



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS E ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

NATHALIA CHAVES CARDOSO

**OTIMIZAÇÃO DAS DOSAGENS DE SULFATO DE ALUMÍNIO
NA ETAPA TERCIÁRIA DO TRATAMENTO DE EFLUENTES
DE INDÚSTRIA DE CELULOSE**

Porto Alegre

Julho 2018

NATHALIA CHAVES CARDOSO

**OTIMIZAÇÃO DAS DOSAGENS DE SULFATO DE ALUMÍNIO NA ETAPA
TERCIÁRIA DO TRATAMENTO DE EFLUENTES DE INDÚSTRIA DE CELULOSE**

TRABALHO DE CONCLUSÃO
APRESENTADO AO CURSO DE ENGENHARIA
AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO GRANDE DO SUL COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO
DE ENGENHEIRA AMBIENTAL.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Domingues Benetti

Porto Alegre

Julho 2018

NATHALIA CHAVES CARDOSO

OTIMIZAÇÃO DAS DOSAGENS DE SULFATO DE ALUMÍNIO NA ETAPA
TERCIÁRIA DO TRATAMENTO DE EFLUENTES DE INDÚSTRIA DE CELULOSE

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul defendido e aprovado em **28/06/2018** pela Comissão avaliadora constituída pelos professores:

Banca Examinadora:

.....
Prof. Dr. Antônio Domingues Benetti - Orientador

.....
Prof. Dr. Gino Roberto Gehling – Instituto de Pesquisas Hidráulicas

.....
Eng^a. Química Larissa Gressler Garcia – CMPC Celulose Riograndense

Conceito:.....

CIP - Catalogação na Publicação

Cardoso, Nathalia Chaves

Otimização das dosagens de sulfato de alumínio na etapa terciária do tratamento de efluentes de indústria de celulose. / Nathalia Chaves Cardoso. -- 2018.

76 f.

Orientador: Antônio Domingues Benetti.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Curso de Engenharia Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2018.

1. tratamento de efluentes. 2. sulfato de alumínio. 3. condutividade. 4. flotateste. 5. celulose e papel. I. Benetti, Antônio Domingues, orient. II. Título.

Dedico este trabalho à minha mãe, Marta Chaves Cardoso e ao meu pai Miguel Ângelo Correa Cardoso, pelo amor incondicional, pela educação proporcionada e por não medirem esforços para que eu realizasse meus sonhos.

A água brota do chão,
pura e sem contaminação.
Corre, desce, molha a plantação.
Continua sua estrada até chegar ao ribeirão.
Daí vai para o rio,
Onde começa a lamentação.
Esgoto, entulho e veneno atingem seu coração.
E na veia desse rio,
que era pra conduzir vida,
só conduz destruição...
Odilon Eusébio

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Antônio Domingues Benetti pela orientação, disponibilidade e ajuda na execução desse trabalho.

Agradeço à Universidade Federal do Rio Grande do Sul e a todos os professores da Engenharia Ambiental pelo ensino de excelência e gratuito ofertado.

Agradeço à Empresa CMPC Celulose Riograndense e ao Gerente de Segurança, Meio Ambiente e Qualidade Clovis Zimmer pela oportunidade de estágio e por possibilitar a realização desse trabalho.

Agradeço à minha supervisora de estágio Larissa Gressler Garcia, que me instruiu para realização desse projeto e que me orientou durante todo meu período de estágio.

Agradeço à Coordenadora Gislayne Couto, ao Assistente Técnico Marcos Lindenmeyer, às assistentes de laboratório Vivian Bischoff e Patrícia De Oliveira e a todos os operadores da Estação de Tratamento de Efluentes.

Agradeço à minha amiga Cátia Espitalher Duarte, pela amizade e conselhos.

Agradeço aos meus amigos e colegas da Engenharia Ambiental, pelos momentos únicos de amizade e pela troca de conhecimentos.

Agradeço à minha mãe Marta Chaves Cardoso, que sempre colocou a realização dos meus sonhos em primeiro lugar e faz tudo que está ao seu alcance para me ver feliz.

Agradeço ao meu pai Miguel Ângelo Correa Cardoso, por colocar a educação de suas filhas em primeiro lugar e por ser incansável em tudo que precisei durante o período de graduação.

Agradeço à minha irmã, Ana Carolina, por ser minha segunda mãe e por me presentear com a nossa Luíza.

Agradeço à Família Marçal, por me acolherem como filha e por me apoiarem.

Agradeço ao meu namorado Victor Marçal por todo seu amor, por saber me acalmar e sempre dizer a coisa certa, pela compreensão nos momentos em que precisava estudar e por ser a pessoa maravilhosa que és.

RESUMO

CARDOSO, N. C. Otimização das dosagens de sulfato de alumínio na etapa terciária do tratamento de efluentes de indústria de celulose. 2018. 75 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Indústrias de celulose e papel geram grandes volumes de efluentes líquidos, os quais necessitam de tratamento eficaz antes de serem lançados no corpo hídrico receptor. Com o objetivo de solucionar o problema de ultrapassagem de sólidos sedimentáveis, realizou-se um estudo na etapa terciária da Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) da indústria CMPC Celulose Riograndense. Utilizando um equipamento de flotateste, buscou-se avaliar se a condutividade do efluente possuía correlação com a dosagem de coagulante (sulfato de alumínio) que deveria ser adicionado para a obtenção de um efluente tratado de boa qualidade. Também foi avaliado qual seria o pH ideal de floculação. No total foram testados quinze diferentes valores de condutividade (variando de 3540 a 6090 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). Obteve-se como resultado uma equação linear ($R^2=0,97$), que poderá ser utilizada pelos operadores da empresa. Estima-se uma economia média mensal de doze toneladas de coagulante e prevê-se o lançamento de um efluente sem sólidos sedimentáveis e com bons resultados de cor e turbidez. Identificou-se que a faixa de pH deve manter-se entre 5,0 a 5,2. O objetivo do trabalho foi atingido, sendo possível otimizar as dosagens de sulfato de alumínio e solucionar o problema de ultrapassagem de sólidos sedimentáveis. Assim, nota-se a importância da realização de ensaios de bancada como forma de simular as melhores condições de operação da ETE.

Palavras-chave: condutividade; flotateste; sulfato de alumínio.

ABSTRACT

Pulp and paper industries generate great amounts of wastewater, which must go through an efficient treatment before its release into water bodies. Aiming to solve settleable solids exceeding environmental limits, it was performed a study in tertiary stage of CMPC Celulose Riograndense wastewater treatment plant. Using a flotatest equipment, it was evaluated if there was a correlation between conductivity and the amount of coagulant (aluminum sulfate) that should be added to obtain a good treated wastewater. It was also analyzed the ideal pH for flocculation. Fifteen different conductivity values were tested (ranging from 3540 to 6090 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). As a result, it was obtained a linear equation ($R^2=0,97$), that can be used by wastewater treatment plant operators. It is estimated a monthly average economy of twelve tons of coagulant and it is predicted the release of treated wastewater with no settleable solids and with good color and turbidity results. It was identified that pH range should be from 5.0 to 5.2. The goal of this study was achieved, enabling to optimize aluminum sulfate dosage and solving settleable solids exceeds. Therefore, stands out the importance of doing laboratory studies as a tool to simulate best wastewater treatment plant conditions.

Keywords: conductivity; flotatest; aluminum sulfate.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação do processo de obtenção da polpa celulósica.....	20
Figura 2: Representação do ciclo fechado do processo Kraft.....	21
Figura 3: CMPC Celulose Riograndense.....	34
Figura 4: Visão aérea da estação de tratamento de efluentes da linha Guaíba 2.....	35
Figura 5: Tratamento de Efluentes da Linha Guaíba 2 (CMPC Celulose Riograndense).....	36
Figura 6: Etapa de tratamento secundário da empresa CMPC Celulose Riograndense....	38
Figura 7: Flotador para a remoção do material floculado e produção de efluente tratado	39
Figura 8: Flotador da empresa CMPC Celulose Riograndense.....	39
Figura 9: Equipamento de flotateste Milan JTF600/6.....	41
Figura 10: Local de coleta do efluente a ser analisado flotateste.	42
Figura 11: Cubas do equipamento flotateste com amostras de efluentes.....	43
Figura 12: Água saturada para realização dos ensaios de flotação.....	44
Figura 13: Efluente clarificado após a realização do ensaio de flotateste.....	45
Figura 14: Teste de sedimentação em cone Imhoff.....	45
Figura 15: Histograma da condutividade (em $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) do flotador norte (jan/2016-abr/2018).....	47
Figura 16: Histograma das análises do flotateste.....	48
Figura 17: Resultados do flotateste para condutividade de $3540\ \mu\text{S}\ \text{cm}^{-1}$	49
Figura 18: Resultados do flotateste para condutividade de $4130\ \mu\text{S}\ \text{cm}^{-1}$	49
Figura 19: Resultados do flotateste para condutividade de $4370\ \mu\text{S}\ \text{cm}^{-1}$	49
Figura 20: Resultados do flotateste para condutividade de $4420\ \mu\text{S}\ \text{cm}^{-1}$	50
Figura 21: Resultados do flotateste para condutividade de $4630\ \mu\text{S}\ \text{cm}^{-1}$	50
Figura 22: Resultados do flotateste para condutividade de $4740\ \mu\text{S}\ \text{cm}^{-1}$	50
Figura 23: Resultados do flotateste para condutividade de $4810\ \mu\text{S}\ \text{cm}^{-1}$	51
Figura 24: Resultados do flotateste para condutividade de $5120\ \mu\text{S}\ \text{cm}^{-1}$	51
Figura 25: Resultados do flotateste para condutividade de $5270\ \mu\text{S}\ \text{cm}^{-1}$	51
Figura 26: Resultados do flotateste para condutividade de $5580\ \mu\text{S}\ \text{cm}^{-1}$	52
Figura 27: Resultados do flotateste para condutividade de $5680\ \mu\text{S}\ \text{cm}^{-1}$	52
Figura 28: Resultados do flotateste para condutividade de $5750\ \mu\text{S}\ \text{cm}^{-1}$	52
Figura 29: Resultados do flotateste para condutividade de $5830\ \mu\text{S}\ \text{cm}^{-1}$	53
Figura 30: Resultados do flotateste para condutividade de $5910\ \mu\text{S}\ \text{cm}^{-1}$	53
Figura 31: Resultados do flotateste para condutividade de $6090\ \mu\text{S}\ \text{cm}^{-1}$	53

Figura 32: Correlação matemática linear da dosagem de sulfato ótima e a condutividade do efluente de entrada.....	55
Figura 33: Correlação matemática de segundo grau entre a dosagem de sulfato de alumínio ótima e a condutividade do efluente de entrada.....	56
Figura 34: Correlação matemática logarítmica natural entre a dosagem de sulfato de alumínio ótima e a condutividade do efluente de entrada.....	57
Figura 35: Comparação entre o padrão de dosagem de sulfato de alumínio pela operação no flotor norte e a curva proposta com os resultados do flotateste (jan a dez de 2016).....	60
Figura 36: Comparação entre o padrão de dosagem de sulfato de alumínio pela operação no flotor sul e a curva proposta com os resultados do flotateste (jan a dez de 2016).....	60
Figura 37: Comparação entre o padrão de dosagem de sulfato de alumínio pela operação no flotor norte e a curva proposta com os resultados do flotateste (jan a dez de 2017).....	61
Figura 38: Comparação entre o padrão de dosagem de sulfato de alumínio pela operação no flotor sul e a curva proposta com os resultados do flotateste (jan a dez de 2017).....	61
Figura 39: Comparação entre o padrão de dosagem de sulfato de alumínio pela operação no flotor norte e a curva proposta com os resultados do flotateste (jan a abr de 2018).....	62
Figura 40: Comparação entre o padrão de dosagem de sulfato de alumínio pela operação no flotor norte e a curva proposta com os resultados do flotateste (jan a abr de 2018).....	62
Figura 41: Variação do pH para condutividade de 4420 $\mu\text{S cm}^{-1}$	65
Figura 42: Variação do pH para condutividade de 4420 $\mu\text{S cm}^{-1}$	65
Figura 43: Variação do pH para condutividade de 5690 $\mu\text{S cm}^{-1}$	65
Figura 44: Variação do pH para condutividade de 5800 $\mu\text{S cm}^{-1}$	66
Figura 45: Variação do pH para condutividade de 6000 $\mu\text{S cm}^{-1}$	66

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Parâmetros de lançamento de efluentes da empresa CMPC Celulose Riograndense que devem ser reportados ao órgão ambiental segundo a Licença de Operação.....	30
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Melhores dosagens de sulfato de alumínio em função da condutividade do efluente.....	54
Tabela 2: Comparação entre as equações propostas e os resultados do flotatestes.....	58
Tabela 3: Motivos prováveis para ultrapassagens de sólidos sedimentáveis.....	64

LISTA DE SIGLAS

CONAMA: Conselho Nacional de Meio Ambiente

CNRH: Conselho Nacional de Recursos Hídricos

CONSEMA: Conselho Estadual de Meio Ambiente

FAD: Flotação por Ar Dissolvido

FEPAM: Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luís Roessler

ETE: Estação de Tratamento de Efluentes

IPH: Instituto de Pesquisas Hidráulicas

NTU: Unidades de turbidez nefelométrica

pH: potencial hidrogeniônico

uC: Unidades de cor

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 OBJETIVOS	18
2.1 OBJETIVO GERAL	18
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1 A INDÚSTRIA DE CELULOSE E PAPEL	19
3.2 EFLUENTES LÍQUIDOS INDUSTRIAIS E DA INDÚSTRIA DE CELULOSE E PAPEL	21
3.3 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS EFLUENTES	23
3.3.1 SÓLIDOS	23
3.3.2 TURBIDEZ	24
3.3.3 COR	24
3.3.4 CONDUTIVIDADE	24
3.3.5 TEMPERATURA	25
3.4 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS E BIOLÓGICAS DOS EFLUENTES	25
3.4.1 POTENCIAL HIDROGENIÔNICO - PH	25
3.4.2 MATÉRIA ORGÂNICA	26
3.5. DISPOSIÇÕES LEGAIS SOBRE RECURSOS HÍDRICOS	26
3.6 TRATAMENTO DE EFLUENTES LÍQUIDOS DA INDÚSTRIA DE CELULOSE E PAPEL	31
3.7 OPERAÇÃO COAGULAÇÃO - FLOTAÇÃO	31
4 METODOLOGIA	34
4.1 ÁREA DE ESTUDO	34
4.2 TRATAMENTO DE EFLUENTES DA ÁREA DE ESTUDO	35
4.3 PLANEJAMENTO DAS ANÁLISES E AVALIAÇÃO DOS DADOS	40
5 RESULTADOS	47
5.1 DOSAGENS DE SULFATO DE ALUMÍNIO	47
5.2 OTIMIZAÇÃO DOS CUSTOS DE DOSAGEM DE SULFATO DE ALUMÍNIO	59
5.3 AVALIAÇÕES DOS EVENTOS DE ULTRAPASSAGEM DE SÓLIDOS SEDIMENTÁVEIS	63
5.4 PH IDEAL DE FLOCULAÇÃO.	64
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	68
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
ANEXO 1	74

1 INTRODUÇÃO

A qualidade dos recursos hídricos reflete diretamente no desenvolvimento sustentável e no padrão de vida das populações. A água é um patrimônio comum da humanidade e fundamental para a vida dos seres humanos, assim como das espécies animais e vegetais. Ademais, é visto que a sociedade buscou seu desenvolvimento ao longo dos rios e esse cenário continua refletido também nos dias atuais. Por isso, e buscando respeitar o uso múltiplo das águas, devemos assegurar que esse recurso esteja disponível em quantidade e qualidade adequada, priorizando a sua proteção.

Visando que o meio ambiente seja preservado e que o direito humano aos serviços básicos seja garantido, existem as políticas e legislações ambientais. No Brasil, é definido por lei que as indústrias são responsáveis pelo tratamento tanto da água que vão utilizar no seu processo produtivo quanto dos efluentes que vão ser lançados no corpo hídrico receptor. Além disso, o tratamento deve ser eficaz para que atenda aos padrões estabelecidos pelo órgão ambiental competente.

Indústrias de grande porte e cujo processo produtivo exija elevado consumo de água são potenciais geradoras de grandes volumes de efluentes líquidos. Esse é o caso das indústrias de celulose e papel, as quais demandam água em todas as etapas produtivas e que podem gerar efluentes que impactam a vida aquática e o meio ambiente. Esse ramo industrial é considerado o sexto maior poluidor ambiental, devido à geração de resíduos sólidos, poluentes atmosféricos e efluentes líquidos (KLIDI *et al.*, 2018).

Para manter a Licença de Operação, evitar penalizações do órgão ambiental ou gerar uma imagem negativa perante a sociedade, é necessário que as empresas cumpram com todas as condicionantes e lancem seus efluentes de acordo com o estabelecido. Para atender a essas exigências, o tratamento convencional de efluentes líquidos segue as etapas de tratamento primário, secundário e, quando necessário, terciário. As etapas primária e terciária usualmente utilizam métodos físico-químicos e a etapa secundária geralmente é biológica.

