

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE GRADUAÇÃO E EDUCAÇÃO PROFISSIONAL
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

**AMANDA ORTEGA
LETÍCIA RENATA GONSAGA**

**AVALIAÇÃO DO EMPREGO DE COAGULANTES E FLOCULANTES
ASSOCIADOS À TÉCNICA DE SEDIMENTAÇÃO E FLOTAÇÃO (FAD)**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**MEDIANEIRA
2019**

**AMANDA ORTEGA
LETÍCIA RENATA GONSAGA**

**AVALIAÇÃO DO EMPREGO DE COAGULANTES E FLOCULANTES
ASSOCIADOS À TÉCNICA DE SEDIMENTAÇÃO E FLOTAÇÃO (FAD)**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Ambiental da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dra. Juliana Bortoli
Rodrigues Mees

**MEDIANEIRA
2019**



TERMO DE APROVAÇÃO

AVALIAÇÃO DO EMPREGO DE COAGULANTES E FLOCULANTES ASSOCIADOS À TÉCNICA DE SEDIMENTAÇÃO E FLOTAÇÃO (FAD)

por

AMANDA ORTEGA E LETÍCIA GONSAGA

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 13h50min do dia 02 de dezembro de 2019 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental. As candidatas foram arguidas pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dra. Juliana Bortoli R. Mees
UTFPR – Câmpus Medianeira
(Orientadora)

Prof. Dr. Ismael Laurindo Costa Junior
UTFPR – Câmpus Medianeira
(Convidado)

Prof. Dr. Fábio Orssato
UTFPR – Câmpus Medianeira
(Convidado)

Prof. Dr. Eduardo Eyng
UTFPR – Câmpus Medianeira
(Responsável pelas atividades de TCC)

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradecemos a Deus por todas as bênçãos concedidas ao longo deste curso, mesmo diante as inúmeras dificuldades, Ele nunca nos desamparou. Agradecemos as nossas famílias que em todo o tempo, mesmo que distantes, estiveram presentes, acreditaram em nós, em nossos sonhos e não permitiram que desistíssemos, nos dando todo o apoio necessário, tanto financeiramente quanto espiritualmente.

Agradecemos aos nossos professores por todo conhecimento passado para que hoje pudéssemos ter a capacidade de desenvolver este trabalho, em especial, agradecemos a nossa Orientadora Juliana Borttoli Mess por toda paciência e orientação na execução do trabalho, assim como a professora Eliane Colla pelo auxílio no desenvolvimento dos dados.

Agradecemos a Universidade por todo seu corpo docente, administração e direção, por todo auxílio prestado, além de nos proporcionar uma excelente infraestrutura para que os experimentos fossem realizados com sucesso.

Agradecemos a Juliana Fenner Ruas Lucas, pelo esclarecimento de dúvidas e auxílios prestados, e a Geomaro Martins, pela sua prestatividade e pelo fornecimento de instrumentos que foram de extrema importância para a realização deste estudo. Por fim, agradecemos aos nossos amigos, pela compreensão devido à ausência e pelo incentivo para que esse sonho se tornasse realidade.

*Consagre ao Senhor tudo o
que você faz, e os seus planos
serão bem-sucedidos
(Provérbios 16:3).*

RESUMO

ORTEGA, Amanda e GONSAGA, Leticia Renata. **Avaliação do emprego de coagulantes e floculantes associados à técnica de sedimentação e flotação (FAD)**. 2019. 56 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2019.

O consumo de água pelas indústrias está diretamente ligado à geração de efluentes líquidos industriais, o qual possui em sua composição elementos que são danosos ao meio ambiente. Com isso, faz-se necessário um tratamento adequado, de acordo com as características físico-químicas do efluente e os padrões exigidos pelas legislações vigentes. A coagulação-floculação, seguida do processo de sedimentação ou a flotação por ar dissolvido são algumas das alternativas para tratamentos dos efluentes industriais. Assim, este trabalho teve por objetivo, comparar o emprego de dois coagulantes, sendo um inorgânico (Klaraid) e outro a base orgânica (Novfloc), combinados ao Polfloc um auxiliar de floculação, em duas técnicas distintas, a sedimentação e a flotação por ar dissolvido, utilizando um efluente de uma indústria láctea. Avaliou-se a eficácia entre as técnicas e os dois coagulantes, tendo como parâmetro a variável resposta redução da turbidez. Foram realizados ensaios preliminares, os resultados obtidos, foram utilizados como base para os dois tratamentos. Para a sedimentação, primeiramente foi realizado um planejamento inicial fatorial 2^3 , visando conhecer melhor o comportamento das variáveis, para o ajuste das faixas e a obtenção da otimização do processo, através de um delineamento composto central rotacional 2^3 (DCCR), com quatro repetições no ponto central, o qual foi executado na sequência. Para a flotação por ar dissolvido (FAD), foi realizado primeiramente um delineamento fatorial fracionado 2^{4-1} , seguido de um delineamento composto central rotacional 2^3 (DCCR), como quatro repetições no ponto central. Verificou-se que o tratamento utilizando apenas a técnica de sedimentação, que na maioria dos ensaios, ocorreu simultaneamente ao fenômeno de flotação, em termos de redução do percentual da turbidez, apresentou uma média de eficiência relativamente maior do que ao do sistema FAD. Em relação aos coagulantes, observou-se que o percentual de redução da turbidez foi similarmente eficiente tanto para o Klaraid quanto para o Novfloc nos dois tipos dos tratamentos utilizados, assim, viabilizando a utilização do coagulante Novfloc. Este que possui base orgânica e conseqüentemente gerará um lodo com características biodegradáveis, sendo mais viável ambientalmente. Para o DCCR da flotação utilizando o coagulante Klaraid e o auxiliar de floculação Polfloc, foi possível alcançar uma faixa ótima da aplicação dos coagulantes. Para os demais, foi possível visualizar apenas tendências. Observou-se que os coagulantes utilizados, dentro da faixa de estudo definida, juntamente com as condições apresentadas pelo efluente no período do estudo, demonstraram ser mais eficientes para a formação de flocos com características apropriadas para o processo de flotação.

Palavras-chave: Coagulação. Floculação. Sedimentação. Flotação. Turbidez.

ABSTRACT

ORTEGA, Amanda e GONSAGA, Letícia Renata. **Evaluation of the use of coagulants and flocculants associated with the (DAF) sedimentation and flotation technique.** 2019. 56 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Medianeira, 2019.

Water consumption by industries is directly linked to the generation of industrial liquid effluents, which has in its composition elements that are harmful to the environment. Thus, proper treatment is necessary, according to the physicochemical characteristics of the effluent and the standards required by current legislation. Coagulation-flocculation followed by the sedimentation process or dissolved air flotation are some of the alternatives for industrial effluent treatment. Thus, this study aimed to compare the use of two coagulants, one inorganic (Klaraid) and one the organic base (Novfloc), combined with Polfloc a flocculation aid in two different techniques, sedimentation and air flotation. dissolved using a dairy effluent. Efficacy between the techniques and the two coagulants was evaluated, using the turbidity reduction response variable as a parameter. Preliminary tests were performed, the obtained results were used as basis for both treatments. For the sedimentation, an initial factorial planning 2^3 was performed, aiming to better understand the behavior of the variables, to adjust the ranges and to obtain the process optimization, through a central rotational composite design 2^3 (DCCR), with four replications in the process. central point, which was executed in sequence. For dissolved air flotation (FAD), a fractional factorial design 2^{4-1} was first performed, followed by a central rotational composite design 2^3 (DCCR) as four repetitions at the central point. It was found that the treatment using only the sedimentation technique, which in most of the tests, occurred simultaneously to the flotation phenomenon, in terms of reduction of turbidity percentage, presented a relatively higher efficiency average than that of the FAD system. Regarding coagulants, it was observed that the turbidity reduction percentage was similarly efficient for both Klaraid and Novfloc in both types of treatments used, thus enabling the use of Novfloc coagulant. This has an organic base and consequently will generate a sludge with biodegradable characteristics, being more environmentally viable. For the flotation DCCR using Klaraid coagulant and Polfloc flocculation aid, it was possible to achieve an optimum range of coagulant application. For the others, it was possible to view only trends. It was observed that the coagulants used within the defined study range, together with the conditions presented by the effluent during the study period, proved to be more efficient for the formation of flocs with appropriate characteristics for the flotation process.

Keywords: Coagulation. Flocculation. Sedimentation. Flotation. Turbidity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Característica de partículas coloidais.....	5
Figura 2. Diagrama de coagulação	6
Figura 3. Desestabilização por varredura.....	7
Figura 4. Flocculação.....	10
Figura 5. Flotação	11
Figura 6. Sedimentação	12
Figura 7. Fluxogramas das etapas do sistema de tratamento do efluente em estudo..	13
Figura 8. Descrição do Equipamento Jar-Test.....	15
Figura 9. Equipamento de bancada convencional utilizado para ensaios de coagulação-floculação-flotação por ar dissolvido	15
Figura 10. Câmara de saturação.....	16
Figura 11. Jarro de flotação	17
Figura 12. Vista frontal do jarro de flotação.....	17
Figura 13. Vista superior do jarro de flotação.....	18
Figura 14. Gradiente de velocidade x rotação do agitador.....	18
Figura 15. Gráfico de Pareto para a significância dos fatores.....	28
Figura 19. Equipamento de bancada convencional utilizado para ensaios de coagulação-floculação-flotação por ar dissolvido	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Concentrações utilizadas para os ensaios de dosagem mínima.....	20
Tabela 2. Valores codificados das variáveis independentes e respostas para redução da turbidez para o Planejamento Inicial Fatorial 2^3	21
Tabela 3. Valores codificados das variáveis independentes e respostas para redução da turbidez com o coagulante Klaraid e Novfloc no Planejamento Inicial Fatorial 2^3	21
Tabela 4. Valores codificados das variáveis independentes e respostas para redução da turbidez para o DCCR 2^3	22
Tabela 5. Valores codificados das variáveis independentes e respostas para redução da turbidez com o coagulante Klaraid e Novfloc no DCCR 2^3	22
Tabela 6. Valores codificados das variáveis independentes e respostas para redução da turbidez para o DFF 2^{4-1}	23
Tabela 7. Níveis reais e codificados das variáveis independentes e respostas para redução da turbidez para o coagulante Klaraid e Novfloc no DFF 2^{4-1}	23
Tabela 8. Valores codificados das variáveis independentes e respostas para redução da turbidez para o DCCR 2^3	24
Tabela 9. Valores codificados das variáveis independentes e respostas para redução da turbidez com o coagulante Klaraid e Novfloc no DCCR 2^3	24
Tabela 10. Dosagem mínima de coagulante.....	26
Tabela 11. Valores reais e codificados das variáveis independentes e respostas para redução de turbidez obtidas com coagulante Klaraid IC1176L Planejamento Inicial Fatorial 2^3 para Sedimentação	27
Tabela 12. Estimativa dos efeitos para redução de turbidez com o coagulante Klaraid IC1176L.....	27
Tabela 13. Valores reais e codificados das variáveis independentes e respostas para redução da turbidez obtidas com o coagulante Klaraid IC1176L DCCR 2^3 para Sedimentação	29
Tabela 14. Estimativa dos efeitos para redução de turbidez com o coagulante Klaraid	30
Tabela 15. Coeficientes de regressão para a resposta redução de turbidez Klaraid	31
Tabela 16. Análise de variância da regressão para a resposta redução de turbidez	31

Tabela 17. Valores reais e codificados das variáveis independentes e respostas para redução de turbidez obtidas com o coagulante Novfloc no Planejamento Inicial Fatorial 2 ³ para Sedimentação.....	32
Tabela 18. Estimativa dos efeitos para redução de turbidez com o coagulante Novfloc 1540	32
Tabela 19. Valores reais e codificados das variáveis independentes e respostas para redução da turbidez obtidas com coagulante o Novfloc no DCCR 2 ³ para Sedimentação	34
Tabela 20. Estimativa dos efeitos para redução de turbidez com o coagulante.....	35
Tabela 21. Coeficientes de regressão para a resposta redução de turbidez Novfloc	35
Tabela 22. Análise de variância da regressão para a resposta redução de turbidez Novfloc	36
Tabela 23. Valores adotados e codificados das variáveis independentes e respostas para redução da turbidez obtidas com o coagulante Klaraid IC1176L no DFF2 ⁴⁻¹	36
Tabela 24. Estimativas dos efeitos das variáveis independentes sobre a variável resposta	37
Tabela 25. Valores adotados e codificados das variáveis independentes e resultados obtidos para a variável resposta com coagulante Klaraid IC1176L no DCCR 2 ³	38
Tabela 26. Estimativa dos efeitos para a resposta redução de turbidez	39
Tabela 27. Coeficientes de regressão para a resposta redução de turbidez	39
Tabela 28. Análise de variância da regressão para a resposta redução de turbidez	40
Tabela 29. Valores adotados e codificados das variáveis independentes e respostas para redução de turbidez obtidas com coagulante Novfloc 1540 no DFF2 ⁴⁻¹	42
Tabela 30. Estimativa dos efeitos para redução de turbidez com o coagulante Novfloc 1540	43
Tabela 31. Valores adotados e codificados das variáveis independentes e resultados obtidos para as variáveis respostas com coagulante Novfloc 1540 no DCCR 2 ³	44
Tabela 32. Estimativa dos efeitos para a resposta redução de turbidez	45
Tabela 33. Coeficientes de regressão para a resposta redução de turbidez	45
Tabela 34. Análise de variância da regressão para a resposta redução de turbidez	46
Tabela 35. Análise Comparativa das Médias	46

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	2
2.1 Objetivo Geral	2
2.2 Objetivo específico.....	2
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
3.1 EFLUENTES LÍQUIDOS INDUSTRIAIS	3
3.2 TRATAMENTOS APLICADOS EM EFLUENTES DE AGROINDÚSTRIA	4
3.3 COAGULAÇÃO.....	4
3.3.1 Compressão da camada difusa	6
3.3.2 Adsorção e neutralização de cargas	6
3.3.3 Varredura	7
3.3.4 Adsorção e formação de pontes.....	8
3.4 Coagulantes.....	8
3.4.1 Coagulantes Inorgânicos.....	8
3.4.2 Coagulantes Orgânicos	9
3.5 FLOCULAÇÃO.....	10
3.6 FLOTAÇÃO.....	11
3.7 SEDIMENTAÇÃO	11
4 MATERIAL E MÉTODOS	13
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO	13
4.2 COLETA E CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE	14
4.3 EQUIPAMENTO DE BANCADA PARA ENSAIOS DE COAGULAÇÃO- FLOCULAÇÃO-FLOTAÇÃO-SEDIMENTAÇÃO	14
4.3.1 Procedimentos de Operação	18
4.4 PREPARO DAS SOLUÇÕES	19
4.4.1 Preparo dos coagulantes e floculantes	19
4.4.1.1 Novfloc 1540.....	19
4.4.1.2 Klaraid IC1176L.....	19
4.4.1.3 Polfloc D150	19
4.5 ENSAIOS PRELIMINARES DE COAGULAÇÃO E FLOCULAÇÃO.....	20
4.5.1 Dosagem Mínima.....	20
4.5.2 Ensaios de pH	20
4.6 ENSAIOS DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO E SEDIMENTAÇÃO.....	20
4.7 ENSAIOS DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO E FLOTAÇÃO	23
4.8 ANÁLISE ESTATÍSTICA E INTERPRETAÇÃO DE DADOS	25

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	26
5.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS PRELIMINARES	26
5.1.1 Dosagem mínima de coagulante	26
5.1.2 Ensaios de pH	26
5.2 ENSAIOS DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO E SEDIMENTAÇÃO.....	26
5.2.1 Otimização do produto coagulante Klaraid IC1176L e o auxiliar de floculação Polfloc.....	26
5.2.1.1 Planejamento Inicial: Fatorial 2 ³	26
5.2.1.2 Delineamento Composto Central Rotacional de Sedimentação	28
5.2.1.3 Planejamento Inicial Fracionado 2 ⁴⁻¹	36
5.2.2 Delineamento Composto Central Rotacional FAD	38
5.2.3 Otimização do produto coagulante Novfloc 1540 e o auxiliar de floculação Polfloc.....	42
5.2.3.1 Planejamento Inicial Fracionado 2 ⁴⁻¹	42
5.2.3.2 Delineamento Composto Central Rotacional FAD.....	43
5.3 ANÁLISE GERAL DOS TRATAMENTOS	46
6 CONCLUSÕES	48
7 REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

A demanda de consumo da população cresce dia a pós a dia, exigindo um aumento na produção industrial. Com isso, as atividades industriais elevam o consumo de água, e conseqüentemente o volume de efluentes que serão lançados nos corpos hídricos. Sendo assim, a água que é um bem essencial para a sobrevivência humana, acaba tendo sua qualidade afetada, e um dos motivos, é o volume dos efluentes industriais que são lançados nos corpos hídricos diariamente, que em muitos casos não atendem adequadamente as legislações vigentes.

Estes despejos, provenientes das indústrias contém elevada carga orgânica, óleos e graxas, metais pesados, que modificam as características físico-químicas e biológicas da água, interferindo na qualidade e em seus usos futuros. Visto isso, para minimizar os impactos ambientais sobre fauna/flora, impedir a contaminação do solo, corpos hídricos e problemas de saúde pública, os efluentes industriais necessitam passar por um sistema de tratamento composto de operações unitárias físicas ou processos químicos e biológicos, antes de serem lançados nos corpos d'água.

