



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Química

IVO DE JESUS CUNHA

**DETERMINAÇÃO DE CONDIÇÕES OPERACIONAIS DE
UM PROCESSO DE FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO
PARA TRATAMENTO DE ÁGUA.**

Campinas,

2025

IVO DE JESUS CUNHA

**DETERMINAÇÃO DE CONDIÇÕES OPERACIONAIS DE
UM PROCESSO DE FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO
PARA TRATAMENTO DE ÁGUA.**

**DETERMINATION OF OPERATING CONDITIONS OF A
DISSOLVED AIR FLOTATION PROCESS FOR WATER
TREATMENT.**

Dissertação de mestrado apresentada à
Faculdade de Engenharia Química da
Universidade Estadual de Campinas
como parte dos requisitos exigidos
para a obtenção do título de Mestre em
Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Vasconcelos da Silva

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À
VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO
DEFENDIDA PELO ALUNO IVO DE JESUS
CUNHA E ORIENTADO PELO PROF. DR.
FLÁVIO VASCONCELOS DA SILVA.

Campinas,

2025

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

C914d Cunha, Ivo de Jesus, 1994-
Determinação de condições operacionais de um processo de flotação por ar dissolvido para tratamento de água / Ivo de Jesus Cunha. – Campinas, SP : [s.n.], 2025.

Orientador: Flávio Vasconcelos da Silva.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Faculdade de Engenharia Química.

1. Tratamento de água. 2. Flotação. 3. Planejamento experimental. 4. Turbidez de água. I. Silva, Flávio Vasconcelos da, 1971-. II. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Faculdade de Engenharia Química. III. Título.

Informações complementares

Título em outro idioma: Determination of operating conditions of a dissolved air flotation process for water treatment

Palavras-chave em inglês:

Water treatment

Flotation

Experimental design

Water turbidity

Área de concentração: Engenharia Química

Titulação: Mestre em Engenharia Química

Banca examinadora:

Flávio Vasconcelos da Silva [Orientador]

Claudio Kiyoshi Umezu

Rodolpho Rodrigues Fonseca

Data de defesa: 11-02-2025

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Química

Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)

ODS: 6. Água potável e saneamento

ODS: 14. Vida na água

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

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0001-7400-5363>

- Currículo Lattes do autor: <https://lattes.cnpq.br/8266928331645441>

Folha de Aprovação da Defesa de Dissertação de Mestrado defendida por **IVO DE JESUS CUNHA** e aprovada em 11 de fevereiro de 2025 pela Comissão Examinadora constituída pelos doutores:

Prof. Dr. Flavio Vasconcelos da Silva

Presidente e Orientador

FEQ/ UNICAMP

Prof. Dr. Claudio Kiyoshi Umezu

Universidade Estadual de Campinas

FEAGRI

Prof. Dr. Rodolpho Rodrigues Fonseca

(Universidade Federal de Sergipe - DEQ)

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.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, quero expressar minha gratidão a mim mesmo, por ter acreditado em minha capacidade e por ter dedicado tanto esforço a este trabalho. Agradeço-me pela perseverança, por não ter permitido que os desafios me desanimassem e por ter dado o meu melhor, mesmo nos momentos mais difíceis. Agradeço por ter persistido, mesmo quando os dias pareceram intermináveis, e por ter me empenhado a cada passo dessa jornada.

Reconheço a importância de minha determinação, de sempre buscar fazer mais e melhor, de aprender com meus erros e celebrar as pequenas conquistas, por mais simples que fossem. Agradeço-me, finalmente, por ser fiel a mim mesmo, por manter minha identidade e meus princípios ao longo de todo o processo.

Aos meus pais, Lucia (*in memoriam*) e Manoel, sou eternamente grato por me ensinarem desde a infância a importância da disciplina, do esforço e da superação. A eles devo os pilares que sustentaram minha trajetória. Agradeço, também, a todos os meus familiares, que sempre estiveram ao meu lado, oferecendo o apoio necessário para que eu seguisse em frente com essa jornada que decidi trilhar.

Aos meus colegas do LCAP, pela colaboração e apoio durante a realização deste mestrado, em especial a Felipe Sousa, cuja ajuda foi fundamental, sem a qual esta jornada acadêmica teria sido consideravelmente mais desafiadora.

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Bolsa processo nº 130395/2021-8.

EPÍGRAFE

“Quem diz que não pode ser feito nunca deve interromper aquele que está fazendo.”

Autor Desconhecido

RESUMO

A água encontrada na natureza não pode não estar potável para ser utilizada diretamente para o consumo humano ou industrial, pois quando captada seus níveis de material (in)orgânico podem estar fora dos padrões de qualidade estabelecidos. Desta forma, o tratamento da água é uma etapa essencial para remoção de impurezas para que seja possível a utilizá-la em fins distintos. Dentre os diversos tratamentos, a flotação por ar dissolvido (FAD) é uma técnica empregada na remoção de material suspenso em água. A FAD utiliza-se da injeção de microbolhas para remover a suspensão do material particulado presente na água. Diante disso, este trabalho objetiva estudar as variáveis de operação de um protótipo de FAD readaptado durante o tratamento de água turva. Um planejamento experimental foi aplicado para avaliar a influência no vaso de saturação, vazão de alimentação do flotor e vazão de reciclo no desempenho do processo de flotação por ar dissolvido. Também foi avaliado como a área da zona de contato influencia na taxa de remoção de turbidez. A avaliação do planejamento experimental foi realizada no *software* Statistica® versão 12. No planejamento foi observado que a vazão de alimentação não é uma variável que impactou diretamente no tratamento da água. A pressão de pressurização é uma variável que impacta diretamente na taxa de remoção da turbidez. A avaliação da zona de contato foi observada que a posição intermediária (5,4 L) apresentou a maior taxa de remoção de turbidez, conseguindo uma taxa de 87,26%.

Palavras-chave: tratamento de água; flotação; planejamento experimental; remoção de turbidez

ABSTRACT

Water found in nature cannot be used directly for human or industrial consumption, when captured its levels of (in)organic material may be outside established quality standards. Therefore, water treatment is an essential step to remove impurities so that it can be used for different purposes. Among the various treatments, dissolved air flotation (DAF) is a technique used to remove material suspended in water. DAF uses microbubble injection to accelerate the process of agglomeration and suspension of particulate matter. Therefore, this work aims to study the operating variables of a readapted FAD prototype during the treatment of turbid water. An experimental design was applied to evaluate the influence of pressurization pressure, feed flow and recycle flow on the performance of the dissolved air flotation process. It was also evaluated how the area of the contact zone influences the turbidity removal rate. The evaluation of the experimental design was carried out using the Statistica® software version 12. In the design, it was observed that the feed flow is not a variable that directly impacted water treatment. The pressurization pressure is a variable that directly impacts the turbidity removal rate. The evaluation of the contact zone showed that the intermediate position (5.4 L) presented the highest turbidity removal rate, achieving a rate of 87.26%.

Keywords: water treatment; flotation; experimental design; turbidity removal

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Tanque de flotação por ar dissolvido	21
Figura 2.2 - Interação entre microbolhas e partícula.	22
Figura 4.1 - Protótipo desenvolvido por Fonseca (2017).	32
Figura 5.1 - Planta automatizada para tratamento de água via flotação por ar dissolvido atualizada.	41
Figura 5.2 - Interface gráfica do controle da planta FAD.....	43
Figura 5.3 - Batelada com concentração de aluminato variando.....	45
Figura 5.4 - Teste da razão de reciclo a 4 bar, 1,20 L/min a 9% e 13% de reciclo, respectivamente.	47
Figura 5.5 - Teste da razão de reciclo a 4 bar, 1,20 L/min a 13% de reciclo.	47
Figura 5.6 - Teste da razão de reciclo a 4 bar, 1,20 L/min a 19% e 25% de reciclo, respectivamente.	48
Figura 5.7 - Teste da razão de reciclo a 4 bar, 1,20 L/min a 19%.....	49
Figura 5.8 - Etapas da remoção da turbidez durante o processo de flotação por ar dissolvido.....	50
Figura 5.9 - Gráfico de Pareto; variável: Remoção de turbidez; 3 fatore; 1 bloco; 8 ensaios.	52
Figura 5.10 - Gráfico de Pareto; variável: Remoção de turbidez; 3 fatore; 1 bloco; 17 ensaios.	55
Figura 5.11 - Comparação entre valores preditos e observados.	57
Figura 5.12 - superfície de resposta entre a pressão e razão de reciclo.	59

Figura 5.13 - Superfície de resposta entre a pressão e vazão de alimentação.	59
Figura 5.14 - Superfície de resposta entre a razão de reciclo e a vazão de alimentação.....	60
Figura 5.15 - Remoção da turbidez em diferentes posições do baffle.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Equipamentos, atuadores e sensores presentes no protótipo de FAD.....	31
Tabela 4.2 - Equipamentos, atuadores e sensores presentes no protótipo de FAD.....	32
Tabela 4.3 - Níveis do planejamento experimental.	38
Tabela 4.4 - Matriz experimental para um planejamento 2^3 fatorial completo.	38
Tabela 4.5 - Matriz experimental para um planejamento 2^3 composto de face centrada.....	39
Tabela 5.1 - Equipamentos da planta FAD atualizada	42
Tabela 5.2 - Avaliação do teste de jarros com turbidez inicial de 20 NTU.	44
Tabela 5.3 - Condições operacionais propostas inicialmente.....	46
Tabela 5.4 - Planejamento fatorial completo de 2^3 em variáveis originais.	51
Tabela 5.5 - Matriz completa de efeitos com 95 % de confiança para o planejamento fatorial completo	52
Tabela 5.6 - Planejamento composto de face centrada de 2^3 em variáveis originais.	53
Tabela 5.7 - Matriz completa de efeitos com 95 % de confiança para o planejamento composto de face centrada com $R^2 = 0,7073$ e $R^2_{ajustado} = 0,3309$	54
Tabela 5.8 - Resultado da aplicação do Backward Elimination.	56
Tabela 5.9 - Tabela ANOVA para o ajuste do modelo de regressão (Equação 2).....	57

Tabela 5.10 - Valores da remoção da turbidez para diferentes posições do

baffle..... 62

SUMÁRIO

1. Introdução	15
2. Fundamentação teórica e revisão bibliográfica	17
2.1 Flotação	17
2.1.1 Flotação por Ar Dissolvido.....	20
2.1.2 Microbolhas	21
2.1.3 Coagulante e floculante	23
2.1.4 Aplicação de tratamento de efluentes através da flotação por ar dissolvido	25
3. Hipótese	28
3.1 Objetivos Gerais	28
3.2 Objetivos Específicos	28
4. Materiais e métodos.....	30
4.1 Adaptação do protótipo de flotação por ar dissolvido.....	30
4.2 Determinação das condições de operação para coagulação	35
4.2.1 Produção da água bruta sintética	35
4.2.2 Teste de jarro	36
4.3 Planejamento experimental.....	37
4.4 Avaliação da variação da área da zona de contato na taxa de remoção da turbidez.....	40
5. Resultados e discussão.....	41

5.1 Protótipo da planta de flotação por ar dissolvido	41
5.2 Produção da água bruta sintética	43
5.3 Planejamento Experimental 2 ³	45
5.4 Variação da zona de contato	61
6. Conclusões.....	64
7. Referências Bibliográficas.....	66

1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural vital para a manutenção da vida na terra, podendo ser encontrada nos três estados da matéria. Embora, esteja presente em grande quantidade, apenas uma pequena parte da água presente no planeta é considerada própria para o consumo humano, além disso, devido ao crescimento populacional e seu mau uso que degradam a qualidade da mesma, a quantidade própria para consumo está cada vez mais escassa (PESSOA et al., 2015).

Uma das formas de contornar esse problema é fazer o tratamento de esgotos domésticos e água residuais de indústrias antes de devolvê-los aos mananciais hídricos. Entre as formas de tratamento de água, pode-se citar a sedimentação e a flotação por ar dissolvido (FAD) (HAARHOFF, 2008). O tratamento por ar dissolvido apresenta vantagens frente à sedimentação como menor espaço requerido, maior rapidez no tratamento da água e maior eficácia na remoção de matéria suspensa (EDZWALD, 2010).

A FAD consiste em remover material particulado utilizando-se de bolhas de ar formadas pela despressurização da água saturada com ar a elevada pressão (RUBIO; SOUZA; SMITH, 2002). Tais bolhas agregam-se nas partículas modificando a densidade aparente, fazendo que as partículas migrem até a superfície, restando a água clarificada logo abaixo. Entretanto, o funcionamento da FAD envolve muitas variáveis tornando uma tarefa árdua encontrar a relação de dependência entre elas durante o tratamento da água.

O tratamento de água seja de esgoto doméstica ou residual tem como objetivo readequar os parâmetros físico-químicos e biológicos para que possa ser destinada para seus devidos fins, consumo humano, uso doméstico, industrial ou desague na natureza. O Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA criou as resoluções nº 357 e nº 430/11 as quais classificam os tipos de águas e estabelecem os as condições padrões de

diretrizes para lançamentos de efluentes na natureza, respectivamente. Já para o consumo humano a água deve obedecer aos padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria de consolidação nº 5/2017 descritos no Anexo XX do Ministério da Saúde. Em que um deles é que a água para consumo humano deve apresentar valores de turbidez menor ou igual a 1,0 NTU.

O Laboratório de Controle e Automação de Processos (LCAP) da Faculdade de Engenharia Química na Universidade Estadual de Campinas possui um protótipo automatizado de flotação por ar dissolvido desenvolvido por Fonseca (2017), o qual foi bastante utilizado no desenvolvimento de pesquisas relacionadas a remoção de turbidez de água bruta. Devido ao constante uso desse protótipo notou-se que alguns equipamentos se desgastaram com o tempo causando pequenos distúrbios que atrapalham o pleno funcionamento do protótipo. Além de que a troca de alguns equipamentos pode proporcionar a flexibilização e melhor entendimento das variáveis presentes no processo de tratamento de água via flotação por ar dissolvido.

Diante disto, este trabalho tem como objetivo fazer a readaptação de um protótipo de uma planta automatizada de tratamento de água por ar dissolvido e por meio de um planejamento experimental exploratório encontrar condições que promovam a máxima remoção de turbidez da água.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FLOTAÇÃO

Os padrões de qualidades da água que bebemos são alcançados quando realizadas as etapas de tratamento de água convencional, passando pela coagulação, floculação, sedimentação, filtração e desinfecção (VALADE; BECKER; EDZWALD, 2009; WANG et al., 2022b). A etapa de coagulação é realizada para desestabilizar as partículas e material, já a de floculação promove o crescimento das partículas através da formação de aglomerados de partículas (HAMEED et al., 2016; SANTOS et al., 2021). O objetivo da floculação é preparar as partículas para que elas decantem na etapa de sedimentação fazendo que a água chegue na etapa de filtração com menor teor de partículas suspensas (VALADE; BECKER; EDZWALD, 2009).

