresenta o comportamento dinâmico do processo de FAD durante os ensaios adotados com diferentes concentrações iniciais de turbidez, fração de 14,3 % de reciclo de água saturada, produzida com 6,85 bar.

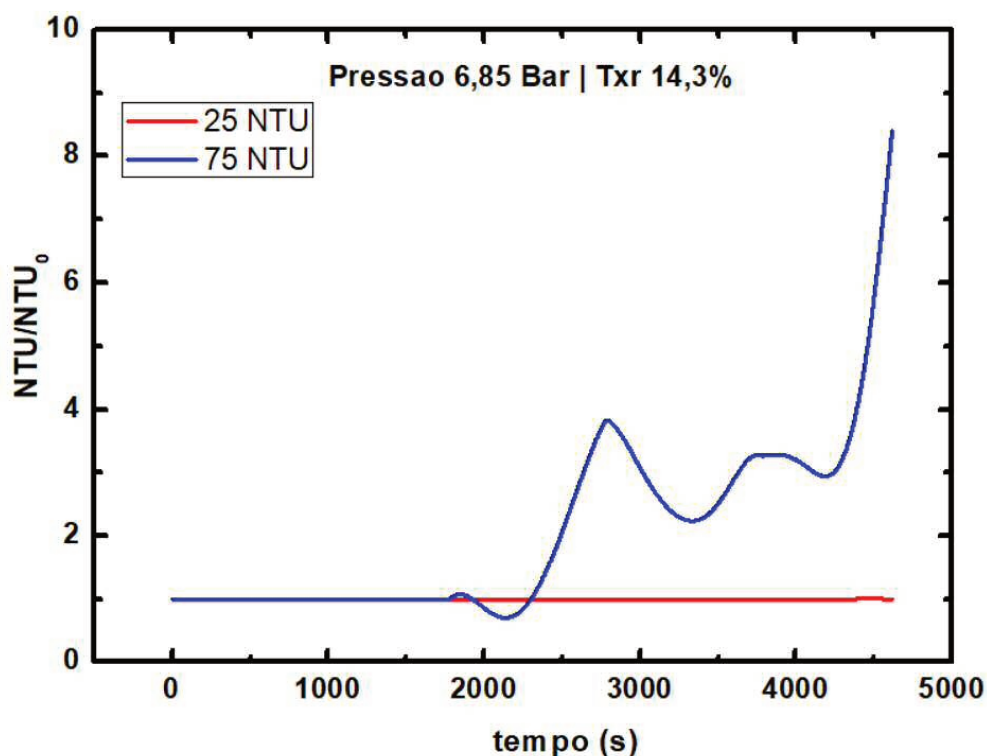


Figura 44. Perfil do comportamento dos valores de Turbidez (normalizada) obtidos no processo de FAD em função do tempo (s), considerando diferentes concentrações de efluentes preparados (25 e 75 NTU), sob condições operacionais previamente ajustadas em: Pressão de saturação: 6,85 bar e Taxa de reciclo: 14,3%.

Fonte: O Autor

Comparativamente, os resultados apresentados nas Figuras 44 e 46, mostram também que não houveram significativas diferenças entre as curvas de 75 NTU, obtidas em diferentes condições, 6,15 bar/ 15,7% Txr e 6,85 bar/ 14,3% Txr, respectivamente. Diante deste cenário, a resposta da turbidez mensurada na etapa pós flotação, torna evidente a influência da pressão de saturação nas características qualitativas de

microbolhas geradas, isto porque o aumento da pressão, de 6,15 bar para 6,85 bar, ajustada na célula de saturação torna-se determinante para a quantidade de microbolhas geradas, apesar da redução da vazão (da taxa de reciclo) de 15,7% para 14,3%. Nesta mesma curva é possível observar que as interações, resultantes das colisões bolha-partícula, ocorreram praticamente nas mesmas regiões da variável “tempo”, iniciado pelo desacoplamento observado em aproximadamente 2300 s, posterior a diluição seguido de rápido reacoplamento, em torno de 2800 s, em virtude da maior densidade, conseqüentemente, redimensionamento dos flóculos (observado também pelo menor desacoplamento na região anterior).

Ainda é possível observar nesta Figura 44 que, nestas condições experimentais, o ensaio realizado com 25 NTU apresentou plena estabilidade no processo de flotação, mantendo-se praticamente inalterada, na faixa de 1,1 NTU, do início ao final da marcha analítica. Este comportamento sugere que a efetividade do processo de separação sólido-líquido para este efluente com baixo teor de sólidos (25 NTU), foi estabelecido desde a zona de contato, pelo mecanismo de *Entrapment* ou interação bolha-partícula de “aprisionamento”, que nesta condição, manteve-se absolutamente estável, até a região extrema da zona de separação ou saída do flotador.

No registro fotográfico do tanque de flotação apresentado na Figura 45, diante das condições estabelecidas para este ensaio, pressão de 6,85 bar, T_{rx} 14,3% e 25 NTU, foi nitidamente observada a estabilidade do processo de flotação em decorrência da maior concentração de microbolhas presentes na zona de contato exercendo o efeito mecânico de *Entrapment* nos flóculos de menores densidades (baixa concentração de sólidos) e expansivos, típicos de efluentes coagulados quimicamente com biopolímeros a base de tanino.

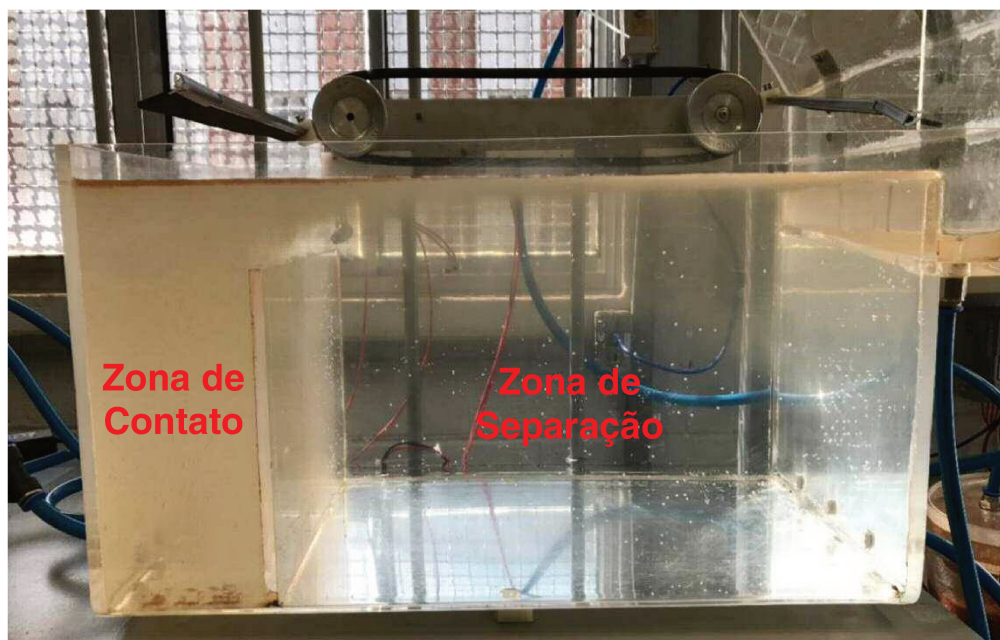


Figura 45. Imagem do flotador em funcionamento durante ensaio realizado considerando as condições operacionais do protótipo previamente ajustadas em Turbidez: 25 NTU, Pressão: 6,85 bar e Taxa de reciclo: 14,3%.

Fonte: O Autor.

A Figura 45 apresenta o comportamento dinâmico do processo de FAD durante os ensaios adotados com diferentes concentrações iniciais de turbidez, fração de 15,7 % de reciclo de água saturada, com injeção de água saturada produzida com 6,85 bar.

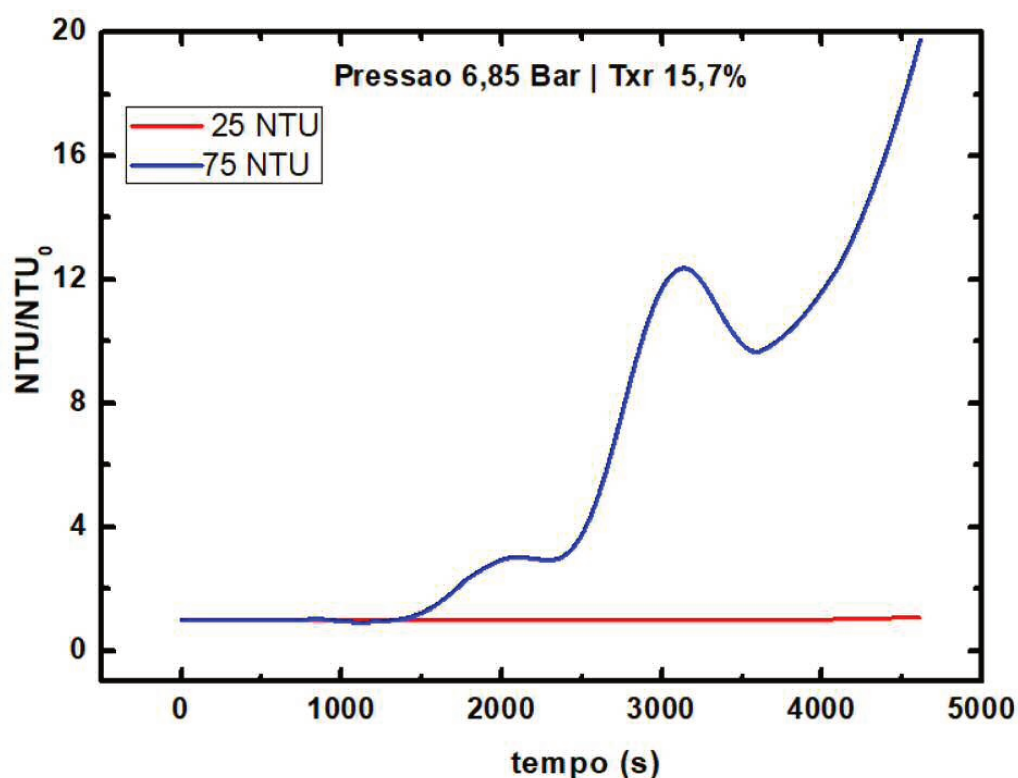


Figura 46. Perfil do comportamento dos valores de Turbidez (normalizada) obtidos no processo de FAD em função do tempo (s), considerando diferentes concentrações de efluentes preparados (25 e 75 NTU), sob condições operacionais previamente ajustadas em: Pressão de saturação: 6,85 bar e Taxa de reciclo: 15,7%.

Fonte: O Autor

O gráfico exposto na Figura 46, constata que o ensaio de FAD realizado com efluente preparado a 25 NTU empregando 15,7% de TXr, apresenta exatamente o mesmo comportamento hidrodinâmico do ensaio também efetuado com 25 NTU, porém com TXr de 14,3 %, conforme exibido na Figura 44. Diante desta estabilidade observada pela manutenção do índice de turbidez na ordem de 1,1 NTU pelo período integral dos ensaios, em ambas condições de fração de reciclo (14,3% e 15,7%), preconiza que o estabelecimento do mecanismo de interação bolha-partícula tipo *Entrapment*, para este efluente com baixo teor de sólidos (25 NTU), é regido pela influência das características qualitativas das microbolhas produzidas sob condição mínima de 6,85 bar de saturação.