Os tratamentos mais usuais para efluentes agroindustriais são os físico-químicos seguido por flotação e os biológicos. O biológico é realizado através de lagoas de estabilização, podendo também ser acompanhado de um tratamento físico-químico, como pós-tratamento. O tratamento físico-químico ocorre através do emprego de agentes químicos, que auxiliam no processo de coagulação/floculação, podendo ser seguido de um processo de sedimentação ou flotação por ar dissolvido.

Os agentes químicos utilizados em grande parte das agroindústrias são os coagulantes inorgânicos, pois estes apresentam uma boa eficiência no tratamento e baixo custo. Os coagulantes mais utilizados são: cloreto férrico, sulfato de alumínio, policloreto de alumínio (PAC) e sulfato férrico. Porém, por ser à base de ferro ou alumínio, o lodo gerado devido à presença de metais pesados, é tóxico, e acaba sendo uma problemática para o sistema de tratamento.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar o emprego de coagulantes e floculantes, orgânicos e inorgânicos, associados à técnica de sedimentação e flotação por ar dissolvido (FAD), e a eficiência entre elas em escala laboratorial, para o tratamento de efluente de uma indústria de laticínios.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar o efluente através dos parâmetros físico-químico: pH e turbidez;
- Verificar em ensaios preliminares a dosagem mínima e o pH de coagulação para o efluente em estudo;
- Determinar a faixa de dosagem ótima de cada coagulante no processo de coagulação/floculação/sedimentação e flotação;
- Comparar o modelo matemático com base nos parâmetros físico-químicos dos coagulantes: comercial Novfloc, orgânico à base de tanino e do coagulante inorgânico policloreto de alumínio (Klaraid), e os processos de coagulação/floculação seguido de sedimentação e posteriormente flotação por ar dissolvido (FAD);

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 EFLUENTES LÍQUIDOS INDUSTRIAIS

A legislação tem se mostrado cada vez mais exigente no desenvolvimento de políticas econômicas e de outras medidas que visam à proteção e preservação do meio ambiente. Devido a isso, as indústrias estão cada vez mais preocupadas em atingir e demonstrar desempenho ambiental correto, que seja coerente com a política adotada pela empresa e seus objetivos ambientais, por meio do controle dos impactos sobre o meio ambiente de suas atividades, produtos e serviços (NBR ISO 14001, 2004).

A competitividade é considerada um fator importante para que as empresas se mantenham adequadas à questão ambiental, proporcionando empreendimentos com foco em produtos e serviços ambientais. Esses empreendimentos são conhecidos como “indústrias verdes” e direcionam suas atividades para o desenvolvimento de programas que visam minimizar os impactos ambientais (JÖHR, 1994).

Com uma legislação mais exigente e mercado competitivo, os órgãos responsáveis em verificar o cumprimento das normas ambientais nas empresas se ocupavam em apenas fiscalizar o atendimento dos padrões ambientais estabelecidos. Por sua vez, as empresas potencialmente poluidoras preocupavam-se unicamente em atender à legislação ambiental.

À medida que os problemas ambientais ficaram mais evidentes e a ideia de qualidade total no setor produtivo ganhou consistência, percebeu-se que o controle de impactos ambientais só seria efetivo por meio de um Sistema de Gestão Ambiental (SEGANFREDO, 2007).

O Sistema de Gestão Ambiental é um sistema que inclui estrutura organizacional, atividades de planejamento, responsabilidades, práticas, procedimentos, processos e recursos para desenvolver, implementar, atingir, analisar criticamente e manter a política ambiental (SOARES *et al.*, 2000).

Abrangendo a importância de um sistema ambiental eficiente nas indústrias, Von SPERLING (2005) cita que a utilização de água pela indústria pode ocorrer de diversas formas, tais como: incorporação ao produto; lavagens de máquinas, tubulações e pisos; águas de sistemas de resfriamento e geradores de vapor; utilizada diretamente nas etapas do processo industrial; esgotos sanitários, entre outros. As

águas tornam-se contaminadas por resíduos do processo industrial ou pelas perdas de energia térmica, originando assim os efluentes líquidos. Exceto pelo volume incorporado aos produtos e pelas perdas por evaporação (VON SPERLING, 2005).

As águas contaminadas por resíduos provenientes do processo industrial devem ser destinadas de forma adequada, pois quando descartadas incorretamente, pode-se acarretar impactos ambientais, tais como: a contaminação do solo, ar e corpos hídricos receptores. Assim, se faz necessário um tratamento desse efluente e disposição final adequada. De acordo com Vourch *et al* (2008) as indústrias alimentícias estão entre as mais poluentes devido ao grande consumo de água e geração de efluentes.

3.2 TRATAMENTOS APLICADOS EM EFLUENTES DE AGROINDÚSTRIA

A escolha do tratamento adequado para efluentes industriais varia de acordo com as características do efluente e corpo receptor (NUNES, 2012). O tratamento engloba processos químicos e biológicos, além de várias operações unitárias físicas para que o efluente se enquadre aos padrões da legislação (BAUMGARTNER; SEGANFREDO, 2005; VAZ, 2009).

As operações de separação, mistura, sedimentação, coagulação, flotação, entre outras, são denominadas operações físicas. Já os processos que envolvem remoção de contaminantes através de reações químicas são denominados processos unitários químicos, como é o caso da precipitação química, adsorção, troca iônica, eletrodiálise, etc. No caso dos processos biológicos, são os tratamentos de efluentes que ocorrem por atividade biológica, sendo os mais utilizados: lodos ativados, digestão anaeróbia, filtração biológica, entre outros (PUNMIA; JAIN, 2002 apud LIED, 2012).

O processo de coagulação e floculação está entre mais utilizados para remover materiais coloidais, odor, metais pesados, turbidez, ácidos, óleos e graxas devido a sua alta eficiência e baixo custo de tratamento (BAUMGARTNER; SEGANFREDO, 2005; VAZ, 2009).

3.3 COAGULAÇÃO

A coagulação é um processo físico-químico para o tratamento de efluentes industriais e águas para abastecimento. Tem por objetivo remover partículas em

suspensão e dissolvidas que causam turbidez e coloração. Além disso, este processo contribui para a redução da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO) (SOLANA, 2014).

É um processo complexo devido aos parâmetros envolvidos, por isso é necessário que o funcionamento do coagulante seja determinado antes de sua aplicação (VERMA, 2012). As características do fluído são determinados através de parâmetro físico-químicos, como: pH, alcalinidade, cor, turbidez, temperatura (influi na viscosidade), concentração de sólidos dissolvidos e do tamanho de partículas em estado coloidal e em suspensão (DI BERNARDO, 1993).

O processo de coagulação envolve reações e mecanismos que estão ligados com a desestabilização das partículas coloidais (METCALF; EDDY, 2016). As principais partículas causadoras de cor e turbidez possuem diâmetro, variando entre 0,001 μm e 1 μm (LORA, 2001).

Para promover a agregação dos sólidos em suspensão, os produtos químicos são misturados com água residual, assim as partículas ficam grandes o suficiente para sedimentarem ou serem removidas. Já para a neutralização de cargas negativas são utilizados coagulantes catiônicos, fazendo com que os potenciais repulsivos diminuam, o que acaba favorecendo os potenciais atrativos de van der Waals. Uma vigorosa mistura é necessária para dispersar o coagulante em todo o líquido (Borchate S.S, 2014).

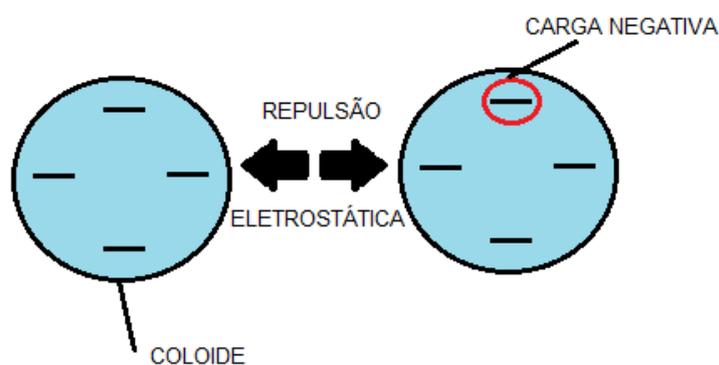


Figura 1. Característica de partículas coloidais
Fonte: Próprios Autores (2019)

3.3.1 Compressão da camada difusa

Os coloides geralmente possuem carga elétrica negativa, atraindo cargas opostas positivas que estão na água (PAVANELLI, 2001). Para quebrar a estabilização eletrostática, altas concentrações de cargas na camada difusa fazem com que o coloide reduza o volume para permanecer neutro (DI BERNARDO; DI BERNARDO; CENTURIONE, 2002). As propriedades elétricas presentes nos coloides criam força de repulsão eletrostática, fazendo com que se mantenham separados e impede a aglomeração e sedimentação (ECKENFELDER, 1989). A adição de produtos químicos resulta na desestabilização, fazendo com que haja a aglomeração das partículas coloidais e posteriormente a remoção por meio do processo de sedimentação, flotação ou filtração (CARDOSO, 2003).

Segundo Alleoni (1994) a desestabilização nesse tipo de mecanismo ocorre pela adição de íons de carga contrária à dos coloides. Os coloides são atraídos e adsorvidos, fazendo com que esses íons permaneçam na superfície da partícula, formando uma camada compacta, e uma camada difusa que não tem contato com a superfície.

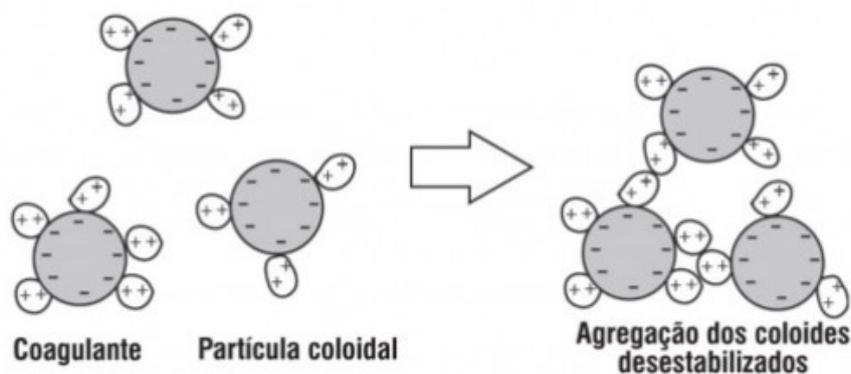


Figura 2. Diagrama de coagulação
Fonte: Sasaki (2015)

3.3.2 Adsorção e neutralização de cargas

Segundo Lima (2007) a neutralização está associada à adsorção de um coagulante com carga diferente da carga do coloide. Para que aconteça a produção de macro-flocos é necessário aplicar uma dosagem maior do coagulante, porém é importante não aplicar uma alta concentração porque pode carregar positivamente às partículas, fazendo com que ocorra a reestabilização dos coloides.

As ligações de hidrogênio, ligações covalentes e reações de troca iônica fazem com que o mecanismo de neutralização de carga ocorra com maior intensidade (DI BERNARDO, DI BERNARDO, CENTURIONE, 2002). A concentração requerida de coagulante é satisfeita, inicia-se a formação de precipitados de hidróxidos de metais, o que acaba efetuando a formação de flocos (Metcalf; Eddy 2016).

3.3.3 Varredura

O mecanismo de varredura não depende da neutralização de cargas dos colóides quando possui, predominantemente, alta concentração do coagulante, pois as partículas são adsorvidas e removidas através do processo de sedimentação (SPINELLI 2001). A formação dos precipitados varia de acordo com a quantidade do coagulante inserido no processo (Pavanelli, 2001).

Os precipitados possuem maior dimensão em relação aos colóides, fazendo com que ocorra o arraste das partículas em suspensão na água, além de proporcionar o desenvolvimento de um floco maior e influenciar na velocidade de sedimentação (PAVANELLI, 2001; LIMA, 2007).

O mecanismo da varredura é muito utilizado em estações de tratamento que utilizam a floculação e sedimentação/flotação antecedendo a filtração. Geralmente, os flocos resultantes são maiores e apresentam velocidade de sedimentação relativamente alta quando comparadas com os flocos formados no mecanismo de adsorção e-neutralização de cargas (Di Bernardo, 2005).

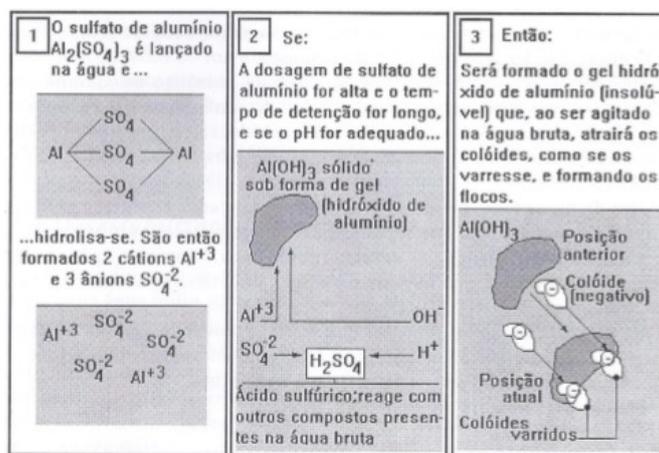


Figura 3. Desestabilização por varredura
Fonte: Vianna (1997)

3.3.4 Adsorção e formação de pontes.

O mecanismo de adsorção ocorre através de compostos orgânicos sintéticos, naturais e inorgânicos. Estes devem possuir grandes cadeias moleculares com sítios ionizáveis para que ocorra a formação de pontes entre os coloides (Lima, 2007). As interações entre os sítios ativos destas macromoléculas e os coloides promovem a sua aglomeração, conhecidas como pontes de hidrogênio ou forças de Van der Waals (Metcalf e Edyy, 2003).

O processo de flotação era utilizado inicialmente na separação de minérios no final do século XIX, sendo empregada posteriormente na década de 20 para o tratamento de águas residuárias, onde este processo passou por importantes desenvolvimentos contribuindo para a sua melhoria e maior utilização (KIURU, 2001). Atualmente, a flotação é utilizada para separar óleos e graxas e remover sólidos suspensos (ECKENFELDER, 2000). Vale ressaltar que este tratamento geralmente é aplicado após os processos de coagulação e floculação (PENETRA, R, G.1998).

Campos *et al.* (1996) aplicou em escala de laboratório algumas dosagens de cloreto férrico e cal hidratada, para verificar a potencialidade do emprego da flotação associada à coagulação e floculação. Essa iniciativa partiu da observação do emprego da flotação associada à coagulação e floculação no tratamento efluente de reator anaeróbio alimentado com esgoto sanitário. Após a aplicação, constatou nos ensaios que o processo foi eficaz na remoção de matéria orgânica, reduzindo a DBO e a DQO em até 85%.

3.4 Coagulantes

3.4.1 Coagulantes Inorgânicos

Na indústria são empregadas inúmeras substâncias químicas que auxiliam no processo de coagulação. Os agentes reativos mais utilizados são: o Alumínio ($Al_2(SO_4)_3 \cdot H_2O$), o Cloreto Ferríco ($FeCl_3$), o Sulfato de ferro ($FeSO_4$) e Cal (CaO ou $Ca(OH)_2$). Com a finalidade de aumentar a velocidade da sedimentação dos flocos e a resistência às forças de cisalhamento, são utilizados auxiliares de coagulação chamados de Polieletrólitos (polímeros sintéticos) (Nunes, 2004).

Os coagulantes inorgânicos são muito utilizados em tratamento de efluentes, pois além de ter um baixo custo, possui facilidade de armazenamento e uma eficiência alta (Da Silva *et al*, 2015).

Segundo Nogueira *et al* (2010), a utilização de coagulantes com íons metálicos também pode propiciar estes mesmos íons ao meio, ou ainda, gerar subprodutos que acabam diminuindo a qualidade da água e gerando riscos à saúde dos seres vivos, pois estes íons podem estar associados a doenças carcinogênicas e neurológicas (FERREIRA, 2012).

As indústrias de países subdesenvolvidos sofrem com a dificuldade de obter coagulante metálico, o que acaba aumentando os custos do tratamento, tanto da água para abastecimento, quanto dos efluentes (AMAGLOH; BENANG, 2009).

O lodo gerado pelo processo de coagulação utilizando coagulantes à base de sais de ferro ou alumínio não são recomendáveis, pois o processo de disposição final é dificultado devido a presença dos íons metálicos (LO MONACO *et al.*, 2010), o que pode influenciar diretamente em maiores custos e chances de contaminação.

Segundo Ferreira (2012), o volume de lodo gerado nesse processo é muito superior quando comparados com processos que utilizam coagulantes orgânicos. Além disso, com grandes volumes, causando problemas na hora da destinação final, pois necessitam de tratamento posterior, encarecendo o processo, pois gera um lodo inorgânico, não biodegradável e tóxico. Outro fator que pode influenciar negativamente na escolha desse tipo de coagulante é que geralmente apresentam faixas de pH mais restritas, necessitando de produtos químicos para a correção do pH (RANGEL, 2009).

3.4.2 Coagulantes Orgânicos

Os polímeros naturais possuem vantagens quando comparadas a coagulantes sintéticos, sendo estas: não apresentam riscos a saúde humana ou animal, são biodegradáveis, não geram subprodutos e precipitados de metal (NOGUEIRA *et al.*, 2010).

Segundo Ferreira (2012), o volume de lodo gerado por processos orgânicos é de quatro a cinco vezes menores que o volume de lodo produzido pela utilização de coagulantes inorgânicos. Assim, apresentará teores menores de substâncias tóxicas

e metais, além de serem biodegradáveis, por este motivo pode ser utilizado para a adubação agrícola do solo (VAZ *et al.*, 2010).