As estações de tratamento de água via flotação também utilizam das etapas de coagulação e floculação para aumentar a remoção de partículas dispersas na água a ser tratada. Entretanto, na sedimentação os flocos crescem o suficiente até decantarem para o fundo do tanque e na flotação os flocos formados são carregados por bolhas até a superfície do tanque onde são coletados por um raspador (HAMEED et al., 2016; VALADE; BECKER; EDZWALD, 2009).

O tratamento de água utilizando a flotação foi desenvolvido em 1920 na Escandinávia. Todavia, sua disseminação global ocorreu entre as décadas de 60 e 70 em países como Suíça, Finlândia, Reino Unido e África do Sul (EDZWALD, 2010; HO et al., 2020). Tal expansão foi impulsionada pelo interesse acadêmico em estudar a fundo esse processo de tratamento de água, pois mostrou-se ser uma forma promissora. As principais contribuições acadêmicas foram a explicação do efeito do tamanho das bolhas

na separação, o comportamento das bolhas em suspensões diluídas, bem como a interação entre bolhas e flocos de partículas suspensas (EDZWALD, 2010; HAARHOFF, 2008).

O tratamento via flotação pode ser classificado como electro flotação, flotação por ar disperso e por flotação por ar dissolvido (FAD). Esses tratamentos utilizam bolhas para tratar a água, mas a sua geração ocorre de forma distinta devido as suas aplicações e peculiaridades (EDZWALD, 2006; RUBIO; SOUZA; SMITH, 2002).

A electro flotação gera bolhas através da passagem de uma corrente elétrica entre dois eletrodos imersos numa solução salina. Bolhas de gás hidrogênio são formadas no catodo e as de oxigênio no anodo durante a hidrólise da água (KYZAS; MITROPOULOS; MATIS, 2021). Tais bolhas podem ter tamanhos de grandeza nano e micrométrica (CHO et al., 2009; WANG et al., 2022a).

Alguns motivos de não utilizar electro flotação no tratamento de água para beber são elevados custos operacionais e consumo energético para tratar água com baixa condutividade; baixo carregamento hidráulico; contaminação dos eletrodos devido a presença de alguns metais presentes na água (EDZWALD; HAARHOFF, 2011).

Flotação por ar disperso as bolhas são geradas quando o ar é forçado a passar através de difusores porosos ou por um sistema de aeração composto de turbina ou impelidor que rotaciona a elevada velocidade para gerar as bolhas a pressão atmosférica contendo uma faixa de 0,5 a 2 mm de diâmetro (EDZWALD; HAARHOFF, 2011; HUNG et al., 2017; WANG; FAHEY; WU, 2004).

A flotação por ar disperso é bastante empregada na separação de minérios e sistemas de água/óleo (RUBIO; SOUZA; SMITH, 2002). Entretanto, esta técnica apresenta algumas limitações que a inviabiliza no tratamento de água para consumo, sendo elas: baixa eficiência na colisão entre bolhas e partículas devido ao grande diâmetro das bolhas; não é necessário de bolhas com diâmetros grandes para remover

partículas de baixa densidade presentes na água; a grande turbulência gerada na agitação mecânica pode romper a aderência das bolhas presente na superfície da partícula (EDZWALD; HAARHOFF, 2011)

Flotação por ar dissolvido ocorre quando a água saturada com ar a elevada pressão é submetida a pressão atmosférica, gerando microbolhas devido a diferença de pressão (AMARAL FILHO et al., 2016). As microbolhas formadas variam seu tamanho entre 20-100 μm (PRAKASH; MAJUMDER; SINGH, 2018).

Quando comparado os processos de tratamento de água que utilizam a flotação para remover os flocos de partículas ao invés da sedimentação, observa-se as seguintes vantagens (ATAMALEKI et al., 2020; EDZWALD, 2010; FÉRIS et al., 2000; HUNG et al., 2017; RYBACHUK; JODŁOWSKI, 2019):

- Maior eficiência na remoção de material particulado disperso na água, proporcionando menor gastos com filtros;
- Menor tempo de retenção no tanque de floculação;
- Maiores carregamentos hidráulicos, conseguindo tratar maiores volumes de água;
- Mais eficiente do que a sedimentação na remoção de partículas de baixa densidade;
- Utilização de doses menores de coagulantes;
- Melhora na performance de remoção de algas em água fria;
- Baixa demanda de espaço para instalação de uma unidade de tratamento;

2.1.1 FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO

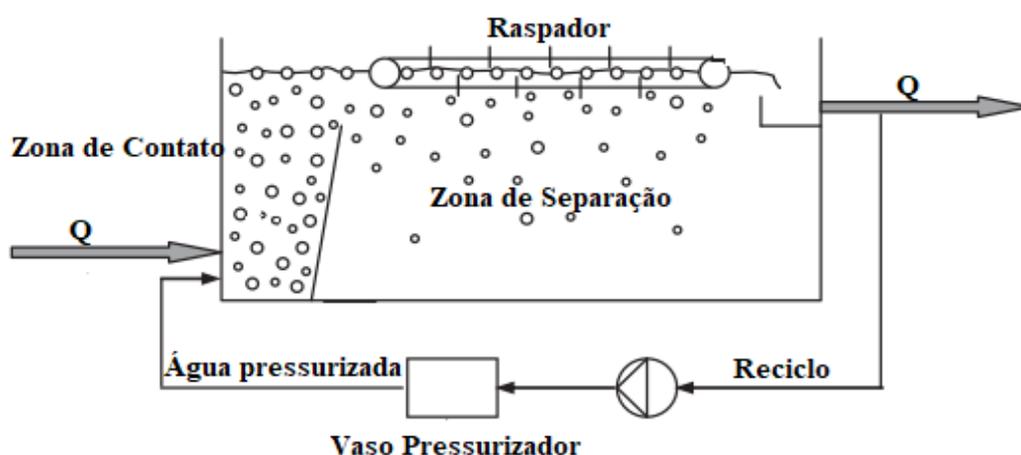
A flotação por ar dissolvido (FAD) é um processo de clarificação que remove material particulado suspenso através de microbolhas (FANAIE; KHIADANI, 2020; LEPPINEN; DALZIEL, 2004). As microbolhas de ar são geradas pela passagem de água saturada com ar sob alta pressão através de uma válvula agulha ou por micro bocais, provocando uma queda de pressão que faz com que o ar se desprenda da água formando as microbolhas (HAARHOFF, 2008; SILVA et al., 2018). Essas microbolhas, colidem com as partículas suspensas e aderem à superfície formando um aglomerado de microbolhas e partículas que têm movimento de ascensão até a superfície do tanque de flotação (BÜRGER et al., 2020; LEPPINEN; DALZIEL, 2004; RUBIO; SOUZA; SMITH, 2002).

A Figura 2.1 representa um típico tanque de flotação composto por duas zonas separadas por um *baffle*: zona de contato e separação, bem como o raspador, a corrente de reciclo e o vaso pressurizador (CHEN; WANG; YANG, 2016). A zona de contato é a região em que haverá a colisão entre as microbolhas e as partículas presentes na água (HO et al., 2020). Após colidirem, os aglomerados, microbolhas/partículas, irão emergir para a parte superior do tanque de flotação, denominada zona de separação (FANAIE; KHIADANI; AYRES, 2019). Essa região é caracterizada por uma região espessa formada pelo acúmulo de microbolhas livres e grandes flocos formados de microbolhas/partículas na parte superior do tanque e logo abaixo desta região está a água clarificada (EDZWALD, 2010; LAKGHOMI; LAWRYSHYN; HOFMANN, 2015).

O *baffle*, parede que separa as duas zonas de contato, apresenta papel fundamental na flotação, sua altura e inclinação pode influenciar diretamente na hidrodinâmica do tanque de flotação como perfil de escoamento e surgimento de zonas

mortas (BEHIN; BAHRAMI, 2012; EDZWALD; HAARHOFF, 2011; FANAIE; KHIADANI; AYRES, 2019). A inclinação do *baffle* é fixada (60° na horizontal ou 90°) entre as zonas a fim de promover a elevação dos aglomerados entre flocos e partículas em direção a superfície (HUNG et al., 2017). Caso não exista essa parede no tanque de flotação, a turbulência da corrente de alimentação localizada na base da zona de contato causará a perturbação da camada de lodo formada na superfície do tanque, tornando a remoção dos flocos ineficiente (FANAIE; KHIADANI; AYRES, 2019; HUNG et al., 2017).

Figura 2.1 Tanque de flotação por ar dissolvido.



Fonte: Adaptado Behin & Bahram (2012).

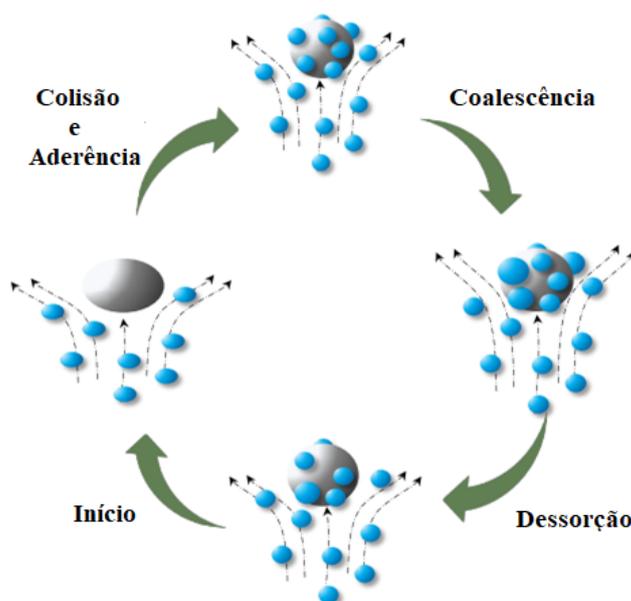
2.1.2 MICROBOLHAS

As microbolhas presentes na zona de contato são geradas pela passagem de água pressurizada através de um redutor de pressão (bocal ou válvula agulha, por exemplo), que após a passagem o ar dissolvido ocorre a nucleação das microbolhas (XU et al., 2022). Essas microbolhas colidem com as partículas suspensas na água e formam

aglomerados (EDZWALD, 2010; XU et al., 2022). Tais aglomerados são unidos pelo contato entre as microbolhas presentes na superfície da partícula (LI et al., 2022).

A interação entre partículas e microbolhas apresentam um caráter cíclico passando por quatro etapas: colisão; adesão; coalescência e dessorção. Na Figura 2.2 está de forma esquemática esse ciclo, em que inicialmente bolhas colidem com a partícula, mas apenas algumas conseguem aderir na superfície da partícula. A colisão e aderência ocorrem de forma constante até o momento em que a superfície da partícula torna-se saturada de bolhas, as mesmas vão coalescendo simultaneamente. Na etapa de coalescência as bolhas menores se unem para aumentar o diâmetro médio e diminuir a quantidade de bolhas menores presentes na partícula, à medida que as bolhas aumentam seu diâmetro, vão se despreendendo das partículas fazendo que o diâmetro médio das bolhas presente na superfície da partícula diminuam, fazendo o ciclo reiniciar (KYZAS; LAZARIDIS; MATIS, 2019; WANG et al., 2021a).

Figura 2.2 Interação entre microbolhas e partícula.



Fonte : Adaptado Wang et al. (WANG et al., 2021a)

Fatores que proporcionam a coalescência das microbolhas são a presença de microbolhas com tamanhos heterogêneos e elevada agitação do meio líquido (KYZAS; LAZARIDIS; MATIS, 2019). A máxima eficiência na etapa da colisão entre bolhas e partículas é encontrada quando ambos apresentam tamanhos similares (KIM; PARK; HAN, 2018). Já o formato da bolha durante sua ascensão varia conforme seu diâmetro, para bolhas contendo diâmetro inferior a 100 μm possui forma de uma esfera rígida, bolhas com diâmetro entre 1 e 10 mm formato elíptico e para superiores a 10 mm formato de tampa esférica (EDZWALD; HAARHOFF, 2011; RAJAPAKSE et al., 2022)

O tamanho da bolha empregado no processo de FAD tem significativo efeito na velocidade de flotação e qualidade da flotação (HAARHOFF; EDZWALD, 2004). Tamanho de bolha contendo diâmetro menor a 100 μm aumenta a velocidade de ascensão dos flocos, aumentando a eficiência da remoção, pois o uso de microbolhas aumenta as chances de colidirem com os flocos e se ligarem, fazendo que o aglomerado floco/microbolha flote de forma mais rápida (SHAHI et al., 2021).

2.1.3 COAGULANTE E FLOCULANTE

A flotação é o processo físico de separação dos aglomerados de partículas suspensas na água. Antecedido desta etapa de remoção, ocorre a coagulação e floculação em que são utilizados agentes químicos para a desestabilização das partículas dispersas na água, auxiliando na formação de flocos de material particulado (JUSTINA et al., 2018; VALADE; BECKER; EDZWALD, 2009).

Os principais agentes coagulantes utilizados são os sais metálicos de alumínio e de ferro, que quando adicionado em água sofrem hidrólise (HAMEED et al., 2016). Após dissolvidos, esses metais fazem ligações por meio de complexação com ligante

orgânicos como o carbono orgânico dissolvido (COD) e a matéria orgânica natural (MON), à medida que o metal vai ligando-se a esses componentes forma-se o surgimento de flocos de partículas na ordem de submícrons, seguido do crescimento desses flocos (EDZWALD, 2007, 2013; MIRANDA; LATOUR; BLANCO, 2020).

Bolhas de ar em água, sem a adição de coagulantes químicos, possuem uma carga negativa, denominada de zeta potencial, que gera uma força de repulsão eletrostática entre as bolhas que pode afetar a estabilidade da partícula e impedir a coalescência das mesmas devido a altos valores de zeta potencial (EDZWALD; HAARHOFF, 2011; SAKR et al., 2022). Por outro lado, partículas, algas e matéria orgânica também possuem cargas negativa em suas superfícies, ocasionando um impacto direto na remoção de material suspenso em água via FAD, pois a presença dessas cargas negativas causam uma barreira energética que inibe a colisão e adesão entre bolhas e os flocos presentes na água flocos (WANG et al., 2021b).