Já no experimento com efluente preparado a 75 NTU, nestas mesmas condições, a estabilidade inicial foi mantida somente até 990 s, a partir deste ponto (tempo) é possível observar a gradativa elevação da turbidez, certamente influenciada pelos mecanismos de interações de desacoplamentos, observados nos intervalos de 1280 s a 2110 s, de 2320 s a 3082 s e, a partir de 3590 s, neste último, provavelmente devido à perda definitiva das interações bolha-partícula ocorridas neste estágio, tendo por consequência a sedimentação de uma pequena quantidade de flóculos, como mostra a Figura 47.

Não obstante, ainda neste hiato (1280 s a 3082 s), também são observadas duas séries distintas de decaimento da turbidez, a primeira (de 2110 s e 2320 s), apresentou menor intensidade, comparada ao segundo intervalo (3082 s a 3590 s) possivelmente influenciados pelo mecanismo de reacoplamento proporcionado pelas forças resultantes do efeito de condução ou carregamento das partículas pelas microbolhas remanescentes na zona de separação.

Comparativamente, as Figuras 44 e 46 mostram que, quando o sistema opera com 6,85 bar de pressão com turbidez ajustada em 75 NTU, a interação B/P é menor, ocorre uma elevada perturbação no sistema e como consequência, a manutenção da turbidez é diretamente afetada, uma vez que este fato pode ser evidenciado pela elevação dos valores de NTU em função do tempo. O desacoplamento das partículas a 75 NTU (ainda Figura 44 e 46) é acentuado, com o aumento da taxa de reciclo, o mecanismo é possivelmente assegurado pela dispersão entre as colisões partícula-partícula (P/P), pois neste caso, o efeito de carregamento é reduzido. É possível observar este efeito observando as Figuras 45 e 47, que mostram respectivamente, o tanque de flotação, considerando os ensaios da turbidez em 75 NTU, pressão de 6,85 bar e T_{rx} em 14,3% e 15,7%.

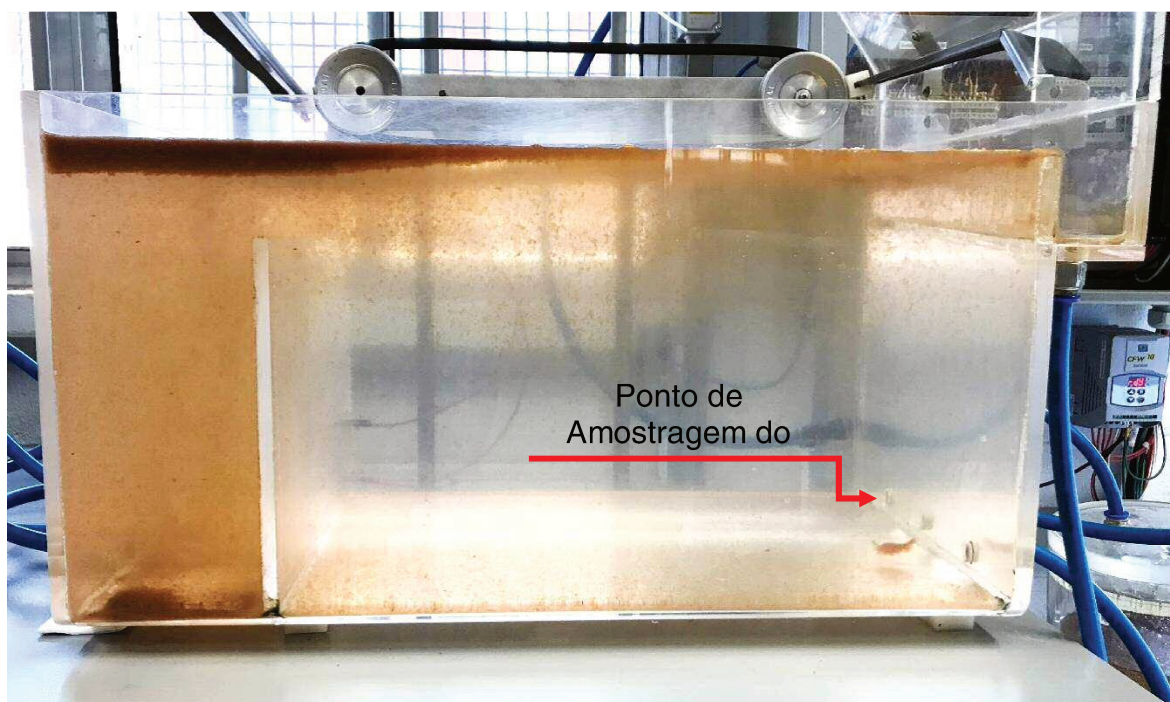


Figura 47. Imagem do flotador em funcionamento durante ensaio realizado considerando as condições operacionais do protótipo previamente ajustadas em Turbidez: 75 NTU, Pressão: 6,85 bar e Taxa de reciclo: 15,7%.

Fonte: O Autor

A partir da Figura 47, do ensaio com efluente preparado a 75 NTU, é possível observar a pequena quantidade de flóculos não flotados. Isto também pode ser analisado na Figura 46, a partir do tempo 3590 s pela gradativa elevação na medição da turbidez, ocasionados pela sedimentação de parte dos flóculos suspensos e arrastados para o ponto de amostragem do turbidímetro *online*, em destaque.

A Figura 48 apresenta a análise comparativa dos ensaios por FAD de 25 NTU com variação da Pressão e Taxa de Retorno constante de 14,3%

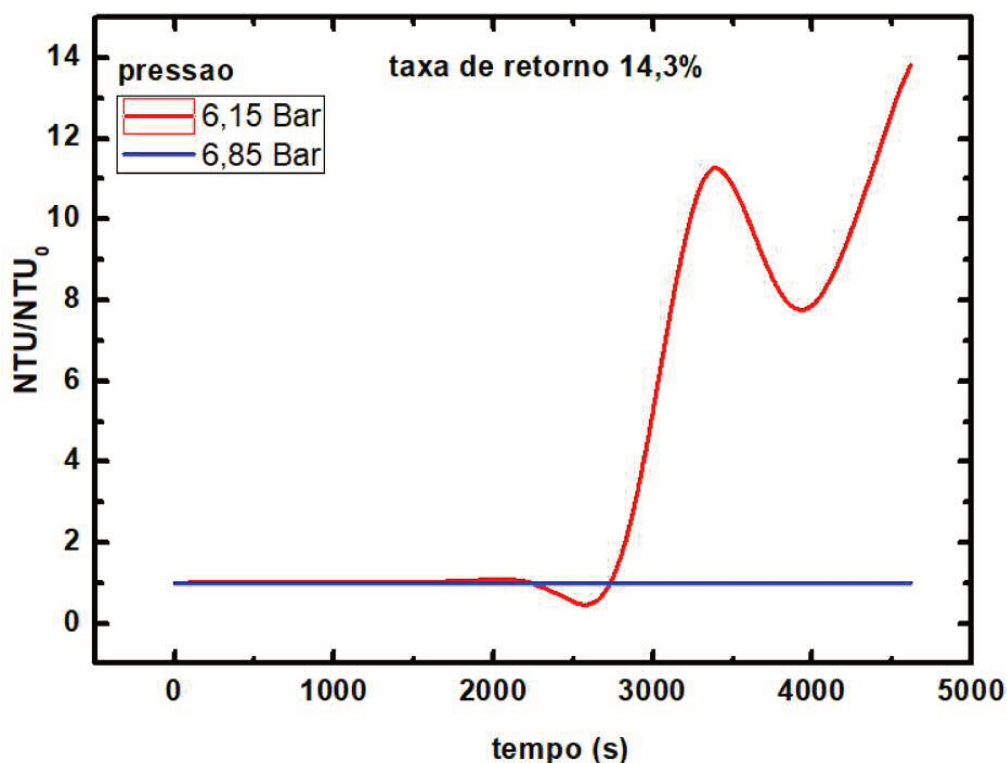


Figura 48. Perfil do comportamento dos valores de Turbidez (normalizada) obtidos no processo de FAD em função do tempo (s), considerando diferentes pressões de saturação (6,15 e 6,85 bar), sob condições operacionais previamente ajustadas em: 25 NTU (concentração de efluente preparado) e Taxa de reciclo: 14,3%.

Fonte: O Autor

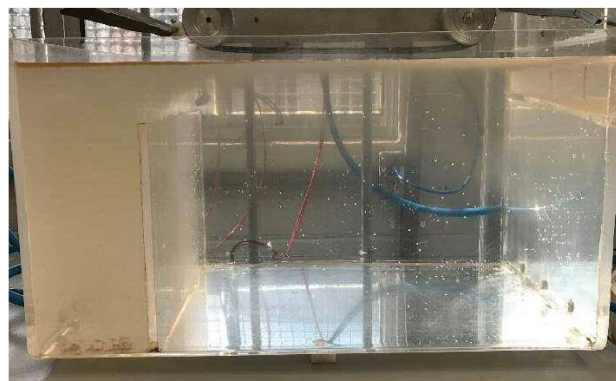
Diante do exposto na Figura 48, o desempenho dinâmico da turbidez nas condições (25 NTU / 14,3% de TXr / 6,15 bar), inicialmente apresentou oscilação e decaimento por 540 s, a partir de T=2200 s até o T=2740 s, atingindo índice da ordem de 0,4 NTU. A contar deste ponto, também é possível constatar a ascensão da turbidez atingindo 11,4 NTU em T=3405 s, possivelmente ocasionada pela combinação das interações (B/P) existentes entre as características físicas das microbolhas geradas nesta condição (6,15 bar) e a configuração dos flóculos formados nesta circunstância experimental (25 NTU), semelhante ao perfil apresentado anteriormente na Figura 40. Tais inter-relações B/P observadas neste estágio, são decorrentes da natureza quali e quantitativa das microbolhas produzidas em escala inferior de pressão (6,15 bar) ajustada na célula de saturação, nestas condições, são geradas menores quantidades de bolhas

de maiores dimensões e, conseqüentemente, mais favoráveis ao “carregamento” de aglomerados ou flóculos mais volumosos. Como pode ser observada na Figura 49(a), o ensaio de FAD (25 NTU; 6,15 bar; T_{rx} 14,3%), ilustrando o comportamento do processo de separação sólido-líquido com flóculos menores e inexpandíveis. Ainda nesta mesma condição, pode-se observar no intervalo de T=3405 s a T=3960, o mecanismo de reacoplamento B/P, em virtude do redimensionamento dos sólidos aglomerados na zona de separação (maior densidade e superfície de contato) seguido, a partir de T=3960, a elevação gradativa da turbidez, certamente ocasionada pela absoluta anulação das interações bolha-partícula ocorridas neste estágio.

Na condição experimental (25 NTU; 6,85 bar; T_{rx} 14,3%) é possível observar a manutenção do índice de turbidez na ordem de 1,1 NTU pelo período integral dos monitoramentos analíticos. Em face desta estabilidade averiguada e ilustrada na Figura 49(b), sugere-se que o encetamento do mecanismo de interação B/P é do tipo *Entrapment*, influenciado pela maior concentração e variação de tamanho (menor) de microbolhas geradas com 6,85 bar de saturação.