A farinha de mandioca, da batata, a pectina e o amido possuem eficiências de remoção de turbidez para esgoto bruto, variando entre 75% e 82% (ALVES *et al.*, 2014). Outro estudo apontou também para a utilização de tanino em conjunto com o extrato de Moringa (FERREIRA, 2012). Além disso, estudos de Lima (2007), apontaram para o uso do quiabo como auxiliar de floculação, onde seu uso melhorou significativamente a qualidade das águas decantadas. Até mesmo cascas de nozes, após secas e trituradas, apresentaram a possibilidade de serem utilizadas como agente floculante (SILVA; MORAES, 2013).

3.5 FLOCULAÇÃO

A floculação é um processo que ocorre durante a etapa de mistura lenta, no qual ocorre após a desestabilização das partículas e formação dos coágulos. Segundo Di Bernardo e Dantas (2005), a floculação consiste na agitação relativamente suave, para que ocorram choques entre as partículas e que se aglomerem formando partículas maiores, sendo denominados flocos.

De acordo com Libânio (2010) a floculação se caracteriza por uma operação unitária de clarificação. Esta se caracteriza por um conjunto de atividades físicas que tem como objetivo reduzir o número de partículas suspensas e coloidais presente na massa líquida, fazendo com que haja a formação de flocos mais densos que posteriormente serão extraídos com mais facilidade (Figura 4).

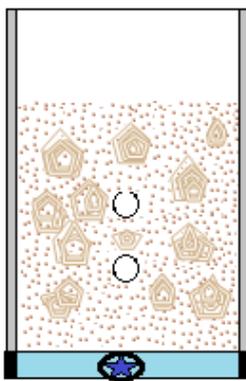


Figura 4. Floculação
Fonte: Próprios Autores (2019)

3.6 FLOTAÇÃO

A flotação é uma técnica de separação de misturas que consiste na introdução de bolhas de ar a uma suspensão de partículas, ou seja, as partículas aderem as bolhas formando uma espuma, fazendo com que a remoção ocorra de maneira mais eficaz. Vale ressaltar que o processo de flotação é o inverso daquele que deveria ocorrer espontaneamente: a sedimentação das partículas. De acordo com DeSousa (2003) A ocorrência do fenômeno se deve à tensão superficial do meio de dispersão e ao ângulo de contato formado entre as bolhas e as partículas (Figura 5).

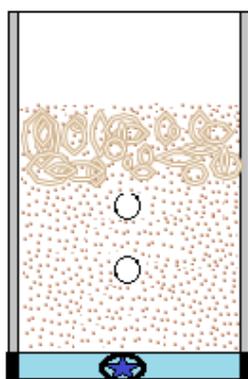


Figura 5. Flotação
Fonte: Próprios Autores (2019)

3.7 SEDIMENTAÇÃO

De acordo com Braga (2013), o processo de sedimentação é dado pela concentração de partículas em suspensão. Quanto maior for a concentração no meio, maior é a resistência à sedimentação. Existem quatro tipos de sedimentação, sendo estas:

- A sedimentação discreta prevalece em suspensões muito diluídas, ou seja, as partículas sedimentam individualmente sem ocorrer interações e com velocidade constante. Neste caso, a velocidade de sedimentação pode ser calculada através do equilíbrio de forças atuantes sobre a partícula na direção vertical (força gravitacional, para baixo, e empuxo mais força de atrito para cima), do qual resulta a lei de Stokes.

- A sedimentação flocculenta se dá a partir da concentração de sólidos em suspensão. Neste caso, a maior concentração de partículas permite a formação de flocos mais robustos e com maior velocidade de sedimentação.
- A sedimentação zonal possui ainda mais a concentração de sólidos em suspensão, onde tende a dificultar a saída de água em contracorrente que possibilita a sedimentação das partículas. Neste caso, a velocidade da sedimentação tende a ser reduzida.
- Na sedimentação por compressão, a suspensão é tão concentrada que a “sedimentação” dá-se pelo peso de uma partícula sobre a outra, provocando a liberação de água intersticial.

As operações da sedimentação são divididas didaticamente em duas classes, espessamento e clarificação. No espessamento o produto de interesse é o sólido e na clarificação, o produto de interesse é o líquido clarificado (Figura 6).

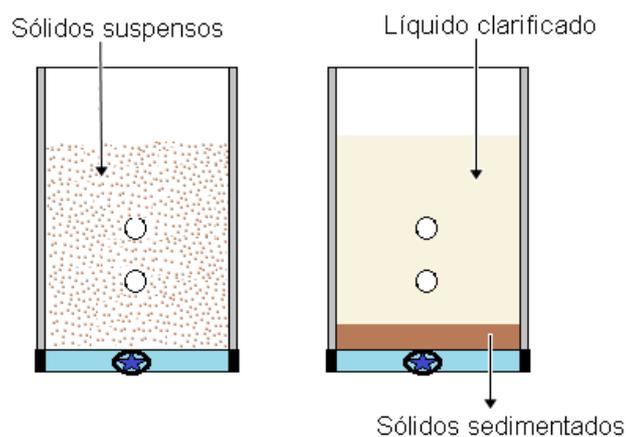


Figura 6. Sedimentação
Fonte: Próprios Autores (2019)

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO

O estudo foi desenvolvido com efluente gerado por uma indústria de laticínios, localizada no município de Matelândia, região oeste do estado do Paraná, clima subtropical úmido mesotérmico.

Esta indústria possui como produtos principais, bebidas lácteas, iogurtes, queijo *petit suisse* e creme de leite. Para a produção destes produtos a indústria recebe cerca de 110.000 litros de leite por dia e consome em seus processos industriais uma média de $310 \text{ m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$ de água potável, gerando uma vazão de efluente de aproximadamente $300 \text{ m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$.

O efluente gerado pela indústria possui um sistema de tratamento composto por níveis preliminares (gradeamento e caixa de gordura), calha Parshall (medidor de vazão), nível secundário (lagoa anaeróbia 1, lagoa anaeróbia 2, lagoa aerada) e um pós-tratamento (coagulação-floculação-flotação), conforme ilustra a Figura 7.

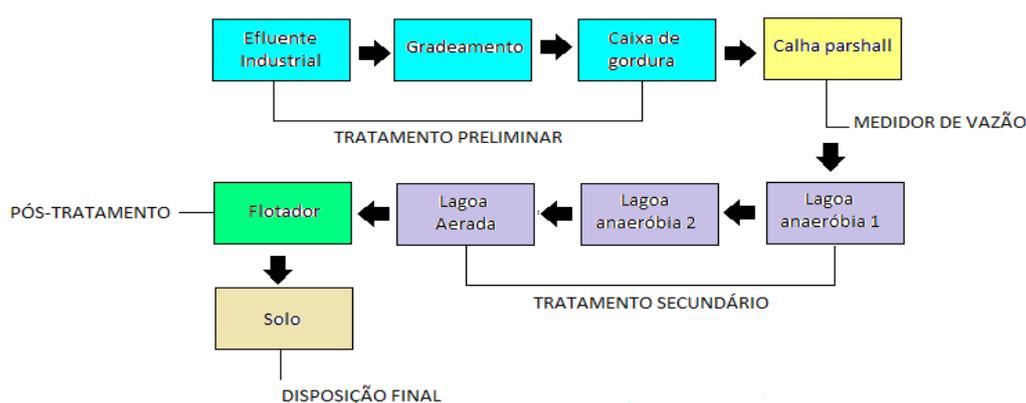


Figura 7. Fluxogramas das etapas do sistema de tratamento do efluente em estudo
Fonte: Próprios Autores (2019)

Após, essas etapas o efluente é disposto no solo, através de um sistema de fertirrigação para uma área de 193.600 m^2 , com plantio de eucalipto próprio da empresa, o qual é utilizado para produção de vapor das caldeiras durante o processo industrial. No processo de flotação há formação de lodo, este lodo é acondicionado em tanques de fibra e assim, é efetuada a drenagem do maior volume de água contido

no lodo. Após isso, ele é concedido a proprietários rurais que realizaram o cadastro para a utilização do lodo como adubo em suas propriedades.

4.2 COLETA E CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE

O efluente utilizado foi coletado após a terceira lagoa de estabilização (lagoa aerada), antes da entrada no flotador, seguindo as normas da NBR 9897 (ABNT, 1987).

No Laboratório de Efluentes e Biotecnologia da UTFPR – Campus Medianeira, foi realizado a caracterização físico-química do efluente, medindo o pH pelo método potenciométrico e turbidez pelo método nefelométrico, os quais seguiram os métodos descritos em Standard Methods for Examination of Water and Wastewater (APHA; AWWA; WEF, 2012).

O efluente foi mantido e armazenado nos galões plásticos de 18 L, sob refrigeração até a sua utilização para os ensaios, seguindo as recomendações necessárias para cada tipo de análise.

4.3 EQUIPAMENTO DE BANCADA PARA ENSAIOS DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO-FLOTAÇÃO-SEDIMENTAÇÃO

4.3.1 Descrição do equipamento *Jar-test*

Para os ensaios de coagulação-floculação e sedimentação, foi utilizado o equipamento *Jar-Test* da marca PoliControl, modelo FlocControl III, este equipamento possui 6 agitadores, composto de sistemas de controle de rotação, que permite programar ciclos para ensaios, simulando diferentes situações, permitindo a otimização de sistemas de tratamento de águas e efluentes (Figura 8).

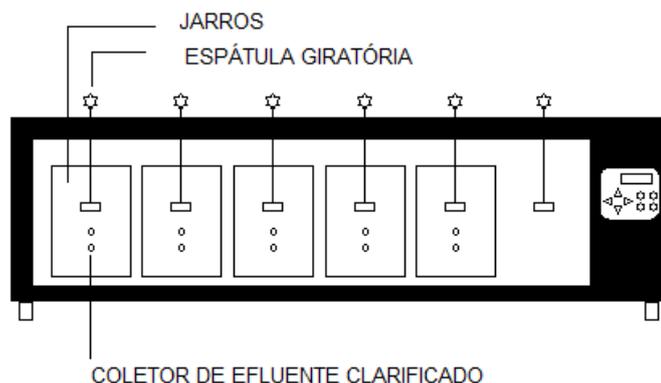


Figura 8. Descrição do Equipamento Jar-Test
Fonte: Próprios Autores (2019)

4.3.2 Descrição do equipamento Flota-test

O equipamento utilizado para a realização dos ensaios de coagulação-floculação-flotação por ar dissolvido é composto por uma câmara de pressão, 5 jarros de flotação, que foram confeccionados com base no dimensionamento de Centurione Filho e Di Bernardo (2002), um conjunto de agitadores *Jar-test* e um compressor de ar (Figura 9).

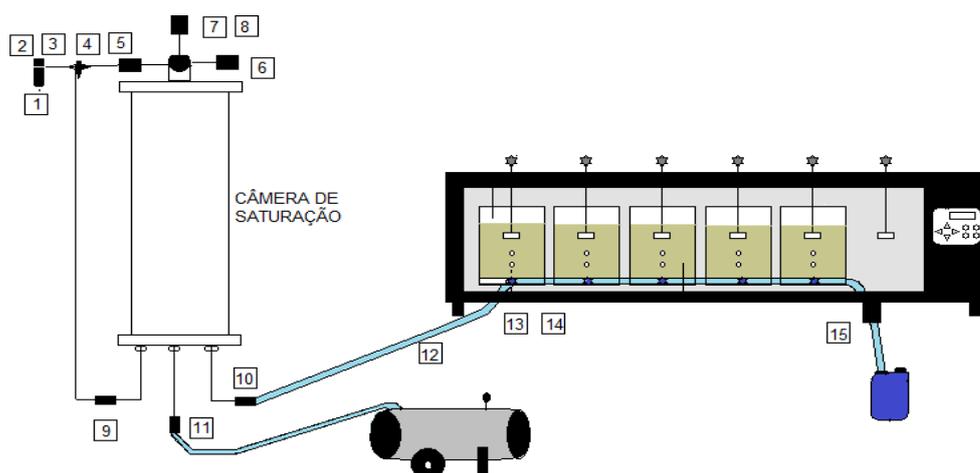


Figura 9. Equipamento de bancada convencional utilizado para ensaios de coagulação-floculação-flotação por ar dissolvido
Fonte: Próprios Autores (2019)

A câmara de saturação possui um volume interno de aproximadamente 12,2 L e estima-se que a pressão máxima de operação seja de 800 kPa. A câmara foi construída em aço inox, seção transversal circular de diâmetro interno 125 mm, espessura da parede 1 mm e altura de 1 m (Figura 10).



Figura 10. Câmara de saturação
Fonte: Lucas (2019)

A câmara possui em seu topo um acesso com uma válvula de esfera para entrada de efluente, o qual será saturado, uma válvula de esfera para entrada de ar sob pressão durante a liberação do líquido saturado, um manômetro e uma válvula de agulha que auxilia no ajuste fino da pressão na câmara. Na sua base ela possui três acessos controlados por válvulas de esfera, uma é responsável por regular a entrada de ar, outra a saída do líquido saturado com ar e a terceira válvula é utilizada para realizar o descarte do conteúdo da câmara.

Um compressor de ar é utilizado para fornecer o ar que será conduzido até câmara de saturação, através de uma válvula reguladora de pressão, a qual possui um filtro, possibilitando o controle da pressão do ar de entrada.

A válvula reguladora possui em sua saída uma conexão “T”, dividindo o fluxo de ar, para a saturação e a manutenção da pressão desejada na câmara de saturação, que ocorre durante a liberação do líquido saturado nos ensaios de flotação.

No sistema de condução de líquido saturado com ar da câmara de saturação para os jarros, assim como o sistema de condução de ar para a câmara de saturação, foram utilizadas mangueiras de poliuretano de 8 mm de diâmetro, conexões tipo “T”,

válvulas de esfera de $\frac{1}{4}$ de volta e adaptadores de BSP 1/8" engate rápido para mangueiras de 8 mm.

Foram confeccionados jarros de flotação em acrílico transparente, com uma seção transversal quadrada de lado interno de 115 mm, e altura de 220 mm. Estes jarros foram confeccionados igualmente aos jarros do equipamento Jar-Test, sendo que a base deste foi construída conforme a descrição de Centurione Filho (2002).

A base dos jarros são compostas por duas placas de acrílico, com espaçamento de 5 mm, a placa inferior possui canais condutores de líquido saturado com ar e a placa superior possui 121 orifícios de 2 mm de diâmetro, com espaçamento de 11 mm, na base de cada jarro existe um sistema de injeção de líquido, constituído através de uma válvula de agulha (Figura 11).



Figura 11. Jarro de flotação
Fonte: Lucas (2019)

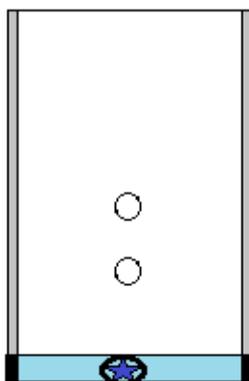


Figura 12. Vista frontal do jarro de flotação
Fonte: Adaptado de Centurione Filho (2002)

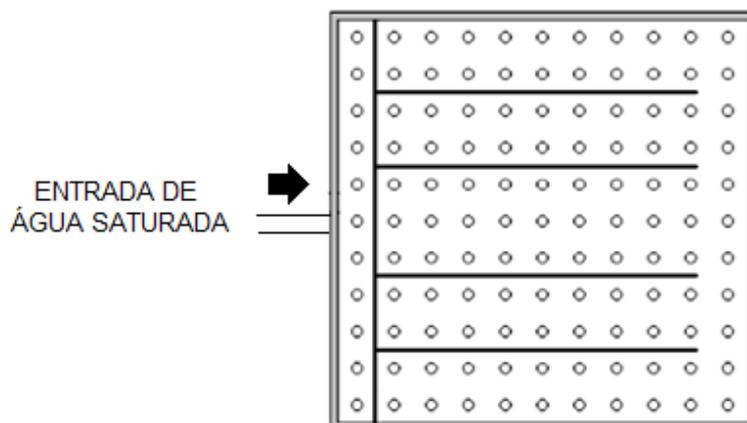


Figura 13. Vista superior do jarro de flotação
Fonte: Adaptado de Centurione Filho (2002)

Visto que os jarros para o sistema de flotação por ar dissolvido, foram confeccionados seguindo as mesmas características geométricas dos jarros do equipamento de bancada Jar-Test, considerando o recomendado por Centurione Filho e Bernardo (2003), a relação entre o gradiente de velocidade médio e rotação das pás do equipamento é conhecida, conforme ilustra a Figura 14.

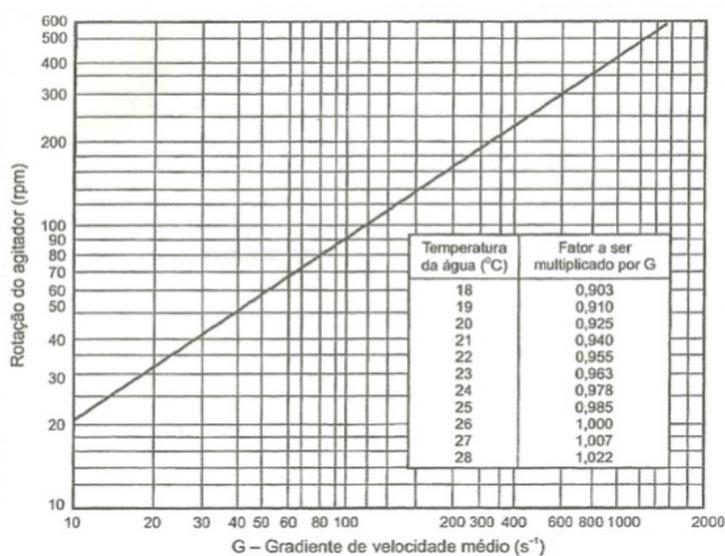


Figura 14. Gradiente de velocidade x rotação do agitador
Fonte: Bernardo e Centurione Filho (2002)

4.3.1 Procedimentos de Operação

Os procedimentos para a operação do Flota Test estão apresentados no Apêndice A.