A utilização do coagulante tem como objetivo neutralizar as cargas negativas superficiais das partículas para valores iguais a zero ou próximos de zero (EDZWALD; KAMINSKI, 2009). Entretanto, a superdosagem de coagulante pode converter as cargas negativas das partículas e microbolhas para cargas positivas devido ao excesso da mudança das cargas, mantendo as forças repulsivas ao invés de forças atrativas como forças hidrofóbicas ou de Van der Waals que auxiliam na formação de grandes agregados de microbolhas e flocos que se ligam e flutuam em direção a superfície (COLIC; MORSE; MILLER, 2008; EDZWALD; HAARHOFF, 2011).

De acordo com Edzwald & Haarhoff (2011) a ótima coagulação é alcançada quando sua dosagem proporciona as seguintes condições:

- Máxima remoção de partículas (turbidez, partículas, patógenos) pela clarificação e filtração;

- Máxima remoção de matéria orgânica natural pela clarificação e filtração;
- Mínima quantidade residual de coagulante na água tratada;
- Baixa produção de lodo;
- Mínimo custos com coagulantes, correção de pH e tratamento do lodo gerado.

O propósito da floculação é aumentar o tamanho das partículas para facilitar a aderência das bolhas na partícula neutralizadas (PIAGGIO et al., 2022). Os agentes floculantes utilizados são grandes moléculas poliméricas que mantem juntos os flocos de partículas gerados na etapa de coagulação (COLIC; MORSE; MILLER, 2008).

Os agentes floculantes podem ser de origem sintética ou natural. O Tanfloc SG é um produto baseado em tanino, compostos polifenólicos, que tem grande potencial como floculante (HAMEED et al., 2016). Seu uso se tornou atrativo devido as suas vantagens como ser um coagulante natural, produz pouco lodo, baixa concentração de metais pesados no lodo, e não consumir a alcalinidade da água durante o tratamento, ser orgânico e biodegradável (JUSTINA et al., 2018; KYZAS; LAZARIDIS; MATIS, 2019).

2.1.4 APLICAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES ATRAVÉS DA FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO

Maeng, Shahi e Dockko (2021) fizeram um estudo no tratamento de água para beber contendo algas. Investigaram a aplicação da sedimentação, FAD convencional e a FAD utilizando pequenas esferas vasadas, miçangas. A FAD convencional conseguiu remover 91 % das algas em 4 min, já a com miçangas a remoção passou para 95,15 % em 2 min, e a sedimentação teve uma remoção de 26,7 % e 87,2 % em 5 e 30 min. A FAD com miçangas conseguiu a taxa de remoção de 95,5 % usando apenas 5% de reciclo

mostrando ser 23,6% mais eficiente que a convencional FAD. Também foi observado que o aumento da vazão de reciclo não mostrou incrementos na remoção quando utilizadas as miçangas, bem como menor uso de doses de coagulante foram utilizadas.

Esfandiari & Mowla (2021) estudaram a aplicação de coagulantes a base de alumínio e de ferro na remoção de partículas de microplástico de polietileno no tratamento via flotação por ar dissolvido. Foi observado um excelente desempenho do tratamento da água cinza contendo as partículas de microplástico, em que o coagulante a base de Al conseguiu uma a remoção 96,10% e 70,56% para o de ferro. A ótima condição operacional foi alcançada utilizando 5,95 bar de pressão de saturação e pH igual a 6.

Priynka & Saravanakumar (2022) utilizaram o processo de flotação por ar dissolvido para avaliarem a remoção de partículas de microplásticos de polietileno tereftalato (PET), poliestireno (OS), polipropileno (PP) e o polietileno (PE) em diferentes matrizes de meio líquido, testando em água deionizada, água do mar, água de rios, águas residuais e em chorume. A FAD conseguiu obter excelentes resultados no tratamento das matrizes conseguindo remover 90 %, 99 %, 87 %, 89 % e 83 % das partículas presentes na água deionizada, água do mar, de rio, residuais e chorume, respectivamente. Neste tratamento também foi utilizado um surfactante biodegradável a base de nozes de sabão *Sapindus mukorossi* para a geração e estabilização do tamanho das bolhas.

Shende *et al* (2022) estudaram a viabilidade de realizar o tratamento dos efluentes gerados em uma indústria de matadouros via FAD. Inicialmente, a água residual coletada apresentava muitos sólidos suspensos apresentando concentrações na faixa de SS: 6000-25000 mg/L, bem como alta concentração de gorduras, óleos e graxas (FOG: 12000-35000 mg/L). Após a utilização da FAD a remoção de sólidos totais passou de 55 % para 90 % e a remoção de gorduras, óleos e graxas alcançou a faixa de 95 %. No final

do tratamento o efluente sai com concentrações de sólidos totais e gorduras em valores médios de 200 e 100 mg/L, respectivamente.

Yap *et al* (2022) fizeram um estudo comparativo entre dois coagulantes no tratamento de água de um rio via FAD, utilizaram o sulfato de alumínio, coagulante padrão a base de alumínio, e o polímero poli(cloreto de N,N-dialquil-N,N-dimetil amônio) (PDADMAC). O tratamento utilizando o PDADMAC ao invés do sulfato de alumínio apresentou uma remoção superior a 98 % e 88,5 % para a convencional. Além do ganho o desempenho de remoção de material particulado, houve a redução dos custos com insumos químicos em torno de 74 %.

Saththasivam *et al* (2022) estudaram a aplicação da FAD para reduzir a concentração de óleos em efluentes indústrias. Apontaram que a FAD possui elevados custos químicos, produz poluição ambiental devido ao efluente residual contendo insumos químicos e geração de lama não-biodegradável. Diante disso propuseram fazer um tratamento utilizando cloreto de ferro como coagulante e a chitosana como floculante biodegradável. A utilização desses agentes reduziu cerca de 37 % os custos químicos; redução de 90 % de uso de agentes não-biodegradável; remoção de quase 90 % da emulsão de óleo, apresentando maior faixa operacional de pH estando entre 5 a 9.

3. HIPÓTESE

A mudança do tanque de flotação de 62 L para um novo tanque de 45 L e com *baffle* móvel tornará o processo de flotação mais flexível, onde a menor área da zona de contato influencia positivamente na etapa de agregação das microbolhas na superfície das partículas suspensas em água.

3.1 OBJETIVOS GERAIS

Redimensionar os equipamentos presentes no protótipo da planta automatizada de flotação por ar dissolvido instalada no Laboratório de Controle e Automação de Processos (LCAP) da Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas.

Investigar como variáveis de pressão de saturação, vazão de alimentação e razão de reciclo influenciam na eficiência de remoção de material suspenso na água durante o processo de flotação.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar a dosagem ideal de agentes coagulante e flocculante;
- Encontrar os melhores parâmetros operacionais de pressão de saturação, vazão de alimentação e de reciclo;
- Elaborar planejamento experimental fatorial completo de dois fatores e três níveis (2^3).
- Elaborar planejamento experimental composto de face centrada de dois fatores e três níveis (2^3).

- Avaliar a influência da variação da área da zona de contato no processo de remoção de turbidez.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção será apresentado o protótipo automatizado da planta de flotação por ar dissolvido. Em seguida serão elencadas as melhorias implementadas no protótipo e, por fim, tem-se o procedimento de preparação da água bruta sintética, planejamento experimental e análise de influência da área da zona de contato no processo de flotação.

4.1 ADAPTAÇÃO DO PROTÓTIPO DE FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO.

Na Figura 4.1 é ilustrada a planta de tratamento de água por ar dissolvido projetada e automatizada por Fonseca (2017), desenvolvida durante seu doutorado, e na Tabela 4.1 está a discriminação dos equipamentos, atuadores, controlador lógico programável e sensores utilizados. Na Tabela 4.2 estão os principais equipamentos com suas respectivas funções. Esse protótipo está localizado no Laboratório de Controle e Automação de Processos (LCAP) da Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas.

Fonseca (2017) no desenvolvimento da automatização do protótipo implementou cinco malhas de controles objetivando assegurar que as condições do processo sejam ajustadas e moldadas para que a coleta dos dados seja feita da melhor forma possível, bem como assegurar a segurança dos equipamentos e dos operadores do protótipo. As malhas de controles estão aplicadas na vazão de alimentação, vazão de água saturada, nível do vaso de pressurização, pressão do vaso de pressurização e da vazão de água saturada. Mais detalhes construtivos e referente ao processo de automação do protótipo podem ser encontrados em Fonseca (2017).

Tabela 4.1 - Equipamentos, atuadores e sensores presentes no protótipo de FAD.

Equipamentos			
Equipamento	Modelo	Marca	Características
Floculador	-	-	Volume de 21,6 L
Flotador	-	-	Volume de 45 L
Filtro de areia	-	-	Volume de 5,65 L
Tanque Água Filtrada	-	-	Volume de 25 L
Vaso saturador	-	-	Volume de 108 L
Tanque de Efluente	-	-	Volume de 100 L
Tanque de NaAlO ₂	-	-	Volume de 1,0 L
Tanque de Tanino	-	-	Volume de 1,0 L
Válv. agulha	SS-ORM2	Swagelok®	Cv = 0,09
Válv. solenóide	20BF073TF	Parker®	0 a 4,8 L/min
Motor de passo	DMX-K-DRV-23	Arcus®	32000 passos
Agitador pá tipo plana	712	Fisatom®	0 a 2000 rpm
Agitador pá tipo hélice	RZR2051	Heidolph®	0 a 1000 rpm
Bomba de engrenagens	GC-M23-JVS-6	Micropump®	3 L/min
Bomba centrífuga	Hydrobloc	P500T KSB®	3600 L/h
Bombas dosadoras	-	-	5000 rpm
CLP	X20 CP1585	B&R®	-
Atuadores			
Inversor de frequência	VLT Micro Drive	Danfoss®	0 - 60 Hz
Inversor de frequência	VLT 2800	Danfoss®	0 - 60 Hz
Inversor de frequência	CFW 10	Easydrive WEG®	0 - 60 Hz
Mod. largura de pulso	-	-	0 - 100 %
Mod. largura de pulso	-	D.A.L.®	0 - 100 %
Válv. reg. de pressão	P3HPA12AD2VD1A	Parker®	0 - 10 bar
Controlador do driver	ACE-SXC 485	Arcus®	-
Sensores			
Turbidímetro <i>online</i>	Microtol 4	HF Scientific®	0 - 1000 NTU
Turbidímetro <i>offline</i>	AP2000	Policontrol®	0 - 1000 NTU
Med. vaz. eletromag.	VMS Pro 1000	Incontrol®	0 - 10 m/s
Med. vaz. turbina	FLR1009ST-I	Omega®	0,05 - 0,5 L/min
Transm. pressão abs.	NP430D	Novus®	0 - 20 bar
Transm. pressão dif.	692900007141	Huba control®	0 - 100 mbar
Pt-100 com Tx-Block	TxMiniBlock	Novus®	-200 - 650 °C
Transd. de potência ativa	3000W420A24VDC	Secon®	0 - 3 kW

Fonte: Adaptada Fonseca (2017)

Tabela 4.2 - Equipamentos, atuadores e sensores presentes no protótipo de FAD.

Identificação	Equipamento	Função
1	Tanque de coagulação e floculação	Proporcionar a coagulação e a floculação do material suspenso na água bruta
2	Motor de passos da válvula agulha	Controlar a vazão de água saturada injetada na zona de contato do flotador para a geração de microbolhas de ar.
3	Tanque de flotação	Remover o material particulado coagulado através da utilização de microbolhas de ar.
4	Filtro de areia	Remover flocos ou partículas que não flotaram.
5	Tanque pulmão de água clarificada	Armazenar a água clarificada após passar pelo filtro de areia.
6	Vaso de pressurização	Dissolver ar a alta pressão na água de recirculação.
7	Turbidímetro <i>in-line</i>	Medir em tempo real a turbidez da água na saída do tanque de flotação.

Fonte: Autor.

Figura 4.1 - Protótipo desenvolvido por Fonseca (2017).



Fonte: Adaptado Fonseca (2017).

A água bruta a ser tratada é armazenada em um reservatório. Este reservatório possui agitador mecânico para manter a água bruta homogeneizada, conservando a

turbidez na faixa desejada, evitando a sedimentação do material particulado em suspensão. Uma bomba centrífuga é responsável por fazer o bombeamento desta água até o tanque de coagulação e floculação.

O tanque de coagulação e floculação apresenta três subdivisões contendo dois agitadores mecânicos. Na primeira seção ocorre a mistura entre o efluente e o aluminato de sódio, o tanino SG é adicionado na seção posterior do tanque. Os agentes de coagulação e floculação são bombeados até a parte superior do tanque através de bombas peristálticas. Agitadores de pás e de hélices foram colocados nas seções 1, 2 e 3 respectivamente. O primeiro agitador apresenta velocidade de agitação (150 rpm) e o segundo velocidade (50 rpm). A elevada agitação promovida pelo primeiro agitador é empregada para a homogeneização entre as entradas de aluminato de sódio e a água bruta, já o segundo e o terceiro serão utilizados para manter os coágulos em suspensão até o momento em que essa mistura seja transferida até o tanque de flotação.

A água contendo aglomerados de coágulos da terceira seção do floculador é transferida para o flotador via ação gravitacional onde entra em contato com microbolhas de ar. Esse contato faz com que as microbolhas colidam e adiram-se na superfície dos flocos de partículas suspensas na água. A adesão de microbolhas faz o material particulado formar uma camada espessa na superfície do tanque de flotação de partículas/bolhas e abaixo dessa camada de material suspenso está a água clarificada contendo baixo teor de turbidez. A água clarificada passa por um filtro de areia para garantir a máxima remoção de material particulado, e após filtrada é reservada em um tanque pulmão acoplado ao filtro de areia.

Com o frequente desenvolvimento de atividades realizadas na planta e com a realocação da mesma para um outro laboratório, percebeu-se a necessidade de readequar

o protótipo a fim de substituir equipamentos desgastados ou que não atendiam todos os requisitos para o pleno funcionamento da unidade de tratamento de água.

Inicialmente, a planta operava com um tanque de 1000 L utilizado para o armazenamento de água bruta. Este tanque será substituído por um tanque de 100 L. Essa troca será feita devido a realocação da planta para outro laboratório.

A coagulação e a floculação ocorriam em um tanque de 30 L feito de acrílico, agora será em um tanque menor com 21,6 L construído em vidro. O tanque da flotação passará de um tanque de acrílico de 67,2 L para um tanque de vidro de 45 L. A mudança desses tanques tem como objetivo menor consumo de água bruta e dos reagentes de coagulação e floculação. Além de que, o novo tanque de flotação apresentará uma configuração a qual o *baffle*, divisória que separa as zonas de contato e a separação, poderá ser alocado em cinco diferentes posições, possibilitando avaliar a influência da área da zona de contato no processo de clarificação da água bruta.