Entre os métodos físico-químicos, os mais utilizados são os de coagulação e floculação. Neste processo, adiciona-se um coagulante químico para agregar e sedimentar os contaminantes, clarificando o efluente. Contudo, a adição de coagulantes inorgânicos, como o

sulfato de alumínio, pode ocasionar impactos ambientais, como a produção de lodo com hidróxido metálico e o aumento da concentração de alumínio na água. O sulfato de alumínio nos recursos hídricos pode ocasionar danos à biota aquática e, na água tratada, danos à saúde humana (MAMINSKA, 2017). Por isso, ao utilizar o sulfato de alumínio para tratamento de efluentes, deve-se adicioná-lo em uma quantidade que seja suficiente para realizar um tratamento eficaz. Porém, deve-se tomar cuidado para não o dosar em excesso, o que pode acarretar em prejuízos ao meio ambiente e também pode conferir custos desnecessários.

Uma empresa muito visada com relação a todos os seus aspectos ambientais é a empresa de celulose e papel CMPC Celulose Riograndense. Entre os motivos para isso, destaca-se o passado de conflitos com a comunidade local e o fato da empresa estar inserida em uma área urbana do município de Guaíba, Região Metropolitana de Porto Alegre. Nessa empresa vem sendo observados episódios de ultrapassagem em um dos parâmetros de lançamento de seus efluentes - os sólidos sedimentáveis.

A Estação de Tratamento de Efluentes da empresa é a maior do estado do Rio Grande do Sul e conta com tratamento convencional primário, secundário e terciário. A etapa terciária é feita por coagulação-flotação, na qual adiciona-se sulfato de alumínio. Buscando identificar a causa das ultrapassagens de sólidos sedimentáveis, assim como solucionar essa questão, foi realizado um estudo na etapa terciária de tratamento de efluentes dessa empresa. Para o estudo, simulou-se a etapa de flotação, através da realização de ensaios de bancada. A hipótese desse trabalho baseou-se em tentar encontrar uma correlação entre a variável de entrada condutividade e a quantidade de sulfato de alumínio que deveria ser utilizada para a melhor coagulação.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Otimização das dosagens de sulfato de alumínio aplicadas na etapa terciária da Estação de Tratamento de Efluentes da linha Guaíba 2 da empresa de celulose e papel CMPC Celulose Riograndense, visando o atendimento ao parâmetro de sólidos sedimentáveis de acordo com o estipulado na Licença de Operação da empresa.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliação do emprego do equipamento de flotatestes como forma de simular a flotação por ar dissolvido (FAD) da planta;
- Padronização da operação, para que os operadores da Estação de Tratamento de Efluentes saibam as quantidades exatas de coagulantes que devem ser aplicadas de acordo com a condutividade de entrada do efluente;
- Obtenção de correlação matemática entre os parâmetros condutividade e dosagem de sulfato de alumínio e
- Otimização dos custos de dosagem de químicos na etapa de floculação.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 A INDÚSTRIA DE CELULOSE E PAPEL

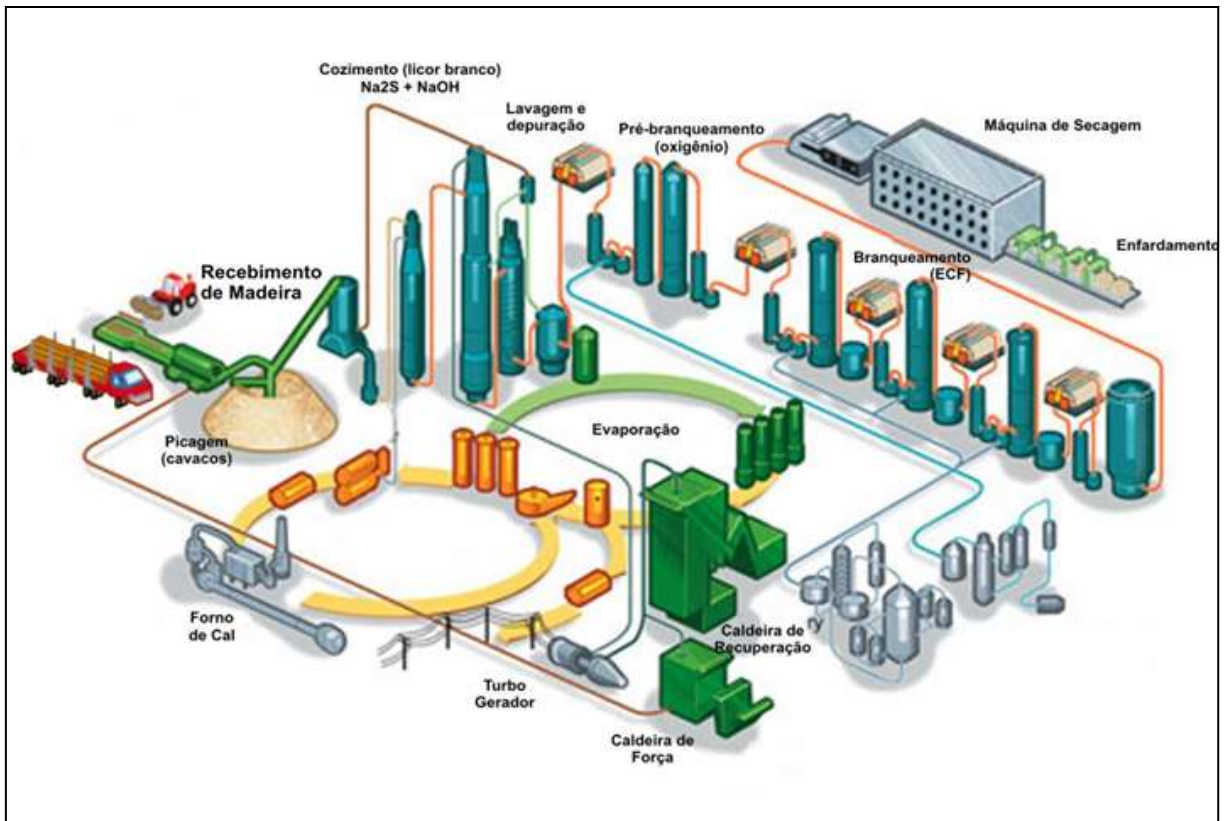
A indústria de celulose e papel é um dos segmentos industriais mais importantes do mundo, devido a seus benefícios econômicos (FURLEY *et al.*, 2018), sendo o Brasil o segundo maior produtor de celulose do mundo e o oitavo maior produtor mundial de papel. As exportações desses produtos contribuem para a balança comercial e para a geração de emprego e renda em todas as regiões do país. No ano de 2017, a produção brasileira de celulose teve um crescimento de 3,8 por cento, atingindo volume recorde anual de 19,5 milhões de toneladas (IBÁ, 2017).

A celulose é um composto natural e um dos principais componentes das células vegetais, de onde é extraída. Além da celulose, as células vegetais também possuem hemicelulose, lignina e extrativos. Para obtenção da denominada polpa ou pasta celulósica, a celulose é separada dos demais constituintes vegetais, em especial a lignina. Existem diversos métodos para obtenção da polpa celulósica, sendo o processo químico de polpação Kraft um dos mais difundidos. Esse processo visa dissolver a lignina, preservando a resistência das fibras (NAVARRO *et al.*, 2007). No Brasil, as duas principais fontes de madeira utilizadas para a produção de celulose são as árvores plantadas de pinus e de eucalipto, responsáveis por mais de 98% do volume produzido (IBÁ, 2015).

A grande vantagem do processo Kraft (Figura 1) consiste na capacidade de ter mínimas perdas químicas e máxima eficiência energética. O diagrama básico desse processo consiste na existência de uma linha de fibras, uma etapa de recuperação e uma etapa de caustificação. Na linha de fibras, as toras de madeira são lavadas e picadas em um tamanho pré-determinado (denominados cavacos). Após a etapa de picagem e peneiramento, os cavacos são enviados para os digestores (grandes vasos de pressão), onde eles reagem com o licor branco de cozimento (sulfeto de sódio - Na_2S e hidróxido de sódio/soda cáustica - NaOH) sob condições adequadas de temperatura e pressão. Após a etapa de cozimento, a polpa celulósica passa por uma etapa de depuração, na qual as impurezas da madeira e os cavacos não cozidos são removidos. Na sequência, a polpa segue para uma etapa de deslignificação, que visa remover a lignina que ainda possa estar presente e por etapas de branqueamento para atingir o

grau de alvura, limpeza e pureza química desejados. Depois de branqueada, a polpa passa por uma etapa de secagem e está pronta para ser utilizada na fabricação de papel ou para ser vendida em folhas de celulose (CELULOSE RIOGRANDENSE, 2018; DE MARINS, 2012; FOELKEL, 2013).

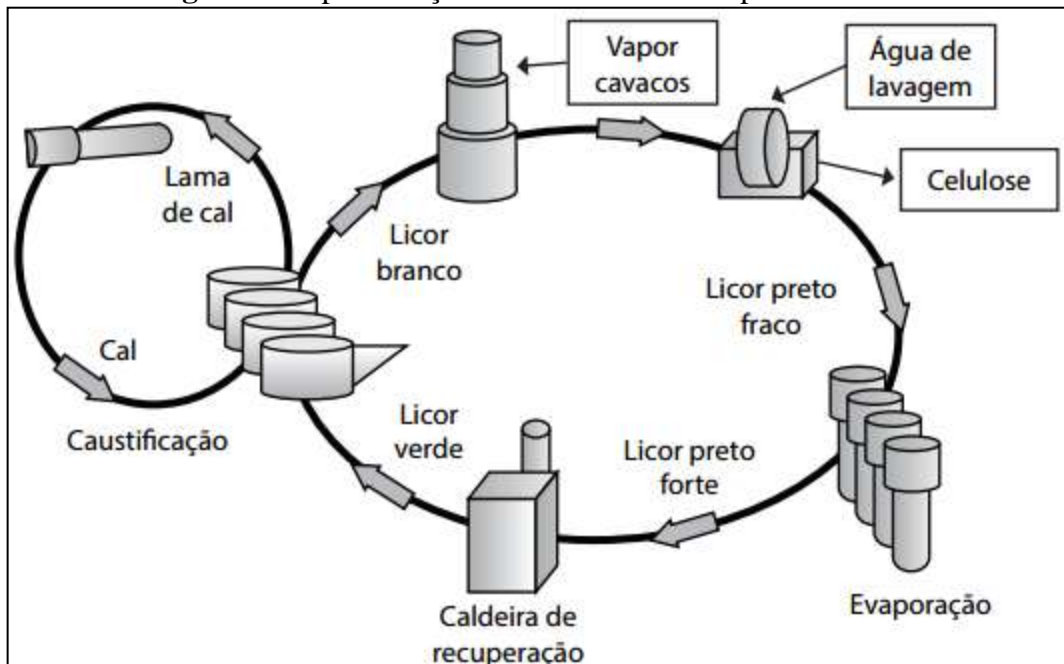
Figura 1. Representação do processo de obtenção da polpa celulósica



(Fonte: Programa de integração da CMPC Celulose Riograndense, 2018).

O processo Kraft possui a característica de recuperar a maioria dos insumos químicos e é, portanto, considerado um ciclo fechado (Figura 2). Por isso, existe a etapa de recuperação, onde o licor negro (que consiste na fração da madeira dissolvida no licor residual de cozimento) é concentrado em evaporadores e convertido em um biocombustível. Esse biocombustível é queimado em uma caldeira especial (caldeira de recuperação), na qual a parte orgânica gera energia térmica e elétrica. Já a parte inorgânica é enviada para o processo de caustificação, onde ocorre a calcinação e a recuperação da soda cáustica. Dessa forma, os reagentes químicos minerais são recuperados e podem ser utilizados para um novo ciclo de cozimento (DE MARINS, 2012; FOELKEL, 2013).

Figura 2. Representação do ciclo fechado do processo Kraft



(Fonte: DA COSTA, 2017).

3.2 EFLUENTES LÍQUIDOS INDUSTRIAIS E DA INDÚSTRIA DE CELULOSE E PAPEL

De acordo com Metcalf & Eddy (2003), resíduos líquidos, sólidos e emissões atmosféricas são produzidos por todas as comunidades. Define-se efluente líquido como sendo a água de suprimento da comunidade após a sua utilização, nas mais diversas aplicações. Os efluentes líquidos também podem ser descritos como uma combinação dos resíduos líquidos que foram carreados pela água e removidos das residências, instituições, estabelecimentos comerciais e industriais, juntamente com a água superficial, subterrânea ou da chuva.

Com relação às indústrias, esses estabelecimentos consomem água nas mais diversas formas. Por exemplo, na incorporação ao produto, nas lavagens das máquinas, tubulações e pisos, nos sistemas de resfriamento e geradores de vapor, durante as etapas do seu processamento e também para fins sanitários. Após o seu uso, essa água (com exceção somente da água que foi incorporada ao produto), torna-se contaminada pelos resíduos e pelas perdas de energia térmica, originando os efluentes líquidos industriais (GIORDANO, 2004).

Entre as grandes geradoras de efluentes líquidos industriais estão as indústrias de celulose e papel, visto que durante todas as etapas de seus processos produtivos são demandados grandes volumes de água. Para a produção de uma tonelada de celulose, são necessários entre 20 a 50 m³ de água e, para a fabricação de uma tonelada de papel, entre 10 a 20 m³ de água (FOELKL, 2014). A água na indústria de celulose pode ser utilizada para lavagem de toras e cavacos, transporte de fibras, polpação, branqueamento, sistemas de resfriamento e limpeza. Após passar por essas etapas, a água adquire elevadas concentrações de matéria orgânica e de substâncias muitas vezes tóxicas, como resinas ácidas (que naturalmente ocorrem na madeira), ácidos graxos insaturados (ácido oleico, linoleico, acético e linolênico), álcoois diterpênicos e compostos clorados (KAMALI & KHODAPARAST, 2015). Quando despejadas sem tratamento adequado, essas águas (que agora são denominadas efluentes líquidos) podem provocar uma alteração da qualidade dos corpos receptores e ocasionar danos à saúde humana, ao meio ambiente e à biota aquática (QUARTAROLI *et al.*, 2014). Essa alteração da qualidade do corpo receptor, seja física, química ou biológica, é definida como poluição hídrica (GIORDANO, 2004).

Os efluentes do processo de produção de celulose e papel apresentam quantidades consideráveis de demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), sólidos suspensos (SS), toxicidade, cor e compostos organo halogenados adsorvíveis (AOX). Por isso, esses efluentes são considerados uma fonte significativa de poluição hídrica. Consequentemente, quando não tratados, ou quando tratados de forma ineficiente, poluem o corpo hídrico receptor (FURLEY *et al.*, 2018; POKHREL & VIRARAGHAVAN, 2004).

Algumas etapas desse processamento industrial são as responsáveis pelas maiores quantidades de geração de efluentes, como lavagem, preparação e digestão da madeira, lavagem e branqueamento da polpa e fabricação de papel. O volume de efluentes produzidos em cada etapa do processo está diretamente relacionado com a quantidade de polpa produzida naquele processo em particular (ASHRAFI *et al.*, 2015).

As características desses efluentes dependem de alguns fatores, como o processo produtivo utilizado, o tipo de madeira, a tecnologia escolhida para ser aplicada, as práticas de gerenciamento, a quantidade de água utilizada no processo e a quantidade de água de recirculação. O volume de água utilizado tem relação direta com a geração e emissão de efluentes. Porém, o potencial poluidor desses efluentes é dependente da forma que a fábrica é operada e do grau de fechamento dos circuitos (ARAÚJO *et al.*, 2013).

3.3 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS EFLUENTES

3.3.1 SÓLIDOS

Os efluentes industriais contêm uma grande variedade de materiais sólidos, dos mais diversos tamanhos. A carga de sólidos é composta por substâncias dissolvidas e em suspensão, de composição orgânica e/ou inorgânica. Simplificadamente, classificam-se esses materiais a partir de suas características físicas (como tamanho e estado), ou a partir de suas características químicas (METCALF & EDDY, 2003). Segundo Von Sperling (1996) todos os contaminantes da água (somente com exceção dos gases dissolvidos) contribuem para a quantidade de sólidos.

Os sólidos totais são os resíduos remanescentes depois de uma amostra ter sido evaporada e seca em uma temperatura específica (103 a 105°C). São medidos em $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ou ppm (base: massa/volume) (METCALF & EDDY, 2003).