4.4 PREPARO DAS SOLUÇÕES

4.4.1 Preparo dos coagulantes e floculantes

4.4.1.1 Novfloc 1540

Novfloc 1540 NOVTEC ® é um polieletrólito catiônico, líquido, derivado das aminas, resinas poliquaternárias e sais inorgânicos. Realizaram diluições do produto para concentrações de 5 e 10 %. Devido à tendência do composto orgânico a se degradar com o tempo, as soluções eram preparadas e utilizadas no mesmo dia.

4.4.1.2 Klaraid IC1176L

O cloreto de polialumínio (PAC) é um coagulante inorgânico fortemente catiônico e de baixo peso molecular, comercializado na forma sólido ou líquida, atuando satisfatoriamente bem na faixa de pH entre 6 e 7, sendo bastante utilizado no tratamento de água de efluentes industriais (CAVALCANTI, 2012).

O cloreto de polialumínio utilizado foi o Klaraid IC 1176L líquido, com concentração entre 20 e 30% de cloreto de alumínio básico, densidade de 1330 kg m⁻³ e pH igual a 3 (solução de 1%) (GE WATER & PROCESS TECHNOLOGIES DO BRASIL, 2016). Foram preparadas soluções de 2, 5, 10 % de Klaraid IC 1176L.

4.4.1.3 Polfloc D150

Foi utilizado como auxiliar de floculação o Polfloc D150, da Novtec. Este é um polieletrólito de longa cadeia molecular, medianamente catiônico, derivado da poli(acrilamida e acrilato de sódio) (NOVTEC, [entre 2003 e 2014]c), o qual atua satisfatoriamente, em uma faixa de pH de 6 a 13.

Este foi utilizado diluído a 0,5 % (concentração de 5g L⁻¹), pesou-se 5 g do produto comercial, e diluiu-se em um balão volumétrico de 1 L, completando este com água destilada. Esta solução foi agitada em Jar-Test a 150 rpm, por 60 minutos, após este processo, a solução estoque poderia ser armazenada por até 2 semanas (NOVTEC, (entre 2003 e 2014)d).

4.5 ENSAIOS PRELIMINARES DE COAGULAÇÃO E FLOCULAÇÃO

4.5.1 Dosagem Mínima

Os ensaios de dosagem mínima, o qual tem por objetivo identificar a menor dosagem de coagulante para a formação de flocos, tanto para Klaraid quanto para o Novfloc, foram realizados com volumes de 500 mL de efluente em béqueres de 600 mL, onde foram submetidos à agitação de 30 rpm no equipamento Jar-Test, até a visualização dos primeiros coágulos ou flocos, conforme procedimento indicado por Ribeiro et al. (2016). As faixas de concentrações analisadas estão representadas na Tabela 1.

Tabela 1. Concentrações utilizadas para os ensaios de dosagem mínima

Coagulantes Ensaio	Concentrações (mg. L ⁻¹)					
	1	2	3	4	5	6
Novfloc 1540 Klaraid 1176L	20	40	60	80	100	120

Fonte: Próprios Autores (2019)

Com base em informações fornecidas junto a fornecedores e usuários do auxiliar de floculação Polfloc D150, a faixa de inicial de investigação foi estabelecida entre 0 a 20 mg L⁻¹ do produto.

4.5.2 Ensaio de pH

Após, obtidos os valores de dosagem mínima para o coagulante em estudo, foi associado os valores da dosagem mínima em diferentes faixas de pH, sendo o pH que melhor favoreceu à remoção da turbidez para cada um dos dois coagulantes, foi adotado como o pH ótimo. A faixa de pH analisada foi compreendida entre 5,5; 6,0; 6,5; 7,0; 7,5; e 8,0; pois são os valores de pH recomendadas pela literatura técnico-científica para os dois coagulantes.

Para o ajuste de pH foi utilizado soluções de HCl 1,0 mol. L⁻¹ e 0,1 mol. L⁻¹; NaOH 1,0 mol. L⁻¹ e 0,1 mol. L⁻¹.

4.6 ENSAIOS DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO E SEDIMENTAÇÃO

Foi realizado no equipamento Jar-Test, os ensaios de coagulação, floculação e sedimentação, em jarros de 2 L com 1,5 L de efluente. Os ensaios foram divididos em duas etapas, através de um Planejamento Inicial Fatorial 2^3 com 4 repetições no ponto central (Tabela 2), e posteriormente um Delineamento Composto Central Rotacional – DCCR 2^3 com 4 repetições no ponto central (Tabela 5), tendo como variável resposta para os dois planejamentos a redução de turbidez, em %.

Tabela 2. Valores codificados das variáveis independentes e respostas para redução da turbidez para o Planejamento Inicial Fatorial 2^3

Ensaio	[]coag (mg. L ⁻¹)	[]floc (mg. L ⁻¹)	pH
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	0	0	0
10	0	0	0
11	0	0	0
12	0	0	0

**Legenda: []coag– dosagem de coagulante, []floc–dosagem de auxiliar de floculação
Fonte: Próprios Autores (2019)**

Através do planejamento inicial fatorial 2^3 , foi possível analisar os efeitos das variáveis e assim, realizar ajustes nas faixas de estudo para a execução da segunda etapa do planejamento. Foram utilizados os seguintes parâmetros operacionais: agitação rápida de 200 rpm por 1 min, seguida de agitação lenta de 50 rpm por 10 min, tempo de sedimentação igual a 30 min. Na Tabela 3, estão representados os valores reais e codificados das variáveis independentes e respostas para os dois coagulantes em estudo.

Tabela 3. Valores codificados das variáveis independentes e respostas para redução da turbidez com o coagulante Klaraid e Novfloc no Planejamento Inicial Fatorial 2^3

	Níveis	[]coag (mg. L ⁻¹)	[]floc (mg. L ⁻¹)	pH
Klaraid + Polfloc	-1	100	0	5
	0	550	10	6,5
	1	1000	20	8
Novfloc + Polfloc	-1	100	0	5
	0	100	10	6,5
	1	700	20	8

**Legenda: []coag–dosagem de coagulante, []floc–dosagem de auxiliar de floculação
Fonte: Próprios Autores (2019)**

A segunda etapa do planejamento foi a execução de um DCCR 2³ com 4 repetições no ponto central, para o produto coagulante Klaraid e Novfloc (Tabela 4). Através dos DCCR's foi possível gerar equações de segundo grau e gráficos de superfície de contorno. Foram utilizados os seguintes parâmetros operacionais: agitação rápida de 200 rpm por 1 min, seguida de agitação lenta de 50 rpm por 10 min, tempo de sedimentação igual a 30 min.

Tabela 4. Valores codificados das variáveis independentes e respostas para redução da turbidez para o DCCR 2³

Ensaio	[]coag	[]floc	pH
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	-1,68	0	0
10	1,68	0	0
11	0	-1,68	0
12	0	1,68	0
13	0	0	-1,68
14	0	0	1,68
15	0	0	0
16	0	0	0
17	0	0	0
18	0	0	0

Legenda: []coag–dosagem de coagulante, []floc–dosagem de auxiliar de floculação
Fonte: Próprios Autores (2019)

Na Tabela 5 estão representados os valores reais e codificados das variáveis independentes e respostas para os dois coagulantes em estudo.

Tabela 5. Valores codificados das variáveis independentes e respostas para redução da turbidez com o coagulante Klaraid e Novfloc no DCCR 2³

Níveis	[]coag (mg. L ⁻¹)	[]floc (mg. L ⁻¹)	pH	
Klaraid + Polfloc	-1,68	300	0	5,6
	-1	482	5	6
	0	750	12,5	6,5
	1	1018	20	7
	1,68	1200	25	7,3
Novfloc + Polfloc	-1,68	100	0	5,6
	-1	262	5	6
	0	500	12,5	6,5
	1	738	20	7
	1,68	900	25	7,3

Legenda: []coag–dosagem de coagulante, []floc–dosagem de auxiliar de floculação
Fonte: Próprios Autores (2019)

4.7 ENSAIOS DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO E FLOTAÇÃO

Os ensaios de coagulação, floculação e flotação foram realizados no aparelho Flota-teste em jarros de 2 L com 1,5 L de efluente. Na etapa da flotação foi efetuada a introdução de água como líquido saturado com um volume de 20% do jarro. Os ensaios foram divididos em duas etapas, inicialmente através de um delineamento fatorial fracionado 2^{4-1} (Tabela 8) e posteriormente um Delineamento Composto Central Rotacional – DCCR 2^3 com 4 repetições no ponto central (Tabela 6) tendo como variável resposta a redução de turbidez, em %.

Tabela 6. Valores codificados das variáveis independentes e respostas para redução da turbidez para o DFF 2^{4-1}

Ensaio	Dcoag (mg. L ⁻¹)	Dfloc (mg. L ⁻¹)	pH	r %
1	-1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1	1
3	-1	1	-1	1
4	1	1	-1	-1
5	-1	-1	1	1
6	1	-1	1	-1
7	-1	1	1	-1
8	1	1	1	1
9	0	0	0	0
10	0	0	0	0
11	0	0	0	0
12	0	0	0	0

Legenda: Dcoag – dosagem de coagulante, Dfloc – dosagem de auxiliar de floculação e r – taxa de recirculação
Fonte: Lucas (2019)

Através dos DFF 2^{4-1} (Tabela 7), foi possível analisar os efeitos das variáveis e assim, realizar ajustes nas faixas de estudo para a execução da segunda etapa do planejamento.

Tabela 7. Níveis reais e codificados das variáveis independentes e respostas para redução da turbidez para o coagulante Klaraid e Novfloc no DFF 2^{4-1}

Níveis		[] coag (mg. L ⁻¹)	[] floc (mg. L ⁻¹)	pH	r %
Klaraid + Polfloc	-1	100	0	5	10
	0	550	10	6,5	20
	1	1000	20	8	30
Novfloc + Polfloc	-1	100	0	5	10
	0	400	10	6,5	20
	1	700	20	8	30

Legenda: Dcoag – dosagem de coagulante, Dfloc – dosagem de auxiliar de floculação e r – taxa de recirculação
Fonte: Lucas (2019)

Nos ensaios dos DFF os parâmetros operacionais fixados foram: 9 L de água na câmara de saturação, pressão de saturação de 500 kPa, tempo de saturação mínimo de 20 min, volume inicial de 2L de efluente com pH ajustado em cada jarro, agitação rápida de 200 rpm por 30 s seguida de agitação lenta de 50 rpm por 10 min, tempo de flotação igual a 10min e ponto de coleta de efluente clarificado a 13cm de altura, caracterizando velocidade de flotação de $1,3\text{cm min}^{-1}$. A segunda etapa do planejamento foi a execução de um DCCR 2^3 com 4 repetições no ponto central, para os coagulantes Klaraid e Novfloc (Tabela 8).

Tabela 8. Valores codificados das variáveis independentes e respostas para redução da turbidez para o DCCR 2^3

Ensaio	Dcoag (mg L^{-1})	Dfloc (mg L^{-1})	pH
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	-1,68	0	0
10	1,68	0	0
11	0	-1,68	0
12	0	1,68	0
13	0	0	-1,68
14	0	0	1,68
15	0	0	0
16	0	0	0
17	0	0	0
18	0	0	0

Legenda: Dcoag – dosagem de coagulante e Dfloc – dosagem de auxiliar de floculação
Fonte: Lucas (2019)

Na Tabela 9, estão representados os valores reais e codificados das variáveis independentes e respostas para a redução da turbidez para os coagulantes Klaraid e Novfloc.

Tabela 9. Valores codificados das variáveis independentes e respostas para redução da turbidez com o coagulante Klaraid e Novfloc no DCCR 2^3

Níveis	[]coag (mg L^{-1})	[]floc (mg L^{-1})	pH	
	-1,68	100	0	5
Klaraid + Polifloc	-1	231,5	4	5,4
	0	425	10	6
	1	618,5	16	6,6
	1,68	750	20	7

Continua

Continuação

	-1,68	100	0	5
	-1	201,2	4	5,4
Novfloc + Polfloc	0	350	10	6
	1	498,8	16	6,6
	1,68	600	20	7

Legenda: Dcoag– dosagem de coagulante e Dfloc – dosagem de auxiliar de floculação
Fonte: Lucas (2019)

Nos ensaios dos DCCR foram fixados os seguintes parâmetros operacionais: Dfloc= 10 mg L⁻¹, uso de 9 L de água na câmara de saturação, tempo de saturação controlado de 20 min (saturação iniciada 9 min antes do acionamento da agitação rápida), volume inicial de 10 L de efluente com pH ajustado, agitação da câmara de saturação de 2 min (a partir dos 18 min de saturação), agitação rápida de 200 rpm por 1 min seguida de agitação lenta de 50 rpm por 10 min, fluxo de injeção de água saturada para o jarro controlado em 0,05 L s⁻¹, tempo de flotação igual a 10 min e ponto de coleta de efluente clarificado a 13 cm de altura, caracterizando velocidade de flotação de 1,3 cm min⁻¹.

Para o cálculo da eficiência real, utilizou-se o raciocínio dado pela Equação 1 indicada por Couto, França e Santos (2011) que tem como objetivo corrigir a interferência da diluição do efluente na eficiência do processo de flotação, uma vez que água foi empregada como líquido saturado.

$$E = 100. \left(1 - \frac{TfVt}{TiVi}\right) \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde Ti e Tf são as medidas de turbidez (NTU) do efluente e do efluente clarificado, respectivamente.

4.8 ANÁLISES ESTATÍSTICA E INTERPRETAÇÃO DE DADOS

Para os ensaios do Planejamento Inicial Fatorial, Planejamento Fatorial Fracionado e do DCCR, foi utilizado o *software* STATISTICA, versão 10.0 (Statsoft™, USA), para determinação dos efeitos das variáveis independentes, análise de variância (ANOVA), cálculo dos coeficientes de regressão e para obtenção dos gráficos de superfície de resposta e contorno.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS PRELIMINARES

5.1.1 Dosagem mínima de coagulante

A dosagem mínima necessária para a formação de flocos observada, tanto para o Klaraid IC1176L quanto para o Novfloc foi de 80 mg/L, dosagem próxima à obtida por Papp (2017), o qual trabalhou com os mesmos produtos coagulantes. Para este ensaio o efluente apresentou pH igual a 8,5. Os resultados obtidos através dos ensaios de dosagem mínima estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10. Dosagem mínima de coagulante

Coagulante	Dosagem Mínima (mg. L ⁻¹)
Klaraid IC1176L	80
Novfloc	80

Fonte: Próprios Autores (2019)

5.1.2 Ensaio de pH

Nos ensaios de pH os dois produtos coagulantes, Klaraid IC1176L e Novfloc, obtiveram os maiores percentual de remoção da turbidez para os valores de pH 5,5 e 6,0. A partir dessa informação, foi definido a faixa inicial de estudo para a variável pH entre 5,0 e 8,0, assim podendo observar melhor os valores de pH ligeiramente inferiores àqueles que indicaram melhores resultados, assim como os valores mais próximos ao pH característico do efluente coletado.

5.2 ENSAIOS DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO E SEDIMENTAÇÃO

5.2.1 Otimização do produto coagulante Klaraid IC1176L e o auxiliar de floculação Polfloc

5.2.1.1 Planejamento Inicial: Fatorial 2³

A Tabela 11 apresenta os valores reais adotados e os valores codificados das variáveis independentes e resposta redução de turbidez (Red Turb) nos ensaios do

planejamento inicial fatorial 2³ com 4 repetições no ponto central, realizado para o coagulante Klaraid e floculante Polfloc.

De acordo com a Tabela 11, observa-se que a redução de turbidez para o coagulante Klaraid IC1176L variou entre 21,84 e 98,63%, respectivamente, e os valores obtidos para os pontos centrais apresentaram uma variação consideravelmente baixa, indicando uma boa repetibilidade no processo de ensaio.

Tabela 11. Valores reais e codificados das variáveis independentes e respostas para redução de turbidez obtidas com coagulante Klaraid IC1176L Planejamento Inicial Fatorial 2³ para Sedimentação

Ensaio	[]coag (mg. L ⁻¹)	[]floc (mg. L ⁻¹)	pH	Red Turb (%)
1	-1 (100)	-1 (0)	-1 (5)	75,43
2	+1 (1000)	-1 (0)	-1 (5)	96,25
3	-1 (100)	+1(20)	-1 (5)	88,40
4	+1 (1000)	+1(20)	-1 (5)	93,86
5	-1 (100)	-1 (0)	+1 (8)	21,84
6	+1 (1000)	-1 (0)	+1 (8)	87,37
7	-1 (100)	+1(20)	+1 (8)	73,04
8	+1 (1000)	+1(20)	+1 (8)	93,17
9	0 (550)	0 (10)	0 (6,5)	98,29
10	0 (550)	0 (10)	0 (6,5)	98,29
11	0 (550)	0 (10)	0 (6,5)	98,63
12	0 (550)	0 (10)	0 (6,5)	98,63

Legenda: []coag – dosagem de coagulante, []floc – dosagem de auxiliar de floculação e Red Turb – Redução da turbidez

Fonte: Próprios Autores (2019)

A partir dos resultados apresentados, foram obtidas as estimativas dos efeitos das variáveis independentes sobre a resposta redução de turbidez para o coagulante Klaraid IC1176L (Tabela 12).