O vaso de pressurização de 4,4 L será substituído por um novo de 100 L. A troca deste vaso é devido a observação da queda do desempenho do funcionamento da planta após o uso contínuo. Notava-se que a corrente de água saturada contendo ar dissolvido gerava menos bolhas após a despressurização da corrente posteriormente a passagem pela válvula agulha ao longo que os experimentos eram realizados. Isto ocorre porque o vaso é constantemente alimentado com água de reciclo advinda de um tanque pulmão durante o funcionamento da planta. Essa corrente de água que alimentava o vaso não tinha tempo o suficiente para que o ar se dissolvesse até a condição de equilíbrio de saturação de ar dissolvido na água. Edzwald (2010) cita em seu trabalho que a condição de saturação de ar em água é alcançada após cerca de 4h.

A válvula agulha que é responsável por fazer o ajuste fino da vazão da corrente de água pressurizada também será substituída por outra de mesmo tipo, material

(aço inox) e coeficiente de vazão ($cv = 0,09$). Essa válvula além de regular a vazão de água pressurizada, promove a geração de microbolhas à medida que a água é despressurizada na saída da válvula, a queda de pressão faz que o ar dissolvido na água se desprenda na forma de microbolhas. As microbolhas são utilizadas para separar os coágulos de material particulado dispersos na água. Essa troca é necessária, pois a geração de microbolhas na saída da válvula causa o desgaste da mesma devido o processo de nucleação, isto é, durante a despressurização da água saturada ocorre a formação de microbolhas as quais colidem na parede da válvula causando o deterioramento do seu interior. Além de que, durante os experimentos antecedentes observava-se uma heterogeneidade na produção de microbolhas devido ao desgaste da válvula.

4.2 DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO PARA COAGULAÇÃO

Os ensaios experimentais na planta serão realizados após ensaios de bancadas para definição de parâmetros operacionais como síntese da água bruta e a dosagem das correntes do coagulante e floculador.

4.2.1 PRODUÇÃO DA ÁGUA BRUTA SINTÉTICA

A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB – possui uma rede automática que monitora a qualidade da água de rios e de reservatórios de todas as 17 estações de tratamento de água por meio de medições *on-line* que acompanham os parâmetros biológicos e físico-químicos. Segundo o relatório anual referente a qualidade das águas interiores do estado de São Paulo do ano de 2020 gerado pela CETESB cerca de 81 % dessas águas tratadas são classificadas como água doce Classe I cuja turbidez limite para essa água é de até 40 NTU, seguindo a resolução CONAMA nº 357/2005.

Ainda de acordo com esse relatório, é usual que a turbidez dos efluentes entre abril a outubro mantenham-se em níveis de 4 a 40 NTU.

Diante destas informações este trabalho irá utilizar um efluente de turbidez de 20 NTU, pois leva em consideração um valor intermediário entre os principais mananciais do estado de São Paulo.

A água bruta será produzida pela dissolução de terra vermelha peneirada em cinco litros de água. A terra após ser peneirada irá ser adicionada aos poucos no recipiente com a água, que será submetido a agitação vigorosa até atingir uma mistura homogênea. Em seguida, a mistura descansará por dois minutos para que os sólidos maiores decantem no fundo do recipiente, restando uma suspensão de material particulado de difícil decantação. Essa suspensão será transferida para o tanque onde terá sua turbidez aferida e ajustada até a condição de 20 NTU.

A turbidez da suspensão obtida será avaliada por um turbidímetro on-line modelo Microtol 4 da HF Scientific®. Realizada a produção do efluente o teste de jarro poderá ser realizado.

4.2.2 TESTE DE JARRO

O teste de jarro é um procedimento bastante empregado em Estações de Tratamento de água para a determinação da dosagem ideal de coagulante e floculante utilizados no tratamento da água bruta. Em que, ensaios de coagulação e floculação são realizados em jarros contendo água bruta, onde a quantidade de coagulante e floculante em cada jarro é variada a fim de determinar a melhor dosagem de coagulante.

Neste trabalho foi utilizado o aluminato de sódio como agente coagulante e o tanino SG como agente floculante, pois ambos apresentam elevado poder de coagulação

e floculação, respectivamente, para remoção de material orgânico suspenso em água (JUSTINA et al., 2018).

Em seis béqueres foram colocados 500 mL da água bruta, tendo a turbidez e o pH aferidos previamente. Posteriormente, diferentes dosagens de aluminato de sódio foram adicionadas nos béqueres e submetidos a agitação vigorosa, 150 rpm, durante três minutos, passado o tempo, as misturas ficaram em repouso por dois minutos, alíquotas foram coletas para aferição do pH e turbidez de cada béquer. A amostra que apresentou menor valor de turbidez foi escolhida para a etapa de determinação do floculante.

A dosagem do tanino foi determinada de forma análoga ao do aluminato. Seis béqueres contendo 500 mL de água bruta mais a dosagem de coagulante determinada anteriormente foi submetido ao agitação de 150 rpm durante três minutos, após esse tempo foram adicionadas diferentes dosagens de tanino aos béqueres e o agitação foi reduzido para 50 rpm, passando por mais três minutos de agitação e repouso de dois minutos. Fechando esse ciclo, foi verificado o pH e a turbidez e, novamente, o béquer de menor turbidez contém a dosagem ideal de coagulante e floculante.

4.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Definidas as condições de turbidez da água bruta sintética a ser tratada juntamente com a melhor dosagem de coagulante e floculante foi possível, então, realizar o planejamento experimental para a etapa da flotação. Os ensaios seguiram dois planejamentos: o planejamento fatorial completo de dois níveis e três fatores e o planejamento composto de face centrada de dois fatores e três níveis.

O planejamento fatorial completo foi realizado para a rápida verificação da correlação entre as variáveis estudadas. A expansão dos ensaios do fatorial completo para

o composto de face centrada foi realizada para proporcionar um melhor entendimento de quais variáveis exercem maior influência no desempenho do processo de flotação, bem como conseguir fazer inferências com base estatística, tendo uma economia na experimentação. Na Tabela 4.3 estão elencadas as variáveis do processo com seus respectivos níveis levando em consideração limitações físicas e teóricas, já na Tabela 4.4 e Tabela 4.5 estão as matrizes dos planejamentos experimentais.

Tabela 4.3 - Níveis do planejamento experimental.

Níveis	Pressão (bar)	Razão de reciclo (%)	Vazão de entrada (L/min)
$+\sqrt[4]{2^3}$	6,01	25,02	1,60
+1	5,50	24,00	1,50
0	4,75	22,50	1,35
-1	4,00	21,00	1,20
$-\sqrt[4]{2^3}$	3,49	19,98	1,10

A vazão de alimentação do tanque de coagulação e floculação (Q_e) juntamente com a razão de reciclo (R) foram determinadas a partir da Equação 1, uma vez que o medidor de vazão de turbina da corrente de reciclo (Q_r) está limitada entre 50 a 500 mL/min. Razões menores do que 18 % não serão utilizadas devido a baixa formação de microbolhas geradas.

$$R = \frac{Q_r}{Q_e} \times 100\% \quad \text{Eq. (1)}$$

Tabela 4.4 - Matriz experimental para um planejamento 2^3 fatorial completo.

Ensaio	Pressão (bar)	Razão de reciclo (%)	Vazão de entrada (L/min)
1	-1	-1	-1
2	-1	-1	+1
3	-1	+1	-1
4	-1	+1	+1
5	+1	-1	-1
6	+1	-1	+1
7	+1	+1	-1
8	+1	+1	+1

Tabela 4.5 - Matriz experimental para um planejamento 2^3 composto de face centrada.

Ensaio	Pressão (bar)	Razão de reciclo (%)	Vazão de entrada (L/min)
1	-1	-1	-1
2	-1	-1	+1
3	-1	+1	-1
4	-1	+1	+1
5	+1	-1	-1
6	+1	-1	+1
7	+1	+1	-1
8	+1	+1	+1
9	$-\sqrt[4]{2^3}$	0	0
10	$+\sqrt[4]{2^3}$	0	0
11	0	$-\sqrt[4]{2^3}$	0
12	0	$+\sqrt[4]{2^3}$	0
13	0	0	$-\sqrt[4]{2^3}$
14	0	0	$+\sqrt[4]{2^3}$
15	0	0	0
16	0	0	0
17	0	0	0

O protótipo pode operar até uma pressão de 8 bar, entretanto, a pressão de 6,0 bar foi escolhida a fim de observar a influência de altas pressões sem a necessidade de funcionamento do protótipo em condições operacionais próximas do limite de segurança. O limite inferior da pressão foi embasado em trabalhos encontrados na literatura nos quais pressões inferiores a 3 bar não conseguem gerar microbolhas de ar o suficiente para o processo de flotação (EDZWALD, 2010).

Os dados obtidos durante a execução do planejamento composto de face centrada foram tratados no *software* Statística[®] versão 12. Esta metodologia foi escolhida, pois necessita de menos ensaios para a geração de modelos quadráticos capazes de descrever as relações entre as variáveis estudadas contendo 95 % de confiança. Serão utilizadas três repetições no ponto central objetivando minimizar o erro experimental e possibilidade de detectar a falta de ajuste. A análise ANOVA juntamente com o teste F

serão realizados como parâmetros de quantificação do grau de (in)dependência das variáveis, onde será observado a variância interna das variáveis e a variância entre variáveis estudadas.

4.4 AVALIAÇÃO DA VARIAÇÃO DA ÁREA DA ZONA DE CONTATO NA TAXA DE REMOÇÃO DA TURBIDEZ

Inicialmente, para o desenvolvimento do planejamento experimental descrito na subseção 4.4, o *baffle* foi fixado na posição 5, estando a 11,5 cm da parede do tanque de flotação, a fim de encontrar a melhor configuração operacional que remova o máximo de material particulado da água a ser tratada.

Determinado o melhor arranjo experimental das variáveis de pressão de saturação e vazões de alimentação e reciclo na posição 5, pode-se avaliar a influência das outras 4 possíveis posições em que o *baffle* pode ser alocado, fazendo que a área da zona de contato aumente ou diminua à medida que o *baffle* é realocado.

A variação da área da zona de contato irá alterar diretamente o percurso das microbolhas partindo do fundo da zona de contato até a superfície, podendo ser mais estreito ou mais largo. Durante a ascensão das microbolhas existe uma maior probabilidade de ocorrer a colisão entre si, bem como ocorrer a aderência de microbolhas na superfície dos flocos de material particulado para regiões de menor área de zona de contato.

5. RESULTADOS E DISCURSÃO

Neste trabalho foi realizado a modificação de um protótipo de planta automatizada de tratamento de água por ar dissolvido, objetivando melhorar o desempenho no tratamento de água. O modo operante da planta durante os ensaios foi com recirculação parcial da água pressurizada. Os resultados obtidos da adaptação do protótipo serão mostrados a seguir.

5.1 PROTÓTIPO DA PLANTA DE FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO

A nova planta automatizada para o tratamento de água via flotação por ar dissolvido, Figura 5.1, apresenta um arranjo dos equipamentos de forma semelhante a antiga planta, Figura 4.1. Na Tabela 5.1 estão elencados os principais componentes da nova planta.

Figura 5.1 - Planta automatizada para tratamento de água via flotação por ar dissolvido atualizada.

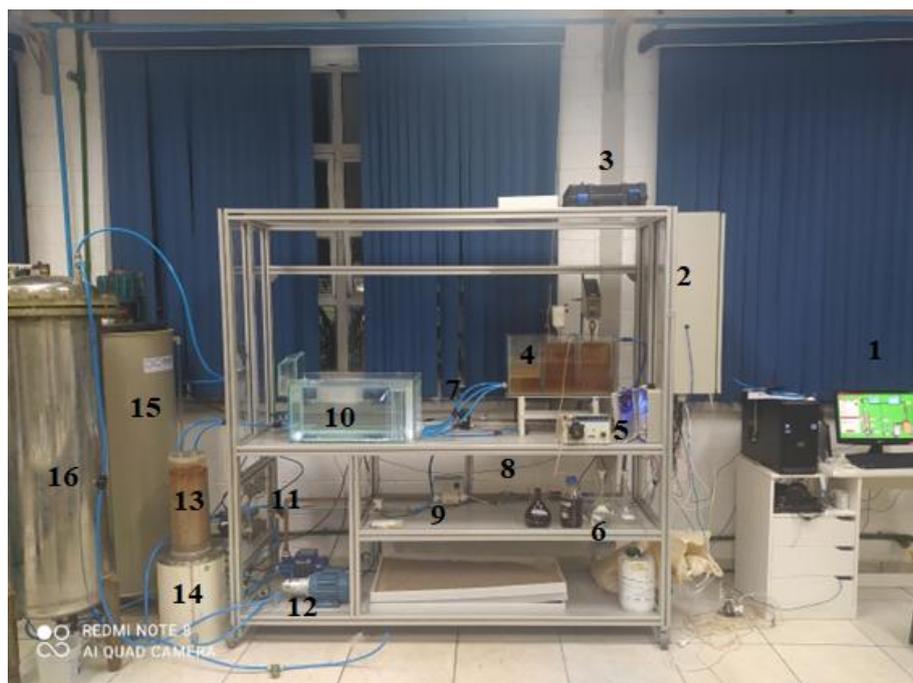


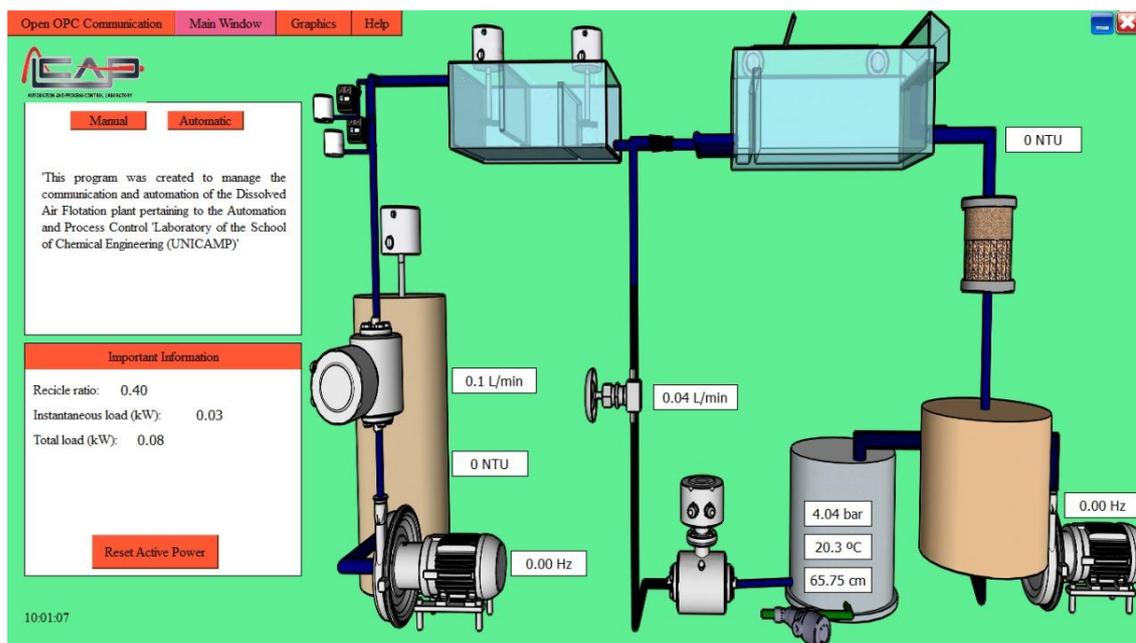
Tabela 5.1 - Equipamentos da planta FAD atualizada.