Sólidos dissolvidos são as partículas com diâmetro inferior a 1,2 μm e sólidos em suspensão as partículas cujo diâmetro é superior a 1,2 μm . Os sólidos em suspensão subdividem-se em sólidos coloidais e sólidos sedimentáveis. As partículas coloidais têm estabilidade eletrostática e permanecem em suspensão. Podem ser removidas quimicamente através dos processos de coagulação e floculação. Já os sólidos sedimentáveis são aqueles que sedimentam após um período específico de tempo. O teste padrão para sólidos sedimentáveis consiste em colocar uma amostra de efluente ou água residuária em um cone Imhoff de 1 litro e observar o volume (em mililitros) de sólidos que sedimentam após uma hora. O teor de sólidos sedimentáveis é adotado na legislação brasileira como um dos padrões de lançamento de águas residuais (CAVALCANTI, 2012).

Os sólidos também são analisados de acordo com a sua composição, podendo, dessa forma, serem classificados como fixos (composição inorgânica) ou voláteis (composição orgânica). À uma temperatura de $550 \pm 50^\circ\text{C}$ a fração orgânica é oxidada e volatilizada, permanecendo somente a fração mineral (GIORDANO, 2004).

3.3.2 TURBIDEZ

Turbidez é a medida da propriedade de transmitir luz através da água e está relacionada com o material coloidal e residual suspenso. A medida da turbidez é baseada na comparação da intensidade de luz dispersa na amostra com relação a quantidade de luz dispersa em uma solução de referência sob as mesmas condições. Os resultados da medida de turbidez são reportados em unidades de turbidez nefelométrica (NTU) (METCALF & EDDY, 2003). Os equipamentos de determinação nefelométrica de turbidez possuem um detector colocado a um determinado ângulo em relação ao raio de luz incidente. A detecção da luz refletida pelas partículas suspensas e coloidais é convertida em sinal elétrico e registrada no painel do equipamento. A turbidez está correlacionada a concentração de sólidos suspensos (LIBÂNIO, 2010).

3.3.3 COR

A cor pode ser devido a constituintes naturais, como decomposição da matéria orgânica, (especialmente ácidos húmicos e fúlvicos de origem vegetal), ou devido à presença de ferro e manganês. Também pode ser de origem antropogênica, devido a resíduos industriais (especialmente de tinturarias, tecelagem e produção de papel) ou em virtude de efluentes domésticos. A cor é medida em uC (unidades de cor) (VON SPERLING, 1996).

3.3.4 CONDUTIVIDADE

A condutividade elétrica ou condutância específica indica a capacidade de uma solução em conduzir corrente elétrica. Essa capacidade é devido à presença de substâncias dissolvidas, as quais são dissociadas em ânions e cátions. Tendo em vista que a corrente elétrica é transportada pelos íons em solução, a condutividade aumenta conforme aumenta a concentração de íons. Entre esses íons usualmente estão os de ferro e manganês além de K^+ , Cl^- , Na^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} . Esse parâmetro pode ser relacionado à concentração de sólidos dissolvidos. A unidade de medida da condutividade elétrica é o milisemens por metro ($mS \cdot m^{-1}$) ou o microhm por centímetro ($\mu mho \cdot cm^{-1}$) (LIBÂNIO, 2010).

De acordo com LOMBARDI & FURLEY (2015) a condutividade é um parâmetro utilizado por diversas indústrias devido à sua facilidade e confiabilidade de medição e por ser um indicador de alterações na qualidade do efluente. As autoras também relatam que altos valores de condutividade podem estar relacionados com o grau de toxicidade dos efluentes das indústrias de celulose e papel. Por isso, esse parâmetro tem forte potencial para ser usado como ferramenta de controle de toxicidade de um afluente.

3.3.5 TEMPERATURA

A temperatura afeta as velocidades de reações químicas e bioquímicas que ocorrem na água, sendo, portanto, um parâmetro de grande importância. Quanto maior a temperatura da água, menos solúvel são o oxigênio e outros gases. Efluentes industriais geralmente possuem temperaturas elevadas. A temperatura também influencia o desempenho dos sistemas de tratamentos químicos e biológicos, estando a temperatura ótima para esses processos situada entre 25 a 35°C (CAVALCANTI, 2012).

3.4 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS E BIOLÓGICAS DOS EFLUENTES

3.4.1 POTENCIAL HIDROGENIÔNICO - pH

O potencial hidrogeniônico, expresso como pH (Equação 1), é um parâmetro de qualidade importante tanto para águas naturais quanto residuais e é definido como o logaritmo negativo da concentração molar de íons de hidrogênio (METCALF & EDDY, 2003).

$$pH = -\log_{10}[H^+] \quad (1)$$

Onde:

pH = potencial hidrogeniônico e

$[H^+]$ = concentração molar de íons de hidrogênio.

O pH está diretamente relacionado à eficiência da coagulação, pois influencia a química dos coagulantes, suas reações no meio aquoso, as espécies hidrolisadas predominantes e a

variação na carga superficial de coloides presentes no efluente (ARAÚJO, 2013). O pH de um sistema aquoso é tipicamente medido através da utilização de um pHmetro.

3.4.2 MATÉRIA ORGÂNICA

Segundo GIORDANI (2004), a matéria orgânica está contida na fração de sólidos voláteis. Porém, usualmente é medida indiretamente através da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e da demanda química de oxigênio (DQO). A DBO é a quantidade de oxigênio necessária para que micro-organismos heterotróficos oxidem (ou biodegradem) a matéria orgânica. Já a DQO mede a quantidade de oxigênio necessária para oxidar quimicamente a matéria orgânica. Outra forma de medir a matéria orgânica é através da quantidade de carbono orgânico total (COT). Um dos impactos mais importantes do descarte de matéria orgânica é que ela consome oxigênio dissolvido da água no processo de biodegradação.

3.5. DISPOSIÇÕES LEGAIS SOBRE RECURSOS HÍDRICOS

A Lei Federal nº 9.433 de 8 de janeiro de 1997 (BRASIL, 1997), instituiu a Política Nacional dos Recursos Hídricos e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos e está fundamentada nos seguintes termos:

Art. 1º – A Política Nacional de Recursos Hídricos baseia-se nos seguintes fundamentos:

I – a água é um bem de domínio público;

II – a água é um recurso natural limitado, dotado de valor econômico;

III – em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais;

IV – a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas;

V – a bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos;

VI – a gestão dos recursos hídricos deve ser descentralizada e contar com a participação do Poder Público, dos usuários e das comunidades.

Como um dos instrumentos de gestão previstos na Lei nº 9.433/1997 (BRASIL, 1997) está o enquadramento em classes de uso das águas superficiais, o qual é regulado pela Resolução nº 357 de 2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2005) e pela Resolução nº 91 de 2008 do Conselho Nacional dos Recursos Hídricos (CNRH, 2008).

No estado do Rio Grande do Sul, a Lei nº 10.350 de 30 de dezembro de 1995 (RIO GRANDE DO SUL, 1995) instituiu o Sistema Estadual de Recursos Hídricos, sendo muito similar e servindo de base à Lei Federal nº 9.433/1997. O Lago Guaíba atualmente está enquadrado em sua maior parte como Classe II, tendo alguns trechos enquadrados como Classe III e alguns trechos enquadrados como Classe I (COMITÊ DO LAGO GUAÍBA, 2018).

A Resolução CONAMA nº 430 de 13 de maio de 2011 (CONAMA, 2011) dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005 e dispõe em seu artigo terceiro sobre o lançamento de efluentes de fontes poluidoras:

Art. 3º Os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados diretamente nos corpos receptores após o devido tratamento e desde que obedeçam às condições, padrões e exigências dispostos nesta Resolução e em outras normas aplicáveis.

O Artigo 16, inciso I, da Resolução CONAMA nº 430/2011 dita as condições de lançamento de efluentes em suas alíneas, as quais devem ser (CONAMA, 2011):

a) pH entre 5 a 9;

b) temperatura: inferior a 40°C, sendo que a variação de temperatura do corpo receptor não deverá exceder a 3°C no limite da zona de mistura;

c) materiais sedimentáveis: até 1 mL·L⁻¹ em teste de 1 hora em cone Imhoff. Para o lançamento em lagos e lagoas, cuja velocidade de circulação seja praticamente nula, os materiais sedimentáveis deverão estar virtualmente ausentes;

d) regime de lançamento com vazão máxima de até 1,5 vez a vazão média do período de atividade diária do agente poluidor, exceto nos casos permitidos pela autoridade competente;

e) óleos e graxas: 1. Óleos minerais: até 20 mg/L; 2. Óleos vegetais e gorduras animais: até 50 mg/L;

f) ausência de materiais flutuantes; e

g) Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO 5 dias a 20°C): remoção mínima de 60% de DBO sendo que este limite só poderá ser reduzido no caso de existência de estudo de autodepuração do corpo hídrico que comprove atendimento às metas do enquadramento do corpo receptor;

O Conselho Estadual do Meio Ambiente (CONSEMA, 2017), através da Resolução nº 355 de 2017 dispõe sobre os padrões de emissão de efluentes líquidos para fontes de emissão que lancem seus efluentes em águas superficiais do estado do Rio Grande do Sul. Esses padrões podem ser mais restritivos que os estabelecidos a nível federal pela Resolução CONAMA nº

430/2011. O Artigo 10 dessa Resolução dita os padrões de emissão que devem ser atendidos para o lançamento de efluentes líquidos de fontes poluidoras.

Já a Resolução CONAMA n° 237 de 19 de dezembro de 1997 (CONAMA, 1997) dispõe sobre o licenciamento ambiental. Esse é o procedimento administrativo pelo qual o órgão ambiental competente (federal, estadual ou municipal), licencia a localização, instalação, ampliação e operação de empreendimentos e atividades utilizadoras de recursos ambientais. O licenciamento é necessário para as atividades consideradas efetivas ou potencialmente poluidoras ou daquelas que, sob qualquer forma, possam causar degradação ambiental. Existem três fases para o licenciamento ambiental: a Licença Prévia (LP), a Licença de Instalação (LI) e a Licença de Operação (LO). A licença de operação é a que estabelece as condicionantes ambientais para a operação do empreendimento (FEPAM, 2016).

No Rio Grande do Sul, a Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luís Roessler (FEPAM) é o órgão ambiental responsável pelo licenciamento ambiental. A Licença de Operação n° 5144/2016 da empresa CMPC Celulose Riograndense tem, como uma de suas condicionantes, que deverão ser atendidos todos os padrões de emissão constantes nas Resoluções CONSEMA n° 128/2006 (revogada pela Resolução CONSEMA n° 335/2017) e n° 129/2006 (revogada pela Resolução CONSEMA n° 334/2016). O Quadro 1 apresenta os parâmetros que a empresa deve reportar ao órgão ambiental, assim como as frequências de medição e o tipo de amostragem.

Quadro 1. Parâmetros de lançamento de efluentes da empresa CMPC Celulose Riograndense que devem ser reportados ao órgão ambiental segundo a Licença de Operação.

Parâmetro	Padrão de emissão a ser atendido	Frequência de medição	Tipo de amostragem
AOX	até 0,10 kg AOX·tSA ⁻¹ de polpa branqueada	diária	composta
Clorato	sem padrão de emissão	anual	simples
Cloreto	sem padrão de emissão	anual	simples
Coliformes termotolerantes	≤ 1000 NMP·100mL ⁻¹ ou 99% de eficiência	diária	simples
Cor	não deve conferir mudança de coloração (cor verdadeira) ao corpo hídrico receptor	-	-
DBO	≤ 36 mg O ₂ ·L ⁻¹	diária	composta
DQO	≤ 140 mg O ₂ ·L ⁻¹	diária	composta
Espumas	virtualmente ausentes		
Fenóis totais (reagentes à 4-aminoantipirina)	≤ 0,05 mg·L ⁻¹	diária	composta
Fósforo total	≤ 0,9 mg P·L ⁻¹	diária	composta
Materiais flutuantes	Ausentes		
Mercúrio	≤ 0,008 mg·L ⁻¹	diária	composta
Nitrogênio total Kjeldahl	≤ 9 mg·L ⁻¹	diária	composta
Odor	livre de odor desagradável	-	-
Óleos e graxas minerais	≤ 10 mg·L ⁻¹	diária	simples
pH	entre 6,0 e 9,0	diária	simples
Sólidos sedimentáveis	≤ 1,0 mL·L ⁻¹ em teste de 1 hora em cone Imhoff	diária	composta
Sólidos suspensos totais	≤ 50 mg·L ⁻¹	diária	composta
Substâncias tensoativas reagente azul metileno	≤ 2,0 mg MBAS·L ⁻¹	diária	composta
Sulfeto total	≤ 0,18 mg S ₂ ·L ⁻¹	diária	composta
Temperatura	< 40°C	diária	simples

(Fonte: Licença de Operação n° 5144/2016 da empresa CMPC Celulose Riograndense).

3.6 TRATAMENTO DE EFLUENTES LÍQUIDOS DA INDÚSTRIA DE CELULOSE E PAPEL

Para realizar o tratamento de seus efluentes, grande parte das indústrias de celulose e papel possui um sistema básico de tratamento, com tratamento primário seguido de tratamento secundário, geralmente biológico. Essa configuração mostra-se eficaz para remoção de sólidos suspensos e compostos orgânicos biodegradáveis. Contudo, os padrões de emissão estabelecidos pela legislação ambiental brasileira não são atendidos somente com a utilização do tratamento primário e secundário. Dessa forma, a implantação de tratamentos terciários (ou pós-tratamentos) mostra-se necessária. Ademais, nesses efluentes há a presença de materiais em suspensão, substâncias orgânicas dissolvidas e materiais não sedimentáveis (na forma coloidal e constituídos, principalmente, por fibras finamente divididas, dióxido de titânio, cola ou amido, tintas e corantes) que elevam a cor e a turbidez do efluente (MANAGÓ *et al.*, 2014).

Em virtude disso, Quartaroli *et al.*, (2014) apresentam como possíveis alternativas a serem utilizadas como tratamento terciário a utilização de processos físico-químicos, como coagulação, floculação, sedimentação, flotação, filtração e oxidação. Esses processos objetivam o atendimento aos padrões ambientais de lançamento em corpos hídricos receptores e também a reutilização ou reuso desses efluentes no processo industrial.

3.7 OPERAÇÃO COAGULAÇÃO - FLOTAÇÃO

A flotação é uma operação unitária que envolve as fases líquida, sólida e gasosa. É especialmente aplicada no tratamento de efluentes para a separação de material em suspensão e para a remoção de materiais oleosos do meio líquido (ARAÚJO, 2013). Uma das principais vantagens da flotação com relação a sedimentação é o fato das partículas leves e pequenas serem mais rapidamente removidas (METCALF & EDDY, 2003).

De forma geral, os sistemas de flotação compreendem mecanismos de introdução de bolhas no meio líquido, sistema coletor de espuma e sistema de recirculação de efluente. Podem ser diferenciados de acordo com a forma pela qual as bolhas de ar são geradas, sendo umas das mais empregadas a flotação por ar dissolvido (FAD) (ARAÚJO, 2013).

A FAD, segundo COUTINHO (2007) é um processo mundialmente consagrado para o tratamento tanto de água quanto de efluentes industriais. A esse processo, é conferido um alto grau de confiabilidade e competitividade, quando comparado a alternativas de separação sólido-líquida e de remoção para determinados tipos de poluentes.

Entre as principais vantagens da flotação por ar dissolvido, DA SILVA (2013) relata a possibilidade de remoção de partículas finamente suspensas, remoção de contaminantes, menor tempo de separação de partículas, menor espaço físico de instalação, flotado mais espesso, eficiência na remoção de outros parâmetros de interesse no tratamento de efluentes (DQO, DBO e turbidez) e a capacidade de trabalhar com grandes variações de afluente sem ocasionar a deterioração da qualidade final do efluente.

São grandes as potencialidades que a FAD possui no tratamento de águas e águas residuárias, sendo uma alternativa de pós-tratamento na clarificação do efluente secundário. Uma das primeiras aplicações da FAD foi na indústria de celulose e papel, mostrando-se uma boa alternativa, devido a sua excelente capacidade de remoção de sólidos suspensos, matéria orgânica dissolvida, redução de gases odoríferos e redução de concentrações de fósforo (CASAGRANDE, 2016; QUARTAROLI *et al.*, 2014).

A FAD consiste na introdução de um gás (geralmente o ar), sob a forma de microbolhas introduzidas até a saturação na massa líquida, sob uma pressão de operação entre 3 a 5 atm. Quando ocorre a despressurização da mistura líquida saturada, minúsculas bolhas de ar são liberadas instantaneamente na solução. O movimento ascendente do ar arrasta os sólidos em suspensão até a superfície do flotador (DI BERNARDO 2003). A remoção das partículas em suspensão, decorre da interação entre as bolhas de ar introduzidas e o material suspenso, o que resulta em um floco (ou agregado) menos denso que o líquido, que tende a emergir à superfície, formando um lodo. Esse lodo possui consistência de 2 a 4%, geralmente, e é retirado por meios mecânicos na superfície. O líquido clarificado é removido próximo ao fundo do flotador. Em operações de flotação com reciclo, parte desse líquido pode ser reciclada em direção a câmara de pressão. À montante do processo de flotação, são utilizados tanque de equalização, tanque de ajuste de pH, tanque de coagulação e tanque de floculação (destinados à reação do efluente com produtos químicos). Também podem ser adicionados polímeros em linha, em uma velocidade que não ocasione quebra dos flocos (CAVALCANTI, 2012).