(a) 6,15 bar



(b) 6,85 bar

Figura 49. Imagens do flotador em funcionamento durante ensaios realizados considerando as condições operacionais do protótipo previamente ajustadas em Turbidez: 25 NTU, Taxa de reciclo: 14,3% e Pressão de saturação de (a) 6,15 bar e (b) 6,85 bar.

Fonte: O Autor

Comparando as Figuras 49(a) e 49(b), é possível observar os diferentes comportamento do processo de separação sólido-líquido para o mesmo tipo de efluente,

com baixo teor de sólidos (25 NTU), mas com condições diferentes. De modo específico, na zona de contato da Figura 49(a), com a injeção de microbolhas produzidas com 6,15 bar, o desempenho de processo a partir da zona de contato é notadamente ineficaz, permanecendo assim até a zona de separação. Entretanto, o ensaio mostrado na Figura 49(b), com a injeção de microbolhas produzidas com 6,85 bar, desde a zona de contato é possível observar a formação de sólidos flotados e, posteriormente, a nítida e estável camada de sólidos de menor espessura, localizada na região superior da zona de separação.

Este cenário fundamenta que quanto menor a pressão de saturação, maior a distribuição de tamanho das bolhas e menor a proporção do número de bolhas e que um aumento na pressão de saturação até 6,85 bar ocasiona um aumento na eficiência do processo de flotação, diminuindo o tamanho das bolhas e o tamanho crítico dos flóculos. Por fim, sugere-se que quanto maior a concentração em volume das bolhas, maior a efetividade do processo de separação via FAD sobre todos os tamanhos de partículas (Han, Kim e Kim, 2007)

A Figura 50 ilustra o comportamento da turbidez normalizada de 25 NTU com variação da Pressão e Taxa de retorno constante de 15,7%

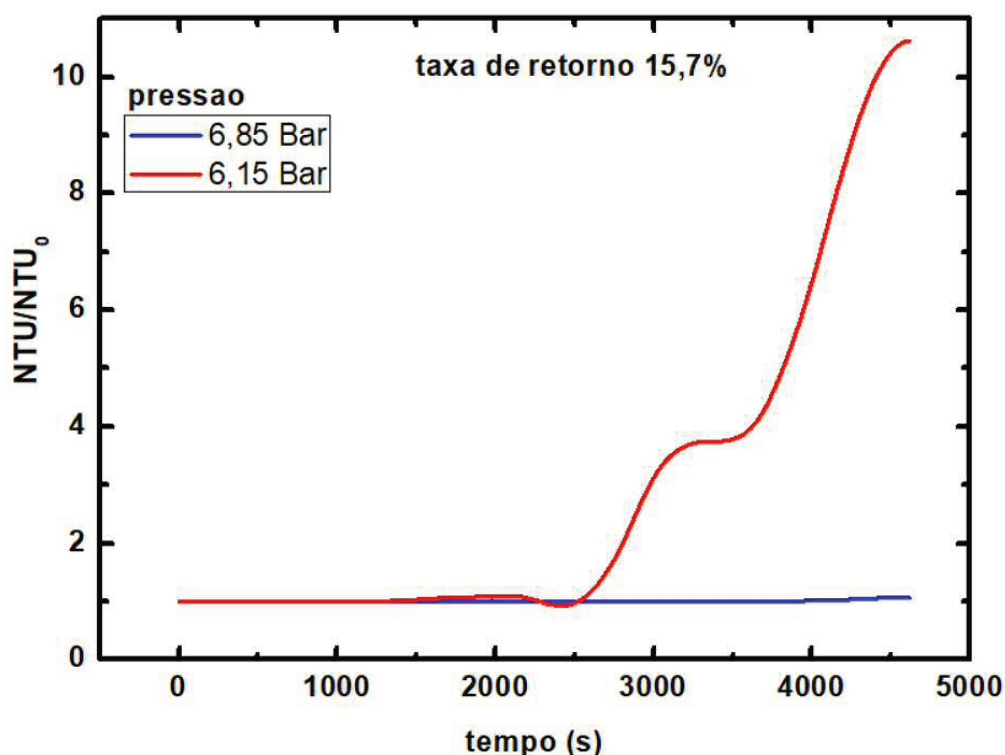


Figura 50. Perfil do comportamento dos valores de Turbidez (normalizada) obtidos no processo de FAD em função do tempo (s), considerando diferentes pressões de saturação (6,15 e 6,85 bar), sob condições operacionais previamente ajustadas em: 25 NTU (concentração de efluente preparado) e Taxa de reciclo: 15,7%.

Fonte: O Autor

O desempenho hidrodinâmico ilustrado na Figura 50, mostra a influência da vazão de água saturada ou taxa de reciclo no processo de FAD, como pode ser inicialmente observado no ensaio realizado com T_{rx} 15,7% ajustado para a injeção de microbolhas geradas com 6,15 bar. Nestas condições, é possível constatar que a vazão de água saturada, ajustada pelo aumento taxa de reciclo, de 14,3% para 15,7%, favoreceu consideravelmente a eficiência de captura, fundamental para o processo de separação sólido-líquido via FAD, como exposto somente a partir de T= 2510 s até 3190 s, pela ligeira instabilidade da turbidez notada pela projeção de 1,1 NTU para 3,7 NTU e, seguidamente mantida estável até 3505 s. Segundo Derjaguin e Dukhin (1960), a eficiência de captura de uma bolha e uma partícula, pode ser definida pelo produto da

eficiência atingida na colisão, da eficiência obtida no acoplamento e a eficiência na estabilidade do agregado bolha-partícula.

No experimento ajustado em 25 NTU; 6,85 bar; T_{rx} 15,7%, é possível observar a manutenção do índice de turbidez na ordem de 1,1 NTU pelo período completo dos ensaios de FAD. A Figura 51 ilustra o comportamento da turbidez normalizada de 25 NTU com variação da Taxa de Retorno e Pressão constante de 6,15 bar.

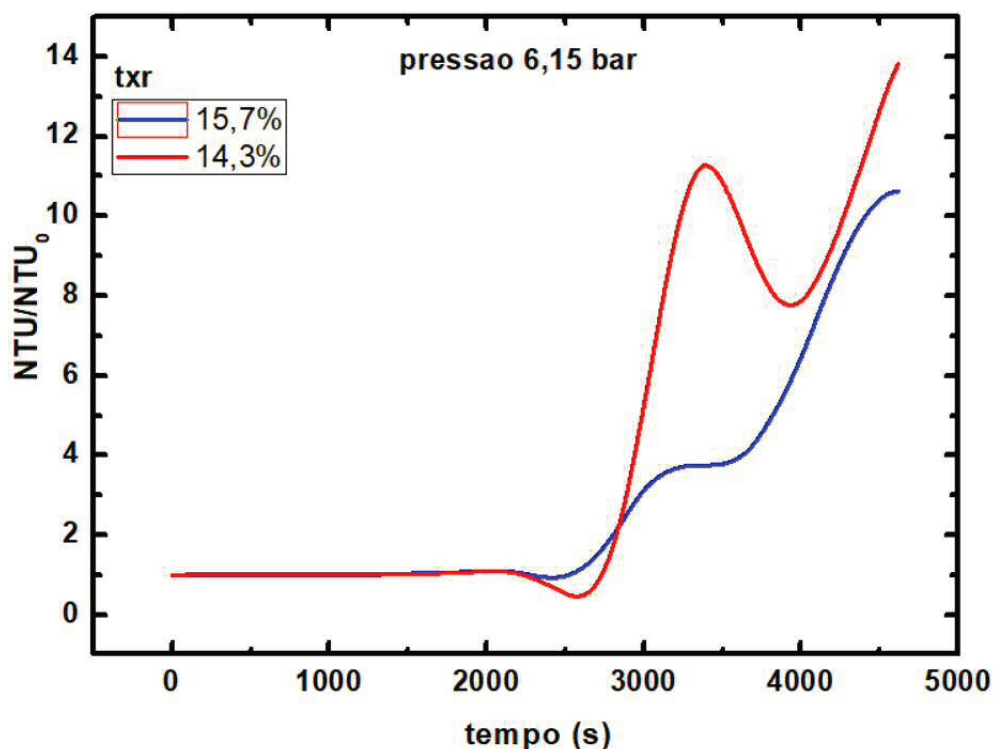


Figura 51. Perfil do comportamento dos valores de Turbidez (normalizada) obtidos no processo de FAD em função do tempo (s), considerando diferentes taxas de reciclo (14,3% e 15,7%), sob condições operacionais previamente ajustadas em: 25 NTU (concentração de efluente preparado) e Pressão de saturação: 6,15 bar.

Fonte: O Autor

A Figura 51 mostra o comportamento dinâmico da turbidez normalizada em 25 NTU com variação da T_{rx} em 14,3%, 15% e 15,7% e Pressão estabilizada em 6,15 bar. A começar pela condição experimental ajustada em T_{rx}=14,3%, é possível observar a conservação da turbidez em 1,0 NTU até T=2410 s, seguido da oscilação até T=2605 s, atingindo 0,4 NTU. Deste ponto em diante, percebe-se até T=3408 s, a elevação da

turbidez, atingindo 11,4 NTU, certamente ocasionada pelo desacoplamento B/P momentâneo ocorrido neste estágio. Ainda nesta curva é possível observar, no intervalo de $T=3408$ s a $T=3965$, o abrupto decaimento da turbidez até 7,8 NTU, seguramente pelo efeito do mecanismo de reacoplamento notado na zona de separação. Prosseguindo, a contar de $T=3965$, verifica-se a elevação gradativa do índice de turbidez, provavelmente devido à perda definitiva das interações B/P.

Na condição experimental, T_{xr} 15,7%, é possível observar a estabilidade inicialmente mantida em 1,0 NTU até $T=2320$ s, a partir deste ponto, é possível visualizar duas séries distintas de ascensão da turbidez, a primeira de $T=2505$ s (1,0 NTU) até $T=3203$ s (3,8 NTU), apresentou menor intensidade, comparada ao segundo intervalo de $T=3505$ s (3,8 NTU) até $T=4690$ (10,7 NTU) possivelmente influenciados pela vazão de injeção de água saturada ($T_{xr}=15,7\%$) combinada a qualidade das microbolhas produzidas sob condição de pressão estabilizada em 6,15 bar, sugerindo a influência das características das bolhas geradas e a taxa de reciclo, ao mecanismo de desacoplamento. Segundo Ralston (1999), partículas acoplada à bolha pode apenas ser desacoplada deste estado se for fornecida energia cinética suficiente para igualar ou superar a energia de acoplamento

A Figura 52 mostra o comportamento da turbidez normalizada em 25 NTU com variação da T_{xr} em 14,3%, 15% e 15,7% e Pressão constante em 6,85 bar