Numeração	Equipamento
1	Computador
2	Painel elétrico
3	Turbidímetro de bancada
4	Tanque de coagulação e floculação
5	Bombas peristálticas
6	Agentes químicos
7	Motor de passos
8	Válvula agulha
9	Medidor de vazão
10	Tanque de flotação
11	Turbidímetro online
12	Bomba de engrenagem
13	Filtro de areia
14	Tanque pulmão
15	reservatório de água bruta
16	Vaso de pressão

O *start-up* da planta é realizado de forma sequencial. Inicialmente a planta é energizada pelo painel elétrico, em seguida no computador são abertos os programas que fazem a comunicação entre o computador e os dispositivos eletrônicos da planta FAD, o controlador do motor de passos também é acionado e por fim a interface gráfica no python, nessa ordem.

A interface gráfica, Figura 5.2, foi criada para a realização do monitoramento do processo. Nela é possível visualizar os valores de turbidez da corrente de saída da planta, a frequência e vazão das bombas utilizadas, nível de água e temperatura do tanque de saturação. Além de visualizar nesta mesma interface, há a possibilidade de entrar com valores de pressão, e vazões de alimentação e de reciclo, nível de agitação do reservatório de água turva. Após registrar esses valores nos respectivos campos a planta consegue controlar essas variáveis para o novo *setpoint* adicionado.

Figura 5.2 - Interface gráfica do controle da planta FAD.



5.2 PRODUÇÃO DA ÁGUA BRUTA SINTÉTICA

Os ensaios de teste de jarro foram realizados com água bruta preparada com terra vermelha para uma turbidez de aproximadamente 20 NTU, sendo utilizados 500 mL de água bruta e diferentes volumes de coagulantes e floculantes. No total foram realizados 15 ensaios divididos em três baterias. Todas as baterias seguiram o procedimento descrito na Seção 4.4.3. A Tabela 5.2 apresenta os resultados obtidos nos testes de jarros.

A água bruta passa de um pH, levemente ácido em torno de 6,3 para um pH alcalino forte em torno de 9,5. Essa variação de pH é ocasionada pela adição do aluminato, pois na presença da água o alumínio hidrolisa a água deixando o meio alcalino. A adição do tanino ao meio faz com que o pH diminua ficando próximo do pH neutro tendendo para a faixa alcalina. Nota-se também que nos ensaios em que o aluminato estava em excesso em relação ao tanino, o pH mostra pouca variação.

Tabela 5.2 - Avaliação do teste de jarros com turbidez inicial de 20 NTU.

Bateria 1: Volume de aluminato fixo.							
Volume dos jarros (mL)	500						
Turbidez inicial (NTU)	21,20						
pH inicial	6,30						
Ensaio N°		1	2	3	4	5	6
NaAlO ₂ (2% v/v)	(mL)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
pH de Alcalinização	-	9,53	9,64	9,69	9,71	9,76	9,80
Tanino SG [®] (5% v/v)	(mL)	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00
pH de Floculação	-	9,38	9,48	9,38	9,39	9,29	9,28
Turbidez Final	(NTU)	10,50	3,63	1,94	2,21	1,98	1,92
Remoção de Turbidez	(%)	50,47	82,88	90,85	89,58	90,66	90,94
Bateria 2: Volume de Tanino fixo.							
Volume dos jarros (mL)	500						
Turbidez inicial (NTU)	21,30						
pH inicial	6,43						
Ensaio N°		7	8	9	10	11	12
NaAlO ₂ (2% v/v)	(mL)	0,20	0,40	0,60	0,80	1,20	1,40
pH de Alcalinização	-	8,49	9,23	9,33	9,56	9,70	10,03
Tanino SG [®] (5% v/v)	(mL)	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
pH de Floculação	-	6,21	7,22	7,90	8,62	9,35	9,50
Turbidez Final	(NTU)	0,59	0,66	0,45	0,54	2,16	2,01
Remoção de Turbidez	(%)	97,23	96,90	97,89	97,46	89,86	90,56
Bateria 3: Ajuste da dosagem de aluminato.							
Volume dos jarros (mL)	500						
Turbidez inicial (NTU)	20,10						
pH inicial	6,27						
Ensaio N°		13	14	15			
NaAlO ₂ (2% v/v)	(mL)	0,50	0,60	0,70			
pH de Alcalinização	-	8,87	9,33	9,46			
Tanino SG [®] (5% v/v)	(mL)	3,00	3,00	3,00			
pH de Floculação	-	7,33	6,50	8,20			
Turbidez Final	(NTU)	0,37	0,51	0,83			
Remoção de Turbidez	(%)	98,16	97,46	95,87			

Os seis primeiros ensaios foram utilizados para determinar o volume de floculante que proporcionasse maior remoção de turbidez, foi observado que 3 mL de floculante proporcionou uma remoção de 90,94 %. Na segunda batelada, o volume de tanino foi fixado em 3 mL e o volume de aluminato foi varrida de 0,2 a 1,4 mL. Dentre

os novos ensaios, quando adicionado 0,6 mL de aluminato removeu 97,89 % da turbidez. Já a terceira batelada foi realizada para verificar se 0,6 mL de aluminato era a melhor dosagem, para isso foi realizado mais três ensaios. Desses ensaios, a melhor dosagem de aluminato é de 0,5 mL e 3,0 mL de tanino conseguindo remover 98,16 % da turbidez da água bruta.

Na Figura 5.3 pode-se observar à medida que a concentração de aluminato aumenta ficando em excesso, a remoção da turbidez diminui. A alta concentração de aluminato eleva o pH do meio, dificultando a coagulação do material em suspensão.

Figura 5.3 - Batelada com concentração de aluminato variando.



Logo, para cada litro de água bruta a ser tratada deve ser adicionado 6 mL de Tanino SG[®] a 5 % v/v e 1 mL de aluminato de sódio a 2 % v/v. Na realização dos testes na planta foi necessário diluir a solução de aluminato de sódio para 1% v/v por causa da limitação da bomba dosadora não conseguir trabalhar a baixas vazões.

5.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL 2³

A nova planta FAD passou por alguns testes antes de realizar os ensaios do planejamento experimental. Esses testes foram realizados a fim de verificar se as

condições propostas inicialmente de pressão de saturação, vazão de alimentação e razão de reciclo presentes na Tabela 5.3 eram condizentes com as limitações da planta.

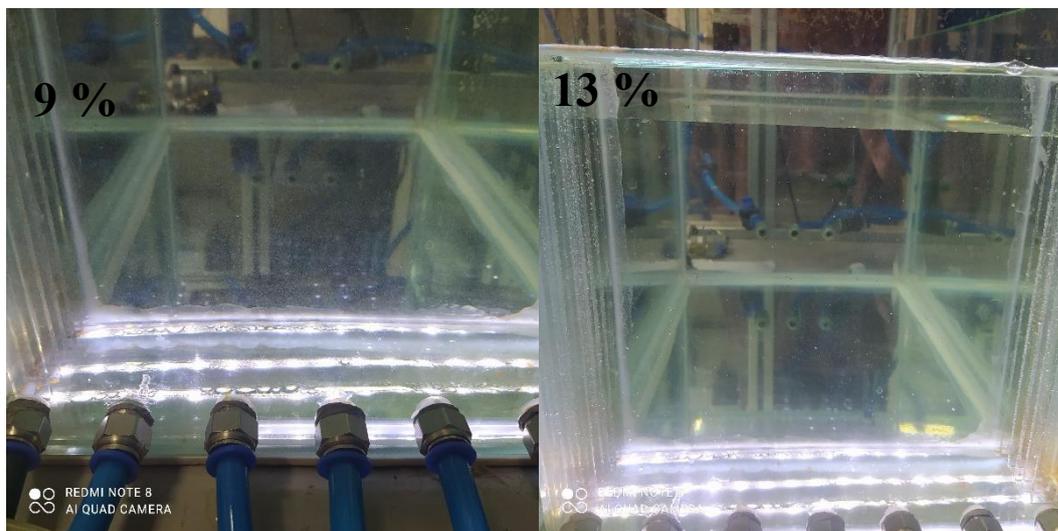
Tabela 5.3 - Condições operacionais propostas inicialmente.

Níveis	Pressão (bar)	Razão de Reciclo (%)	Vazão de entrada (L/min)
+1	6,0	13,0	2,3
-1	4,0	9,0	1,1

No teste de pressão foi verificado o tempo necessário para que ocorresse a saturação da água com o ar no novo vaso de pressão. Previamente, o vaso de pressão foi preenchido com água até 50% de sua capacidade e deixado em repouso durante 4 h de pressurização a 4 bar. Observou-se que esse tempo não é o suficiente para a geração de microbolhas, pois quando a válvula agulha é acionada não era possível ver microbolhas no tanque de flotação, mesmo abrindo a válvula no seu limite havia pouca formação de bolhas. Durante algumas tentativas notou-se que o tempo ideal para o vaso de pressão saturar a água o suficiente para a geração de bolhas fosse visível a olho nu era de doze horas no mínimo.

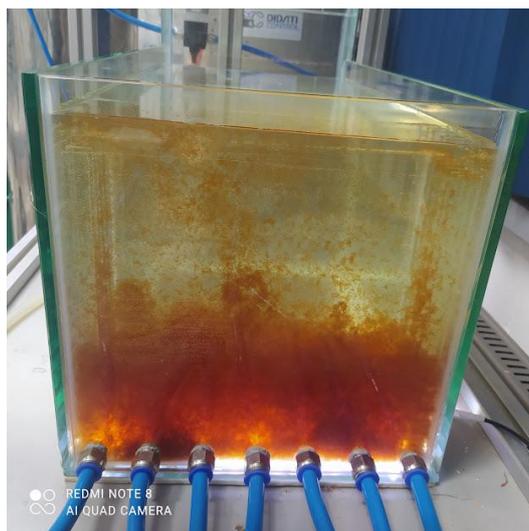
Estabelecido o tempo mínimo de pressurização, foi verificada a razão de reciclo. Na literatura, é possível encontrar muitos trabalhos utilizando razão de reciclo entre 9% a 15%. A planta FAD do LCAP quando ajustada para essa faixa de reciclo não é possível observar a formação de microbolhas, Figura 5.4. Uma das principais características do processo de tratamento de água via FAD é o aspecto esbranquiçado da zona de contato ocasionado pela presença da elevada concentração de microbolhas, entretanto essa condição não foi alcançada na faixa proposta inicialmente.

Figura 5.4 - Teste da razão de reciclo a 4 bar, 1,20 L/min a 9% e 13% de reciclo, respectivamente.



A Figura 5.5 mostra o grande acúmulo de material particulado na zona de contato gerado pela sedimentação da sujeira, pois não há microbolhas o suficiente para fazer com que essas partículas flitem até a superfície para a condição de 13% de reciclo.

Figure 5.5 - Teste da razão de reciclo a 4 bar, 1,20 L/min a 13% de reciclo.



Após a realização de um conjunto de testes chegou-se que a faixa de razão de reciclo que a nova planta pode operar e gerar bolhas o suficiente para a remoção da turbidez é 19% a 25%. Razões inferiores a 19% não é possível perceber formação de bolhas de forma contínua e uniforme, já o limite superior foi de 25% pois para razões de reciclo acima desse valor, o medidor de vazão dessa linha não conseguiria medir devido a seu range de medição de vazão de 0,05-0,500 L/min.

Na Figura 5.6 pode-se observar o aspecto esbranquiçado da zona de contato devido a presença das microbolhas, à medida que a concentração de microbolhas aumenta mais esbranquiçada a zona de contato.

Figura 5.6 - Teste da razão de reciclo a 4 bar, 1,20 L/min a 19% e 25% de reciclo, respectivamente.



A Figura 5.7 ilustra o momento em que a geração de microbolhas é o suficiente para que ocorra a flotação de forma satisfatória do material particulado disperso na água. Na parte superior está a camada de sujeira acumulada e logo abaixo está a água clarificada.

Figura 5.7 - Teste da razão de reciclo a 4 bar, 1,20 L/min a 19%.



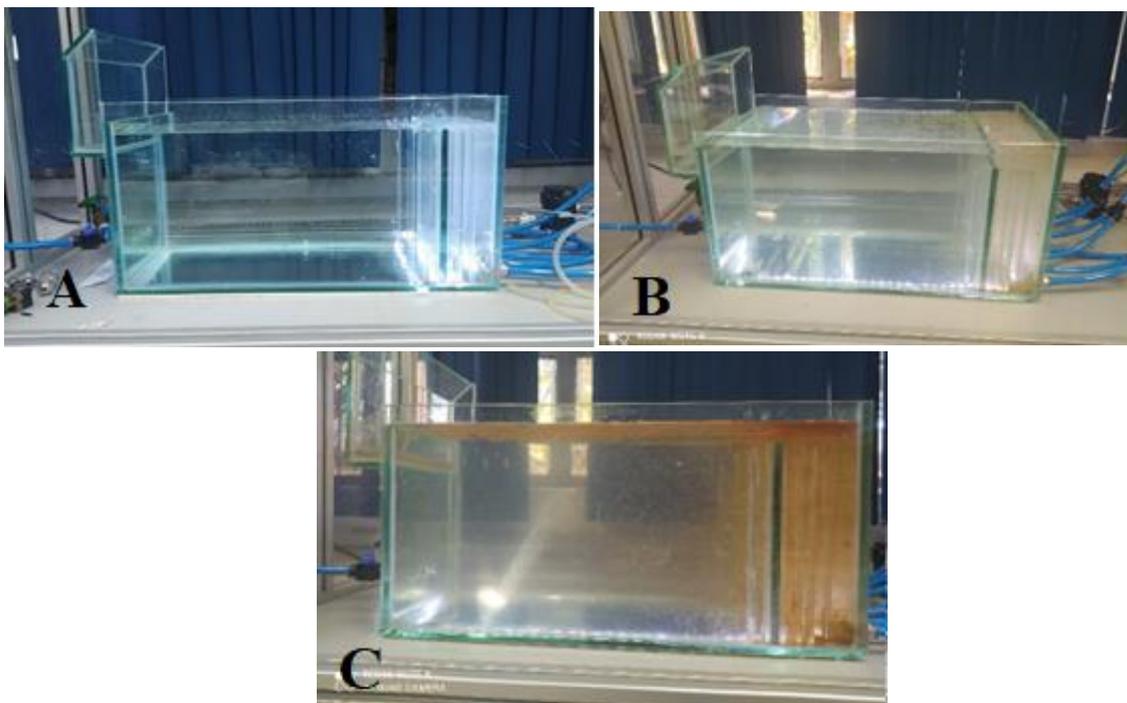
Durante os testes observou-se que a forma como a zona de contato era preenchida influenciava no processo de remoção da turbidez. Quando a zona de contato era preenchida previamente com água limpa e em seguida as vazões de alimentação e de reciclo eram acionadas. Conforme o tempo passava muita sujeira era acumulada nas zonas de contato e separação. Isso ocorria, devido à baixa concentração de microbolhas presente na zona de contato no início do processo, mesmo com elevada vazão de reciclo muito acúmulo de partículas era observado.