Dentre os parâmetros que devem ser controlados para uma boa eficiência na operação de flotação destacam-se a taxa de aplicação superficial, o tempo de detenção no tanque de flotação, o tamanho das bolhas, a taxa de recirculação do líquido pressurizado com ar, a pressão na câmara de saturação e, conseqüentemente, a quantidade de ar fornecida em relação à massa de sólidos em suspensão no líquido (COUTINHO, 2007).

A flotação é, geralmente, precedida pela coagulação, que neutraliza as cargas negativas das partículas e favorece sua aglutinação. Em condições ideais os flocos produzidos devem ter pequenas cargas ou próximas de zero para que as forças eletrostáticas de repulsão favoreçam a prevalência das forças atrativas de van der Waals. Coagulantes químicos são usados para promover melhores condições de adesão entre bolhas e flocos ou bolhas e partículas (ARAÚJO, 2013).

A operação unitária coagulação-floculação é influenciada pelo tipo de coagulante, dosagem, concentração de partículas, pH da solução, velocidade de agitação, natureza do auxiliar de floculação e tempo de mistura rápida e lenta. A seletividade do processo se baseia na hidrofobicidade de uma partícula associado à sua hidrofiliabilidade (RAMOS *et al.*, 2016).

O controle do pH é importante para que ocorra uma boa coagulação e floculação. Dependendo do tipo de coagulante utilizado, o pH pode variar numa faixa muito ampla, o que torna os testes de jarros (jartestes) indispensáveis para a determinação do pH ótimo e das dosagens de coagulantes. Além disso, para melhorar a floculação e reduzir o consumo de coagulantes primários, têm sido utilizados polímeros sintéticos ou naturais como auxiliares na coagulação, cujas dosagens combinadas devem ser pesquisadas através de ensaios de laboratório realizados com a água ou com o efluente a ser tratado (COUTINHO, 2007).

4 METODOLOGIA

4.1 ÁREA DE ESTUDO

O trabalho foi realizado na Estação de Tratamento de Efluentes da linha Guaíba 2 da empresa CMPC Celulose Riograndense, produtora de celulose branqueada de fibra curta de eucalipto. A empresa está presente no mercado internacional e pertence ao grupo chileno CMPC. Está localizada sob o endereço Rua São Geraldo, nº 1680, Bairro Ermo, no município de Guaíba, Região Metropolitana de Porto Alegre (Figura 3).

Figura 3. CMPC Celulose Riograndense



(Fonte: Google imagens).

O objetivo do processo industrial da empresa é a extração da celulose na forma de uma pasta, separando-a dos demais constituintes da madeira (lignina, resinas e minerais), através do processo Kraft de produção. Atualmente a Celulose Riograndense conta com duas linhas de produção de celulose (Guaíba 1 e Guaíba 2) e uma fábrica de papel. A Linha Guaíba 1 foi inaugurada em 16 de março de 1972, sob o nome de Celulose Borregaard S.A. Ao longo dos anos a empresa passou por diversas mudanças em sua razão social, sendo comprada em 2009 pelo grupo chileno CMPC. Em 2013 foi dado início às obras da linha Guaíba 2, cujo início das operações foi em 03 de maio de 2015. A produção anual nominal da linha Guaíba 1 é de

450.000 toneladas de celulose e a da linha Guaíba 2 é de 1.500.000 toneladas. (CMPC Celulose Riograndense, 2017).

4.2 TRATAMENTO DE EFLUENTES DA ÁREA DE ESTUDO

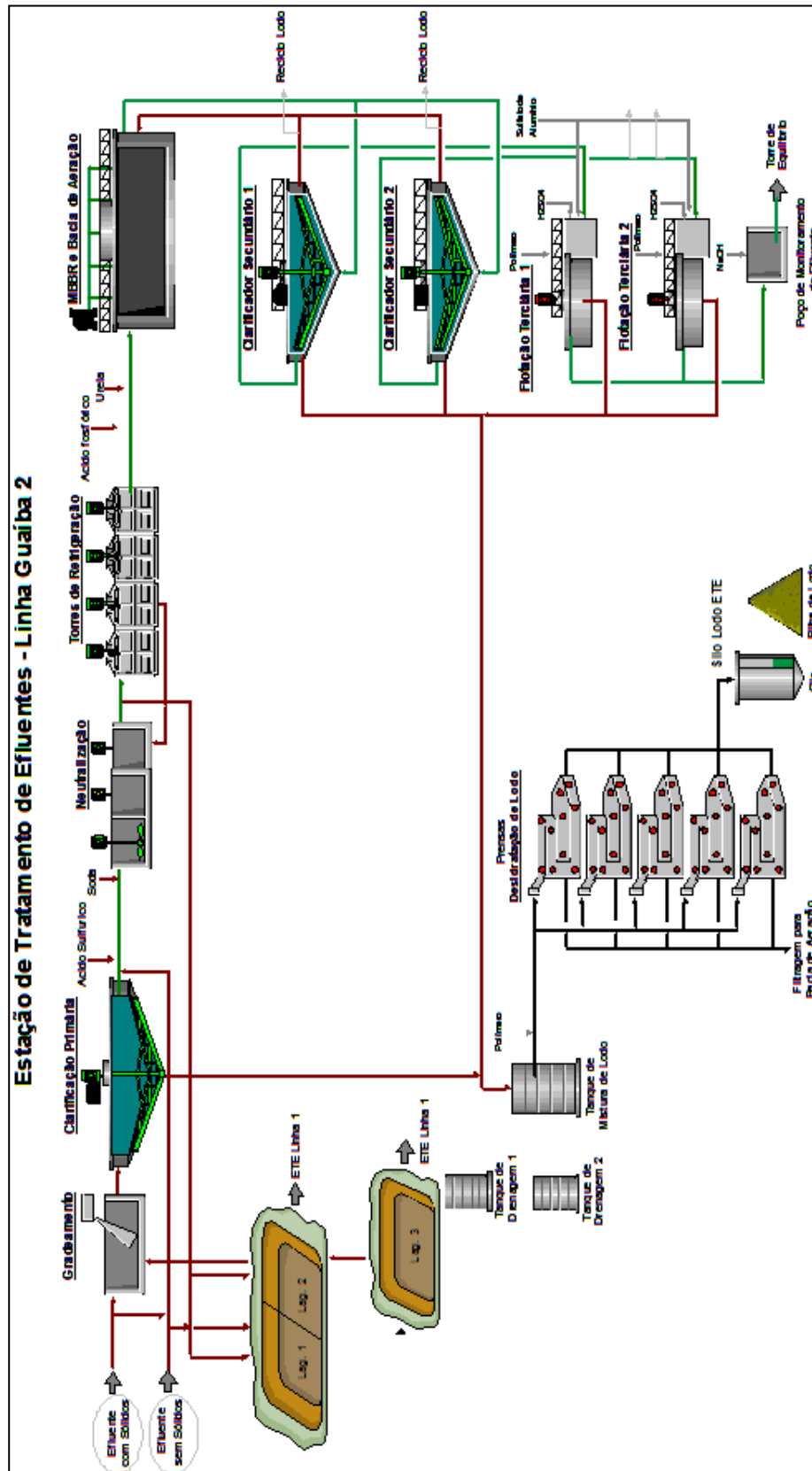
Diversas etapas são necessárias para o processamento da madeira à celulose. Durante esse processamento, são gerados efluentes nas etapas de lavagem das toras, operação do pátio de madeira, cozimento, depuração, branqueamento, secagem, recuperação química, utilidades (tratamento de água e efluentes), além dos efluentes gerados para fins sanitários. O efluente gerado nas áreas da linha Guaíba 2 é bombeado e enviado para a estação de tratamento de efluentes específica dessa linha (Figura 4). Nessa estação, o efluente passa por etapas de pré-tratamento, tratamento primário, tratamento secundário e tratamento terciário (Figura 5).

Figura 4. Visão aérea da estação de tratamento de efluentes da linha Guaíba 2.



(Fonte: Google Maps).

Figura 5. Tratamento de Efluentes da Linha Guaíba 2 (CMPC Celulose Riograndense)



(Fonte: CMPC Celulose Riograndense, PI Process Book).

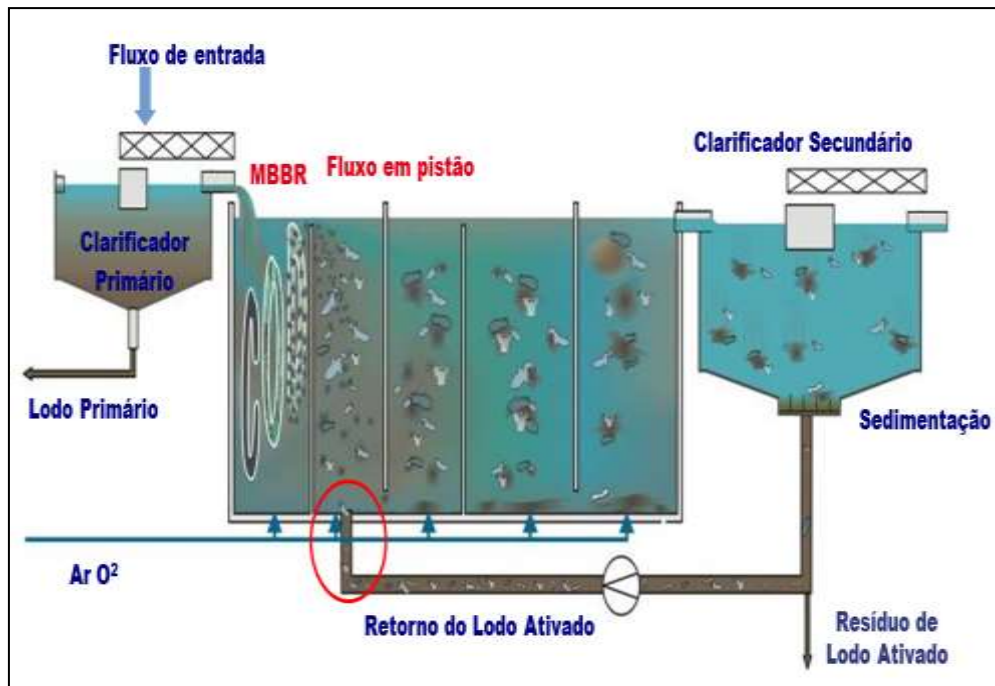
O efluente que chega na estação passa primeiro por uma etapa de pré-tratamento, que consiste em um gradeamento para remover sólidos espessos e rejeitos. Essa operação tem por objetivo evitar entupimentos e danos aos equipamentos das etapas seguintes.

Caso o efluente seja proveniente de áreas cujo processo o deixou rico em fibras, ele é encaminhado para a etapa de tratamento primário. Essa é uma etapa de sedimentação que consiste em um clarificador, onde os sólidos suspensos são assentados no fundo. O efluente clarificado é coletado na periferia do decantador, sendo conduzido para o tanque de neutralização. O lodo primário (rico em fibras) é coletado no centro do clarificador, através de um mecanismo de braços arqueados que são rotacionados. Os fluxos de projeto médio e máximo do clarificador primário são, respectivamente, $1800 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ e $2600 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

O efluente livre de fibras é encaminhado diretamente para um tanque de neutralização, cujo objetivo é a mistura do efluente sem fibra e do efluente com fibra após o tratamento primário. O pH é ajustado entre 6,5 a 7,7 com soda cáustica 20% (NaOH) ou ácido sulfúrico 98% (H_2SO_4). Após o ajuste, o líquido é encaminhado para o sistema de resfriamento, de modo a prepará-lo para o tratamento biológico. O fluxo de projeto de neutralização é de $4500 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ e a capacidade hidráulica máxima é de $5500 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. O sistema de resfriamento é formado por quatro células com ventiladores cujas vazões de projeto são iguais ao do sistema de neutralização. Caso o efluente não possa ser bombeado para o processo biológico, ele será desviado para a lagoa de emergência.

O tratamento secundário é realizado pelo processo de lodos ativados com leito de biofilme móvel (MBBR – *Moving Bed Biofilm Reactor*), o qual consiste de um tanque de aeração com peças plásticas e dois clarificadores secundários (Figura 6). No tratamento por MBBR os micro-organismos aderem-se em um meio de suporte plástico, formado o biofilme. Nos decantadores ocorre a separação da massa biológica, ou seja, o lodo ativado (AS - *Activated Sludge*), que é parcialmente reciclado para o tanque de aeração. O meio suporte é mantido no tanque através de telas no lado de descarga. Fornece-se ar para os micro-organismos no fundo dos reatores. Caso haja falta de nutrientes no canal após as torres de resfriamento, são dosados ureia e ácido fosfórico. Agentes antiespumantes são dosados nos reatores MBBR caso haja quantidade alta de espuma. O efluente do decantador secundário flui por gravidade para a etapa seguinte de tratamento.

Figura 6. Etapa de tratamento secundário da empresa CMPC Celulose Riograndense.



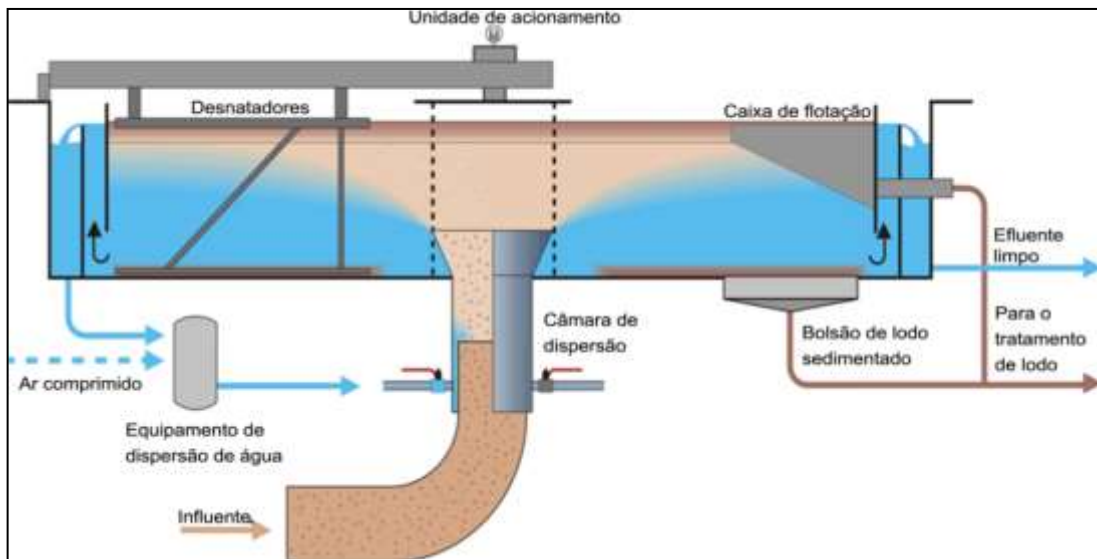
(Fonte: CMPC Celulose Riograndense, documentação interna).

Como estágio final no processo de tratamento de efluentes, é realizada a etapa de tratamento terciário, cujo objetivo é produzir um efluente final de qualidade e estável, cumprindo com os objetivos da licença de operação da empresa. Nessa etapa, objetiva-se remover componentes não ou lentamente biodegradáveis (lignina), cor, nutrientes em excesso e sólidos residuais.

O tratamento terciário é realizado com processo de flotação e é composto por duas câmaras de mistura de produtos químicos, dois tanques de floculação, dois tanques de flotação e equipamento de dispersão de água (Figuras 7 e 8). Na câmara de mistura ajusta-se o pH com ácido sulfúrico para uma faixa de valores de 5,2 a 5,4 e adiciona-se sulfato de alumínio para a realização de coagulação química. O efluente é encaminhado para as câmaras de floculação, onde é adicionada uma solução de polieletrólito (polímero) para o fortalecimento e crescimento dos flocos. O efluente floculado flui para a câmara de dispersão, na qual é adicionado o ar. A pressão dentro do tanque de dispersão de água é de aproximadamente 5 a 5,5 atm. A água de dispersão é obtida através do bombeamento de uma parte do efluente clarificado através de um tanque pressurizado de dispersão de água. Mistura-se o efluente e a água de dispersão, ocasionando a subida das bolhas de ar e dos flocos. O lodo é flotado para a superfície e removido com uma escumadeira. A remoção do lodo que ficou no fundo do

flotador é feita por raspadores de fundo. Cada flotador realiza, em média, o tratamento de $1800 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ de efluente.

Figura 7. Flotador para a remoção do material floculado e produção de efluente tratado.



(Fonte: CMPC Celulose Riograndense, documentação interna).

Figura 8. Flotador da empresa CMPC Celulose Riograndense.



(Fonte: autora).