Tabela 12. Estimativa dos efeitos para redução de turbidez com o coagulante Klaraid IC1176L

Fator	Efeito	Erro padrão	t(5)	p-valor	Limite de confiança < 90%	Limite de confiança > 90%
Média	85,27	4,39	19,41	0,00	76,42	94,12
(1)[]Coag	27,99	10,76	2,60	0,05	6,30	49,67
(2)[]Floc	16,89	10,76	1,57	0,18	-4,79	38,58
(3)pH	-19,62	10,76	-1,82	0,13	-41,31	2,06
(1) x (2)	-15,19	10,76	-1,41	0,22	-36,87	6,49
(1) x (3)	14,85	10,76	1,38	0,23	-6,84	36,53
(2) x (3)	11,60	10,76	1,08	0,33	-10,08	33,29

Fonte: Próprios Autores (2019)

Analisando-se os efeitos das variáveis independentes na resposta redução de turbidez apresentados na Tabela 12, verificou-se que apenas a dosagem de coagulante (p-valor = 0,0482) pode ser considerada estatisticamente significativa, ou

seja, com o $p\text{-valor} < 0,05$, mostrando que a remoção da turbidez tende a ser favorecida conforme o aumento da dosagem do coagulante.

Através do Gráfico de Pareto (Figura 15) também é possível visualizar a influência dos fatores para a variável resposta redução da turbidez, o qual apresentou um efeito positivo.

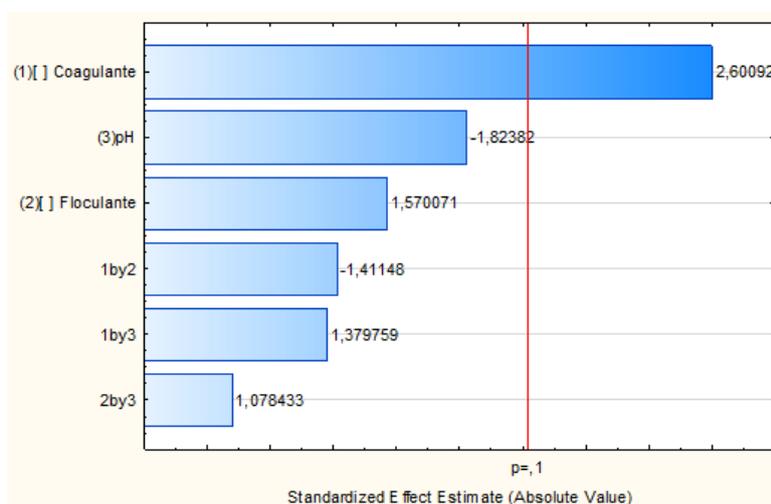


Figura 15. Gráfico de Pareto para a significância dos fatores
Fonte: Próprios Autores (2019)

Após a análise dos resultados do planejamento inicial 2^3 , optou-se tanto em aumentar o nível inferior e superior da faixa de dosagem do coagulante, diminuir o nível superior da faixa de valores de pH e manter a faixa de dosagem do auxiliar de floculação e as demais condições operacionais fixadas neste planejamento, para o planejamento seguinte.

5.2.1.2 Delineamento Composto Central Rotacional de Sedimentação

A Tabela 13 apresenta os valores reais adotados e os valores codificados das variáveis independentes dosagem de coagulante Klaraid IC1176L ($[]_{\text{coag}}$), dosagem de auxiliar de floculação Polfloc D150 ($[]_{\text{floc}}$) e pH sobre as respostas redução de turbidez (Red Turb) no delineamento composto central rotacional (DCCR) 2^3 com 4 repetições no ponto central

Tabela 13. Valores reais e codificados das variáveis independentes e respostas para redução da turbidez obtidas com o coagulante Klaraid IC1176L DCCR 2³ para Sedimentação

Ensaio	D _{coag} (mg.L ⁻¹)	D _{floc} (mg.L ⁻¹)	pH	Red turb (%)
1	-1 (482)	-1 (5)	-1 (6)	95,13
2	+1 (1018)	-1 (5)	-1 (6)	93,12
3	-1 (482)	+1 (20)	-1 (6)	96,27
4	+1 (1018)	+1 (20)	-1 (6)	94,55
5	-1 (482)	-1 (5)	+1 (7)	93,98
6	+1 (1018)	-1 (5)	+1 (7)	98,85
7	-1 (482)	+1 (20)	+1 (7)	93,98
8	+1 (1018)	+1 (20)	+1 (7)	98,85
9	-1,68 (300)	0 (12,5)	0 (6,5)	94,55
10	+1,68 (1200)	0 (12,5)	0 (6,5)	98,85
11	0 (750)	-1,68 (0)	0 (6,5)	98,85
12	0 (750)	+1,68 (25)	0 (6,5)	97,42
13	0 (750)	0 (12,5)	-1,68 (5,6)	96,85
14	0 (750)	0 (12,5)	+1,68 (7,3)	93,98
15	0 (750)	0 (12,5)	0 (6,5)	97,99
16	0 (750)	0 (12,5)	0 (6,5)	97,99
17	0 (750)	0 (12,5)	0 (6,5)	97,42
18	0 (750)	0 (12,5)	0 (6,5)	97,70

Legenda: []coag – dosagem de coagulante, []floc – dosagem de auxiliar de floculação e Red Turb – Redução da turbidez

Fonte: Próprios Autores (2019)

De acordo com a Tabela 13, é possível observar que o percentual de redução da turbidez variou de 93,12 a 98,85 %, os valores obtidos nos quatro pontos centrais apresentaram baixas dispersões, indicando uma boa repetitividade do processo.

Na grande maioria dos ensaios ocorreu a flotação simultaneamente a sedimentação, interferindo nos resultados (Figura 16), visto que diante deste ocorrido, não é possível atribuir a clarificação do efluente apenas a sedimentação, como era o esperado.



Figura 16. Efluente em Floculação – Sedimentação

Fonte: Próprios Autores (2019)

Observou-se, que o efluente utilizado durante o período do presente estudo, demonstrou possuir maior potencial para tratamentos de clarificação de efluentes por meio da flotação. Os ensaios que estavam associados ao nível superior de pH, favoreceram melhor a sedimentação.

Na Tabela 14 estão representadas as estimativas dos efeitos das variáveis independentes sobre a resposta redução da turbidez, considerando que as letras L e Q, estão representando os termos lineares e quadráticos das variáveis do modelo de regressão, assim como os números 1,2 e 3 representam às variáveis []coag, []floc e pH, respectivamente.

Tabela 14. Estimativa dos efeitos para redução de turbidez com o coagulante Klaraid

Fator	Efeito	Erro padrão	t(8)	p-valor	Limite de confiança < 95%	Limite de confiança > 95%
Média	97,76	0,75	130,32	0,00	96,03	99,49
(1)[]Coag(L)	1,94	0,81	2,38	0,04	0,06	3,82
[]Coag(Q)	-1,24	0,85	-1,46	0,18	-3,20	0,72
(2)[]Floc(L)	0,03	0,82	0,03	0,97	-1,85	1,91
[]Floc(Q)	-0,23	0,86	-0,27	0,79	-2,22	1,75
(3)pH (L)	0,12	0,80	0,15	0,88	-1,73	1,97
pH (Q)	-1,89	0,80	-2,37	0,05	-3,73	-0,05
1L x 2L	0,07	1,06	0,07	0,95	-2,38	2,52
1L x 3L	3,37	1,06	3,17	0,01	0,92	5,82
2L x 3L	-0,64	1,06	-0,61	0,56	-3,09	1,81

Fonte: Próprios Autores (2019)

Analisando a Tabela 14, verifica-se que 3 fatores foram estatisticamente significativos ao nível de significância de 5%. É possível identificar que a redução da turbidez teve grande influência da dosagem do coagulante (efeito positivo), pH (efeito negativo) e a interação entre esses dois fatores.

Na Tabela 15 foram apresentados os coeficientes do modelo de regressão estatisticamente significativos ao nível de significância de 5% (p-valor < 0,05). Através desses coeficientes, foi possível obter a Equação 2.

$$\text{Red Turb} = 97,76 + 0,97 X_3^2 - 0,94 X_3 + 1,68 X_1 X_3 \quad \text{Eq.(2)}$$

Tabela 15. Coeficientes de regressão para a resposta redução de turbidez Klaraid

Fator	Coefficiente de regressão	Erro padrão	Limite de confiança < 95%	Limite de confiança > 95%
Média	97,76	0,75	96,03	99,49
(1)[] Coag(L)	0,97	0,41	0,03	1,91
[] Coag(Q)	-0,62	0,42	-1,60	0,36
(2)[] Floc(L)	0,01	0,41	-0,93	0,96
[] Floc(Q)	-0,12	0,43	-1,11	0,87
(3)pH (L)	0,06	0,40	-0,87	0,99
pH (Q)	-0,95	0,40	-1,87	-0,03
1L x 2L	0,04	0,53	-1,19	1,26
1L x 3L	1,68	0,53	0,46	2,91
2L x 3L	-0,32	0,53	-1,55	0,90

Fonte: Próprios Autores (2019)

A Tabela 16 apresenta a ANOVA do modelo de regressão.

Tabela 16. Análise de variância da regressão para a resposta redução de turbidez

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	Fcal
Regressão	51,72	9,00	5,75	2,55
Resíduos	18,06	8,00	2,26	
Total	69,79	17,00		

Fonte: Próprios Autores (2019)

O modelo de regressão dado pela Equação 2, apresentou coeficiente de determinação, R^2 , igual a 74,12 um valor não tão elevado, o que indica que o modelo não se ajusta tão bem aos dados experimentais. A ANOVA da Tabela 16 apresenta $F_{cal} < F_{tab} (GLReg; GLRes; \alpha) = F_{tab}(9;8;0,05) = 3,39$, resultando em $F_{cal}/F_{tab} = 2,54/3,39 = 0,7509$. Isso indica que a regressão dada não é estatisticamente significativa pelo teste F e nem útil para realizar previsões.

5.2.1 Otimização do produto coagulante Novfloc e auxiliar de floculação Polfloc

5.2.1.1 Planejamento Inicial: Fatorial 2^3

A Tabela 17 apresenta os valores reais adotados e os valores codificados das variáveis independentes e resposta redução da turbidez (Red Turb) nos ensaios do planejamento inicial fatorial 2^3 com 4 repetições no ponto central, realizado para o coagulante Novfloc e floculante Polfloc.

De acordo com a Tabela 17, observa-se que a redução de turbidez para o coagulante Novfloc variou entre 24,23 e 97,95%. Os valores obtidos para os pontos

centrais apresentaram uma variação consideravelmente pequena, indicando uma boa repetibilidade do processo de ensaio.

Tabela 17. Valores reais e codificados das variáveis independentes e respostas para redução de turbidez obtidas com o coagulante Novfloc no Planejamento Inicial Fatorial 2³ para Sedimentação

Ensaio	[]coag (mg.L ⁻¹)	[]floc (mg.L ⁻¹)	pH	Red Turb %
1	-1 (100)	-1 (0)	-1 (5)	68,26
2	+1 (700)	-1 (0)	-1 (5)	92,83
3	-1 (100)	+1(20)	-1 (5)	74,06
4	+1 (700)	+1(20)	-1 (5)	88,40
5	-1 (100)	-1 (0)	+1 (8)	24,23
6	+1 (700)	-1 (0)	+1 (8)	95,56
7	-1 (100)	+1(20)	+1 (8)	82,94
8	+1 (700)	+1(20)	+1 (8)	97,95
9	0 (400)	0 (10)	0 (6,5)	97,27
10	0 (400)	0 (10)	0 (6,5)	96,59
11	0 (400)	0 (10)	0 (6,5)	96,25
12	0 (400)	0 (10)	0 (6,5)	95,56

Legenda: []coag – dosagem de coagulante, []floc – dosagem de auxiliar de floculação e Red Turb – Redução da turbidez
Fonte: Próprios Autores (2019)

A partir dos resultados apresentados, foram obtidas as estimativas dos efeitos das variáveis independentes sobre a resposta redução de turbidez, para o coagulante Novfloc.

Tabela 18. Estimativa dos efeitos para redução de turbidez com o coagulante Novfloc 1540

Fator	Efeito	Erro padrão	t(5)	p-valor	Limite de confiança < 90%	Limite de confiança > 90%
Média	84,16	4,41	19,07	0,00	75,27	93,05
(1) []coag	31,31	10,81	2,90	0,03	9,53	53,10
(2)[]Floc	15,61	10,81	1,44	0,21	-6,17	37,40
(3)pH	-5,72	10,81	-0,53	0,62	-27,50	16,07
(1) x (2)	-16,64	10,81	-1,54	0,18	-38,42	5,14
(1) x (3)	11,86	10,81	1,10	0,32	-9,92	33,64
(2) x (3)	14,93	10,81	1,38	0,23	-6,85	36,71

Fonte: Próprios Autores (2019)

Analisando-se os efeitos das variáveis independentes na resposta redução de turbidez apresentados na Tabela 18 para o coagulante Novfloc 1540, verificou-se que apenas a dosagem de coagulante (p-valor = 0,0339) pode ser considerada estatisticamente significativa a 10% de significância. Mostrando que a remoção da turbidez tende a ser favorecida conforme o aumento da dosagem de coagulante.

Através do Gráfico de Pareto (Figura 17) também é possível visualizar a influência dos fatores para a variável resposta redução da turbidez, observando sobre o mesmo um efeito positivo.

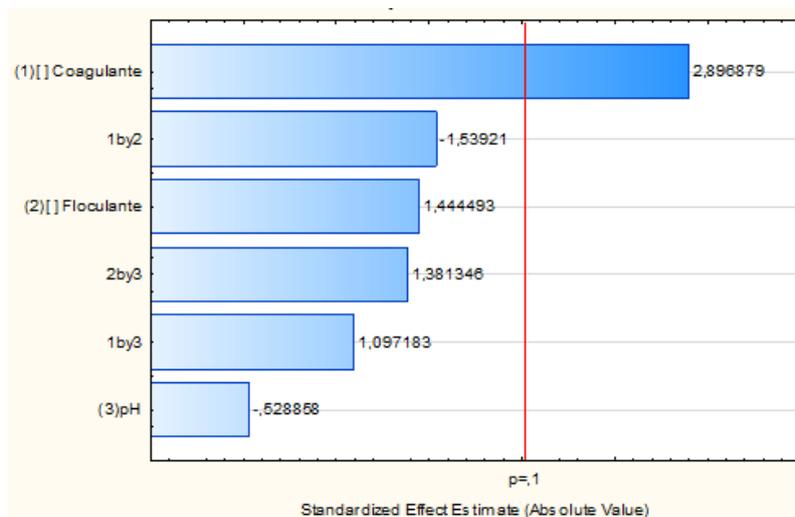


Figura 17. Gráfico de Pareto para a significância dos fatores
Fonte: Próprios Autores (2019)

Após a análise dos resultados do planejamento inicial 2³, optou-se em aumentar o nível inferior e superior da faixa de dosagem de coagulante, diminuir o nível superior da faixa de valores de pH, manter a faixa de dosagem de auxiliar de floculação e as demais condições operacionais fixadas neste planejamento, para o planejamento seguinte.

5.2.2.2 Delineamento Composto Central Rotacional de Sedimentação

Na Tabela 19 estão representadas as estimativas dos efeitos das variáveis independentes sobre a resposta redução da turbidez, considerando que as letras L e Q, estão representando os termos lineares e quadráticos das variáveis do modelo de regressão, assim como os números 1,2 e 3 referencia às variáveis []coag, []floc e pH, respectivamente.

Tabela 19. Valores reais e codificados das variáveis independentes e respostas para redução da turbidez obtidas com coagulante o Novfloc no DCCR 2³ para Sedimentação

Ensaio	D _{coag} (mg. L ⁻¹)	D _{floc} (mg. L ⁻¹)	pH	Red turb (%)
1	-1 (262)	-1 (5)	-1 (6)	98,85
2	+1 (738)	-1 (5)	-1 (6)	98,85
3	-1 (262)	+1 (20)	-1 (6)	95,99
4	+1 (738)	+1 (20)	-1 (6)	97,71
5	-1 (262)	-1 (5)	+1 (7)	84,53
6	+1 (738)	-1 (5)	+1 (7)	97,99
7	-1 (262)	+1 (20)	+1 (7)	89,68
8	+1 (738)	+1 (20)	+1 (7)	97,13
9	-1,68 (100)	0 (12,5)	0 (6,5)	71,35
10	+1,68 (900)	0 (12,5)	0 (6,5)	98,28
11	0 (500)	-1,68 (0)	0 (6,5)	97,42
12	0 (500)	+1,68 (25)	0 (6,5)	97,71
13	0 (500)	0 (12,5)	-1,68 (5,6)	97,42
14	0 (500)	0 (12,5)	+1,68 (7,3)	96,28
15	0 (500)	0 (12,5)	0 (6,5)	97,71
16	0 (500)	0 (12,5)	0 (6,5)	97,71
17	0 (500)	0 (12,5)	0 (6,5)	97,99
18	0 (500)	0 (12,5)	0 (6,5)	97,99

Legenda: []_{coag} – dosagem de coagulante, []_{floc} – dosagem de auxiliar de floculação e Red Turb – Redução da turbidez

Fonte: Próprios Autores (2019)

De acordo com a Tabela 19, é possível observar que o percentual de redução da turbidez variou de 71,35 a 98,85%, os valores obtidos nos quatro pontos centrais apresentaram dispersões pequenas, indicando uma boa repetibilidade do processo.