No momento em que a zona de contato era preenchida inicialmente apenas com a corrente de água saturada, a zona de contato tornava-se uma região com elevada concentração de microbolhas. Assim que a vazão de alimentação era acionada, o material particulado dessa corrente já entrava em contato em uma região com muitas microbolhas, tornando a remoção dessas partículas mais viável.

Na Figura 5.8 mostra uma sequência de fotos do processo de remoção de turbidez de água. Inicialmente a zona de separação, Figura 5.8 - A, é preenchida com água limpa, a zona de contato é preenchida pela corrente de água saturada com ar, dando o aspecto esbranquiçado na zona de contato. Em seguida, Figura 5.8 - B é acionada a

corrente de alimentação na qual está com elevada concentração de material particulado suspenso. E por fim na Figura 5.8 - C temos a separação dos flocos de material particulado ficando suspensos na superfície da zona de separação e logo abaixo da superfície a água clarificada, contendo baixo teor de material particulado disperso.

Figura 5.8 - Etapas da remoção da turbidez durante o processo de flotação por ar dissolvido. A) adição das microbolhas na Z.C.; B) acionamento da corrente de água bruta contendo agentes químicos. C) remoção do lodo formado na parte superior do tanque de flotação.



Realizado os ajustes nas condições operacionais das variáveis de pressão de saturação, razão de reciclo e vazão de alimentação, bem como determinada a faixa de trabalho do efluente e da dosagem necessária de coagulante e floculante pode-se partir para a planta de FAD para a realização dos ensaios.

Os ensaios foram realizados conforme o planejamento descrito na seção 4.5. Cada ensaio foi realizado durante cerca de 90 a 120 minutos, tempo equivalente para encher 3 vezes o tanque de flotação. A cada 1 segundo a planta FAD coletava e guardava os dados das variáveis estudadas em um arquivo Excel.

A Tabela 5.4 apresenta o conjunto dos oito experimentos que compuseram o planejamento fatorial completo com os respectivos valores de remoção de turbidez (R.T.) quando variado a pressão (P), razão de reciclo (R.R) e a vazão de alimentação (Qe).

Tabela 5.4 - Planejamento fatorial completo de 2^3 em variáveis originais.

Ensaio	Pressão (bar)	Razão de Reciclo (%)	Vazão de Alimentação (L/min)	Turbidez Removida (%)
1	4,00	21,00	1,20	83,00
2	4,00	21,00	1,50	80,29
3	4,00	24,00	1,20	86,85
4	4,00	24,00	1,50	73,97
5	5,50	21,00	1,20	77,46
6	5,50	21,00	1,50	80,32
7	5,50	24,00	1,20	77,16
8	5,50	24,00	1,50	80,85

Os resultados da Tabela 5.4 foram tratados *software* Statistica® versão 12 a fim de avaliar como as variáveis influenciam na remoção da turbidez. Esse tratamento forneceu uma matriz de efeitos que auxilia na determinação de quão significativo uma variável pode interferir ou ajudar no processo de tratamento da água. O intervalo de confiança aplicado na geração desse modelo foi de 95 % tendo uma tolerância de erro de apenas 5 %.

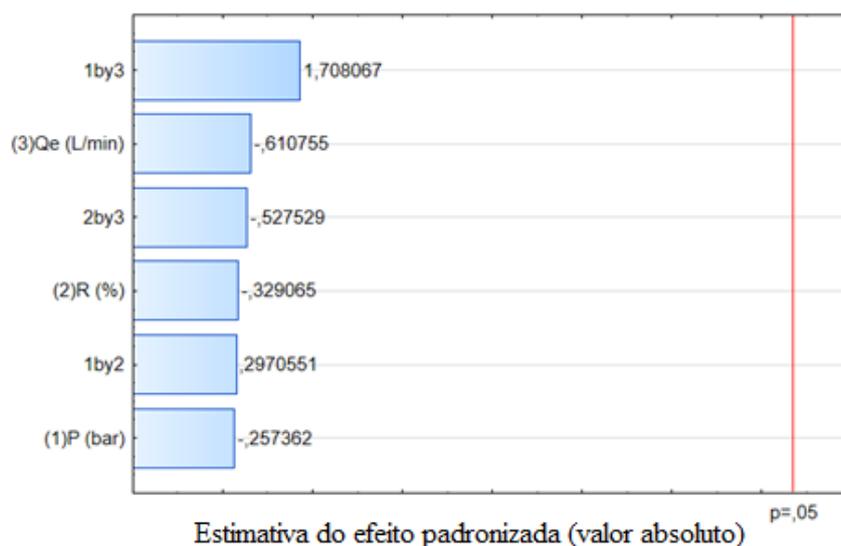
A Tabela 5.5 mostra a matriz de efeitos completa gerada para o planejamento fatorial completo. Os efeitos considerados significativos (p -valor $< 5\%$) estão destacados em vermelho. Dos sete efeitos analisados apenas o valor da constante foi significativo, os demais efeitos contendo as variáveis de pressão, razão de reciclo e vazão de alimentação não mostraram ser significativos, pois apresentaram um valor de p -valor muito maior que 0,05.

Tabela 5.5 - Matriz completa de efeitos com 95 % de confiança para o planejamento fatorial completo.

	Efeito	Desvio padrão do erro puro	<i>t-student</i> calculado	<i>p-valor</i>	Coefficiente de regressão	Desvio padrão do erro do coeficiente
Constante	79,1200	1,9525	40,5224	0,0157	79,1200	1,9525
P	-1,0050	3,9050	-0,2574	0,8396	-0,5025	1,9525
R	-1,2850	3,9050	-0,3291	0,7976	-0,6425	1,9525
Qe	-2,3850	3,9050	-0,6108	0,6509	-1,1925	1,9525
P*R	1,1600	3,9050	0,2971	0,8162	0,5800	1,9525
P*Qe	6,6700	3,9050	1,7081	0,3372	3,3350	1,9525
R*Qe	-2,0600	3,9050	-0,5275	0,6910	-1,0300	1,9525

O gráfico de Pareto (Figura 5.9) é uma forma de visualizar a importância e a magnitude dos efeitos. As barras do gráfico de Pareto representam o valor do teste *t-student* determinado para os efeitos calculados da Tabela 5.5. As barras que cruzam a linha de referência ($p = 0,05$) a indica que tal efeito é estatisticamente significativo no processo de remoção de turbidez, para este caso em análise nenhum dos efeitos mostrou-se significativos no processo de tratamento de água via flotação por ar dissolvido

Figura 5.9 - Gráfico de Pareto; variável: Remoção de turbidez; 3 fature; 1 bloco; 8 ensaios.



A análise da matriz dos efeitos juntamente com o gráfico de Pareto do planejamento fatorial completo mostrou-se que não há correlação de dependência entre as variáveis de pressão de saturação, razão de reciclo e vazão de alimentação para o processo de tratamento de água via flotação de ar dissolvido. Entretanto, na literatura há trabalhos que mostram que existe correlação entre essas variáveis. Com isso, o planejamento experimental fatorial foi expandido para um planejamento composto de face centrada para que seja verificada mais a fundo a interação entre essas variáveis.

A Tabela 5.6 apresenta o conjunto completo dos 17 experimentos que compuseram o planejamento fatorial composto de face centrada e reúne os respectivos valores de remoção de turbidez (R.T.) quando variado a pressão (P), razão de reciclo (R.R) e a vazão de alimentação (Qe).

Tabela 5.6 - Planejamento composto de face centrada de 2^3 em variáveis originais.

Ensaio	Pressão (bar)	Razão de Reciclo (%)	Vazão de Alimentação (L/min)	Turbidez Removida (%)
1	4,00	21,00	1,20	83,00
2	4,00	21,00	1,50	80,29
3	4,00	24,00	1,20	86,85
4	4,00	24,00	1,50	73,97
5	5,50	21,00	1,20	77,46
6	5,50	21,00	1,50	80,32
7	5,50	24,00	1,20	77,16
8	5,50	24,00	1,50	80,85
9	6,01	22,50	1,35	41,57
10	3,49	22,50	1,35	83,46
11	4,75	19,98	1,35	72,04
12	4,75	25,02	1,35	82,71
13	4,75	22,50	1,10	88,43
14	4,75	22,50	1,60	88,51
15	4,75	22,50	1,35	83,50
16	4,75	22,50	1,35	91,56
17	4,75	22,50	1,35	86,78

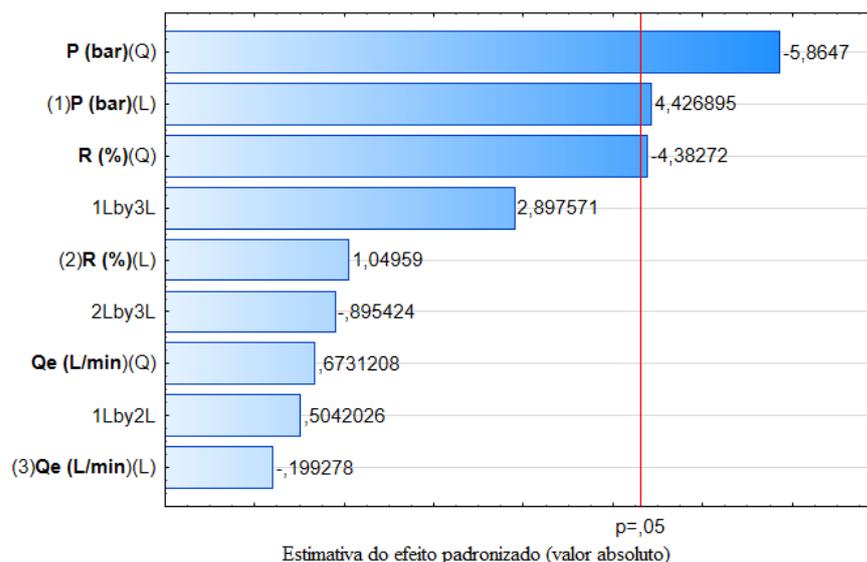
A Tabela 5.7 mostra a matriz de efeitos completa gerada. Os efeitos considerados significativos (p -valor $< 5\%$) estão destacados em vermelho. Dos nove efeitos analisados apenas três foram ditos significativos sendo a P, P² e a R.R².

Tabela 5.7 - Matriz completa de efeitos com 95 % de confiança para o planejamento composto de face centrada com $R^2 = 0,7073$ e $R^2_{ajustado} = 0,3309$.

	Efeito	Desvio padrão do erro puro	<i>t-student</i> calculado	<i>p-valor</i>	Coefficiente de regressão
Constante	85,73252	1,79522	47,75611	0,00044	85,73252
P	7,20279	1,62705	4,42689	0,04743	3,60140
P ²	-8,67282	1,47882	-5,86470	0,02786	-4,33641
R.R	1,70774	1,62705	1,04959	0,40403	0,85387
R.R ²	-6,48124	1,47882	-4,38272	0,04832	-3,24062
Qe	-0,32424	1,62705	-0,19928	0,86047	-0,16212
Qe ²	0,99542	1,47882	0,67312	0,57023	0,49771
P*R.R	1,16017	2,30100	0,50420	0,66418	0,58009
P*Qe	6,66731	2,30100	2,89757	0,10132	3,33366
R.R*Qe	-2,06037	2,30100	-0,89542	0,46505	-1,03019

O gráfico de Pareto para o planejamento composto de face centrada (Figura 5.10) mostra que os efeitos da pressão linear e quadrático juntamente com o efeito da razão de reciclo quadrático mostrou-se ser estatisticamente significativo.

Figura 5.10 - Gráfico de Pareto; variável: Remoção de turbidez; 3 fatores; 1 bloco; 17 ensaios.



A geração da Tabela 5.7 também fornece dois coeficientes que auxiliam na avaliação do nível de significância das variáveis estudadas. Estes coeficientes são o R^2 e o $R^2_{ajustado}$. O R^2 é o coeficiente de determinação que representa a porcentagem de variação dos dados. Este coeficiente auxilia na avaliação de como o modelo se ajusta a regressão dos dados, podendo variar de 0 a 1, sendo que quanto mais próximo de 1 maior o poder de explicação da variação dos dados. Quanto maior o número de variáveis em um modelo maior será o valor de R^2 , independentemente da relevância dessa variável. O $R^2_{ajustado}$ também é um coeficiente de determinação, só que esse coeficiente penaliza o uso de variáveis independentes desnecessárias, fazendo que seu valor seja inferior quando comparado com o R^2 . A eliminação das variáveis desnecessárias aumenta o valor do $R^2_{ajustado}$, uma forma de fazer essa eliminação é aplicar a técnica do *Backward Elimination*.

A técnica de *Backward Elimination* permite determinar quais coeficientes do modelo devemos ignorar comparando os valores de $R^2_{ajustado}$. Essa eliminação pode ser

feita eliminando os efeitos menos significativos presentes do gráfico de Pareto (Figura 5.10), as variáveis devem ser eliminadas até o momento em que o $R^2_{ajustado}$ pare de crescer.

Tabela 5.8 - Resultado da aplicação do Backward Elimination.