Ao final da etapa de flotação, encaminha-se o efluente clarificado para a estação de monitoramento. Ajusta-se o pH entre 6 e 8 com soda cáustica, em uma última etapa de neutralização. Um amostrador coleta automaticamente amostras do efluente final para as

análises laboratoriais. O efluente tratado é lançado no corpo hídrico receptor (Lago Guaíba), nas coordenadas geográficas: -30,14258880 (latitude) e -51,29228330 (longitude).

O lodo gerado em cada uma das etapas de tratamento (primária, secundária e terciária), é combinado e misturado a fim de fornecer um lodo misto e estável. Posteriormente ele é desidratado em uma unidade de pré-desidratação (mesa desaguadora) e em uma prensa de filtragem de correia. Esse lodo é enviado para a empresa VIDA, que, através do processo de compostagem, transforma-o em um adubo orgânico chamado humosolo.

4.3 PLANEJAMENTO DAS ANÁLISES E AVALIAÇÃO DOS DADOS

Realizou-se um levantamento dos dados da Estação de Tratamento de Efluentes da linha Guaíba 2 durante o período de janeiro de 2016 a abril de 2018. Foram considerados para análise os dados de condutividade da saída do efluente secundário (misturador norte juntamente com o misturador sul), o pH das câmaras de mistura, as dosagens de sulfato de alumínio e polímero nos flotores norte e sul e os resultados das análises da saída do flotor norte e sul para sólidos sedimentáveis, cor, condutividade e turbidez.

Para cada um dos dados, foram desenvolvidas análises estatísticas com o uso do Excel. Calcularam-se as médias, os desvios padrões e os valores máximos e mínimos. Com o Software Minitab 18 foram elaborados histogramas da condutividade a fim de verificar quais apresentavam as maiores frequências e verificar se a série amostral das análises laboratoriais era representativa.

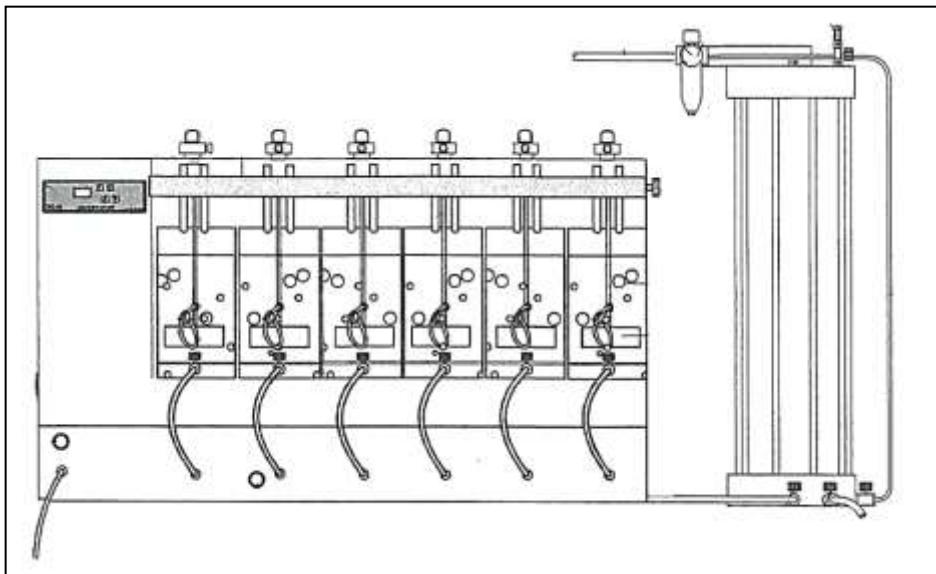
Para o planejamento das análises de flotatestes, realizou-se um levantamento com o assistente técnico da área, os operadores de painel e os operadores da estação de tratamento de efluentes a fim de identificar qual era o padrão de dosagem de químicos na estação. A conduta das análises foi baseada no manual do equipamento e no procedimento proposto por Di Bernardo & Filho (2003).

A determinação das dosagens ótimas dos coagulantes, assim como a determinação do pH ótimo de floculação foi realizada utilizando o equipamento de flotatestes da marca Milan, modelo JTF600/6 (Figura 9) composto de saturador S.600 em tubo acrílico transparente, regulador de pressão com manômetro, câmara de saturação, válvula de entrada de água e ar comprimido, válvula de sistema de entrada de ar e saída de água, válvula de saída de água

saturada para as cubas de teste de flotação, Jar Test microcontrolado com velocidade variável de 15 a 300 rpm, programação da velocidade, tempo de programação do processo e tensão bivolt automática de trabalho.

O equipamento possui seis cubas graduadas em acrílico transparente de dois litros cada (permitindo a realização de seis testes por vez), com placa difusora para água saturada (específica para o teste de flotação). As etapas de coagulação, floculação e flotação são realizadas nos jarros de flotação.

Figura 9. Equipamento de flotateste Milan JTF600/6.



(Fonte: Adaptado do manual de equipamento de flotateste Milan JTF 600/6).

Para a realização das análises no equipamento, foram preparados os seguintes reagentes, que são atualmente empregados na etapa terciária de tratamento:

- Solução de sulfato de alumínio a $100 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$. Nesta concentração cada 1,0 mL equivale a 100 mg de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$;
- Hidróxido de sódio a 1% e ácido sulfúrico a 1% (para ajuste de pH) e
- Solução de polímero a $1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ (0,1%) – recém-preparada. Nesta concentração, cada 1,0 mL equivale a 1 mg de polímero.

As amostras foram coletadas do transbordo do efluente secundário da linha Guaíba 2 (Figura 10). Atualmente, a etapa de flotação da Estação de Tratamento de Efluentes trabalha

com uma taxa de recirculação de 15%. Por isso, a fim de representar essa taxa de recirculação, cada uma das cubas graduadas de acrílico foi preenchida com 85% de efluente, ou seja, 1.700 mL (Figura 11). Conforme o manual do equipamento, ao atingir um quarto do volume (425 mL), deve-se inclinar a cuba para a eliminação das bolhas e pequenas bolsas de ar que possam existir na base do jarro de flotação, pois a permanência de bolhas pode afetar a distribuição da água saturada com ar durante a recirculação. As análises no flotateste foram feitas imediatamente após a coleta do efluente para manter a mesma temperatura da estação de tratamento. Ensaios realizados com um mesmo efluente sob diferentes condições de temperatura podem conduzir a resultados distintos.

Figura 10. Local de coleta do efluente a ser analisado no flotateste.



(Fonte: autora).

Figura 11. Cubas do equipamento flotateste com amostras de efluentes.



(Fonte: autora).

Nessa etapa também foi realizada a caracterização das amostras com relação aos parâmetros de interesse (pH, condutividade, cor e turbidez), utilizando uma alíquota do efluente que estava sendo adicionado às cubas.

Para encontrar a dosagem ótima de sulfato de alumínio, após o preenchimento das cubas em 85% do seu volume total, adicionou-se sulfato de alumínio em diferentes concentrações. Primeiramente foram pré-definidas 5 dosagens de sulfato de alumínio: 570, 640, 700, 770 e 830 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Esses valores foram escolhidos em função das dosagens que eram usualmente aplicadas na planta. Em alguns casos, quando essas dosagens não mostraram resultados adequados para os testes, utilizaram-se também dosagens maiores ou menores que as pré-estabelecidas.

Após a adição do sulfato de alumínio, o pH de cada uma das cubas foi corrigido para 5,2 (faixa usualmente empregada na planta). Após a correção de pH, dava-se início ao programa de floculação, o qual foi definido com uma velocidade de rotação de 120 rpm durante 3 minutos, seguida por 60 rpm durante 2 minutos e 20 rpm por 1 minuto. A solução de polímero foi adicionada na velocidade de 60 rpm, para que não houvesse quebra dos flocos. A

quantidade de polímero adicionada foi fixada em $3,2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Simultaneamente ao término do programa, as cubas foram preenchidas (até o volume de 2 litros) com água saturada, para simular o processo de flotação (Figura 12). A água foi saturada através de um compressor de ar, cuja pressão foi regulada para 6 atm (DI BERNARDO & FILHO, 2003).

Figura 12. Água saturada para realização dos ensaios de flotação.



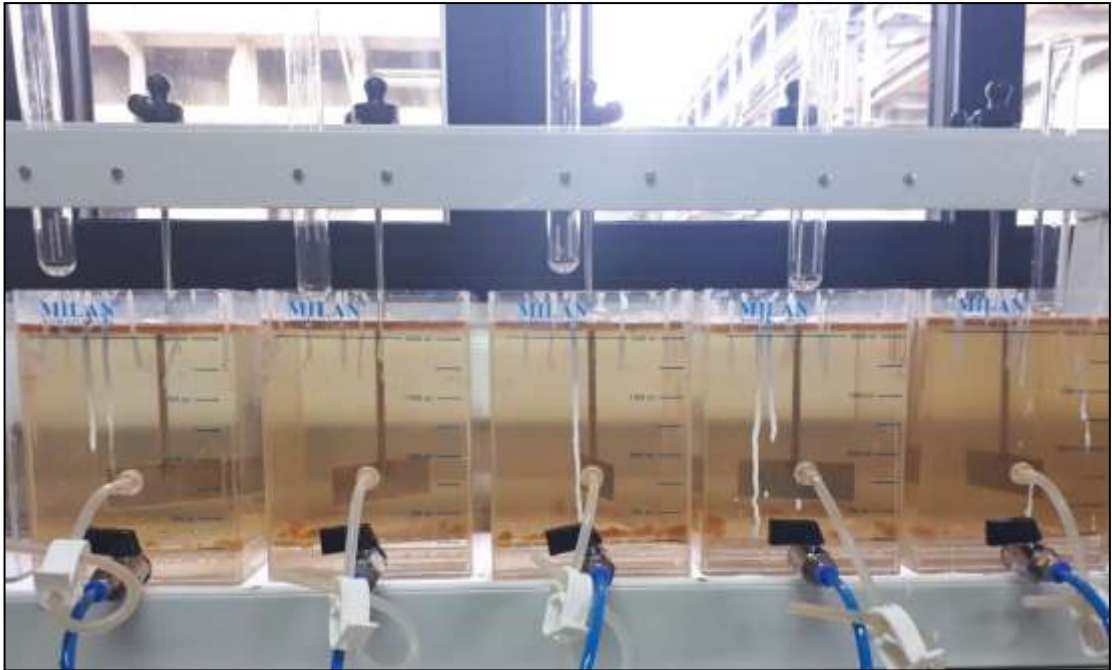
(Fonte: autora).

Após a obtenção da quantidade ótima de sulfato de alumínio para uma condutividade específica, foram realizados testes para encontrar o pH ideal de floculação. Para isso, foram repetidos os mesmos passos anteriores, porém mantendo-se fixa a quantidade de sulfato de alumínio e de polímero, mas alterando o pH de 5,0 a 5,4. Foram feitas análises em 5 cubas e em cada cuba o pH foi variado em 0,1.

Inicialmente também seriam realizados testes para avaliar a influência da variação da dosagem de polímero. Porém, a empresa está em fase de teste para a utilização de um novo polímero, em emulsão. Portanto, neste trabalho, o foco foi a dosagem de sulfato de alumínio.

Após a realização de cada ensaio (Figura 13), esperou-se um tempo de 10 minutos, para que os flocos tivessem tempo para chegar até a superfície. Para a avaliação dos resultados, coletou-se uma alíquota das cubas para análise de cor, turbidez, pH e condutividade finais. Para a avaliação dos resultados de sólidos sedimentáveis, coletou-se 1 litro de amostra de cada cuba e realizou-se ensaio de sedimentação com cone Imhoff no período de 1 hora (Figura 14).

Figura 13. Efluente clarificado após a realização do ensaio de flotateste.



(Fonte: autora).

Figura 14. Teste de sedimentação em cone Imhoff.



(Fonte: autora).

Para definição da dosagem ótima de sulfato de alumínio e do pH ótimo de floculação, comparou-se os resultados de cada uma das cubas e escolheu-se a dosagem cujo ensaio forneceu os menores valores de cor e turbidez finais e cujo volume de sólidos sedimentáveis foi inferior a $1 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$.

Plotou-se, assim, um gráfico de dispersão, cujos pontos foram a dosagem ótima de sulfato de alumínio em função de cada condutividade analisada. A partir do gráfico de dispersão, geraram-se três diferentes equações da reta. A equação da reta que melhor se adequou aos objetivos do trabalho foi proposta como resultado final do trabalho.

Para a avaliação da otimização dos custos, os dados de dosagem de sulfato de alumínio do flotor norte e sul foram comparados com os resultados da aplicação da equação proposta. A diferença entre a dosagem realizada e a dosagem pela equação da reta foi calculada e realizou-se a conversão de $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ para toneladas de sulfato de alumínio. Multiplicou-se o valor em toneladas pelo custo da tonelada de sulfato de alumínio e encontrou-se o valor economizado.

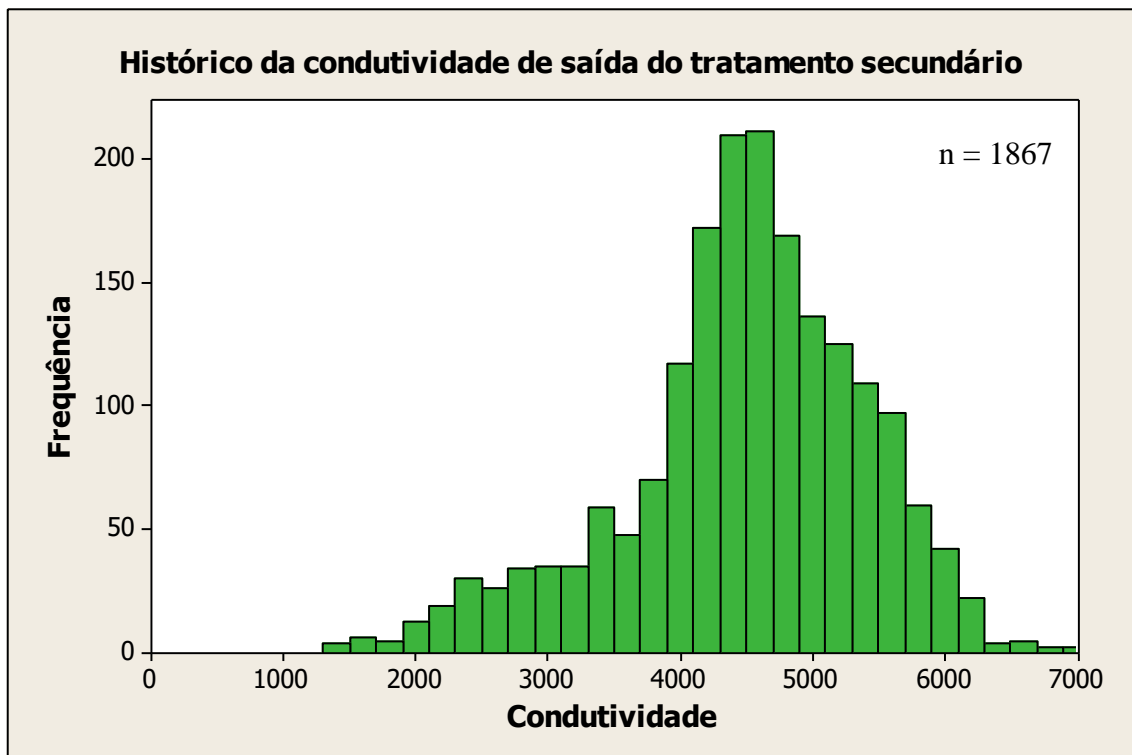
Buscando encontrar os possíveis motivos para as ultrapassagens de sólidos sedimentáveis (valores maiores que $1,0 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$), foram avaliados os eventos em que isso aconteceu. Comparou-se a dosagem de sulfato de alumínio e polímero que estava sendo aplicada na planta naquele dia e utilizou-se a equação proposta para identificar qual deveria ter sido a dosagem correta de sulfato de alumínio de acordo com o estudo.

5 RESULTADOS

5.1 DOSAGENS DE SULFATO DE ALUMÍNIO

A Figura 15 apresenta o histograma dos valores de condutividade da saída do efluente secundário, durante o período janeiro de 2016 a abril de 2018, totalizando 1867 dados. A condutividade é medida pela operação três vezes ao dia (01h00min, 09h00min e 17h00min). Nesse período, a condutividade média do efluente foi de $4475 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, com desvio padrão de $922 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. A mediana dos dados foi de $4530 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, sendo o valor máximo de $6930 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ e o mínimo de $1322 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.

Figura 15. Histograma da condutividade (em $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) do flotador norte (jan/2016-abr/018).



(Fonte: autora).