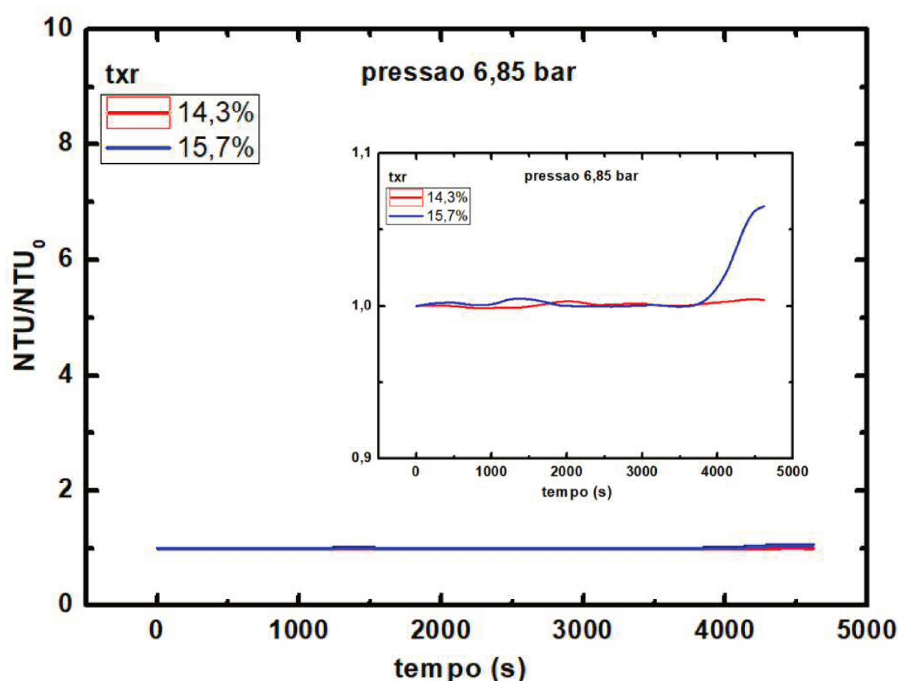
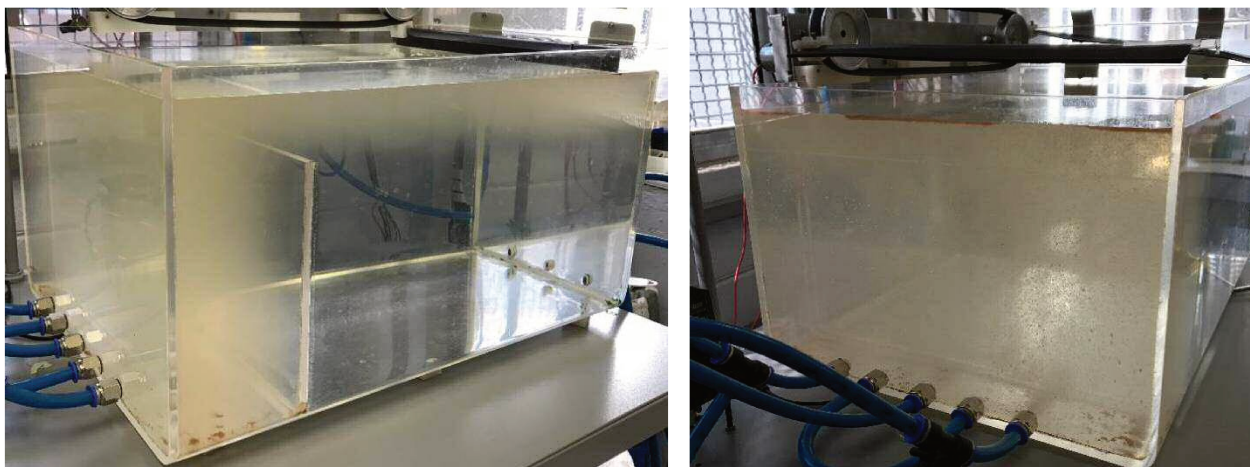


Figura 52. Perfil do comportamento dos valores de Turbidez (normalizada) obtidos no processo de FAD em função do tempo (s), considerando diferentes taxas de reciclo (14,3% e 15,7%), sob condições operacionais previamente ajustadas em: 25 NTU (concentração de efluente preparado) e Pressão de saturação: 6,18 bar.

Fonte: O Autor

A partir do gráfico exposto na Figura 52 é possível observar a similaridade entre os ensaios realizados com $T_{xr}=14,3\%$ e $T_{xr}=15,7\%$, ambos pelo período completo dos ensaios de FAD mantiveram índices de turbidez inalterados, na ordem de 1,0 NTU. Tais eficiências da FAD desenvolvidas nestes experimentos, expostos na Figura 53, sugerem que a condição de pressão estabilizada na célula de saturação (6,85 bar) para a geração de bolhas, foi determinante para a estabilidade do processo de separação sólido-líquido. De acordo com alguns autores, tais como Han, Kim e Kim (2007) e Aisse *et al.* (2001), o aumento na pressão de saturação favorece a efetividade do processo de flotação pois, nestas condições, ocorre a diminuição do tamanho das bolhas e, conseqüentemente, o aumento da concentração volumétrica das bolhas em relação à quantidade de partículas ou aglomerados.



(a)

(b)

Figura 53. Imagens do flotador em funcionamento durante ensaios realizados considerando as condições operacionais do protótipo previamente ajustadas em Turbidez: 25 NTU, Pressão de saturação: 6,85 bar e Taxa de reciclo: (a) 14,3% e (b) 15,7%.

Fonte: O autor

Diante das Figuras 53(a) e 53(b), é possível observar o efeito “nuvem” de microbolhas localizadas nas zonas de contatos, nestas condições, representando exemplos onde a probabilidade de colisão (basicamente controlado pela hidrodinâmica do sistema), entre a microbolha e a partícula, é maior de acordo com o aumento do volume de microbolhas injetadas no flotador.

A Figura 54 ilustra o efeito da variação (percentual) em relação ao Ponto Central para os diferentes ensaios de FAD com turbidez ajustada em 25 NTU.

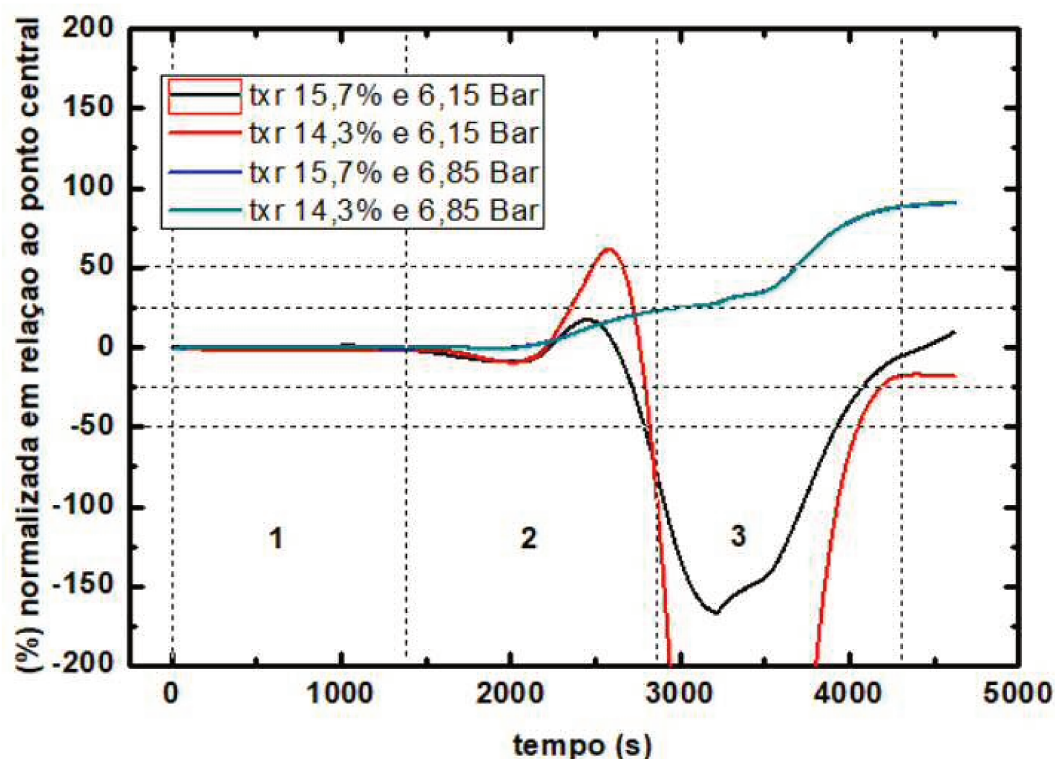


Figura 54. Efeito da variação (%) normalizada em relação ao Ponto Central para as diferentes condições de ensaios realizados com efluente preparado (25 NTU) em função do tempo. As regiões 1, 2 e 3 demarcadas são intervalos de tempo correspondente ao TDH.

Fonte: O Autor

A Figura 54 apresenta o efeito da variação percentual em relação ao ponto central (6,5 bar; Txr 15%) para os diferentes ensaios de FAD com turbidez ajustada em 25 NTU. As regiões 1, 2 e 3 são intervalos de TDH ou tempo de detenção hidráulica, equivalente ao intervalo de 1440 s. A desestabilização do sistema nos processos bolha-partícula (B/P) é observado em função do tempo que foi dividido em quadrantes que representa o número de TDH, representando assim também o número de vezes que o sistema permanece em equilíbrio.

Considerando que a efetividade do processo de FAD seja basicamente determinada pela “condição ideal” ou, pela circunstância experimental que apresente, de maneira estável, os menores índices de remoção de turbidez, atrelada à menor taxa de reciclo de água tratada, concomitantemente à menor pressão admitida na célula de saturação, a Figura 54 apresenta a estabilidade do processo de FAD em função do TDH durante os ensaios com 25 NTU, para efeito de comparação entre os diferentes ensaios

foram considerados os valores normalizados da turbidez em relação aos valores do ponto central.

O gráfico ilustrado Figura 54, mostra que a pretendida situação de tratabilidade via FAD, encontra-se naquela condição que permaneça equilibrada, ou estável, pelo maior espaço de tempo (TDH) mantendo-se próxima do percentual igual a zero. Logo, o desequilíbrio é evidenciado a partir do momento em que as condições resultam no afastamento da região percentual do zero, em função do tempo.

Diante do exposto, os ensaios condicionados em $T_{xr}=15,7\%$ e 6,15 bar, em relação ao ponto central (50 NTU / 6,5 bar / $T_{xr}=15\%$), mantiveram estabilidade inicial até o $T=1710$ s, a partir deste ponto, é possível observar a acentuada oscilação no período de $T=2480$ s até $T=4500$ s, seguramente influenciada pelos mecanismos de interações de desacoplamentos, observados neste intervalo de 2020 s ou 1,4 ciclo de TDH. A partir de $T=4500$, nota-se o reposicionamento para a região do equilíbrio, certamente pelo efeito da interação B/P via mecanismo de reacoplamento.

Equitativamente, em relação ao ponto central (50 NTU / 6,5 bar / $T_{xr}=15\%$), os ensaios realizados sob condições de $T_{xr}=15,7\%$ / 6,85 bar e $T_{xr}=14,3\%$ / 6,85 bar apresentaram similaridade em seus resultados e, conseqüentemente, também nos comportamentos observados a partir de $T=2200$ s, onde iniciou-se o período de instabilidade e distanciamento gradativo da região do equilíbrio. Ainda nestes mesmos ensaios é possível constatar que os resultados obtidos nestas condições, após iniciada a instabilidade ($T=2200$ s) não retomaram o posicionamento inicial, ou seja, a recomposição para a região de equilíbrio ou próxima de zero.