Fatores removidos	R^2	$R^2_{ajustado}$
Modelo completo	0,70727	0,33090
Qe	0,70694	0,41388
P*R.R	0,70485	0,47530
Qe	0,70113	0,52181
R.R*Qe	0,69454	0,55570
R.R	0,68549	0,58066
P*Qe	0,61652	0,52803

Observa-se na Tabela 5.8 conforme as variáveis de menor significância no modelo são eliminadas o valor do R^2 decresce e o $R^2_{ajustado}$ aumenta até o momento em que a remoção do termo da interação da pressão com a vazão de entrada é eliminada e faz com que o valor de $R^2_{ajustado}$ caia. Assim, o termo da interação entre pressão e vazão de alimentação de entrada é significativo para o modelo. O modelo de regressão final proposto com os melhores coeficientes de R^2 e $R^2_{ajustado}$ é:

$$R.T. (\%) = 86,57077 + 7,20279*P - 9,06575*P^2 - 6,87417*R.R^2 + 6,66731*P*Qe \quad \text{Equação 2}$$

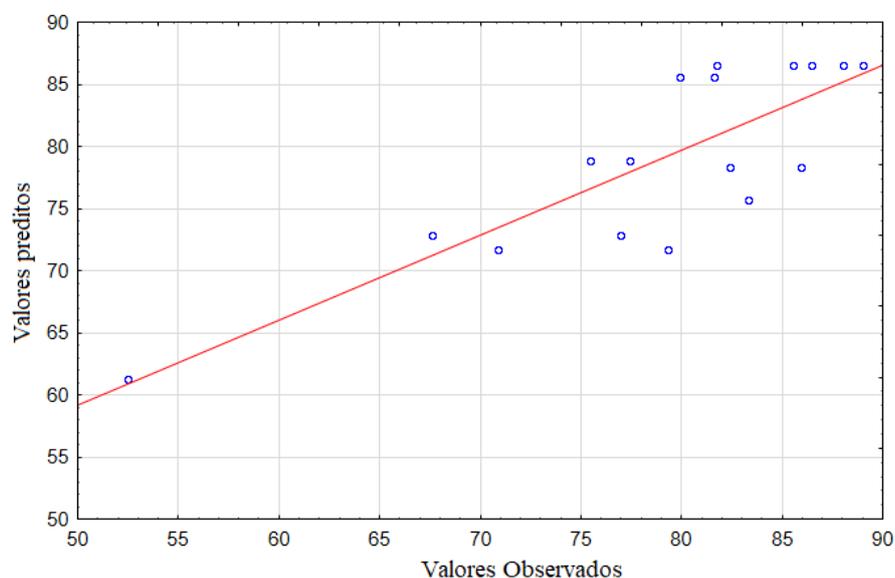
Os resultados da análise de variância (ANOVA) presentes na Tabela 5.9 mostram que o modelo proposto não é muito satisfatório, pois apresentam um alto valor de resíduos gerados. A porcentagem de variação total explicada em torno da média é de apenas 68,55%, gerando 34,45% de resíduos.

Tabela 5.9 - Tabela ANOVA para o ajuste do modelo de regressão (Equação 2).

	Soma Quadrática	Nº de Graus de Liberdade	Média Quadrática
Regressão	883,58	4	220,90
Resíduo	405,39	12	33,78
Falta de ajuste	384,21	10	38,42
Erro puro	21,18	2	10,59
Total	1288,97	16	
% de variação explicada	68,55%		
% máxima de variação explicável	98,36%		

A falta de ajuste do modelo de regressão também pode ser observada pela distribuição dos pontos da Figura 5.11, pois os pontos estão distribuídos de forma dispersa, mostrando que a equação gerada não apresenta um bom nível de predição dos valores de remoção de turbidez no processo de flotação por ar dissolvido.

Figura 5.11 - Comparação entre valores preditos e observados.



Outra maneira de testar a significância estatisticamente do modelo é através do teste de Fisher ou teste F, em que consiste fazer a razão entre a média quadrática da regressão pela média quadrática dos resíduos e da média quadrática da falta de ajuste pela

média quadrática do erro puro, o resultado obtido deve ser confrontado pelo valor do Teste F tabelado, com seus respectivos graus de liberdade.

$$F_{\text{calculado,regressão}(4,12)} = \frac{MQ_R}{MQ_r} = \frac{220,9}{33,78} = 6,539$$

$$F_{\text{calculado,erro}(10,2)} = \frac{MQ_{faj}}{MQ_{ep}} = \frac{38,42}{10,59} = 3,623$$

Assumindo um intervalo de confiança de 95% temos que

$$F_{\text{tabelado,regressão}(4,12)} = 3,259 \text{ e } F_{\text{tabelado,erro}(10,2)} = 19,396.$$

$$\frac{F_{\text{calculado,regressão}(4,12)}}{F_{\text{tabelado,regressão}(4,12)}} = 2,010$$

$$\frac{F_{\text{calculado,erro}(4,12)}}{F_{\text{tabelado,erro}(4,12)}} = 0,187$$

Uma regra prática para avaliar se um modelo de regressão é estatisticamente útil para fazer previsões é assumir que a razão $\frac{MQ_R}{MQ_r}$ possua um valor de cerca 10 vezes ou superior e a razão $\frac{MQ_{faj}}{MQ_{ep}}$ possua valores baixos (NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2010).

A razão entre os testes F calculado e tabelado para a regressão é de apenas 2,01, mostrando que o modelo estatístico proposto não é significativo estatisticamente para fazer previsões de resultados.

Todavia, vale ressaltar que este trabalho não tem o intuito de gerar modelos preditivos estatisticamente, mas sim estudar como as variáveis estudadas (pressão, razão de reciclo e vazão de alimentação) interagem durante o processo de remoção de turbidez.

As curvas de superfícies, Figuras 5.12-5.14, mostram de forma qualitativa como as variáveis estudadas interagem no processo de remoção de turbidez.

Figura 5.12 - superfície de resposta entre a pressão e razão de reciclo.

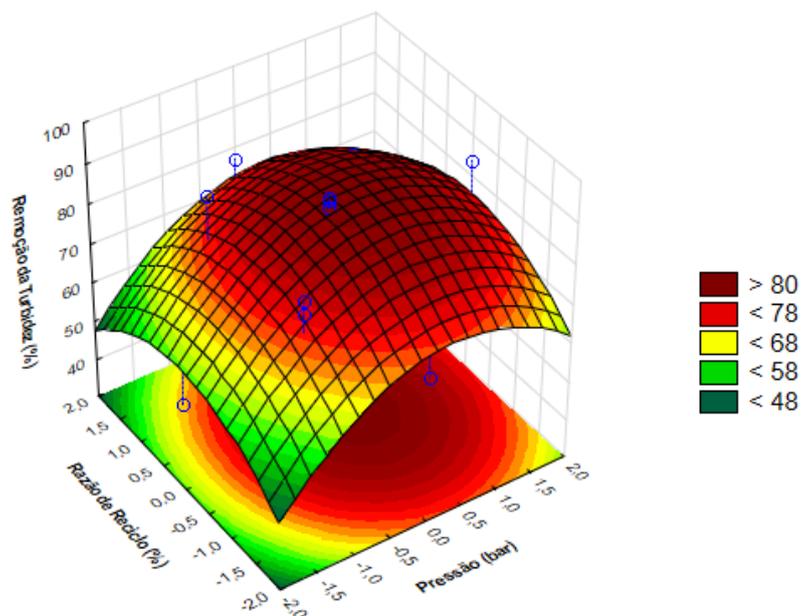


Figura 5.13 - Superfície de resposta entre a pressão e vazão de alimentação.

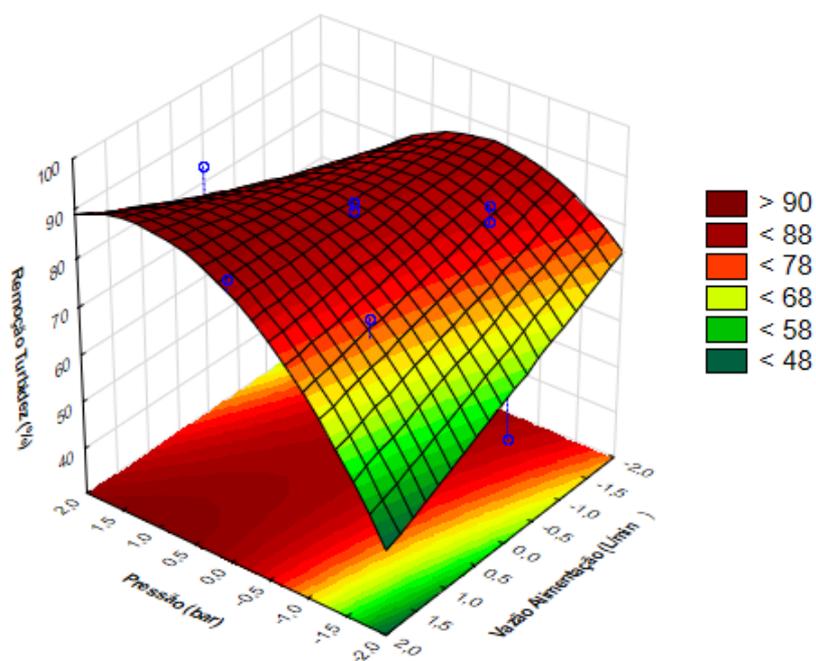
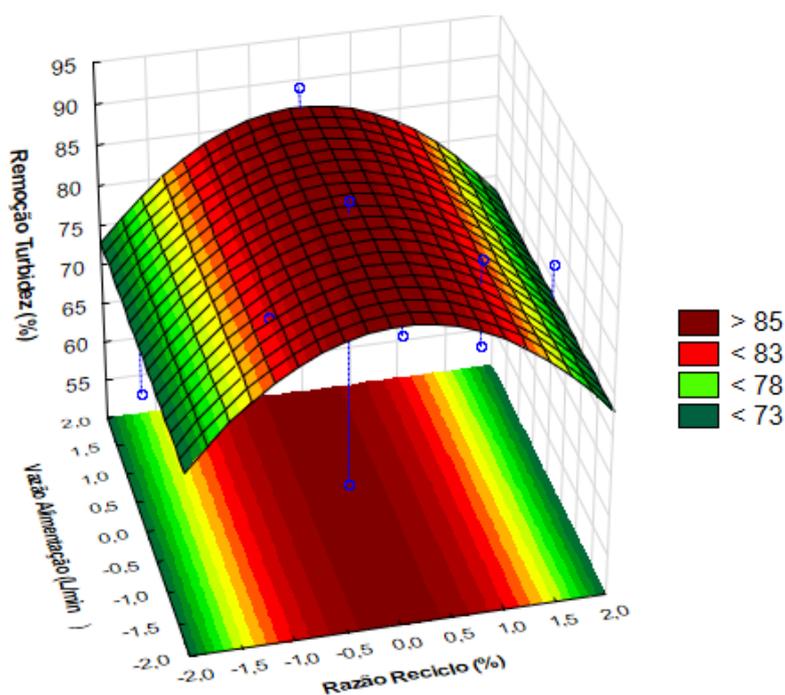


Figura 5.14 - Superfície de resposta entre a razão de reciclo e a vazão de alimentação.



A superfície de resposta entre a pressão e a razão de reciclo, Figura 5.12, observa-se que existe uma região parabólica de alta remoção. A superfície de resposta entre a pressão e a vazão de alimentação, Figura 5.13, mostra uma superfície com caráter hiperbólico. A superfície de resposta entre a razão de reciclo e a vazão de alimentação, Figura 5.14, apresenta um formato parabólico

Utilizando o *software* Statistica® versão 12 é possível encontrar os pontos críticos em que ocorre a máxima remoção de turbidez com seu respectivo valor teórico. Os pontos críticos em que a turbidez será máxima ocorrerá quando a pressão assumir um valor de 5,0 bar, vazão de alimentação de 1,35 L/min e razão de reciclo de 23,0%, apresentando uma remoção teórica de turbidez de 86,32%. Essas condições serão utilizadas no estudo da área da zona de contato.

5.4 VARIAÇÃO DA ZONA DE CONTATO

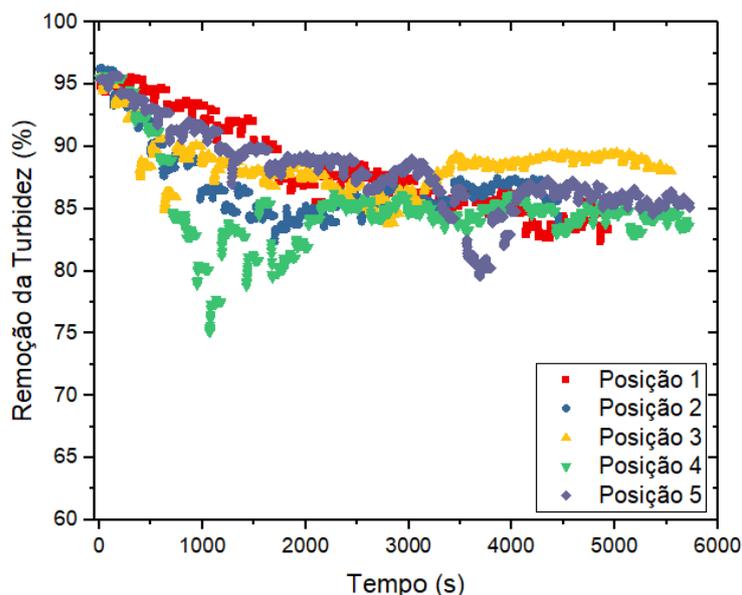
Determinada as condições críticas que favorecem a maior remoção de turbidez segundo o modelo proposto pelo *software* Statistica[®] versão 12, mais cinco ensaios foram realizados. Desta vez, os valores das variáveis de pressão, razão de reciclo e vazão de alimentação foram fixadas e o *baffle* da zona de contato foi posicionado em diferentes posições:

- Posição 1 → o *baffle* está a 3,5 cm de distância da parede fixa do flotador.
- Posição 2 → o *baffle* está a 5,6 cm de distância da parede fixa do flotador.
- Posição 3 → o *baffle* está a 7,5 cm de distância da parede fixa do flotador.
- Posição 4 → o *baffle* está a 9,4 cm de distância da parede fixa do flotador.
- Posição 5 → o *baffle* está a 11,5 cm de distância da parede fixa do flotador.

As curvas de remoção dos novos ensaios são mostradas na Figura 5.15. Observa-se que todas as curvas apresentam um comportamento semelhante. Em que, no início do ensaio durante os primeiros 1.500 segundos o valor da remoção da turbidez cai para todas as posições. Esse tempo antes de estabilizar a taxa de remoção da turbidez é referente ao tempo necessário para que toda a água limpa da zona de separação seja substituída pela água tratada. A taxa de remoção apresenta um comportamento constante de remoção após esse tempo de residência. Os ensaios foram realizados durante um

tempo médio equivalente a três vezes o tempo de residência da partícula para percorrer todo o tanque de flotação.