Assim, como foi observado para o coagulante Klaraid, nos ensaios realizados com o coagulante Novfloc, também foi observado a ocorrência da flotação simultaneamente a sedimentação, interferindo nos resultados, visto que diante deste ocorrido, não é possível atribuir a clarificação do efluente apenas a sedimentação. Sendo assim, foi observado através dos ensaios, a tendência que o efluente em estudo tem em flotar, sendo mais indicado tratamentos de clarificação de efluentes por meio da flotação.

Na Tabela 20 estão representadas as estimativas dos efeitos das variáveis independentes sobre a resposta redução da turbidez, considerando que as letras L e Q, estão representando os termos lineares e quadráticos das variáveis do modelo de regressão, assim como os números 1, 2 e 3 referencia às variáveis []_{coag}, []_{floc} e pH, respectivamente.

Tabela 20. Estimativa dos efeitos para redução de turbidez com o coagulante

Fator	Efeito	Erro padrão	t(8)	p-valor	Limite de confiança < 95%	Limite de confiança > 95%
	97,87	2,04	47,96	0,00	93,17	102,58
9,95	2,22	4,49	0,00	4,84	15,06	15,0620
-8,26	2,31	-3,58	0,01	-13,57	-2,94	-2,9409
0,11	2,22	0,05	0,96	-5,02	5,24	5,2427
0,80	2,34	0,34	0,74	-4,59	6,19	6,1912
-3,46	2,22	-1,56	0,16	-8,58	1,66	1,6574
-0,08	2,25	-0,03	0,97	-5,27	5,11	5,1121
-1,07	2,90	-0,37	0,72	-7,75	5,60	5,6032
4,80	2,90	1,66	0,14	-1,88	11,48	11,4772
2,08	2,90	0,72	0,49	-4,60	8,76	8,7551

Fonte: Próprios Autores (2019)

Analisando a Tabela 20, verifica-se que apenas 2 fatores foram estatisticamente significativos ao nível de significância de 5%. Observa-se que a redução da turbidez teve grande influência da dosagem do coagulante.

Na Tabela 21 foram apresentados os coeficientes do modelo de regressão estatisticamente significativos ao nível de significância de 5% (p-valor < 0,05). Através desses coeficientes, foi possível obter a Equação 3.

$$\text{Red Turb} = 97,87 + 4,97 X_1 - 4,128 X^2 \quad \text{Eq. (3)}$$

Tabela 21. Coeficientes de regressão para a resposta redução de turbidez Novfloc

Fator	Coefficiente de regressão	Erro padrão	Limite de confiança < 95%	Limite de confiança > 95%
Média	97,87	2,04	93,17	102,58
(1)[]Coag(L)	4,97	1,11	2,42	7,53
[]Coag(Q)	-4,13	1,15	-6,79	-1,47
(2)[]Floc(L)	0,06	1,11	-2,51	2,62
[]Floc(Q)	0,40	1,17	-2,29	3,10
(3)pH (L)	-1,73	1,11	-4,29	0,83
pH (Q)	-0,04	1,13	-2,63	2,56
1L x 2L	-0,54	1,45	-3,88	2,80
1L x 3L	2,40	1,45	-0,94	5,74
2L x 3L	1,04	1,45	-2,30	4,38

Fonte: Próprios Autores (2019)

A Tabela 22 apresenta a ANOVA do modelo de regressão.

Tabela 22. Análise de variância da regressão para a resposta redução de turbidez Novfloc

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	Fcal
Regressão	678,79	9,00	75,42	4,50
Resíduos	134,17	8,00	16,77	
Total	812,97	17,00		

Fonte: Próprios Autores (2019)

O modelo de regressão dado pela Equação 3 apresentou $R^2=83,63$, valor não tão elevado, o que indica que o modelo não se ajusta tão bem aos dados experimentais. A ANOVA da Tabela 26 indica que $F_{cal} > F_{tab}(GLReg;GLRes;\alpha) = F_{tab}(9;8;0,05) = 3,39$, sendo estatisticamente significativa pelo teste F. Porém, verifica-se que $F_{cal}/F_{tab} = 4,50/3,39 = 1,32$, ou seja, $F_{cal}/F_{tab} < 4$ mostra que o modelo não é adequado para realizar previsões ou para a construção de superfícies de resposta e de curvas de contorno.

5.2 ENSAIOS DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO E FLOTAÇÃO

5.2.1 Otimização do produto coagulante Klaraid IC1176L e o auxiliar de floculação Polfloc

5.2.1.3 Planejamento Inicial Fracionado 2^{4-1}

Os valores reais adotados e codificados das variáveis independentes dosagem de coagulante Klaraid IC1176L (Dcoag), dosagem de auxiliar de floculação Polfloc D150 (Dfloc), pH e taxa de recirculação (r), e da variável resposta redução da turbidez (Red Turb), realizado através de um delineamento fatorial fracionado 2^{4-1} com 4 repetições no ponto central, estão representados na Tabela 23.

Tabela 23. Valores adotados e codificados das variáveis independentes e respostas para redução da turbidez obtidas com o coagulante Klaraid IC1176L no DFF 2^{4-1}

Ensaio	Dcoag	Dfloc	pH	r	Red Turb
--------	-------	-------	----	---	----------

	(mg.L ⁻¹)	(mg.L ⁻¹)		%	%
1	-1 (100)	-1 (0)	-1 (5)	-1 (10)	44,6
2	+ 1 (1000)	-1 (0)	-1 (5)	+1 (30)	88,4
3	-1 (100)	+1 (20)	-1 (5)	+1 (30)	60,7
4	+ 1 (1000)	+1 (20)	-1 (5)	-1 (10)	85,4
5	-1 (100)	-1 (0)	+1 (8)	+1 (30)	7,1
6	+ 1 (1000)	-1 (0)	+1 (8)	-1 (10)	90,9
7	-1 (100)	+1 (20)	+1 (8)	-1 (10)	51,7
8	+ 1 (1000)	+1 (20)	+1 (8)	+1 (30)	85,2
9	0 (550)	0 (10)	0 (6,5)	0 (20)	90,1
10	0 (550)	0 (10)	0 (6,5)	0 (20)	90,8
11	0 (550)	0 (10)	0 (6,5)	0 (20)	91,8
12	0 (550)	0 (10)	0 (6,5)	0 (20)	91,2

Legenda: Dcoag–dosagem de coagulante, Dfloc–dosagem de auxiliar de floculação, r –taxa de recirculação e Red Turb –redução de turbidez

Fonte: Lucas (2019)

Analisando a Tabela 23, é possível verificar que a redução da turbidez variou entre 7,1 e 91,8%, e os valores referentes aos quatro pontos centrais para a variável resposta, indicaram uma boa repetitividade dos ensaios.

A partir dos resultados apresentados, foram obtidas as estimativas dos efeitos das variáveis independentes sobre a variável resposta, os quis foram representados na Tabela 24.

Tabela 24. Estimativas dos efeitos das variáveis independentes sobre a variável resposta

Fator	Efeito	Erro padrão	t(7)	p-valor	Limite de confiança Inferior (-90%)	Limite de confiança superior (+90%)
Média	73,16	5,86	12,47	0,00	62,05	84,27
(1) []coag	46,45	14,37	3,23	0,01	19,23	73,67
(2) []floc	13,00	14,37	0,91	0,40	-14,22	40,22
(3) pH	-11,05	14,37	-0,77	0,47	-38,27	16,17
(4) r	-7,80	14,37	-0,54	0,60	-35,02	19,42

Legenda: Dcoag–dosagem de coagulante, Dfloc–dosagem de auxiliar de floculação e r – taxa de recirculação

Fonte: Lucas (2019)

Observa-se que para um p-valor < 0,10, apenas a dosagem de coagulante (p-valor = 0,0144) pode ser considerada estatisticamente significativa e que ao aumentar a dosagem de coagulante, eleva-se o percentual de redução da turbidez (efeito positivo).

Durante os ensaios que obtinham as maiores dosagens de coagulante, que estavam associadas ao nível inferior da taxa de recirculação, ocorreu o fenômeno de sedimentação, o que interferiu nos resultados. Acredita-se que a ocorrência da sedimentação tenha sido a causa para que a taxa de recirculação não tenha

apresentado significância estatística, visto que esta variável tem grande influência no FAD.

Diante desse contexto, definiu-se fixar a taxa de recirculação em 30%, pois este foi o nível superior adotado no delineamento inicial, com o objetivo de entregar maior quantidade de ar aos ensaios, evitando a ocorrência de sedimentação. Optou-se também em reduzir o nível superior da faixa de dosagem de coagulante e da faixa de valores de pH, manter a faixa de dosagem do auxiliar de floculação e as demais condições operacionais fixadas utilizadas neste planejamento para o subsequente.

5.2.2 Delineamento Composto Central Rotacional FAD

Os valores reais adotados e codificados das variáveis independentes dosagem de coagulante Klaraid IC1176L(Dcoag), dosagem de auxiliar de floculação Polfloc D150 (Dfloc), pH e da variável resposta redução de turbidez (Red Turb), no delineamento composto central rotacional (DCCR) 2³ com 4 repetições no ponto central, estão representados na Tabela 25.

Tabela 25. Valores adotados e codificados das variáveis independentes e resultados obtidos para a variável resposta com coagulante Klaraid IC1176L no DCCR 2³

Ensaio	Dcoag (mg. L ⁻¹)	Dfloc (mg. L ⁻¹)	pH	Red Turb %
1	-1 (231,5)	-1 (4)	-1 (5,4)	79,60
2	+1 (618,5)	-1 (4)	-1 (5,4)	87,20
3	1 (231,5)	+1 (16)	-1 (5,4)	81,60
4	+1 (618,5)	+1 (16)	-1 (5,4)	87,90
5	-1 (231,5)	-1 (4)	+1 (6,6)	56,70
6	+1 (618,5)	-1 (4)	+1 (6,6)	84,00
7	-1 (231,5)	+1 (16)	+1 (6,6)	58,00
8	+1 (618,5)	+1 (16)	+1 (6,6)	85,60
9	-1,68 (100)	0 (10)	0 (6)	47,60
10	+1,68 (750)	0 (10)	0 (6)	96,10
11	0 (425)	-1,68 (0)	0 (6)	86,90
12	0 (425)	+1,68 (20)	0 (6)	88,80
13	0 (425)	0 (10)	-1,68 (5)	88,00
14	0 (425)	0 (10)	+1,68 (7)	60,70
15	0 (425)	0 (10)	0 (6)	92,50
16	0 (425)	0 (10)	0 (6)	93,10
17	0 (425)	0 (10)	0 (6)	92,90
18	0 (425)	0 (10)	0 (6)	93,50

Legenda: Dcoag – dosagem de coagulante, Dfloc – dosagem de auxiliar de floculação e Red turb - % de redução da turbidez.

Fonte: Lucas (2019)

Analisando a Tabela 25, é possível verificar que a redução da turbidez variou entre 47,6 e 96,1% e que os 4 pontos centrais obtiveram dispersões relativamente

pequenas, portanto, indicando uma boa repetibilidade do processo. As estimativas dos efeitos das variáveis independentes sobre a variável resposta estão representadas na Tabela 26. Foram utilizadas as letras L e Q para se referir aos termos lineares e quadráticos das variáveis do modelo de regressão, assim como os números 1, 2 e 3 para fazer referência às variáveis Dcoag, Dfloc e pH, respectivamente.

Tabela 26. Estimativa dos efeitos para a resposta redução de turbidez

Fator	Efeito	Erro padrão	t(3)	p-valor	Limite de confiança < 95%	Limite de confiança > 95%
Média	92,96	0,19	489,96	0,00	92,35	93,56
(1)Dcoag(L)	22,03	0,21	107,01	0,00	21,38	22,69
Dcoag(Q)	-14,71	0,21	-68,76	0,00	-15,39	-14,03
(2)Dfloc(L)	1,29	0,21	6,24	0,01	0,63	1,95
Dfloc(Q)	-3,42	0,22	-15,77	0,00	-4,11	-2,73
(3)pH(L)	-14,38	0,21	-69,63	0,00	-15,04	-13,73
pH(Q)	-13,15	0,22	-60,69	0,00	-13,84	-12,46
1Lx2L	-0,25	0,27	-0,94	0,42	-1,11	0,60
1Lx3L	10,27	0,27	38,18	0,00	9,41	11,12
2Lx3L	0,06	0,27	0,22	0,84	-0,80	0,92

Fonte: Lucas (2019)

Observa-se que apenas 7 fatores foram estatisticamente significativos ao nível de significância de 5% e que a redução da turbidez com o coagulante Klaraid IC1176L teve grande influência da dosagem do coagulante. Outro fator significativo foi o pH (efeito negativo), assim como a interação entre dosagem de coagulante e pH. É possível verificar que a dosagem do auxiliar de floculação também apresentou efeito significativo.

Na Tabela 27 são apresentados os coeficientes do modelo de regressão estatisticamente significativos ao nível de significância de 5% (p -valor < 0,05). A partir desses coeficientes, tem-se a Equação 4, o qual é o modelo reparametrizado que descreve a redução de turbidez em função das variáveis codificadas.

Tabela 27. Coeficientes de regressão para a resposta redução de turbidez

Fator	Coeficiente de regressão	Erro padrão	Limite de confiança < 95%	Limite de confiança > 95%
-------	--------------------------	-------------	---------------------------	---------------------------

Média	92,96	0,19	92,35	93,56
(1)Dcoag(L)	11,02	0,10	10,69	11,34
Dcoag(Q)	-7,35	0,11	-7,70	-7,01
(2)Dfloc(L)	0,64	0,10	0,32	0,97
Dfloc(Q)	-1,71	0,11	-2,05	-1,36
(3)pH(L)	-7,19	0,10	-7,52	-6,86
pH(Q)	-6,57	0,11	-6,92	-6,23
1Lx3L	5,13	0,13	4,71	5,56

Fonte: Lucas (2019)

$$\text{Red Turb} = 92,95 + 11,02 X_1 - 7,35 X_1^2 + 0,64 X_2 - 1,71 X_2^2 - 7,19 X_3 - 6,57 X_3^2 + 5,13 X_1 X_3 \quad \text{Eq. (4)}$$

A Equação 4 apresentou um coeficiente de determinação $R^2 = 96,68$, indicando que o modelo se ajusta bem aos dados experimentais.

Tabela 28. Análise de variância da regressão para a resposta redução de turbidez

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	Fcal
Regressão	3591,34	7,00	513,05	41,61
Resíduos	123,29	10,00	12,33	
Total	3714,63	17,00		

Fonte: Lucas (2019)

A ANOVA da Tabela 28 indica $F_{cal} > F_{tab} (GL_{Reg}; GL_{Res}; \alpha) = F_{tab} (7; 10; 0,05) = 3,14$, resultando em $F_{cal}/F_{tab} = 41,6135/3,14 = 13,25$, sendo assim, verifica-se que a regressão dada é estatisticamente significativa pelo teste F e útil para realizar previsões.

As superfícies de respostas, assim como as curvas de contorno para a redução da turbidez, em função das variáveis independentes foram realizadas pelo software Statistic 10.0 e estão representadas na Figura 17.

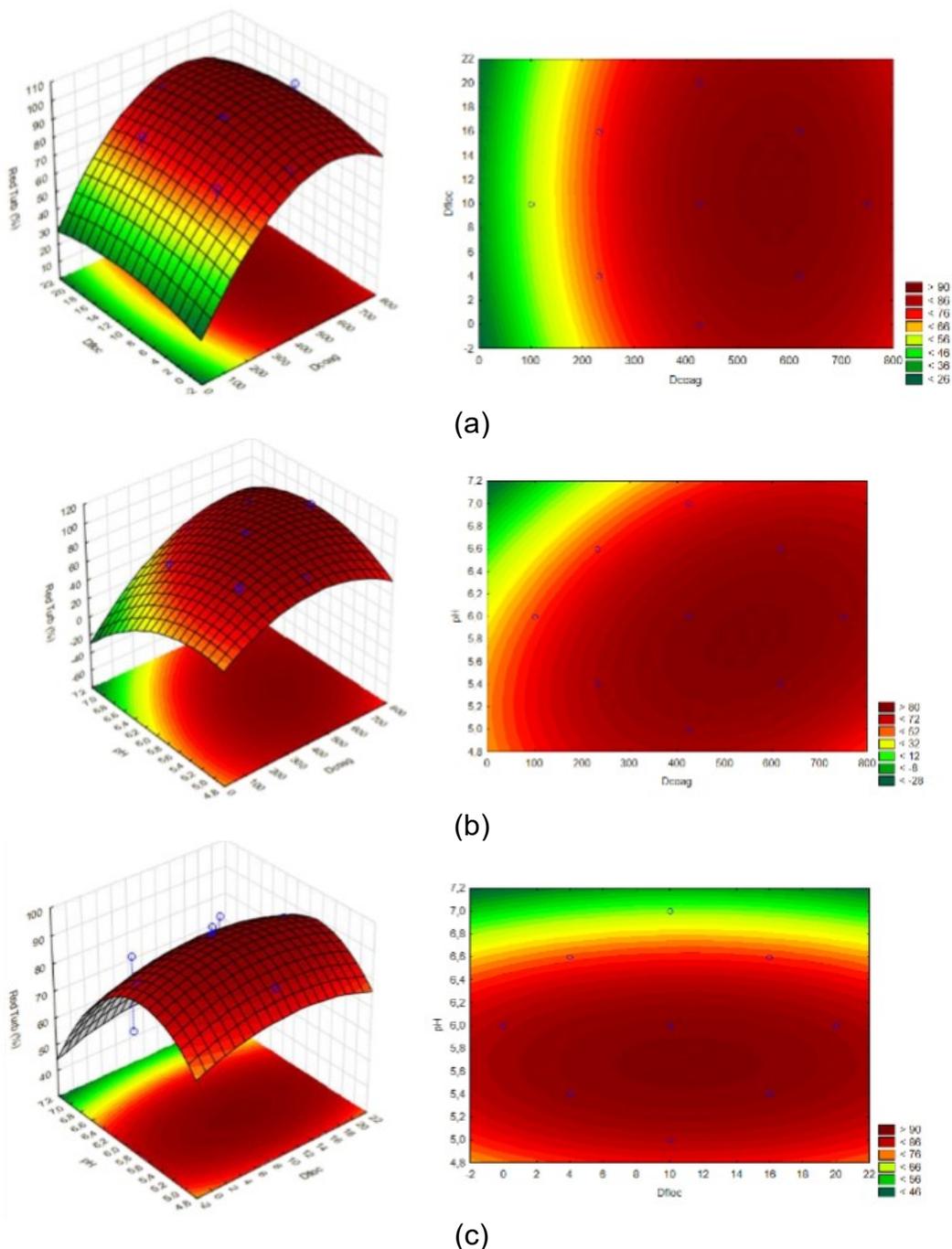


Figura 18. Superfícies de resposta e curvas de contorno para redução de turbidez em função de (a) dosagem de coagulante e dosagem de auxiliar de floculação, (b) pH e dosagem de coagulante e (c) pH e dosagem de auxiliar de floculação para o coagulante Klaraid IC11
Fonte: Lucas (2019)

Observando as superfícies de resposta e as curvas de contorno geradas pelo modelo (Equação 4), verifica-se que para a dosagem de coagulante, a faixa ótima está entre 500 e 600 mg. L⁻¹, para dosagem de auxiliar entre 10 e 14 mg. L⁻¹, e para pH em torno de 5,8.