Os ensaios ajustados em $T_{xr}=14,3\%$ e 6,15 bar, mantiveram estabilidade até o $T=1600$ s e, a partir deste ponto, é possível observar sucessivas oscilação de naturezas distintas, como podem ser observados nos intervalos de $T=2050$ s até $T=2590$ s e no abrupto deslocamento no período de $T=2590$ s até $T=4600$ s, totalizando 2550 s de instabilidade, ou aproximadamente 1,8 ciclo de TDH, comparado ao ponto central. Apesar da retomada dos resultados de FAD, sentido a região do equilíbrio observado em $T=4600$ s, o realocamento foi estabilizado em 20% fora da região ideal ou eixo denominado 0%

Observa-se ainda que, os resultados dos ensaios utilizando água saturada com 6,15 bar, existe uma perturbação mais acentuada e irregular quando comparada a pressão de 6,85 bar, por mais que ao fim dos ensaios de 14,3% e 15,7%, com as taxas de retorno, apresentem um sistema normalizado próximo de 10% de desestabilização do equilíbrio em relação ao ponto central. Existe um intervalo de 17 minutos que o sistema bolha-partícula possivelmente passa a ser conduzido pela dispersão partícula-partícula, no qual, as colisões promovem a elevação da turbidez, porém, o efeito de carregamento após este intervalo de tempo, volta a se estabilizar possivelmente, pela existência de bolhas remanescentes sobre a pequena quantidade de flóculos ainda existem.

A Figura 55 apresenta a análise comparativa dos ensaios de FAD desenvolvidos com efluente preparado e aferido em 75 NTU.

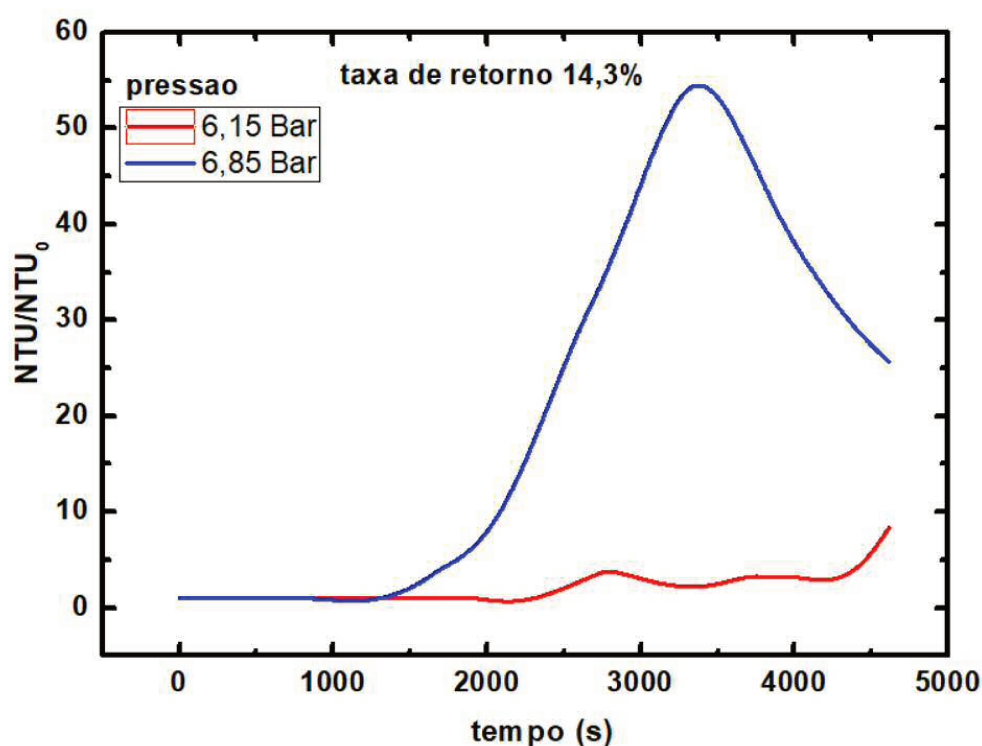


Figura 55. Perfil do comportamento dos valores de Turbidez (normalizada) obtidos no processo de FAD em função do tempo (s), considerando diferentes pressões de saturação (6,15 e 6,85 bar), sob condições operacionais previamente ajustadas em: 75 NTU (concentração de efluente preparado) e Taxa de reciclo: 14,3%.

Fonte: O Autor

A partir da Figura 55, é possível observar que os comportamentos analíticos exibidos pelos experimentos efetuados sob diferentes condições de pressão (6,15 bar e 6,85 bar) adotadas para a produção de água saturada, também foram significativamente distintos entre si. O ensaio de FAD desenvolvido com admissão de água saturada a 6,15 bar, ilustrado na Figura 56a, manteve o índice de turbidez estável, na ordem de 0,8 NTU, até o $T=2260$ s. Deste ponto em diante, a ligeira oscilação identificada no intervalo findado em $T=4470$ s, não excedeu 4,6 NTU.

Analizando também o experimento com pressão de saturação previamente ajustada em 6,85 bar, como mostra a Figura 56b, percebe-se que conservação do índice de turbidez inicial (0,8 NTU) foi mantida sob condição estável somente até o $T=1210$ s e, a partir deste ponto, no intervalo até $T=3410$ s, este ensaio apresentou ascensão da turbidez até o índice de 55 NTU. Seguidamente, esta mesma curva, do ponto $T=3410$ s em diante, demonstrou redução da turbidez até o índice de 25,8 NTU, possivelmente em decaimento gradativo, até então, finalizado pelo encerramento da marcha analítica em $T=4600$ s.

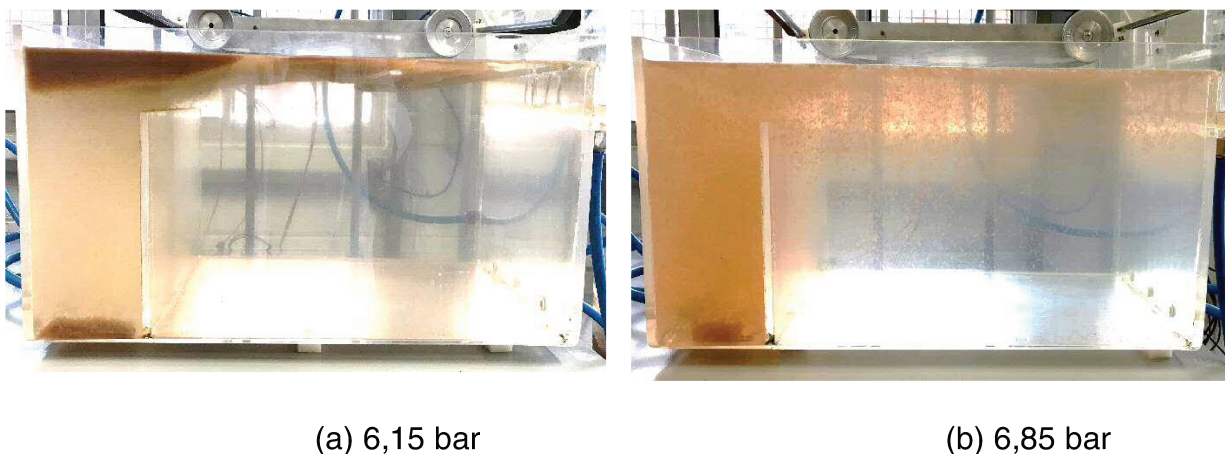


Figura 56. Imagens do flotador em funcionamento durante ensaios realizados considerando as condições operacionais do protótipo previamente ajustadas em Turbidez: 75 NTU, Taxa de reciclo: 14,3% e Pressão de saturação de (a) 6,15 bar e (b) 6,85 bar.

Fonte: O Autor

Diante do exposto, no ensaio com água saturada produzida com 6,15 bar, sugere-se que para efluentes com maiores concentrações de sólidos, em que os flóculos formados sejam maiores e mais abertos, espera-se que prevaleça a zona do mecanismo

“*entrapment*” (aprisionamento), e que as pressões de saturação na câmara de saturação quando forem menores o facilitem, uma vez nestas condições geram-se bolhas maiores e mais favoráveis ao arraste de aglomerados maiores (pois estes possuem maior quantidade de ar tornando o aglomerado menos denso).

A Figura 57 ilustra o comportamento da turbidez normalizada em 75 NTU com variação da pressão e T_{rx} constante na ordem de 15,7%.

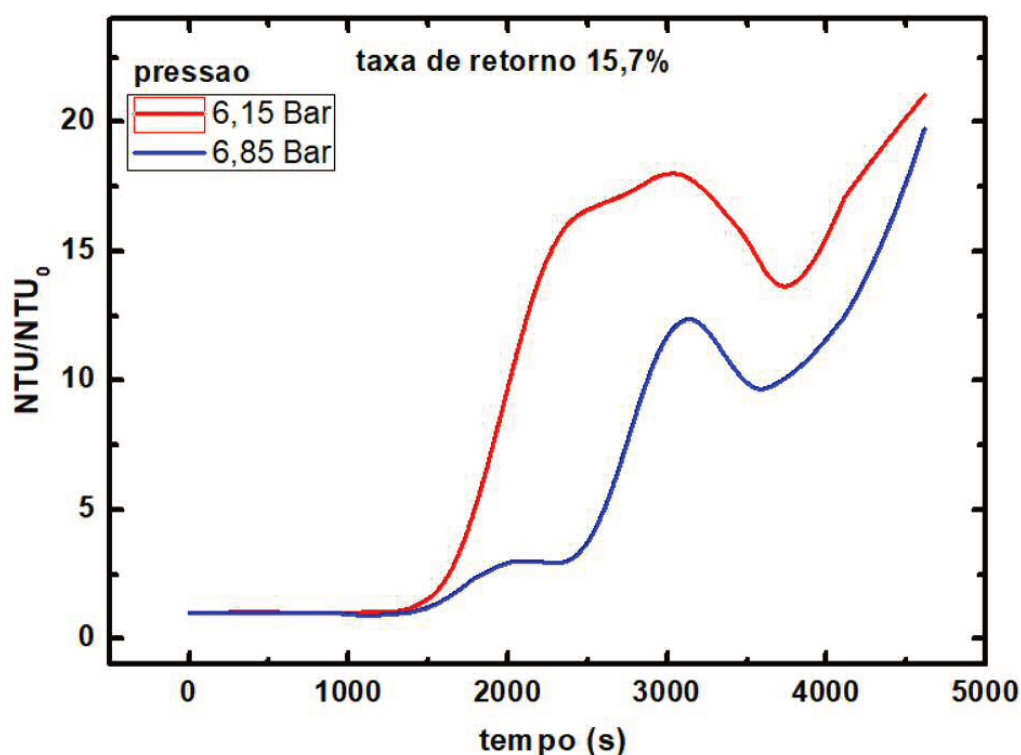


Figura 57. Perfil do comportamento dos valores de Turbidez (normalizada) obtidos no processo de FAD em função do tempo (s), considerando diferentes pressões de saturação (6,15 e 6,85 bar), sob condições operacionais previamente ajustadas em: 75 NTU (concentração de efluente preparado) e Taxa de reciclo: 15,7%.