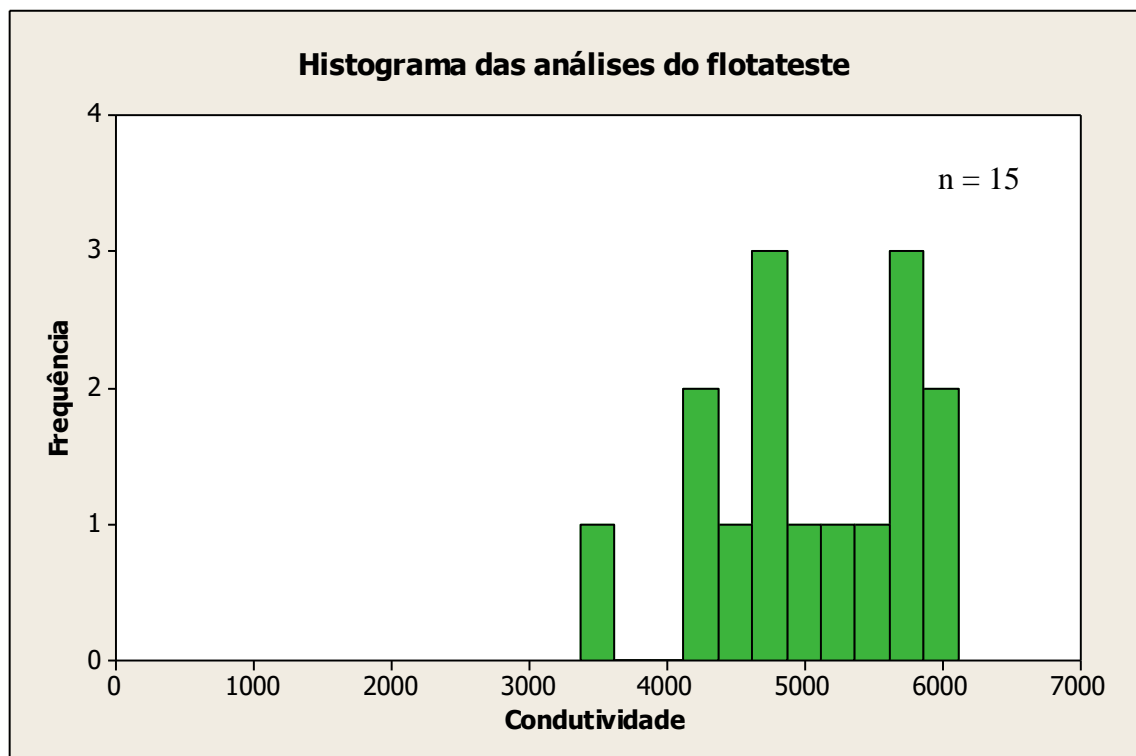
A maior concentração dos dados está localizada em uma faixa que indica que usualmente a condutividade varia entre 4000 e $5500 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Isso indica que deveriam ter sido realizadas análises de flotateste especialmente para essa faixa de variação. Valores de condutividade mais baixos que $3000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ são notados principalmente em episódios de parada de fábrica, na qual a vazão de alguns efluentes setoriais é reduzida, sendo a maior vazão a de efluentes sanitários. Da mesma forma, também em período de paradas de fábrica, ou de irregularidades

da produção, são observados valores altos de condutividade (entre 6500 e 7000 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). Nesse caso é devido a lavagens de alguns equipamentos, à maior carga de algum efluente setorial ou irregularidades do processo produtivo.

Com relação aos valores de cor e turbidez da saída dos flotadores, o valor médio de cor é de 141 uC, com desvio padrão de 83. No período de janeiro de 2016 a abril de 2018 o valor máximo de cor registrado foi de 2260 uC e o mínimo de 38 uC. O valor médio de turbidez nesse período foi de 8 NTU, com desvio padrão de 16, o valor máximo foi de 737 NTU e o mínimo de 3 NTU.

No total, foram realizados 15 ensaios de flotatestes com diferentes dosagens de sulfato de alumínio. A menor condutividade avaliada foi a de 3540 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ e a maior condutividade foi de 6090 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Na Figura 16, é apresentado o histograma das condutividades em que foram realizados os flotatestes. Pode ser observado que os ensaios realizados conseguiram representar os valores mais frequentes de condutividade da fábrica.

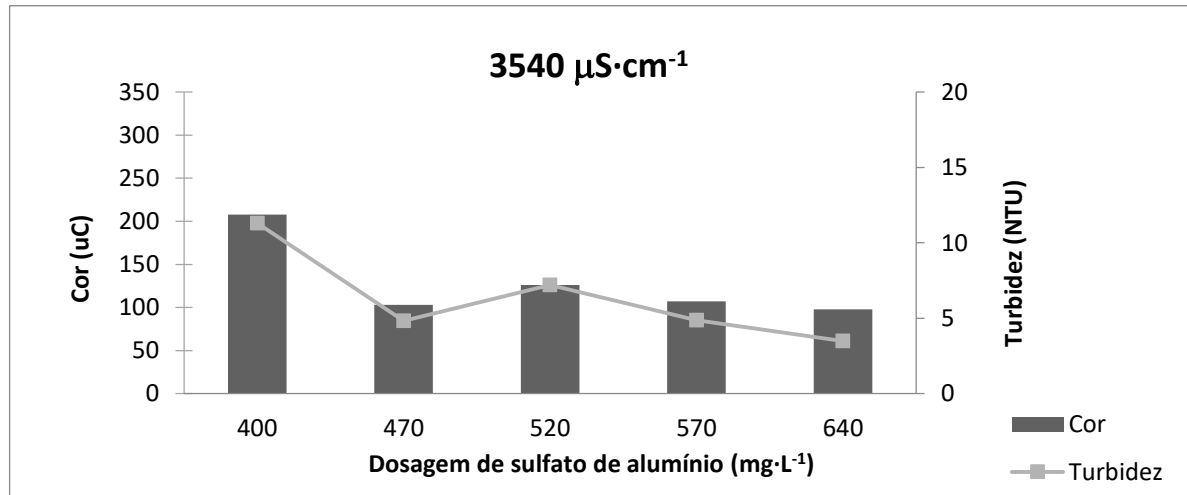
Figura 16. Histograma das análises do flotateste.



(Fonte: autora).

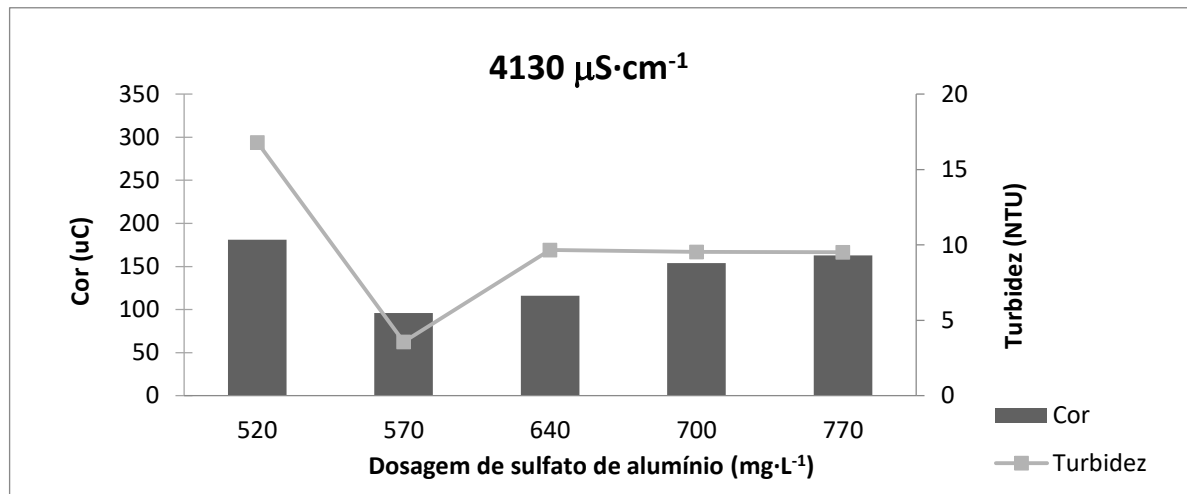
As Figuras 17 a 30 apresentam os resultados de cor e turbidez em função das diferentes dosagens de sulfato de alumínio. Os resultados completos são apresentados no Anexo 1.

Figura 17. Resultados do flotateste para condutividade de $3540 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.



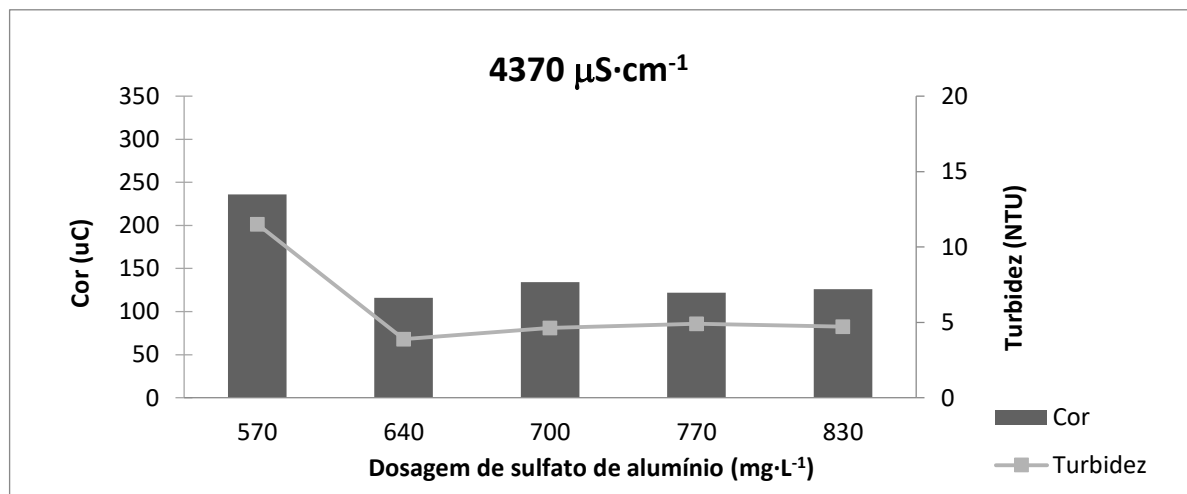
(Fonte: autora).

Figura 18. Resultados do flotateste para condutividade de $4130 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.



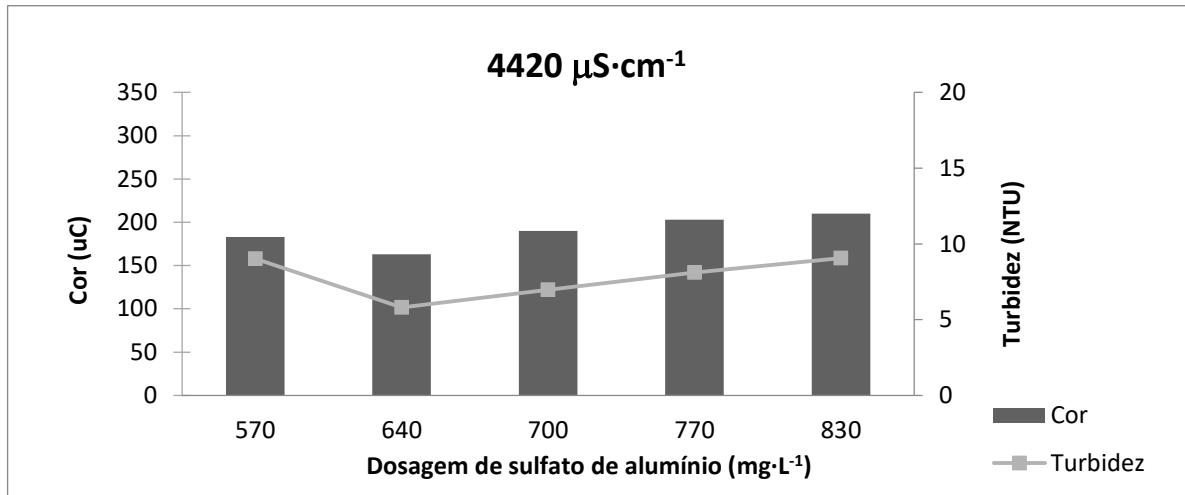
(Fonte: autora).

Figura 19. Resultados do flotateste para condutividade de $4370 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.



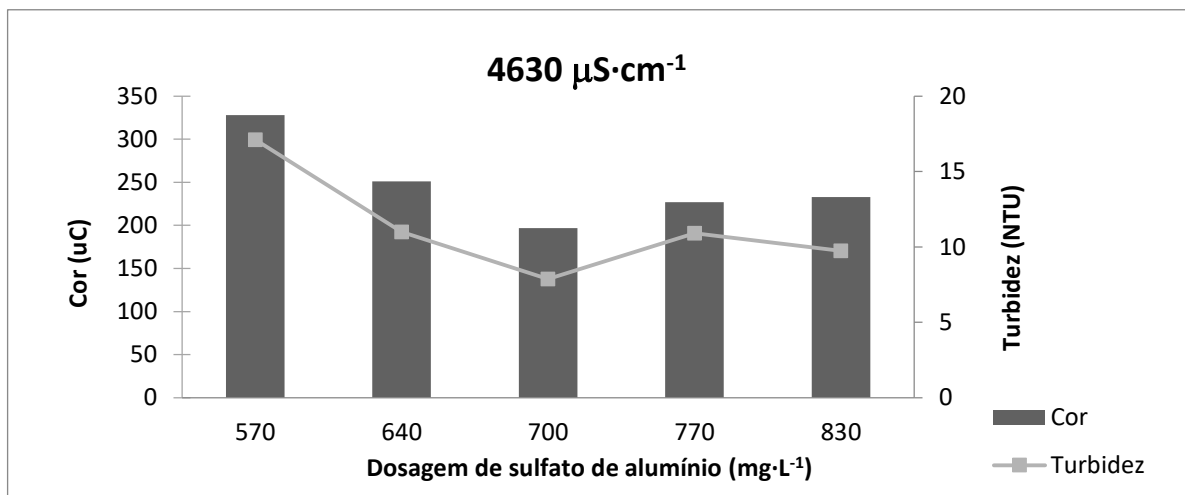
(Fonte: autora).

Figura 20. Resultados do flotateste para condutividade de $4420 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.



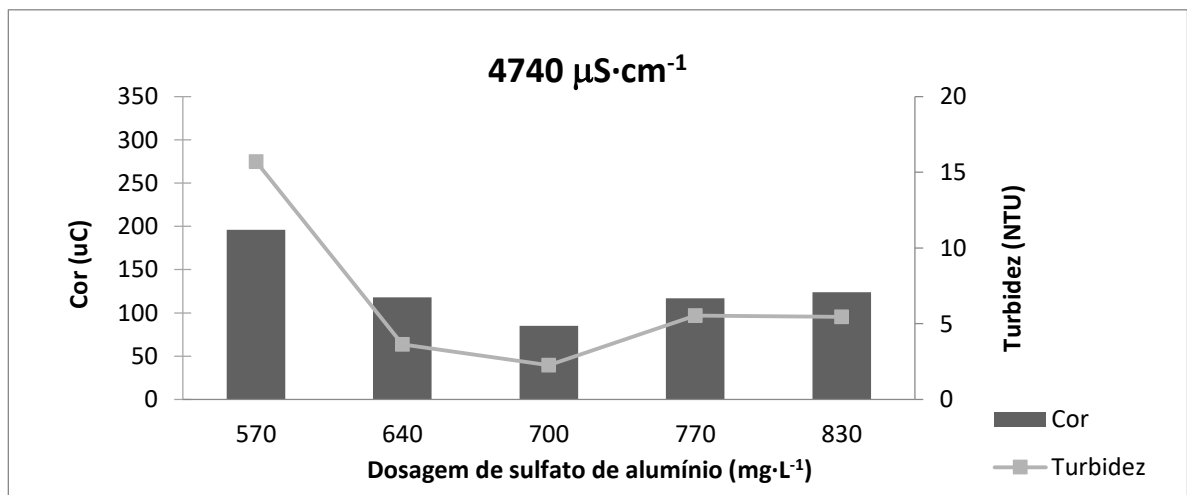
(Fonte: autora).

Figura 21. Resultados do flotateste para condutividade de $4630 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.



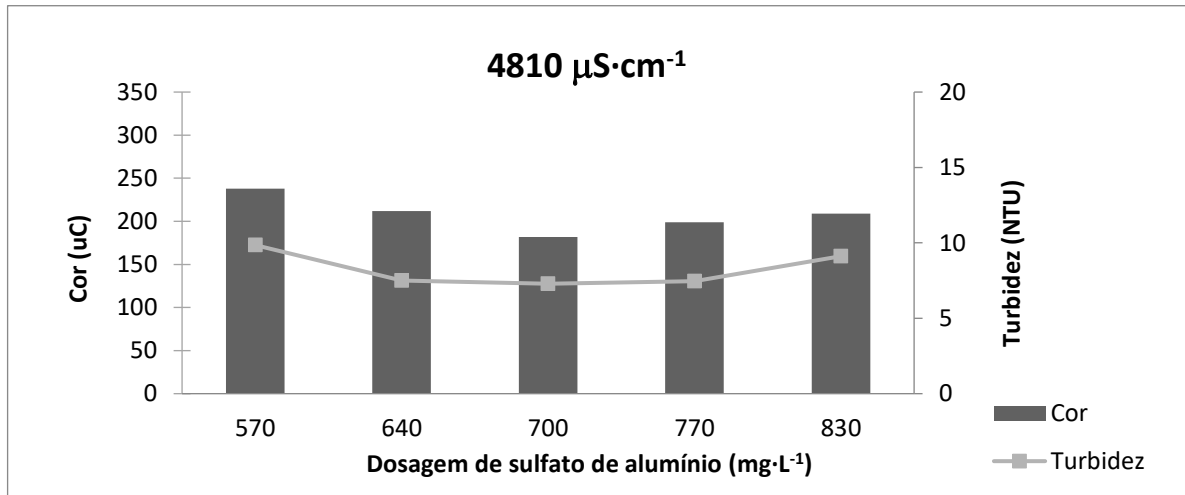
(Fonte: autora).