O software Statistic indicou que dentro das faixas de estudos, o ponto ótimo, o qual ocorre o maior percentual de remoção da turbidez, seria de 97,6% para os valores das variáveis independentes: Dcoag= 549,74 mg L⁻¹, Dfloc= 10,97 mg L⁻¹ e pH = 5,8.

5.2.3 Otimização do produto coagulante Novfloc 1540 e o auxiliar de floculação Polfloc

5.2.3.1 Planejamento Inicial Fracionado 2⁴⁻¹

Os valores reais adotados e codificados das variáveis independentes dosagem de coagulante Novfloc 1540 (Dcoag), dosagem de auxiliar de floculação Polfloc D150 (Dfloc), pH e taxa de recirculação (r) e a resposta redução de turbidez (Red Turb) no delineamento fatorial fracionado 2⁴⁻¹ com 4 repetições no ponto central, estão representados na Tabela 29.

Tabela 29. Valores adotados e codificados das variáveis independentes e respostas para redução de turbidez obtidas com coagulante Novfloc 1540 no DFF2⁴⁻¹

Ensaio	Dcoag (mg.L ⁻¹)	Dfloc (mg.L ⁻¹)	pH	r %	Red Turb %
1	-1 (100)	-1 (0)	-1 (5)	-1 (10)	59,3
2	+ 1 (700)	-1 (0)	-1 (5)	+1 (30)	72,9
3	-1 (100)	+1 (20)	-1 (5)	+1 (30)	72,1
4	+ 1 (700)	+1 (20)	-1 (5)	-1 (10)	70,6
5	-1 (100)	-1 (0)	+1 (8)	+1 (30)	13,4
6	+ 1 (700)	-1 (0)	+1 (8)	-1 (10)	92,8
7	-1 (100)	+1 (20)	+1 (8)	-1 (10)	63,6
8	+ 1 (700)	+1 (20)	+1 (8)	+1 (30)	93,5
9	0 (400)	0 (10)	0 (6,5)	0 (20)	71,6
10	0 (400)	0 (10)	0 (6,5)	0 (20)	71,0
11	0 (400)	0 (10)	0 (6,5)	0 (20)	69,5
12	0 (400)	0 (10)	0 (6,5)	0 (20)	71,0

Legenda: Dcoag – dosagem de coagulante, Dfloc – dosagem de auxiliar de floculação, r – taxa de recirculação e Red turb - % de redução da turbidez

Fonte: Lucas (2019)

Analisando a Tabela 29, observa-se que a redução de turbidez variou entre 13,4 e 93,5% e que os valores obtidos nos quatro pontos centrais para a resposta apresentaram uma variação pequena, indicando uma boa repetibilidade do processo. A partir dos resultados apresentados, foram obtidas as estimativas dos efeitos das variáveis independentes sobre a resposta redução de turbidez, as quais estão apresentadas na Tabela 30.

Analisando-se os efeitos das variáveis independentes, apresentados na Tabela 30, verificou-se que apenas a dosagem de coagulante (p -valor = 0,0366) pode ser considerada estatisticamente significativa a 10% de significância, sendo possível observar que um aumento na dosagem de coagulante leva um aumento no percentual de redução da turbidez (efeito positivo).

Tabela 30. Estimativa dos efeitos para redução de turbidez com o coagulante Novfloc 1540

Fator	Efeito	Erro padrão	t(7)	p-valor	Limite de confiança < 90%	Limite de confiança > 90%
Média	68,44	4,81	14,24	0,00	59,33	77,55
(1) D_{coag}	30,35	11,78	2,58	0,04	8,04	52,66
(2) D_{floc}	15,35	11,78	1,30	0,23	-6,96	37,66
(3) pH	-2,90	11,78	-0,25	0,81	-25,21	19,41
(4) r	-8,60	11,78	-0,73	0,49	-30,91	13,71

Fonte: Lucas (2019)

Nos ensaios com o coagulante Novfloc 1540, também foi observado que os ensaios que possuíam as maiores dosagens de coagulante, que estavam associadas ao nível inferior da taxa de recirculação, ocorreu o fenômeno de sedimentação, interferindo nos resultados. Visto que ocorreu o fenômeno de sedimentação em alguns dos ensaios, acredita-se que este possa ter sido a causa para que a variável taxa de recirculação não tenha apresentado significância estatística dos efeitos, variável esta que tem grande influência nos efeitos e na eficiência da clarificação dos efluentes por FAD (mostrou-se com efeito negativo).

De acordo, com as constatações, para o próximo planejamento, definiu-se em deixar fixa a variável taxa de recirculação em 30 % (nível superior adotado no planejamento inicial), com objetivo de garantir maior quantidade de ar, assim, diminuindo as chances de sedimentação. Reduzir o nível superior da faixa dosagem de coagulante e da faixa de pH, e manter fixas a faixa de dosagem de auxiliar de floculação e as demais condições operacionais utilizadas neste planejamento, fixadas no planejamento subsequente.

5.2.3.2 Delineamento Composto Central Rotacional FAD

Na Tabela 31, estão apresentas os valores reais adotados e codificados das variáveis independentes dosagem de coagulante Novfloc 1540 (D_{coag}), dosagem de auxiliar de floculação Polfloc D150 (D_{floc}), pH e da variável resposta redução da

turbidez para no delineamento composto central rotacional (DCCR) 2³ com 4 repetições no ponto central.

Tabela 31. Valores adotados e codificados das variáveis independentes e resultados obtidos para as variáveis respostas com coagulante Novfloc 1540 no DCCR 2³

Ensaio	Dcoag (mg. L ⁻¹)	Dfloc (mg. L ⁻¹)	pH	Red Turb %
1	-1 (201,2)	-1 (4)	-1 (5,4)	82,1
2	+1 (498,8)	-1 (4)	-1 (5,4)	76,2
3	-1 (201,2)	+1 (16)	-1 (5,4)	76,8
4	+1 (498,8)	+1 (16)	-1 (5,4)	46,6
5	-1 (201,2)	-1 (4)	+1 (6,6)	56,6
6	+1 (498,8)	-1 (4)	+1 (6,6)	87,9
7	-1 (201,2)	+1 (16)	+1 (6,6)	60,6
8	+1 (498,8)	+1 (16)	+1 (6,6)	92,1
9	-1,68 (100)	0 (10)	0 (6)	80,0
10	+1,68 (600)	0 (10)	0 (6)	95,9
11	0 (350)	-1,68 (0)	0 (6)	84,2
12	0 (350)	+1,68 (20)	0 (6)	91,5
13	0 (350)	0 (10)	-1,68 (5)	82,4
14	0 (350)	0 (10)	+1,68 (7)	76,0
15	0 (350)	0 (10)	0 (6)	94,3
16	0 (350)	0 (10)	0 (6)	94,1
17	0 (350)	0 (10)	0 (6)	93,7
18	0 (350)	0 (10)	0 (6)	94,0

Legenda: Dcoag – dosagem de coagulante, Dfloc – dosagem de auxiliar de floculação e Red turb - % de redução da turbidez.

Fonte: Lucas (2019)

Analisando a Tabela 31, é possível verificar que a redução da turbidez variou entre 46,6 e 95,9%, e os valores dos quatro pontos centrais, indicaram pequenas dispersões, indicando uma boa repetibilidade do processo.

Estão apresentadas na Tabela 32 as estimativas dos efeitos das variáveis independentes sobre a resposta redução de turbidez, sendo que as letras L e Q estão associadas aos termos lineares e quadráticos das variáveis do modelo de regressão, assim como os números 1, 2 e 3 fazem referência às variáveis D_{coag}, D_{floc} e pH, respectivamente.

Tabela 32. Estimativa dos efeitos para a resposta redução de turbidez

Fator	Efeito	Erro padrão	t(3)	p-valor	Limite de confiança inferior (-95%)	Limite de confiança superior (+95%)
Média	94,7206	0,1293	732,7666	0,0000	94,3092	95,1319
(1)D _{coag} (L)	7,8372	0,1403	55,8698	0,0000	7,3908	8,2836
D _{coag} (Q)	-9,4968	0,1457	-65,1864	0,0000	-9,9605	-9,0332
(2)D _{floc} (L)	-2,1516	0,1407	-15,2878	0,0006	-2,5995	-1,7037
D _{floc} (Q)	-9,801	0,1476	-66,3896	0,0000	-10,2709	-9,3312
(3)pH(L)	0,7214	0,1407	5,1257	0,0144	0,2735	1,1693
pH(Q)	-16,0597	0,1476	-108,784	0,0000	-16,5295	-15,5899
1Lx 2L	-6,0387	0,1832	-32,9614	0,0001	-6,6217	-5,4556
1Lx 3L	24,7195	0,1832	134,9287	0,0000	24,1364	25,3025
2Lx 3L	10,7547	0,1832	58,7036	0,0000	10,1717	11,3378

Fonte: Lucas (2019)

Através da Tabela 32, é possível identificar que, todos os fatores foram estatisticamente significativos ao nível de significância de 5%. O percentual de redução da turbidez com o uso do coagulante Novfloc 1540 representou grande influência da interação entre dosagem de coagulante e pH, seguida por todos os demais fatores.

Na Tabela 33 são apresentados os coeficientes do modelo de regressão estatisticamente significativos ao nível de significância de 5% (p-valor < 0,05).

Tabela 33. Coeficientes de regressão para a resposta redução de turbidez

Fator	Coeficiente de regressão	Erro padrão	Limite de confiança < 95%	Limite de confiança > 95%
Média	94,72	0,13	94,31	95,13
(1)D _{coag} (L)	3,92	0,07	3,70	4,14
D _{coag} (Q)	-4,75	0,07	-4,98	-4,52
(2)D _{floc} (L)	-1,08	0,07	-1,30	-0,85
D _{floc} (Q)	-4,90	0,07	-5,14	-4,67
(3)pH(L)	0,36	0,07	0,14	0,58
pH(Q)	-8,03	0,07	-8,26	-7,79
1Lx 2L	-3,02	0,09	-3,31	-2,73
1Lx 3L	12,36	0,09	12,07	12,65
2Lx 3L	5,38	0,09	5,09	5,67

Fonte: Lucas (2019)

A Equação 5 é o modelo que descreve a redução de turbidez em função das variáveis codificadas.

$$\text{Red Turb} = 94,72 + 3,92 X_1 - 4,75 X_1^2 - 1,08 X_2 - 4,90 X_2^2 + 0,36 X_3 - 8,02 X_3^2 - 3,02 X_1 X_2 + 12,35 X_1 X_3 + 5,38 X_2 X_3 \quad \text{Eq (5)}$$

Na Tabela 34 está apresentada a análise de variância (ANOVA) do modelo de regressão.

Tabela 34. Análise de variância da regressão para a resposta redução de turbidez

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	Fcal
Regressão	2776,68	9,00	308,52	3,62
Resíduos	681,09	8,00	85,14	
Total	3457,77	17,00		

Fonte: Lucas (2019)

A Equação 5 apresentou coeficiente de determinação, R^2 igual a 80,30, verificando um valor não tão alto como o esperado, indicando que o modelo não se ajusta tão bem aos dados experimentais.

Através da ANOVA da Tabela 34, é possível verificar que o $F_{cal} > F_{tab}(GL_{Reg}; GL_{Res}; \alpha) = F_{tab}(9; 8; 0,05) = 3,39$, obtendo $F_{cal}/F_{tab} = 3,6238/3,39 = 1,07$. O $F_{cal} > F_{tab}$, indicou que a regressão dada é estatisticamente significativa pelo teste F, porém devido ao valor de $F_{cal}/F_{tab} < 4$, indica-se que o modelo não é adequado para realizar previsões, tampouco para a construção de superfícies de resposta e de curvas de contorno.

5.3 ANÁLISE GERAL DOS TRATAMENTOS

Foram realizadas comparações entre os tratamentos dos DCCR's que foram utilizados para a sedimentação e para o FAD, sendo avaliado a eficiência e os fatores que influenciaram os experimentos. A média de cada um dos tratamentos e os valores da redução do percentual da turbidez foi representada na Tabela 35.

Tabela 35. Análise Comparativa das Médias

	Tratamento	Média	Desvio Padrão	Valor Mínimo	Valor Máximo
Sedimentação	Novfloc + Polfloc	95,03	9,75	71,35	98,85
	Klaraid + Polfloc	96,47	9,82	93,12	98,85
FAD	Novfloc + Polfloc	81,39	9,02	46,60	95,90
	Klaraid + Polfloc	81,15	9,01	47,60	96,10

Fonte: Próprios autores (2019).

No primeiro tratamento apenas os fatores dosagem de coagulante (termo linear e quadrático) se mostraram significativos ao nível de significância de 5%,

apresentando uma eficiência média de 95,05%. Apesar de se esperar grande influência do fator pH, este não se demonstrou significativo, acredita-se que isso tenha ocorrido, devido ao fato do Novfloc ser um produto orgânico, a base de tanino, com uma faixa ampla na escala de pH e possuir cargas iônicas mais baixas.

No segundo tratamento o fator dosagem do coagulante (termo linear) apresentou grande influência na redução da turbidez, seguido pelo fator pH (termo quadrático) e a interação entre esses dois fatores (termo linear), como era esperado, visto que o Klaraid depende de uma faixa específica de atuação do pH para desempenhar o processo de coagulação e desestabilização, apresentando uma eficiência média de 96,47%. No terceiro tratamento todos os fatores foram estatisticamente significativos ao nível de significância de 5%, representando grande influência no percentual de redução da turbidez a interação entre dosagem de coagulante e pH, seguida pelos demais fatores, com uma eficiência média de 81,39%.

No quarto tratamento sete fatores se demonstraram significativos. Os fatores que representaram grande influência no percentual de redução da turbidez foram, o fator dosagem de coagulante, seguido do pH, e a interação entre esses dois fatores, apresentando uma eficiência média de 81,15%.

Todos os tratamentos apresentaram um bom desempenho, porém os tratamentos que se tentou aplicar a sedimentação demonstraram uma eficiência muito alta, o que é bom, pois apesar de não poder atribuir a clarificação do efluente apenas ao fenômeno da sedimentação, a técnica de flotação por ar dissolvido é mais complexa, ou seja, com uma técnica mais simples, foi possível alcançar um desempenho maior em termos de eficiência de redução da turbidez.

A grande dificuldade deste estudo foi em relação a se trabalhar com efluente de matriz real, onde que por mais que tenha sido estabelecidos critérios para se tentar obter um efluente com característica mais homogênea possível, esta homogeneidade obtida nem sempre é o suficiente, influenciando nos resultados.

6 CONCLUSÕES

Através dos resultados obtidos neste estudo, pode-se verificar que os produtos coagulantes utilizados, dentro da faixa de estudo definida, juntamente com as condições apresentadas pelo efluente no período do estudo, demonstraram ser mais eficientes para a formação de flocos com características apropriadas para o processo de flotação.

O estudo foi executado para verificar a eficácia entre o tratamento de sedimentação e flotação por ar dissolvido, sendo assim, observou-se que o tratamento utilizando apenas a técnica de sedimentação, que na maioria dos ensaios, ocorreu simultaneamente ao fenômeno de flotação, em termos de redução do percentual da turbidez, apresentou uma média de eficiência relativamente maior do que ao do sistema FAD.

Em relação aos coagulantes, observou-se que o percentual de redução da turbidez foi similarmente eficiente tanto para o Klaraid quanto para o Novfloc nos dois tipos tratamentos utilizados, assim, viabilizando a utilização do coagulante Novfloc que possui base orgânica e conseqüentemente gerará um lodo com características biodegradáveis, sendo mais viável ambientalmente.

Para o DCCR da flotação utilizando o coagulante Klaraid e o auxiliar de floculação Polfloc, foi possível alcançar uma faixa ótima da aplicação dos coagulantes, para os demais, foi possível visualizar apenas tendências.

Para estudos futuros, recomenda-se testar outros auxiliares de floculação, tais como polímeros aniônicos, em conjunto com os coagulantes utilizados, visando observar se ocorreria a formação de flocos apropriados para a clarificação de efluentes através da sedimentação. Indica-se que nos próximos estudos sejam avaliadas mais variáveis dependentes, como DQO, DBO e ou sólidos totais, para garantir e verificar com maior precisão os resultados em relação à eficiência do tratamento proposto.