Fonte: O Autor

Os resultados dos ensaios desenvolvidos e ilustrados na Figura 57, demonstram a influência da taxa de reciclo no processo de FAD e, como pode ser observado nos experimentos realizado com T_{rx} 15,7% ajustado para a injeção de microbolhas geradas com 6,15 bar. Nestas condições, é possível constatar que a vazão de água saturada,

ajustada pela taxa de reciclo, de 15,7%, desfavoreceu a estabilidade e, conseqüentemente, a eficiência do processo de separação sólido-líquido via FAD. Como exposto, a estabilidade foi mantida em 1,1 NTU por apenas 1360 s, a partir deste ponto ($T = 1360$ s) a marcha analítica foi conduzida pela ascensão gradativa da turbidez atingindo 18 NTU em $T = 3020$ s, tão logo, esta mesma curva, até o $T = 3730$ s, demonstrou redução da turbidez alcançando o índice de 13,7 NTU, possivelmente sob efeito (parcial) do mecanismo de reacoplamento B/P ocorrido na zona de separação. Brevemente, a partir de $T = 3730$, elevação da turbidez foi retomada seguramente devido à perda definitiva das interações B/P.

Quanto aos experimentos realizados com T_{rx} 15,7% ajustado para a injeção de microbolhas produzidas com 6,85 bar, praticamente nota-se o mesmo cenário, onde a taxa de reciclo, de 15,7%, também desfavoreceu a estabilidade e a eficiência do processo de FAD. Basicamente, a diferença pode ser observada apenas nos comportamentos das curvas em relação aos valores dos índices de turbidez. Igualmente ao ensaio com 6,15 bar, neste experimento, com injeção de água saturada com 6,85 bar, a estabilidade foi mantida em 1,1 NTU por apenas 1360 s e, a partir deste ponto, a elevação da turbidez ocorreu em dois estágios, o primeiro observado no intervalo de $T = 2000$ s até 2340 s, atingindo 3 NTU e o segundo, no intervalo de $T = 2340$ s até 3105 s, atingindo 12,5 NTU, em seguida, deste ponto ($T = 3105$ s) até $T = 3590$ s, nota-se a breve redução da turbidez até o índice de 9,5 NTU. Logo e diante, a perda definitiva das interações B/P, teve por consequência, a ascensão da turbidez.

Diante do exposto, nestes intervalos de desestabilidade ou ascensão dos índices de turbidez, sugere-se que o sistema bolha-partícula foi possivelmente percorrido pela dispersão partícula-partícula, no qual, tais colisões ocasionaram a elevação da turbidez, porém, o efeito de carregamento após este intervalo de tempo, volta a se estabilizar possivelmente, pela existência de bolhas remanescentes sobre a baixa quantidade de flóculos presentes na zona de separação.

A Figura 58 ilustra o comportamento FAD aplicada no tratamento de efluente preparado com turbidez ajustada em 75 NTU e com variação da taxa de reciclo e pressão da célula de saturação ajustada em 6,15 bar.

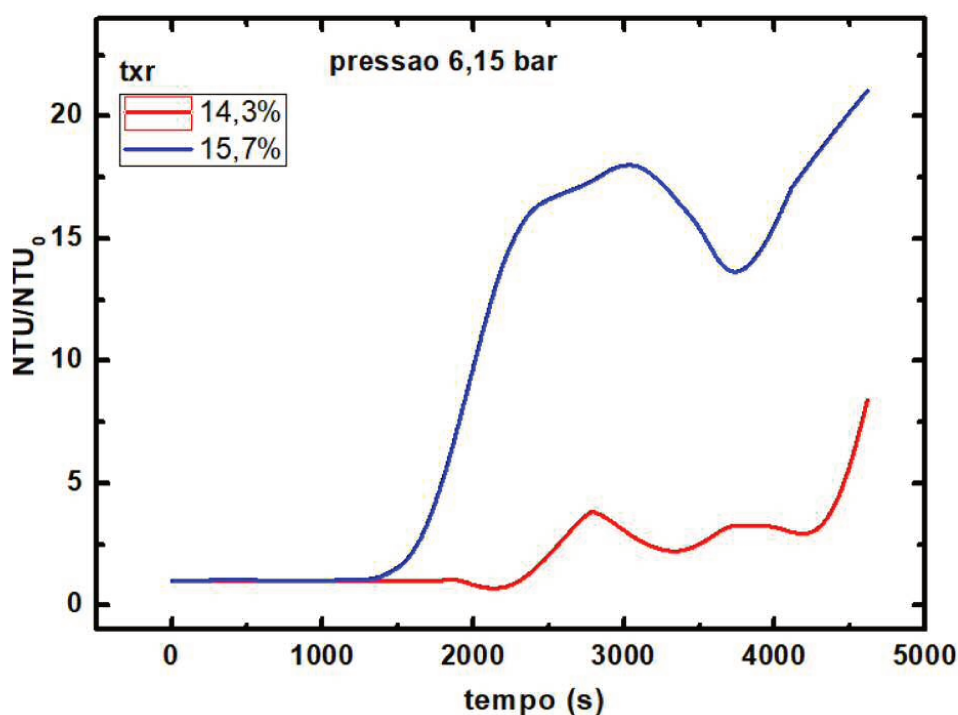


Figura 58. Perfil do comportamento dos valores de Turbidez (normalizada) obtidos no processo de FAD em função do tempo (s), considerando diferentes taxas de reciclo (14,3% e 15,7%), sob condições operacionais previamente ajustadas em: 75 NTU (concentração de efluente preparado) e Pressão de saturação: 6,15 bar.

Fonte: O Autor

Como observado na Figura 58, os comportamentos experimentais exibidos pelos ensaios desenvolvidos sob diferentes condições de T_{rx} (14,3% e 15,7%), foram significativamente distintos entre si. O ensaio de FAD desenvolvido com 14,3% de reciclo de água tratada, porém saturada a 6,15 bar, manteve o índice de turbidez praticamente estável, na ordem de 1,1 NTU, até o T=2290 s. Deste ponto em diante, é possível identificar uma breve oscilação ocorrida no período marcado até T=2730 s, neste intervalo, não excedendo 3,8 NTU. A partir deste ponto (até T=2730 s, nota-se a breve redução da turbidez até o índice de 2,3 NTU. Ainda nesta curva, é possível verificar uma oscilação novamente sucedida, agora no intervalo de T=2730 s até T=4190 s, não excedendo 3,0 NTU. Posteriormente, havendo a elevação progressiva da turbidez,

ocasionada pela absoluta anulação das interações mecânicas entre microbolhas e partículas.

Verificando também os experimentos efetuados com 15,7% de reciclo de água tratada, saturada com pressão de saturação aferida em 6,15 bar, percebe-se que manutenção do índice de turbidez inicial (1,1 NTU) ocorreu sob condição estável somente até o $T=1210$ s pois, a partir deste marco, até 3005 s, observa-se a elevação da turbidez, atingindo 18 NTU, logo depois, diante deste mesmo ponto ($T=3005$ s) até $T=3740$, nota-se redução da turbidez até o índice de 17,2 NTU, certamente ocasionado pelo típico efeito de reacoplamento B/P. A contar de $T=3740$, percebe-se a ascendência da turbidez, supostamente, também motivada pelo encerramento das interações mecânicas efetivas entre bolhas e partículas.

Conforme exposto anteriormente, nas Figuras 55 e 56, os resultados reportados na Figura 58, sugestionam que efluentes mais concentrados ou, neste caso, com índice de turbidez ajustada em 75 NTU, proporcionam a formação de coágulos ou flóculos maiores e mais expansivos, contribuindo diretamente no processo de separação sólido-líquido via FAD, o mecanismo de aprisionamento (*entrapment*) e, assim como condicionado nestes experimentos (Figura 58), a pressão (6,15 bar) considerada nestes ensaios para aferição da câmara de saturação, tenha favorecido a geração de bolhas maiores e, conseqüentemente, mais suscetível ao arraste de aglomerados mais volumosos.

A Figura 59 apresenta o comportamento da FAD aplicada no tratamento de efluente preparado com turbidez ajustada em 75 NTU e com variação da taxa de reciclo e pressão da célula de saturação ajustada em 6,85 bar

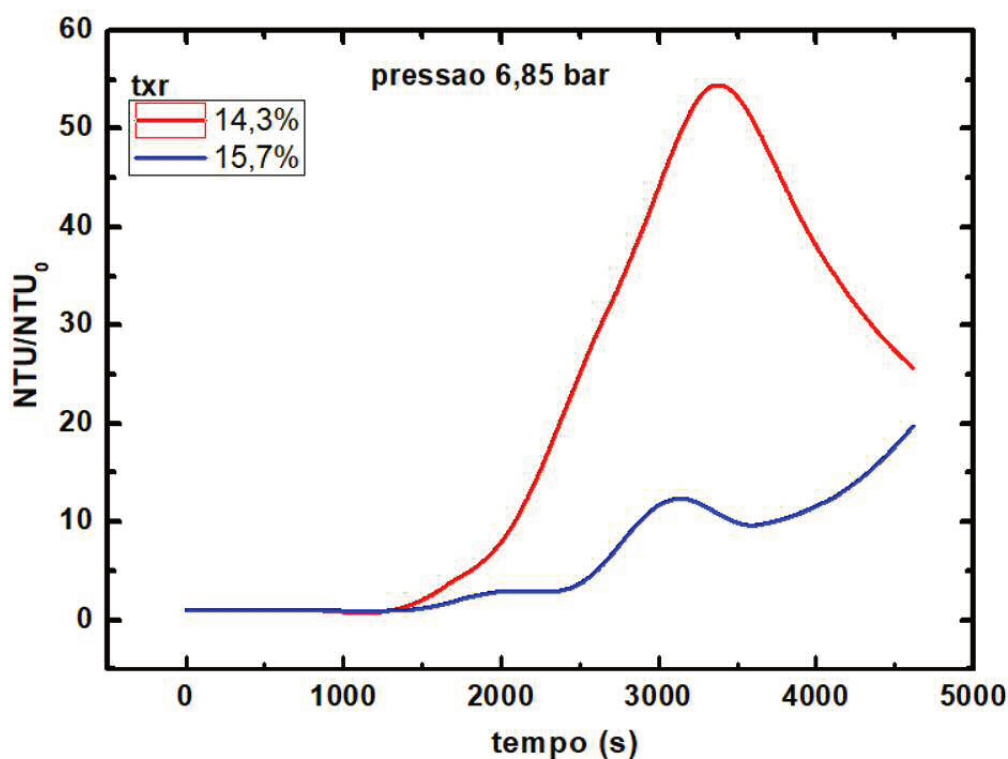


Figura 59. Perfil do comportamento dos valores de Turbidez (normalizada) obtidos no processo de FAD em função do tempo (s), considerando diferentes taxas de reciclo (14,3% e 15,7%), sob condições operacionais previamente ajustadas em: 75 NTU (concentração de efluente preparado) e Pressão de saturação: 6,85 bar.

Fonte: O Autor

Diante da Figura 59, é possível observar que os comportamentos analíticos exibidos pelos experimentos efetuados sob diferentes condições de taxa de reciclo (14,3% e 15,7%) ajustados como referências para a injeção de água tratada, saturada sob pressão aferida em 6,85 bar, foram significativamente distintos entre si. O ensaio de FAD desenvolvido com $T_{xr}=14,3\%$, ilustrado na Figura 59, manteve o índice de turbidez estável, na ordem de 1,1 NTU, até o $T=1290$ s e, deste mesmo ponto ($T=1290$ s), no intervalo até $T=3410$ s, estes experimentos apresentaram elevação da turbidez até o índice de 54,8 NTU. Em seguida, nesta mesma curva, a partir do ponto $T=3410$ s em diante, houve decaimento da turbidez até o índice de 25,8 NTU, finalizado pelo encerramento desta marcha experimental em $T=4600$ s.