Figura 5.15 - Remoção da turbidez em diferentes posições do *baffle*.



A Tabela 5.10 mostra os valores médios obtidos da remoção de turbidez dos novos ensaios variando o *baffle*. A posição que melhor conseguiu remover o material particulado foi a posição 3, conseguindo remover 87,26%.

Tabela 5.10 - Valores da remoção da turbidez para diferentes posições do *baffle*.

	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Posição 4	Posição 5
Remoção da Turbidez (%)	84,85	85,32	87,26	85,41	85,91
Volume da zona de contato (L)	2,5	4,0	5,4	6,8	8,3

A posição que se esperava maior taxa de remoção devido a hipótese tomada deste trabalho, posição 1, apresentou a menor taxa de remoção de material particulado suspenso, removendo apenas 84,85% quando comparada com as outras quatro posições. Na posição 2 esperava-se um desempenho ligeiramente inferior na remoção da turbidez devido a hipótese tomada, mas foi ao contrário, removendo 85,32 %, sendo superior a

posição 1. Esse comportamento é ocasionado pelo menor volume da zona de contato, pois como percurso a ser percorrido pelo material particulado é mais estreito nas posições 1 e 2, as microbolhas não tem tempo o suficiente de colidirem e aderirem na superfície do material particulado. Com isso, a remoção da turbidez tende a ser menor.

As posições 5 e 4 esperava-se que apresentassem menores taxas de remoção de turbidez quando comparada com as posições 1 e 2. Entretanto, as posições 5 e 4 obtiveram remoções de turbidez ligeiramente superiores. Essas posições apresentavam percursos maiores para que o material particulado suspenso percorresse. Com isso, as microbolhas que aderiam na superfície das partículas com o passar do tempo desprendiam-se da superfície da partícula, pois como o aglomerado de microbolha/partícula tinha um percurso longo para percorrer as microbolhas coalesciam ficavam maiores e desprendiam-se da partícula fazendo que o ciclo das microbolhas com as partículas reiniciasse.

Das cinco posições testadas a posição 3 foi a que obteve um melhor desempenho na remoção da turbidez. O volume de 5,4 L da zona de contato na posição 3 apresentou a melhor relação tempo de residência, fazendo que as microbolhas tivessem tempo o suficiente para encontrar as partículas suspensas, colidirem e emergirem em direção para zona de separação.

6. CONCLUSÕES

A troca do vaso de pressão, a válvula agulha e o tanque de flotação do protótipo da planta de tratamento de água foi realizada com sucesso. o *start-up* da planta FAD atualizada ocorreu de forma satisfatória.

Foi determinado que a quantidade ideal de coagulante e floculante para o tratamento da água é de que a cada litro de água são necessários 1 mL de aluminato de sódio a 2% e 6 mL de Tanino SG[®] a 5% v/v.

Os novos limites operacionais do protótipo foram testados com êxito, levando em consideração as limitações físicas dos equipamentos e limitações teóricas.

O planejamento experimental fatorial completo e o planejamento experimental composto de face centrada foram aplicados para a avaliação dos efeitos da pressão de saturação, razão de reciclo e vazão de alimentação no processo de flotação por ar dissolvido. O planejamento fatorial não conseguiu descrever bem o processo de remoção de turbidez, já o composto de face centrada conseguiu fazer uma varredura mais detalhada mostrando que a pressão de saturação e a razão de reciclo tem maior influencia do que a vazão de alimentação.

O modelo quadrático proposto pelo planejamento composto de face centrada consegue explicar apenas 68,55% da variação dos dados, logo não é viável fazer previsões utilizando esse modelo. O teste F reafirmou que o modelo quadrático sugerido para a remoção da turbidez não é indicado usar para previsões devido seus baixos valores. No entanto, vale ressaltar que este trabalho não possui intuito de gerar modelos matemáticos preditivos, mas sim avaliar como as variáveis pressão de saturação, vazão de alimentação e vazão de reciclo influenciam na remoção da turbidez.

Na avaliação da influência da zona de contato foi observado que todas as curvas de remoção da turbidez apresentam um comportamento constante após o tempo

de residência das partículas dentro tanque de flotação. A posição que favoreceu a maior taxa de remoção da turbidez foi a posição 3, conseguindo remover 87,26%, já a de menor remoção foi a posição 1 removendo 84,85% da turbidez.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARAL FILHO, J. et al. Removal of sulfate ions by dissolved air flotation (DAF) following precipitation and flocculation. **International Journal of Mineral Processing**, v. 149, p. 1–8, 2016.

ATAMALEKI, A. et al. Effect of coagulation and sonication on the dissolved air flotation (DAF) process for thickening of biological sludge in wastewater treatment. **Environmental Health Engineering and Management Journal**, v. 7, p. 59–65, 2020.

BARROS NETO, B. .; SCARMINIO, I. S. .; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: Pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. 2001.

BEHIN, J.; BAHRAMI, S. Modeling an industrial dissolved air flotation tank used for separating oil from wastewater. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 59, p. 1–8, 2012.

BÜRGER, R. et al. Simulation and control of dissolved air flotation and column froth flotation with simultaneous sedimentation. **Water Science and Technology**, v. 81, p. 1723–1732, 2020.

CHEN, A.; WANG, Z.; YANG, J. Influence of bubble size on the fluid dynamic behavior of a DAF tank: A 3D numerical investigation. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 495, p. 200–207, 2016.

CHO, K. W. et al. Ratio of Electrolytic bubbles to Solids as a Governing Parameter of Flotation for Activated Sludge. **Environmental Engineering Science**, v. 26, p. 1131–1138, 2009.

COLIC, M.; MORSE, W.; MILLER, J. D. The development and application of the hybrid centrifugal- dissolved air flotation system for wastewater treatment. **CAmerican Filtration and Separation Society Meeting**, p. 14, 2008.

EDZWALD, J. K. Chapter 6: Dissolved air flotation in drinking water treatment. **Interface Science and Technology**, v. 10, n. C, p. 89–107, 2006.

EDZWALD, J. K. Developments of high ate dissolved air flotation for drinking water treatment. **Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA**, v. 56, p. 399–409, 2007.

EDZWALD, J. K. Dissolved air flotation and me. **Water Research**, v. 44, n. 7, p. 2077–2106, 2010.

EDZWALD, J. K. Coagulant mixing revisited: Theory and practice. **Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA**, v. 62, n. 2, p. 67–77, 2013.

EDZWALD, J. K.; HAARHOFF, J. **Dissolved Air Flotation for Water Clarification**. 1. ed. [s.l.] McGraw-Hill Education, 2011.

EDZWALD, J. K.; KAMINSKI, G. S. A practical method for water plants to select coagulant dosing. **Journal of the New England Water Works Association**, v. 123, p. 15–31, 2009.

ESFANDIARI, A.; MOWLA, D. Investigation of microplastic removal from greywater by coagulation and dissolved air flotation. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 151, p. 341–354, 2021.

FANAIE, V. R.; KHIADANI, M. Effect of salinity on air dissolution, size distribution of microbubbles, and hydrodynamics of a dissolved air flotation (DAF) system. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 591, p. 13, 2020.

FANAIE, V. R.; KHIADANI, M.; AYRES, T. Effects of internal geometry on hydrodynamics of dissolved air flotation (DAF) tank : An experimental study using particle image velocimetry (PIV). **Colloids and Surfaces A**, v. 575, p. 382–390, 2019.

FÉRIS, L. A. et al. Optimizing dissolved air flotation design system □. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 17, p. 1–7, 2000.

HAARHOFF, J. Dissolved air flotation: progress and prospects for drinking water treatment. **Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA**, v. 57, p. 555–567, 2008.

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

HAMEED, Y. T. et al. A tannin-based agent for coagulation and flocculation of municipal wastewater: Chemical composition, performance assessment compared to Polyaluminum chloride, and application in a pilot plant. **Journal of Environmental Management**, v. 184, p. 1–10, 2016.

HO, K. L. et al. Micro-bubble flow simulation of dissolved air flotation process for water treatment using computational fluid dynamics technique *. **Environmental Pollution**, v. 256, p. 9, 2020.

HUNG, Y.-T. et al. Dissolved Air Flotation (DAF) for Wastewater Treatment. Em: **Waste Treatment in the Service and Utility Industry**. 1. ed. [s.l.] Taylor & Francis Group, 2017. p. 145–182.

JUSTINA, M. DELA et al. Using vegetable tannin and polyaluminium chloride as coagulants for dairy wastewater treatment: A comparative study. **Journal of Water Process Engineering**, v. 25, p. 173–181, 2018.

KIM, T.; PARK, H.; HAN, M. Design parameter estimations for adjustable bubble size in bubble generating system. **Water Science and Technology**, v. 77, p. 6, 2018.

KYZAS, G. Z.; LAZARIDIS, N. K.; MATIS, K. A. Flotation: Recent innovations in an interesting and effective separation process. Em: **Advanced Low-Cost Separation Techniques in Interface Science**. [s.l.] Elsevier, 2019. p. 15–42.

KYZAS, G. Z.; MITROPOULOS, A. C.; MATIS, K. A. From microbubbles to nanobubbles: Effect on flotation. **Processes**, v. 9, p. 1–13, 2021.

LAKGHOMI, B.; LAWRYSHYN, Y.; HOFMANN, R. A model of particle removal in a dissolved air flotation tank: Importance of stratified flow and bubble size. **Water Research**, v. 68, p. 262–272, 2015.

LEPPINEN, D. M.; DALZIEL, S. B. Bubble size distribution in dissolved air flotation tanks. **Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA**, v. 53, n. 8, p. 531–543, 2004.

LI, M. et al. Enhancement of selective fine particle flotation by microbubbles generated through hydrodynamic cavitation. **Powder Technology**, v. 405, 2022.

MAENG, M.; SHAHI, N. K.; DOCKKO, S. Enhanced flotation technology using low-density microhollow beads to remove algae from a drinking water source. **Journal of Water Process Engineering**, v. 42, p. 7, 2021.

MIRANDA, R.; LATOUR, I.; BLANCO, A. Understanding the Efficiency of Aluminum Coagulants Used in Dissolved Air Flotation (DAF). **Journal Frontiers in Chemistry**, v. 8, p. 14, 2020.

PESSOA, F. L. P. et al. A crise hídrica e a disponibilidade de água para as necessidades humanas. **Revista de Química Industrial**, p. 4–9, 2015.

PIAGGIO, A. L. et al. High suspended solids removal of Indian drain water with a down-scaled Dissolved Air Flotation (DAF) for water recovery. Assessing water-type dependence on process control variables. **Environmental Challenges**, v. 8, p. 1–12, 2022.

PRAKASH, R.; MAJUMDER, S. K.; SINGH, A. Flotation technique: Its mechanisms and design parameters. **Chemical Engineering and Processing - Process Intensification**, v. 127, p. 249–270, 2018.

PRIYANKA, M.; SARAVANAKUMAR, M. P. A sustainable approach for removal of microplastics from water matrix using Colloidal Gas Aphrons: New insights on flotation potential and interfacial mechanism. **Journal of Cleaner Production**, v. 334, n. August 2021, p. 1–12, 2022.

RAJAPAKSE, N. et al. Effects of influent physicochemical characteristics on air dissolution , bubble size and rise velocity in dissolved air flotation : A review. **Separation and Purification Technology**, v. 289, p. 13, 2022.

RUBIO, J.; SOUZA, M. L.; SMITH, R. W. Overview of flotation as a wastewater treatment technique. **Minerals Engineering**, v. 15, p. 139–155, 2002.

RYBACHUK, Y.; JODŁOWSKI, A. Mathematical model of dissolved air flotation (DAF) based on impulse conservation law. **SN Applied Sciences**, v. 1, p. 8, 2019.

SAKR, M. et al. A critical review of the recent developments in micro – nano bubbles applications for domestic and industrial wastewater treatment. **Alexandria Engineering Journal**, v. 61, p. 6591–6612, 2022.

SANTOS, M. A. et al. Wastewater treatment using DAF for process water reuse in apatite flotation. **Journal of Cleaner Production**, v. 308, p. 1–7, 2021.

SATHTHASIVAM, J. et al. Evaluating dissolved air flotation for oil/water separation using a hybridized coagulant of ferric chloride and chitosan. **Journal of Water Process Engineering**, v. 47, p. 1–8, 2022.

SHAHI, N. K. et al. Assessing the efficacy of dissolved air and flash-pressurized flotations using low energy for the removal of organic precursors and

disinfection byproducts: a pilot-scale study. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 40598–40607, 2021.

SHENDE, A. D. et al. An improved primary wastewater treatment system for a slaughterhouse industry: a full-scale experience. **Water Science and Technology**, v. 85, n. 5, p. 1688–1700, 2022.

SILVA, E. J. et al. Biosurfactant Application as Alternative Collectors in Dissolved Air Flotation System. **Chemical Engineering Transactions**, v. 64, p. 547–552, 2018.

VALADE, M. T.; BECKER, W. C.; EDZWALD, J. K. Treatment selection guidelines for particle and NOM removal. **Journal of Water Supply: Research and Technology -- AQUA**, v. 58, p. 424–432, 2009.

WANG, C. et al. Separation of emulsified crude oil from produced water by gas flotation : A review. **Science of the Total Environment**, v. 845, n. July, p. 157304, 2022a.

WANG, L. K.; FAHEY, E. M.; WU, Z. Dissolved Air Flotation. Em: **Handbook of Environmental Engineering: Physicochemical Treatment Processes**. 3. ed. [s.l.] Humana Press, 2004. p. 431–500.

WANG, Y. et al. Interactions between flocs and bubbles in the separation zone of dissolved air flotation system. **Science of the Total Environment**, v. 761, p. 1–37, 2021a.

WANG, Y. et al. A study on the feasibility and mechanism of enhanced coagulation dissolved air flotation with chitosan-modified microbubbles. **Journal of Water Process Engineering**, v. 40, p. 11, 2021b.

WANG, Y. et al. Study on the operation performance and floc adhesion mechanism of dissolved air flotation equipment. **Environmental Science and Pollution Research**, n. 0123456789, p. 1–15, 2022b.

XU, M. et al. A contribution to exploring the importance of surface air nucleation in froth flotation – The effects of dissolved air on graphite flotation. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 633, p. 1–9, 2022.

YAP, R. K. L. et al. Evaluating the performance of conventional DAF and PosiDAF processes for cyanobacteria separation at a pilot plant scale. **H2Open Journal**, v. 5, p. 275–288, 2022.