7 REFERÊNCIAS

ABNT. Associação brasileira de normas técnicas. NBR 9897/1987 – **Planejamento de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores - Procedimento**. Rio de Janeiro – RJ. 1987. Disponível em: <http://www.abnt.org.br/pesquisas/?searchword=NBR+9897%2F87&y=6>. Acesso em: 7 de jun.2019.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14001 – **Sistema de gestão ambiental: requisitos com orientações para uso**. ed 2. Rio de Janeiro, 2004.

ALVES, P. S.; DOS SANTOS, E. R.; SANTANA, A. L.; CARVALHO, L. O. **Avaliação da eficiência do uso de cascas de batata, de mandioca e de maracujá como coagulantes no tratamento de esgoto da ETE Recanto das emas – DF**. V Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. Belo horizonte – MG. 2014.

APHA, AWWA e WEF. (2012). **Métodos padrão para o exame de água e efluentes**. 22ª edição. Washington DC: Associação Americana de Saúde Pública.

AMAGLOH, F. K.; BENANG, A. **Effectiveness of Moringa oleifera seed as coagulant for water purification**. African Journal of Agricultural Research, Vol. 4. 2009.

Akshaya Kumar Verma, R. R. (2012). **A review on chemical coagulation/flocculation Technologies for removal of colour from textile wastewaters**. Journal of Environmental Management, 93, 154-168.

BAUMGARTNER, D.; SEGANFREDO, D. **Caracterização dos resíduos líquidos gerados em um laboratório de uma cooperativa e proposta de um novo sistema**. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira. 2005.

Borchate S.S, K. G. (2014). **A Review on Applications of Coagulation-Flocculation and Ballast Flocculation for Water and Wastewater**. International Journal of Innovations in Engineering and Technology (IJJET).

BRAGA, et al. **Introdução à Engenharia Ambiental**. São Paulo, Prentice Hall, 2002. Cammarota, M. C. **Curso de tratamento biológico de efluentes, Escola de química/ UFRJ**, 2003.

CAVALCANTI, J. E. W. de A. **Manual de tratamento de efluentes industriais**. 2. ed. São Paulo: Engenho, 2012

CAMPOS, J. R.; REALI, M.A.P.; DOMBROSKI, S.A.G.; MARCHETTO, M. & LIMA, M.R.A. (1996). **Tratamento Físico-químico por Flotação de Efluentes de Reatores Anaeróbios**. XXV Congresso Interamericano Ingeniería Sanitaria y Ambiental, México.

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

CENTURIONE FILHO, P. L. **Desenvolvimento e operação de uma instalação de flotação de bancada para águas de abastecimento**. 2002. 313 p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

CENTURIONE FILHO, P. L.; BERNARDO, L. **Procedimento para execução de ensaios de flotação/filtração em equipamento de bancada**. Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, v. 8, n. 1, p. 39-44, jan./mar. 2003. Disponível em: <http://www.abes-dn.org.br/publicacoes/engenharia/resaonline/v8n12/v8n12n04.pdf>. Acesso em: 8 Maio. 2018.

COUTO, H. J. B.; FRANÇA, S. C. A.; SANTOS, J. da S. **Dissolved air flotation (DAF) as an alternative treatment for coal wastewater**. In: SEMINARIO INTERNACIONAL DE PROCESAMIENTO DE MINERALES, 8., 2011, Santiago. Anais [...] Santiago: [s. n.], 2011.p.427-433. Disponível em: <http://www.cetem.gov.br/images/congressos/2011/CAC00470011.pdf>. Acesso em: 11 fev. 2019.

CRITTENDEN, J. C.; TRUSSELL, R.R.; HAND, D. W.; HOWE, K. J.; TCHOBANOGLOUS, G. **Water Treatment: Principles and Design, MWH**. 2 ed., 2005.

DI BERNARDO, L. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água**. Vol I. Rio de Janeiro, ABES. 1993.

DI BERNARDO, L.; DI BERNARDO, A.; CENTURIONE FILHO, P. L. **Ensaio de Tratabilidade de Água e dos Resíduos Gerados em Estações de Tratamento de Água**. São Paulo: Rima, 2002.

DI BERNARDO, LUIZ; DANTAS, ANGELA D. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água**. 2. ed. São Carlos: RiMa, 2005.

DESOUSA, S.R.; OLIVEIRA, K.F.; SOUZA, C.S.; KILIKIAN, B.V.; LALUCE, C. **Yeast flotation viewed as the result of the interplay of supernatant composition and cell-wall hydrophobicity**. *Colloid and Surfaces B: Biointerfaces*, v. 29, p. 309-319, 2003.

ECKENFELDER Jr, W. W. **Industrial Water Pollution Control**. 2ª ed., McGraw-Hill Inc., 1989.

FERREIRA, R. P. **Uso de coagulantes naturais como pré-tratamento de efluente de laticínio**. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2012.

GE WATER & PROCESS TECHNOLOGIES DO BRASIL. **Klaraid IC1176L: ficha de informações de segurança de produtos químicos**. Versão 1.2. Sorocaba, 2016.

JÖHR, H. **O verde é negócio**, ed: Saraiva, São Paulo, 1994.

KIURU, H. J. **Development of dissolved air flotation technology from the first generation to the newest (third) one (DAF in turbulent flow conditions)**. *Water Science and Technology*, Great Britain, v. 43, n. 8, p. 1-7, 2001.

LIBÂNIO, MARCELO. **Fundamentos de Qualidade e Tratamento de Água**. 3. ed. Campinas: Editora Átomo, 2010.

LIED, E. B. **Tratamento de efluente industrial de fecularia utilizando macrófita aquática *Eichhornia crassipes* e coagulante natural**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química, área de concentração em Monitoramento e Controle Ambiental) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Toledo – PR. 2012.

LIMA, G. J. A. **Uso de polímero natural do quiabo como auxiliar de floculação e filtração em tratamento de água e esgoto**. 154 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ, 2007.

LO MONACO, P. A. V. MATOS, A. T. RIBEIRO, I. C. A. NASCIMENTO, F. S. SARMENTO, A. P. **Utilização de extrato de sementes de moringa como agente coagulante no tratamento de água para abastecimento e águas residuária**. *Ambi-Agua*. Taubaté – SP. 2010.

LORA, Electro Silva. **Prevenção e controle da poluição nos setores energético, industrial e transporte**. Brasília, DF: ANEEL, 2001.

CENTURIONE FILHO, P. L.; BERNARDO, L. **Procedimento para execução de ensaios de flotação/filtração em equipamento de bancada**. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v. 8, n. 1, p. 39-44, jan./mar. 2003. Disponível em: <http://www.abes-dn.org.br/publicacoes/engenharia/resaonline/v8n12/v8n12n04.pdf>. Acesso em: 8 Maio. 2018.

LUCAS, JULIANA F. R. **Flotação por ar dissolvido no pós-tratamento de efluente de indústria de produtos lácteos visando ao reuso**. 2019. 219 páginas. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Disponível em: <http://tede.unioeste.br/handle/tede/4276#preview-link0>. Acesso em: 10 Maio. 2019.

LLEONI, L. R. F.; CAMARGO, O. A. **Modelos de dupla camada difusa de Gouy-Chapman e Stern aplicados a latossolos ácricos paulistas**. *Sci. Agr. Piracicaba* – SP. Maio/ago, 1994.

METCALF, L.; EDDY, H. **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse**. 4 ed. New York: McGraw-Hill. USA. 2003.

METCALF & EDDY. AECOM. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.

NOGUEIRA, F. C. B. NETO, F. R. C. ZAMPERO, R. SABINO, P. H. **Sementes de Moringa Oleifera e extrato de quiabo no tratamento de efluentes urbanos e industriais**. II Encontro Nacional de Moringa. Aracaju – SE. 2010.

NOVTEC. Novfloc 1540: **ficha de informação de segurança de produto químico**. Biguaçu, [entre 2003 e 2014].

NOVTEC. Polfloc D150: **ficha de informação de segurança de produto químico**. Biguaçu, [entre 2003 e 2014]

NUNES, J. A. **Tratamento físico-químico de águas residuárias industriais**. Gráfica Editorial J Andrade. Aracaju - SE, 2004.

NUNES, J. A. **Tratamento físico-químico de águas residuárias industriais**. 6. ed. Aracaju: J. Andrade, 2012.

PAVANELLI, G. **Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor e turbidez elevada**. 233 p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos/SP, 2001.

PAPP, Gabriel T. **Pós-Tratamento físico-químico por flotação FAD em efluentes de laticínios**. 2017. 84 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira. 2017.

PENETRA, R. G. (1998). **Pós-tratamento físico-químico por flotação de efluentes de reatores anaeróbios de manta de lodo (UASB)**. São Carlos, 1998. 140p. Dissertação (Mestrado) – Escol de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

PUNMIA, B. C. JAIN, A. **Wastewater engineering**. New Delhi: LAXMI. 1998.

RANGEL, M. S. **Um purificador natural de água e complemento alimentar para o nordeste do brasil**. 2009.

RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F. **Planejamento de experimentos e otimização de processos**. 2. ed. Campinas, SP: Cárita, 2009

SEGANFREDO, M. A., **Gestão Ambiental na Suinocultura**, Brasília, ed: 1, 2007.

SILVA, E. S. MORAES, V. **O uso de coagulantes orgânicos no tratamento de água como forma de gerar conhecimento na área de química**. Encontro de Pós Graduação e Iniciação Científica – EPG INIC. Universidade Camilo Castelo Branco (UNICASTELO). 2013.

SOARES, S. R.; BELLI, P.; CASTILHOS, A. **Gestão de recursos ambientais**. In: FRANKENBERG, C. L. C.; RAYA-RODRIGUEZ, M. T.; CANTELLI, M. (Org). **Gerenciamento de resíduos e certificação ambiental**. Porto Alegre, ed EDIPUCRS, p. 280-291, 2000.

SOLANA, Isabela. **Estudo da viabilidade de utilização de um polímero de base orgânica em substituição ao cloreto férrico no tratamento de efluente industrial**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2014.

SPINELLI, V. A. **Quitosana, polieletrólito natural para o tratamento de água potável**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Florianópolis – SC. 2001.

VAZ, L. G. L. **Performance do processo de coagulação/floculação no tratamento do efluente líquido gerado na galvanoplastia**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química, área de concentração em Desenvolvimento de processos) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Toledo – PR. 2009.

VAZ, L. G. L. KLEN, M. R. F. VEIT, M. T. SILVA, E. ABARBIERO, T. A. BERGAMASCO, R. **Avaliação da eficiência de diferentes agentes coagulantes na remoção de cor e turbidez em efluente de galvanoplastia**. Revista Eclética Química. São Paulo. Volume 35, número 4, 2010.

VON SPERLING, M. **Princípio do Tratamento Biológico de Águas Residuárias**. Belo Horizonte, ed: 3, p. 452, UFMG, 2005.

VOURCH, M. *et al.* **Treatment of dairy industry waste water by reverse osmosis for reuse water**. Desalination, v. 219, p. 190- 202, 2008.

VIANNA, Marcos Rocha. **Hidráulica aplicada às estações de tratamento de água**. 3a edição. Belo Horizonte/MG: Imprimatur, 1997.

VILLA, R. D.; SILVA, M. R. A.; NOGUEIRA, R. F. P. **Potencial de aplicação do processo foto-fenton/solar como pré-tratamento de efluente da indústria de laticínios**. Departamento de Química Analítica, Instituto de Química de Araraquara, Universidade Estadual Paulista. Araraquara – SP, Brasil. Quim. Nova. Vol. 30, No. 8. 2007.

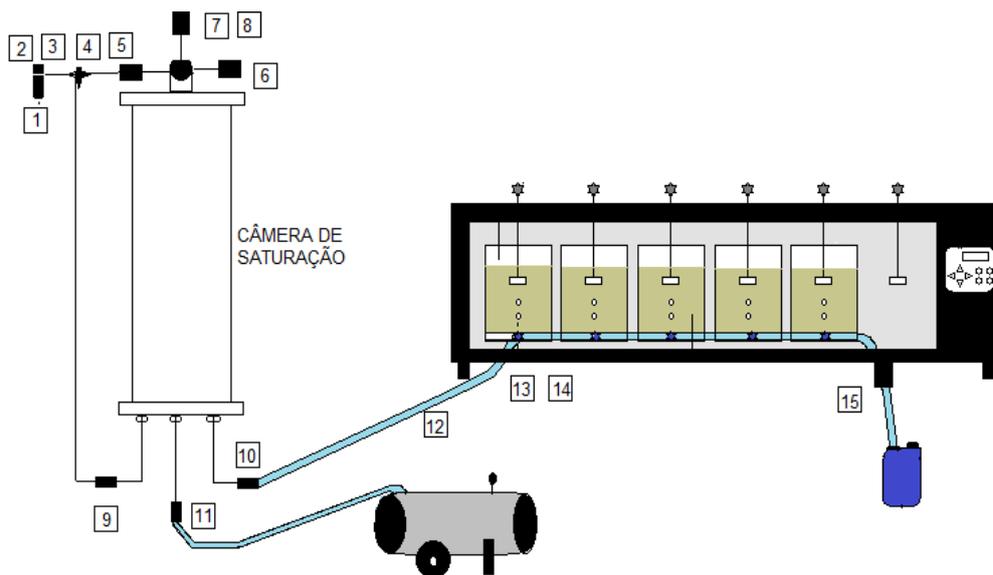


Figura 16. Equipamento de bancada convencional utilizado para ensaios de coagulação-floculação-flotação por ar dissolvido
Fonte: Próprios autores, (2019).

Legenda:

- (1) Entrada de ar;
- (2) Registro da válvula reguladora de pressão;
- (3) Manômetro da válvula reguladora de pressão;
- (4) Conexão tipo “t”;
- (5) Válvula de entrada de ar sob pressão durante a liberação do líquido saturado;
- (6) Válvula de agulha para ajuste fino da pressão na câmara;
- (7) Válvula de entrada de água/efluente/clarificado;
- (8) Manômetro;
- (9) Válvula para regular a entrada de ar;
- (10) Válvula para regular a saída do líquido saturado com ar;
- (11) Válvula de descarte de conteúdo da câmara;
- (12) Sistema de condução de líquido saturado com ar;
- (13) Conexão tipo “t” de acesso ao jarro de flotação;
- (14) Válvula de agulha de acesso ao jarro de flotação;
- (15) Válvula de descarte.

A seguir, encontram-se as etapas a serem seguidas para a operação do equipamento Flota-test:

1º Com as válvulas (6) e (7) abertas, deve-se encher a câmara de saturação com efluente, e as demais válvulas devem estar fechadas. Após, a câmara estar preenchida, estas válvulas (6) e (7) devem ser fechadas.

2º Liga-se o compressor de ar (1) regulando-o para a pressão necessária, através do auxílio do manômetro (3). Para garantir que a pressão não seja alterada, deve-se pressionar o registro (2) deslocando-o para baixo.

3º Deve-se abrir a válvula (9), para atingir a pressão no interior da câmara de pressão. Deixar o efluente saturar por pelo menos 20 minutos.

4º Após a saturação do efluente deve-se fechar a válvula (9) e agitar a câmara de saturação por 2 minutos, balançando-a.

5º Adiciona-se efluente aos 5 jarros até atingir o volume de 2 litros, garantindo a homogeneidade. Deve-se tomar cuidado com a formação de bolhas nas bases dos jarros ou junto as válvulas de acesso.

6º Deve-se verificar a temperatura do efluente, para manter as mesmas condições em todos os jarros, posicionando os jarros e as espátulas giratórias do equipamento.

7º Conectar a mangueira condutora de efluente saturado (12) junto aos jarros de flotação, utilizando as conexões tipo "T" (13).

10º Abrir a válvula (10) para o preenchimento das mangueiras com o efluente saturado, fechando a válvula (15).

11º Através da válvula (15), deve-se descartar uma parcela pequena do efluente, assim, mantendo o sistema pressurizado.

A seguir está a descrição do procedimento para a realização do ensaio de coagulação-floculação-flotação:

12º: Deve-se realizar a programação da rotação do equipamento de acordo com o gradiente de velocidade desejado em cada etapa do processo de coagulação - floculação.

13º Após a finalização do processo de agitação, o equipamento emitirá um alarme sonoro, indicando que as espátulas giratórias devem ser levantadas. Em seguida, devem-se abrir lentamente os registros dos jarros de flotação (14), para aplicação do

efluente saturado, iniciando pelos registros dos jarros centrais e, posteriormente os jarros das laterais.

14° O cálculo da quantidade de efluente saturado a ser introduzido em um jarro, é realizado em função do volume de efluente no jarro. Exemplo, considerando uma taxa de recirculação r de 10% e um volume de efluente no jarro de 2 L, deve-se introduzir um volume de 200 mL de efluente saturado. Sendo as dimensões internas da base de um jarro (11,5 cm x 11,5 cm), pode-se calcular a altura (hr) que irá corresponder ao volume de efluente saturado a ser introduzido: $h_{10\%} = 200 / (11,5 \times 11,5) = 1,5$ cm. Na face frontal do jarro, acima do nível de efluente correspondente ao volume de 2 L, pode-se identificar essa altura. Segue o mesmo procedimento para o cálculo de taxas.

15° Após o término da introdução do efluente saturado aos jarros, deve-se descartar o efluente por aproximadamente 2 segundos antes de se iniciar as coletas das amostras.

16° Após coletar as amostras de efluente clarificado referente a cada jarro deve-se fazer a limpeza do equipamento, e efetuar as análises dos parâmetros de interesse.