Analisando também o comportamento dinâmico dos experimentos desenvolvidos com $T_{xr}=15,7\%$, é possível constatar que as interações resultantes das colisões bolha-partícula, ocorreram praticamente nas mesmas regiões da variável “tempo” visto na condição anterior. A começar pelo desacoplamento observado no intervalo de $T=1290$ s até $T=3100$ s, elevando a turbidez para 12,5 NTU, certamente em virtude da maior densidade e pelo redimensionamento dos flóculos. Na sequência, o breve reacoplamento ocasionado entre os pontos $T=3100$ s até 3590, reduzindo ligeiramente o índice de turbidez para 9,7 NTU, sugere a influência da pressão de saturação nas características qualitativas de microbolhas geradas, isto porque o aumento da pressão, de 6,15 bar para 6,85 bar, configurada na célula de saturação, torna-se determinante para a quantidade de microbolhas geradas, principalmente, pelo aumento da vazão de água saturada ou taxa de reciclo, de 15,7% para 14,3%.

A Figura 60 ilustra o efeito da variação (percentual) em relação ao Ponto Central para os diferentes ensaios de FAD com turbidez ajustada em 75 NTU.

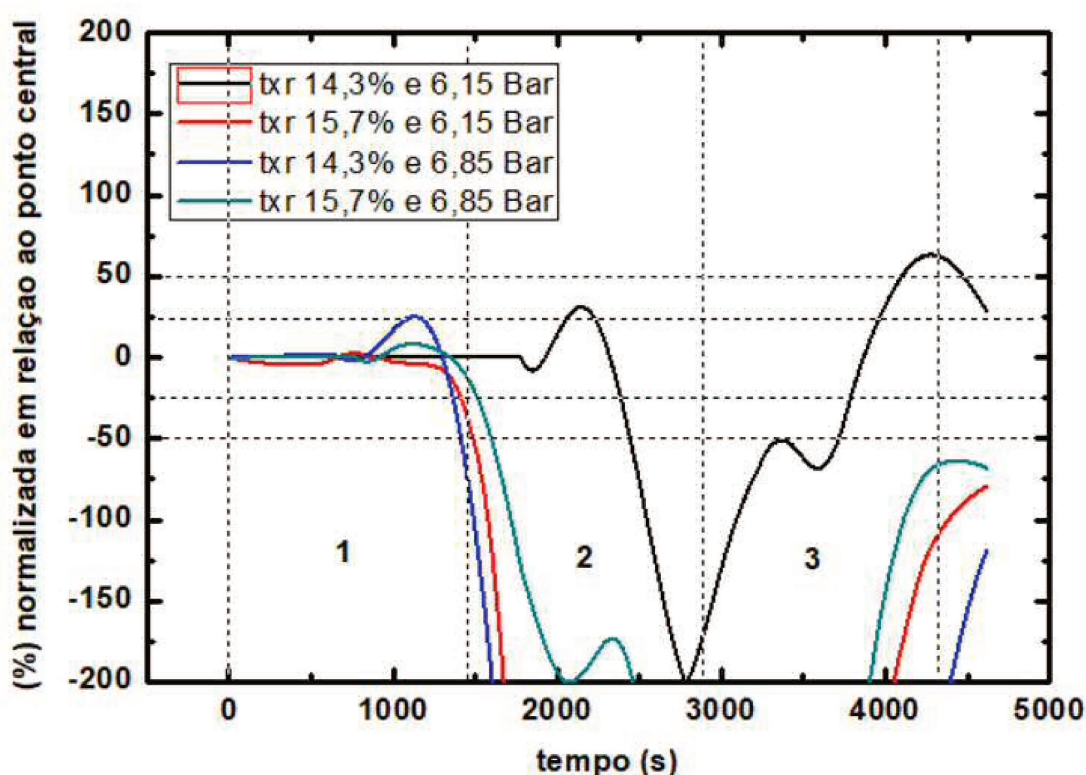


Figura 60. Efeito da variação (%) normalizada em relação ao Ponto Central para as diferentes condições de ensaios realizados com efluente preparado (75 NTU) em função do tempo. As regiões 1, 2 e 3 demarcadas são intervalos de tempo correspondente ao TDH.

Fonte: O Autor

Na Figura 60, os intervalos de tempo de detenção hidráulica (TDH) foram divididos em regiões 1, 2 e 3, equivalente ao intervalo de 1440 s, assim como visto na Figura 54. A viabilidade e a eficiência do processo de FAD é determinada pela combinação de análises experimentais e a constituição de resultados estáveis obtidos e utilizados na condição ideal de tratamento de efluentes. Para tal, são parametrizados pelos menores índices de remoção de turbidez, a menor pressão aferida na célula de saturação e a menor taxa de reciclo de água tratada. Também a partir da Figura 60, pode-se analisar a estabilidade do processo de FAD em função do TDH durante os ensaios com 75 NTU, para efeito de comparação entre os diferentes ensaios foram considerados os valores normalizados da turbidez em relação aos valores do ponto central. A desestabilização do sistema nos processos bolha-partícula (B/P) é observado em função do tempo que foi dividido em quadrantes representando o TDH ou número de vezes em que o sistema permanece em equilíbrio.

Reiterando que, o pretendido método ideal de tratabilidade pode ser encontrado naquela condição que permaneça estável ou equilibrado, pelo maior período (TDH) e localizado na região percentual igual a zero. Portanto, o afastamento desta região ($\%=0$), pode ser compreendido como uma situação de instabilidade ou desequilíbrio.

Diante disso, analisando individualmente os resultados apresentados na Figura 60, em relação ao ponto central, a começar pelo ensaio condicionado em $T_{xr}=14,3\%$ e 6,15 bar, pode-se observar que inicialmente a estabilidade foi mantida até o segundo quadrante, atingindo 1,22 ciclos de TDH em $T=1760$ s e, a partir deste ponto, nota-se o desencadeamento de sucessivas oscilações de naturezas distintas e afastamentos da região do equilíbrio ($\%=0$), nos períodos de $T=1760$ s até $T=1940$, de $T=1940$ s até $T=2305$ s e $T=2305$ s até $T=3844$, certamente ocasionados pelas interações B/P de

desacoplamentos seguido dos mecanismos de reacoplamentos, justificando os reposicionamentos para a região do equilíbrio.

Os ensaios desenvolvidos sob condições de $T_{xr}=15,7\%$ e 6,15 bar e $T_{xr}=14,3\%$ e 6,85 bar, em relação ao ponto central, inicialmente apresentaram pequenas instabilidades, das ordens de 5% e 25%, respectivamente, ambas ocorridas no intervalo de $T=240$ s até $T=1280$ s, a partir deste ponto ($T=1280$ s), iniciou-se o período de instabilidade e acentuado distanciamento da região do equilíbrio. Em seguida, nestes mesmos ensaios, é possível constatar somente em $T=4010$ s a recomposição sentido ao equilíbrio, do experimento ($T_{xr}=15,7\%$ e 6,15 bar) e $T=4330$ s, o experimento ($T_{xr}=14,3\%$ e 6,85 bar), no entanto, apesar desta diferença de 320 s, ambos ensaios experimentais não retomaram integralmente o posicionamento para a região de equilíbrio ou próxima de zero.

A curva relativa ao ensaio ajustado em $T_{xr}=15,7\%$ e 6,85 bar, permanece estável até o $T=960$ s e, a partir deste ponto, é possível observar uma breve oscilação ($\sim 7\%$) deste ponto ($T=960$ s) até $T=1380$ s, seguido de um acentuado deslocamento no período de $T=1380$ s até $T=2070$ s, totalizando 690 s de pleno distanciamento, comparado ao ponto central. A partir de $T=2070$ até 2300 s, nota-se na escala de instabilidade, na região de -200%, um breve deslocamento (+50%) sentido a região de equilíbrio, seguido rapidamente a partir deste ponto ($T=2300$ s) até $T=2500$ em um direção contrária. No entanto, a partir de $T=3810$ s ou 1310 s depois, observa-se o realocamento desta curva para a zona de equilíbrio, possivelmente pela dispersão P/P (partícula-partícula), no qual, o efeito de carregamento após este intervalo de tempo, volta a se estabilizar, pela existência de bolhas remanescentes sobre a pequena quantidade de flóculos ainda existentes.

6.4. Conclusões Parciais

Em linhas gerais, quanto ao processo de FAD mais efetivo avaliado para a condição (25 NTU), pode-se concluir parcialmente que, a combinação entre as variáveis T_{rx} 15,7% de água saturada produzida com 6,15 bar, foi a condição experimental que apresentou a melhor situação de equilíbrio, observada pela estabilidade mantida pelo maior número de ciclos notadas nas regiões de TDH.

Diante dos comportamentos experimentais (expostos de modo abrangente na Figura 60), ainda que parcialmente, é possível concluir que a convergência das condições experimentais que apresentaram as melhores respostas quanto a estabilidade ou maior número de ciclos decorridos nos quadrantes de TDH, foram observadas nos ensaios experimentais de FAD (75 NTU), efetuados com o reciclo de 14,3% (T_{rx}) de água tratada e pressurizada na célula de saturação aferida em 6,15 bar. Nesta conjuntura analítica, a pressão de saturação ajustada nesta faixa (6,15 bar) pode ser considerada como fundamental para a tipologia de microbolhas produzidas, isto porque, a diminuição da pressão, de 6,85 bar para 6,15 bar, ajustada na célula de saturação favorece quali e quantitativamente a geração microbolhas. Além disso, a redução da vazão de água tratada saturada (taxa de reciclo) de 15,7% para 14,3%, demonstra que, para águas preparadas com maiores concentrações de sólidos (75 NTU), conseqüentemente, com a formação de flóculos mais expansivos, seja prevalecida a interação B/P tipo aprisionamento “*entrapment*” e, sobretudo, diante da baixa pressão de saturação, este mecanismo seja favorecido, visto que nestas condições, sejam prevalecidas os desempenhos das bolhas maiores e mais efetivas ao carregamento “*carrier*” de aglomerados maiores.

7. Conclusões Finais

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi projetado e construído um protótipo de um sistema contínuo de tratamento físico-químico de águas, composto pelas etapas de equalização, coagulação, floculação, flotação por ar dissolvido (FAD) e filtração. Esta planta foi automatizada e instrumentada para a medição de pressão, vazão, nível, temperatura, pH e turbidez, possibilitando a elaboração de diversos tipos de projetos de pesquisa visando o desenvolvimento de novas tecnologias para o processo de separação sólido-líquido via flotação por ar dissolvido (FAD).