Figura 22. Resultados do flotateste para condutividade de $4740 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.



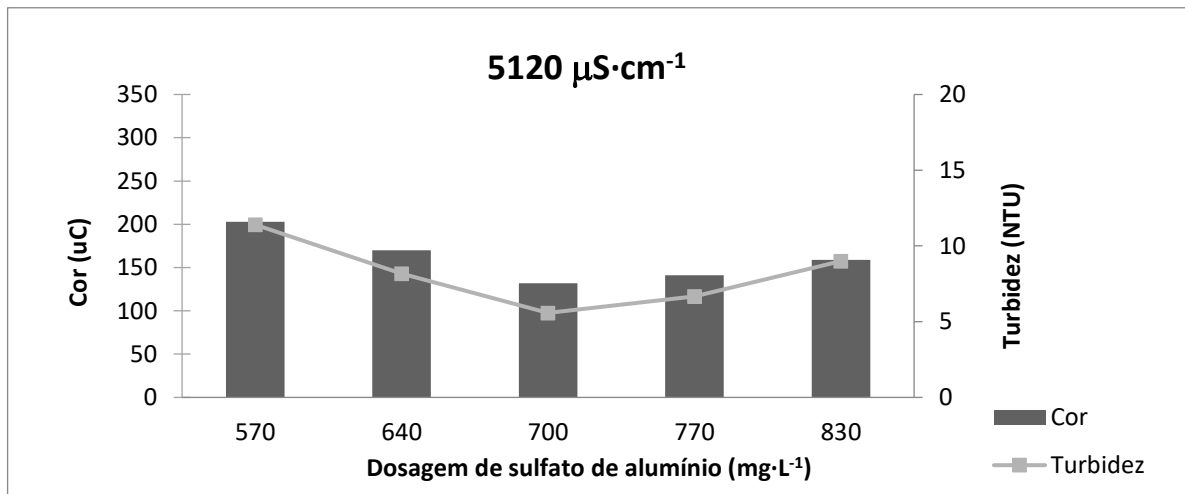
(Fonte: autora).

Figura 23. Resultados do flotateste para condutividade de $4810 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.



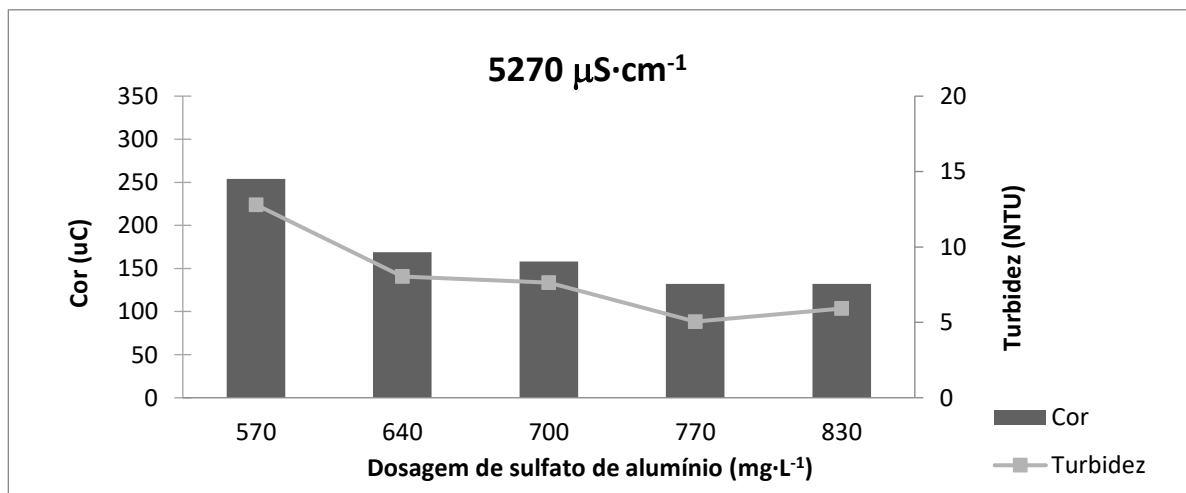
(Fonte: autora).

Figura 24. Resultados do flotateste para condutividade de $5120 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.



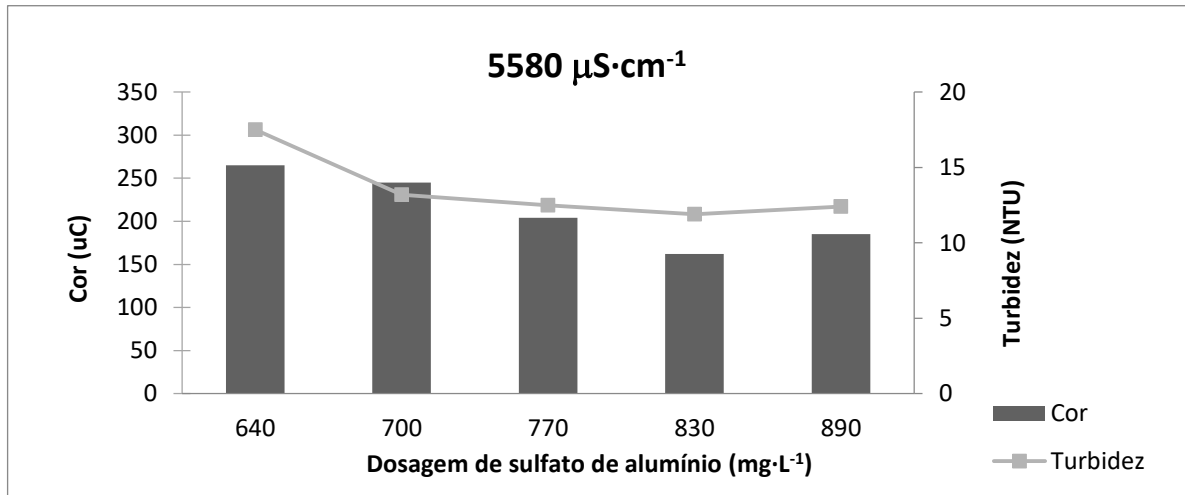
(Fonte: autora).

Figura 25. Resultados do flotateste para condutividade de $5270 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.



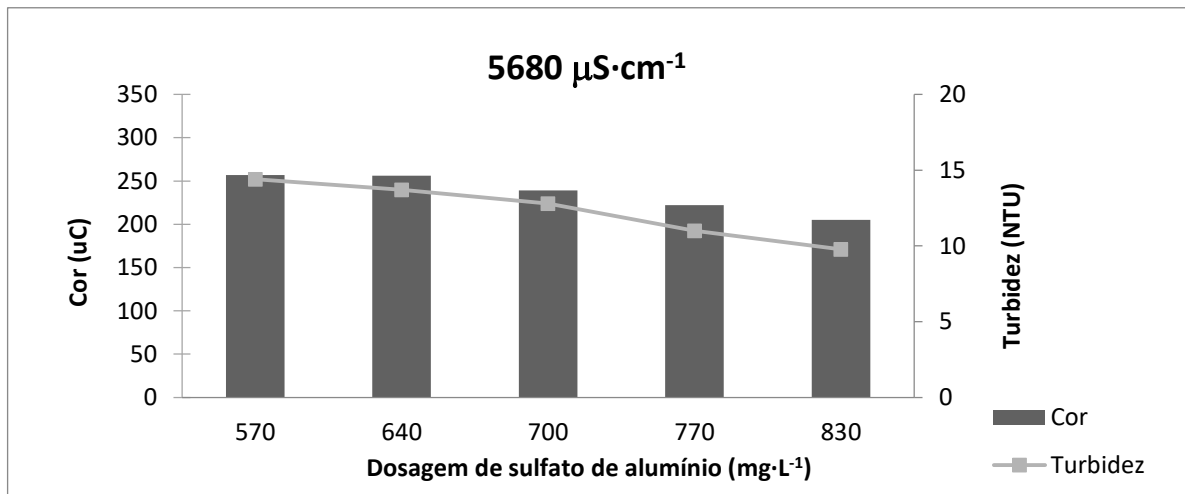
(Fonte: autora).

Figura 26. Resultados do flotateste para condutividade de $5580 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.



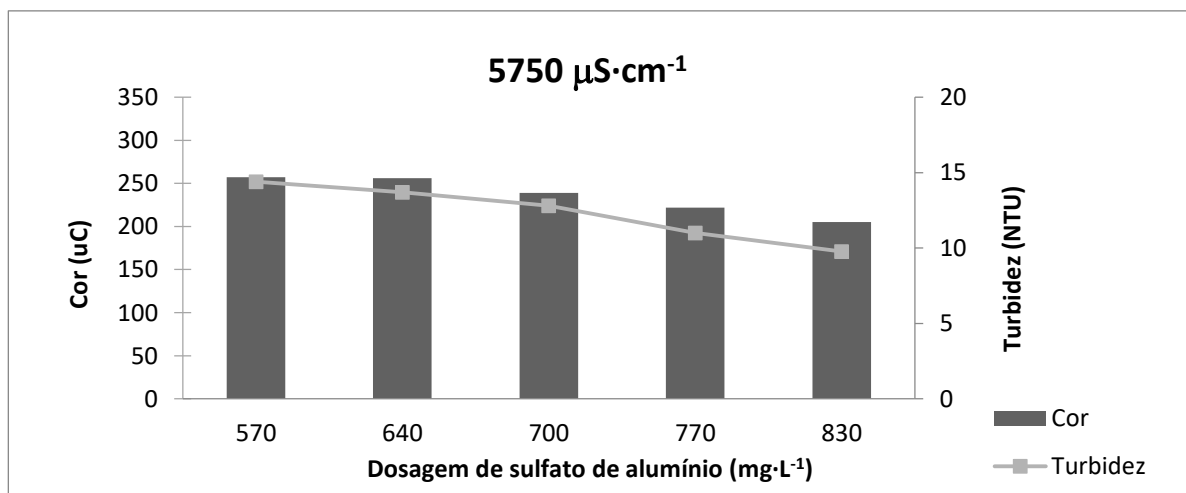
(Fonte: autora).

Figura 27. Resultados do flotateste para condutividade de $5680 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.



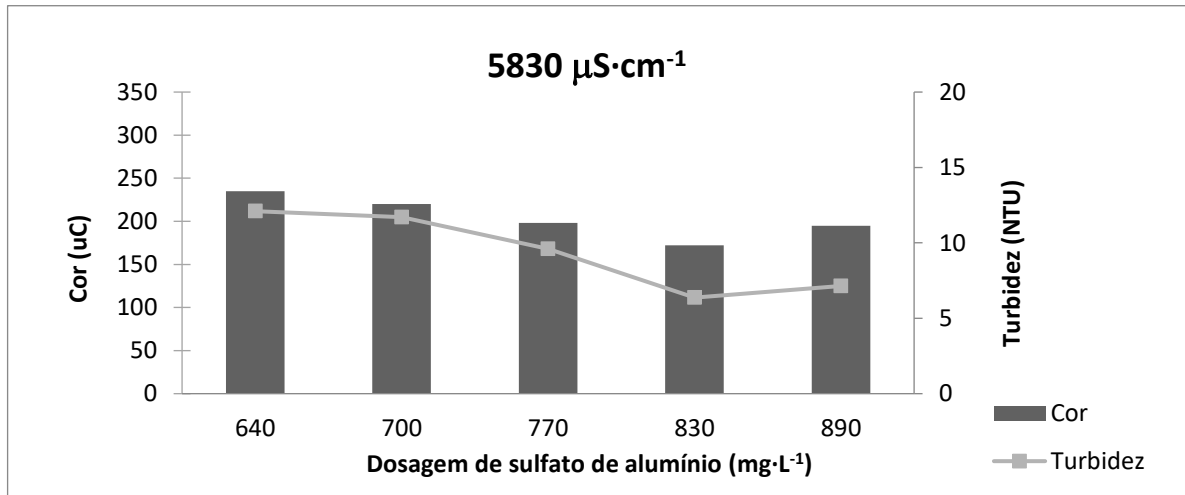
(Fonte: autora).

Figura 28. Resultados do flotateste para condutividade de $5750 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.



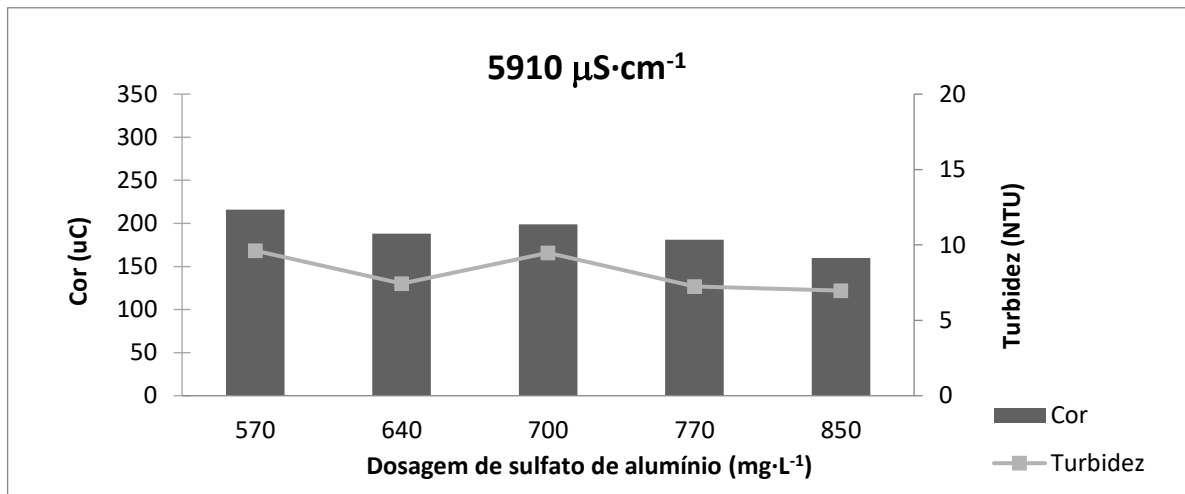
(Fonte: autora).

Figura 29. Resultados do flotateste para condutividade de $5830 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.



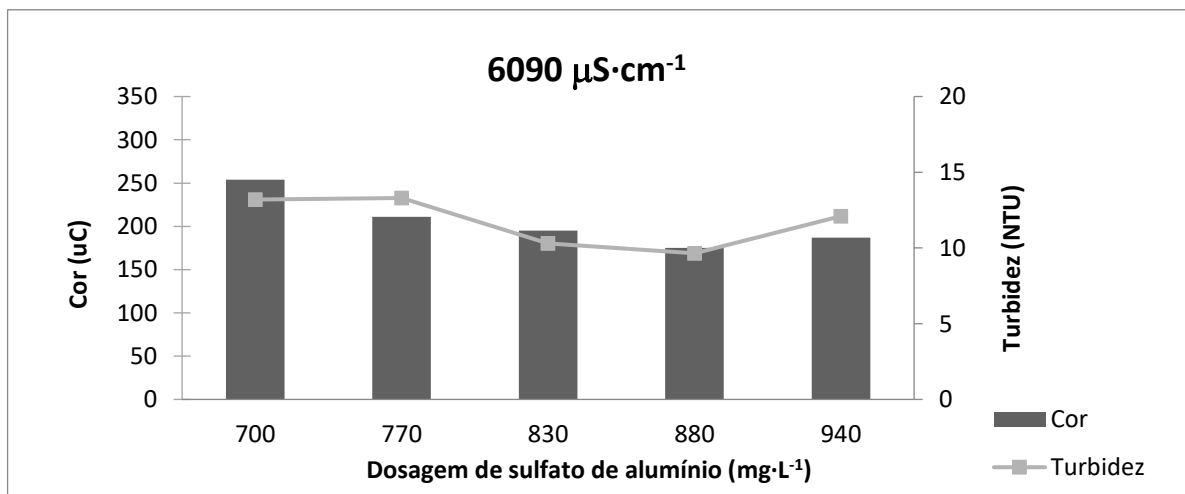
(Fonte: autora).

Figura 30. Resultados do flotateste para condutividade de $5910 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.



(Fonte: autora).

Figura 31. Resultados do flotateste para condutividade de $6090 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.



(Fonte: autora).