Nas condições experimentais investigadas neste estudo, os resultados obtidos permitem concluir que:

Considerando o projeto e a construção do protótipo de tratamento físico-químico de águas por FAD, provido de Sistema Supervisório (SCADA) e, com base nas pesquisas realizadas para o desenvolvimento deste estudo, não foram localizados trabalhos científicos similares;

A concentração de sólidos da água exerceu influência direta na etapa de coagulação/floculação, na determinação das classes de reagentes (eletrólitos, coagulantes, floculantes, etc.) mais efetivos e respectivas dosagens. Para tal, a técnica de Jar Test e o protótipo adotado neste estudo, tornaram-se fundamentais para os ensaios de tratabilidade;

Em relação as estrutura dos flóculos, a diferença de mecanismos de coagulação existentes entre o reagentes combinados, Aluminato de Sódio (varredura) e Tanfloc SG (formação de pontes), responderam positivamente para a formação de flóculos estáveis, expansivos (abertos), proporcionando também uma maior área de contato, favorável ao mecanismo “*entrapment*” (aprisionamento);

A planta experimental empregada neste estudo foi fundamental para o controle, aquisição de dados (em fluxo contínuo) e observações dos comportamento nos

mecanismos de interações B/P e P/P, como os “reacoplamentos” vistos em vários ensaios deste trabalho, por exemplo;

Quanto aos ensaios de FAD avaliados com diferentes concentrações de sólidos, 25 NTU e 75 NTU, as combinações mais eficientes (% de remoção de turbidez) foram observadas nas condições de 6,85 bar/Txr 14,3%; (95,6%) e, 6,15 bar/Txr 14,3%; (93,8%), respectivamente;

A metodologia adotada possibilitou a identificação de diferentes padrões de comportamentos nos mecanismos de interações B/P. Microbolhas geradas a partir da saturação da água com menor pressão (6,15 bar) são maiores, e beneficiam o acoplamento com flóculos maiores (mais expansivos) e mais densos, favorecendo o processo de flotação de águas com maiores concentrações de sólidos (75 NTU);

Por outro lado, a saturação da água com maior pressão (6,85 bar), proporciona a geração de bolhas menores em maior quantidade, favorecendo a efetividade da “captura” de partículas e flóculos em águas com menores concentrações de sólidos (25 NTU), pela maior probabilidade de colisão, adesão, acoplamento e estabilidade do agregado.

A combinação de técnicas de flotação com as convencionais técnicas de tratamento de águas e efluentes, têm permitido, um considerável aumento na capacidade e eficiência dos sistemas projetados. Com isto, a flotação vem ganhando credibilidade tanto no meio acadêmico como também nos segmentos industriais. Contudo, sua viabilidade de implantação depende de estudos relativos às necessidades de cada caso, considerando-se aspectos econômicos, técnicos e ambientais.

8. Sugestões para trabalhos futuros

Os resultados obtidos a partir da construção do protótipo de tratamento físico-químico de águas via FAD foram bastante promissores e certamente impulsionam a continuidade para trabalhos futuros. A seguir seguem algumas sugestões para o prosseguimento deste projeto:

- Desempenho do protótipo diante de algumas possíveis alterações, tais como: Processo de distribuição de bolhas e redução da zona de contato; Vias de transferência (floculador-flotador), das águas coaguladas; Raspador superficial;
- Determinação da distribuição de tamanho das bolhas geradas a partir da adaptação de um microscópio óptico visando a captura de imagens digitais na zona de contato;
- Variação das taxas de reciclo (vazão) com diferentes tipos de válvulas agulhas;
- Estudos com efluentes reais e reagentes diversificados;
- Ensaios comparativos considerando diferentes tipos de misturadores na etapa de coagulação/floculação;
- Avaliação dos benefícios (DBO e DQO) em Processos “mistos” (Biológicos/ Físico-químicos);
- Avaliação do desempenho da etapa de produção de água saturada com ar, considerando a adição de agentes surfactantes;
- Estudo do processo de dissolução de ar na água de reciclo, considerando a variável temperatura e o empacotamento (recheio) da célula de saturação;

9. Referências Bibliográficas.

AISSE, M.M.; JURGENSEN, D.; REALI, M. A. P.; PENETRA R.; ALÉM SOBRINHO, P.; FLORÊNCIO L. **Avaliação do Sistema Reator RALF e Flotação por Ar Dissolvido, no Tratamento de Esgoto Sanitário**. In: CHEMICARO, C.A.L. (Coordenatos) Pós-tratamento de efluentes anaeróbios. Rio de Janeiro. Coletânea de Artigos Técnicos.Vol 2, ABES, 2001.

BRATBY, J.; MARAIS, G.V.R. Flotation. In PURCHAS, D.B. (Ed.): **Solid/Liquid Separation Equipment Scale-Up**. New York, NY Upland Press, p.155–168. 1977.

BURNS, S. E.; YIACOUMI, S.; TSOURIS, C. **Microbubbles generation for environmental and industrial separations**. Separation and Purification Technology. New York. v.\11. p.221-232, jul. 1997.

DERJAGUIN, B.V., DUKHIN, S.S. **Theory of flotation of small and medium size particles**. *Transactions of the Institution of Mining Metallurgy*. New York: Elsevier, n. 70, p. 221, 1960.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. Di Bernardo. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. [S.l: s.n.], 2005

ENGLERT, A. H.; RODRIGUES, R. T.; RUBIO, J.; **Flotação de partículas ultrafinas: Estado da arte e contribuição técnica sobre o ponto de mínimo na eficiência de captura bolha-partícula**. *Hollos*, [S.l.], v. 5, p.39-48, dez. 2011.

FONSECA, R.R. **Monitoramento e controle avançado aplicados à flotação por ar dissolvido**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, São Paulo, 2017.

GREGORY, J. E ZABEL, T. (1990). “**Sedimentation and Flotation.**” In: McGraw-Hill, Inc. (eds.) *Water Quality and Treatment: A Handbook of Community Water Supplies*. 4a. edição. E.U.A., 367-453.

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*, Great Britais, v. 56, n. 10, p. 109-115, 2007

HENDRICK, D. **Fundamentals of Water Treatment Unit Processes: Physical, Chemical, and Biological.** Boca Raton: CRC Press. 1 ed., p. 156-172. 2010.

JUNIOR JAFELLICI, M. ; VARANDA, L. C. **O mundo dos coloides.** *Química Nova na Escola*, n. 9, p 9-13, mai 1999.

KAWAMURA, S. “**Design of Basic Treatment Process Units.**” In: John Wiley e Sons, Inc. (eds.) *Integrated Design and Operation of Water Treatment Facilities*. 2a. edição. E.U.A., 59-342. 2000.

KRASOWSKA, M.; MALYSA, K. **Kinetics of bubble collision and attachment to hydrophobic solids: I. Effect of surface roughness.** *International Journal of Mineral Processing*. New York: Elsevier, n. 81, p. 205-2016, 2007.

LARSSON, A. **Dia’s homepage. Lysator**, The Academic Computer Society. Ago, 2003.

LASKOWSKI, J. S.; RALSTON, J. **Colloid chemistry in mineral processing.** New York: Elsevier, 1992. p. 428.

LEITE, C. N.. **Análise qualitativa comparativa de efluentes com diferentes concentrações de sólidos suspensos totais (SST) frente ao tratamento com tanino e separação sólido-líquido via FAD.** Dissertação de Mestrado em Química, Universidade Federal de Uberlândia – UFU, Minas Gerais, 2015.

LIU, S.; WANG, Q.; MA, H.; HUANG, P.; LI, J.; KIKUCHI, T. **Effect of micro-bubbles on coagulation flotation process of dyeing wastewater.** Separation and Purification Technology. New York: Elsevier, n. 71, p. 337-346, 2010.

LOBATO, S.J.M., REALI, M.A.P. E FAITANIN, L. (1995). **“O sucesso da flotação por ar dissolvido no pré-tratamento da água bruta da ETA Meaípe – ES.”** XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES, Foz do Iguaçu, Brasil.

LONGHURST, S.J. E GRAHAM, N.J.D. (1987). **“Dissolved air flotation for potable water treatment: a survey of operational units in Great Britain.”** The Public Health Engineer, 14 (6), 71-76.

MALLEY, J.P. E EDZWALD, J.K. (1991). **“Concepts for dissolved-air flotation treatment of drinking waters.”** Journal Water Supply: Research and Technology – Aqua, 40 (1), 7-77.

MARTINS, G. S. **Construção de um turbidímetro de baixo custo para controle de qualidade de efluentes industriais.** – Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica – UNICAMP, Campinas, São Paulo, 2012.

MASSI, L.; SOUSA, S. R.; LALUCE, C.; JAFELICCI JUNIOR, M. **Fundamento e Aplicação da flotação como Técnica de Separação de Misturas.** Química Nova na Escola, n.28, p.4, 2008.

MATIOLO, E.; RUBIO, J. **Flotação avançada para o tratamento e reaproveitamento de águas poluídas.** XIX Prêmio Jovem Cientista, Tema: Água - Fonte da Vida, p.1, 2003.

RALSTON, J.; FORNASIERO, D.; HAYES, R. **Bubble-particle attachment and detachment in flotation.** International Journal of Mineral Processing, New York: Elsevier, n. 56, p. 133-164, 1999.

REALI, M. A. P.; MORUZZI, R. B.; PATRIZZI, L. J. **Flotação por ar dissolvido aplicada na clarificação de água que apresentam picos de turbidez.** 22º Congresso de Engenharia Sanitária e Ambiental: Joinville - Santa Catarina, p. 1-9. 2003.

REALI, M.A.P. E CAMPOS, J.R. (1985). "**Emprego da flotação por ar dissolvido na clarificação de água para abastecimento: parte II.**" Boletim de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos - USP, São Carlos, Brasil.

REALI, M.A.P. E CAMPOS, J.R. (1995). "**Optimization of colour removal using a batch flotation test.**" 2º Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental - SIBESA, ABES-ANDIS, Veneza/Padova, Itália, 199-210.

RUBIO, J.; SOUZA, M. L.; SMITH, R. W. **Overview of flotation as a wastewater treatment technique.** Minerals Engineering, New York: Pergamon, n.15, p.139-155, 2002.

SANTO, C. E.; **Optimization of coagulation-flocculation and flotation parameters for the treatment of a petroleum refinery effluent from a Portuguese plant.** Chemical Engineering Journal, New York: Elsevier, n. 183, p. 117-123, 2012.

SENA, R. F.; MOREIRA, R. F. P. M.; JOSÉ, H. J. **Comparison of coagulants and coagulation AIDS for treatment of meat processing wastewater by column flotation.** **Bioresource Technology**, New York: Elsevier, n. 99, p. 8221-8225, 2008

TAFFAREL, S. R. **Apostila de Operações e Processos Hidrosanitários I.** Unilasalle-Canoas, 2012. Disponível em: < <http://www.hidroengnet.com.br/apostila.pdf>>. Acesso em: 10 Maio de 2016.

TAKAHASHI, T.; MIYAHARA, T.; MOCHIZUKI, H. **Fundamental study of bubble formation in dissolved air pressure flotation.** Journal of Chemical Engineering of Japan, v. 12, n. 4, p. 275-280, 1979.

TCHOBANOGLIOUS, G. **Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse / Metcalf & Eddy Inc.** 3a. ed. New York: McGraw-Hill, 1991.

THOMPSON JUNIOR, J. P. **Passando a Limpo: a Flotação por Ar Dissolvido no Tratamento de Efluentes Industriais.** Jundiaí: PACO Editorial, 2015

WANG, L.; PENG, Y.; RUNGE, K.; BRADSHAW, D. **A review of entrainment: Mechanisms, contributing factors and modeling in flotation.** Mineral Engineering, New York: Elsevier, n.70, p. 77-91, 2015.

ZABEL, T.F. (1984). **"Flotation in water treatment."** In: Ives K.J. (ed.) The Scientific Basis of Flotation, NATO ASI Series, Martinus Nijhoff Publishers. The Hague, Holanda, 349- 377.