Nos gráficos das Figuras 17 a 31, é possível observar que há um ponto cujos valores de cor e turbidez são menores. Esse ponto foi o escolhido como sendo o representante da dosagem ótima de sulfato de alumínio para aquela condutividade. Pode-se notar que na maioria dos gráficos, logo após esse ponto de menor cor e turbidez, há um ponto cujos valores dessas mesmas variáveis aumentam. Isso indica que o aumento da dosagem de sulfato de alumínio não acarreta em melhores condições de efluente clarificado. Pelo contrário, caso seja adicionado mais coagulante do que o necessário, a qualidade do efluente pode ser piorada. Além disso, ressalta-se que o sulfato de alumínio possui impactos ao meio ambiente, à biota aquática e também à saúde humana. Ainda, dosar mais sulfato de alumínio que o necessário também acarreta em desperdício de produto químico e custo desnecessário para a empresa. Pode-se concluir que para condutividades menores, é necessária uma menor dosagem de sulfato de alumínio, enquanto que para condutividades mais elevadas, é necessário dosar mais coagulante.

A Tabela 1 apresenta os valores que foram escolhidos para o gráfico de dispersão matemática da dosagem de sulfato de alumínio em função da condutividade. Todos os valores são provenientes das Figuras 17 a 31 e do Anexo 1 e foram escolhidos por apresentarem a melhor condição de efluente clarificado após o flotatestes.

Tabela 1. Melhores dosagens de sulfato de alumínio em função da condutividade do efluente.

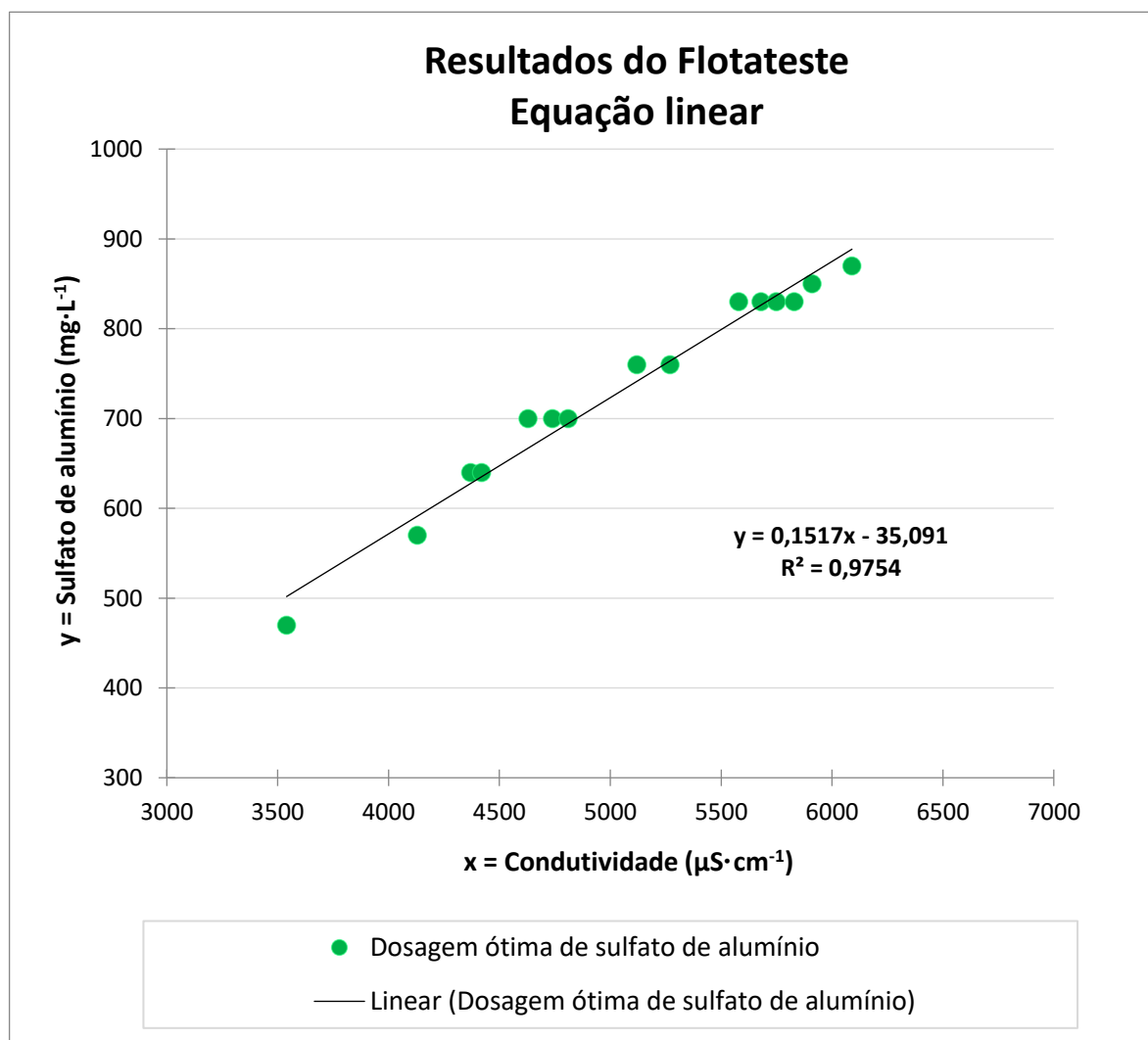
Condutividade ($\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$)	Dosagem ótima ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	Sólidos sedimentáveis ($\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$)
3540	470	0,00
4130	570	0,00
4370	640	0,00
4420	640	0,00
4630	700	0,00
4740	700	0,00
4810	700	0,00
5120	760	0,00
5270	760	0,00
5580	830	0,00
5680	830	0,00
5750	830	0,00
5830	830	0,00
5910	850	0,00
6090	870	0,00

(Fonte: autora).

Observa-se que com essa dosagem de sulfato de alumínio não houve a aparição de sólidos sedimentáveis em nenhuma das amostras coletadas para a realização de teste de sedimentação com cone Imhoff. Portanto, esses valores mostraram-se adequados para serem aplicados no tratamento terciário em cada uma das condutividades especificadas.

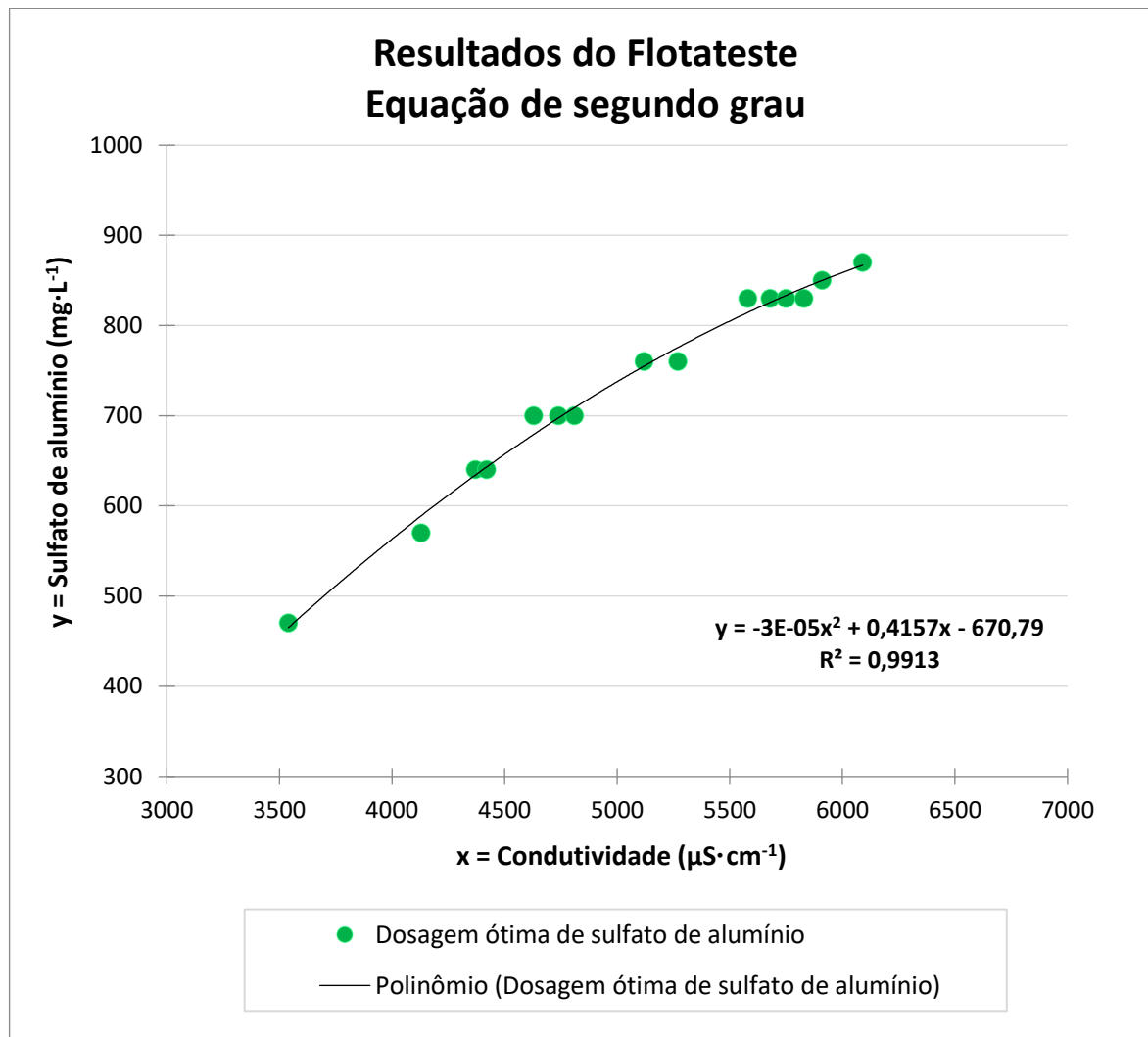
O gráfico de dispersão matemática, gerado pelo Excel, mostrou que há uma correlação entre a dosagem de sulfato de alumínio e a condutividade de entrada do efluente. Para avaliar o comportamento da correlação matemática, foi testada uma correlação linear (Figura 32), uma correlação de segundo grau (Figura 33) e uma correlação com o logaritmo natural (Figura 34).

Figura 32. Correlação matemática linear da dosagem de sulfato de alumínio ótima e a condutividade do efluente de entrada.



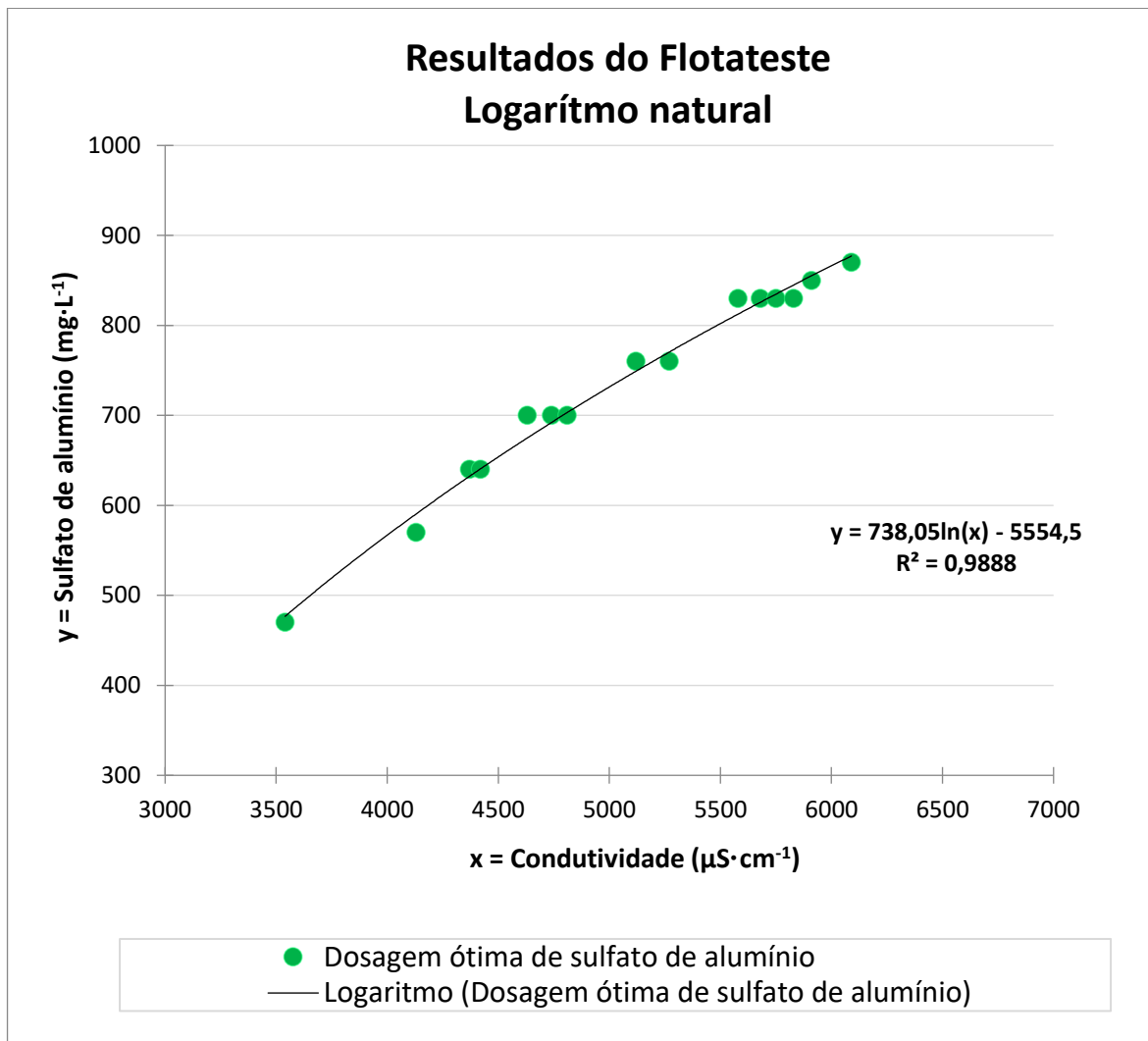
(Fonte: autora).

Figura 33. Correlação matemática de segundo grau entre a dosagem de sulfato de alumínio ótima e a condutividade do efluente de entrada.



(Fonte: autora).

Figura 34. Correlação matemática logarítmica natural entre a dosagem de sulfato de alumínio ótima e a condutividade do efluente de entrada.



(Fonte: autora).

A partir das Figuras 32, 33 e 34, observa-se que de fato a dosagem de sulfato de alumínio possui correlação com a condutividade do efluente. As três curvas apresentaram um bom coeficiente de correlação matemática e poderiam ser utilizadas para determinação da quantidade de coagulante a ser adicionada na etapa terciária de tratamento de efluentes.

Buscando escolher qual das curvas seria melhor a ser aplicada, a Tabela 2 mostra a comparação entre os resultados fornecidos pela equação linear, equação de segundo grau e equação de logaritmo natural e os resultados dos testes de bancada.

Tabela 2. Comparação entre as equações propostas e o resultado do flotateste.

Condutividade ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	Dosagem ótima de sulfato de alumínio ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	Equação linear ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) $R^2= 0,975$	Equação de segundo grau ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) $R^2 = 0,991$	Equação de logaritmo natural ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) $R^2 = 0,989$
3540	470	502	425	477
4130	570	591	569	591
4370	640	628	612	632
4420	640	635	620	641
4630	700	667	654	675
4740	700	684	671	692
4810	700	695	682	703
5120	760	742	724	749
5270	760	764	742	770
5580	830	811	775	813
5680	830	827	785	826
5750	830	837	791	835
5830	830	849	798	845
5910	850	861	805	855
6090	870	889	818	877

(Fonte: autora).

Em virtude do apresentado pelas Figuras 32, 33 e 34, observa-se que a utilização de uma Equação linear consegue representar bem a correlação existente entre a condutividade do efluente da empresa e a quantidade de sulfato de alumínio que deve ser adicionada. A Equação linear também apresenta resultados semelhantes aos observados na realização dos ensaios de bancada, como foi visto na Tabela 2. Nessa Tabela observa-se que a resposta da equação linear é melhor que a resposta do polinômio de segundo grau. A Equação do logaritmo natural também apresenta bons resultados. Porém, buscando a utilização de uma equação mais simples e que seja mais facilmente empregada na rotina da fábrica, escolheu-se a Equação Linear como resultado final.

A Equação proposta (Equação 2) aplica-se para uma faixa de valores de 3540 a 6090 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, representando o intervalo de condutividade nas quais os ensaios de bancada foram realizados. Essa equação representa as condutividades mais usualmente encontradas na entrada da etapa terciária de tratamento de efluentes.

$$\text{Dosagem de coagulante} = (0,1517 \times C_{efl}) - 35,091 \quad (2)$$

Onde:

Dosagem coagulante = Dosagem de sulfato de alumínio a ser adicionada, em $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

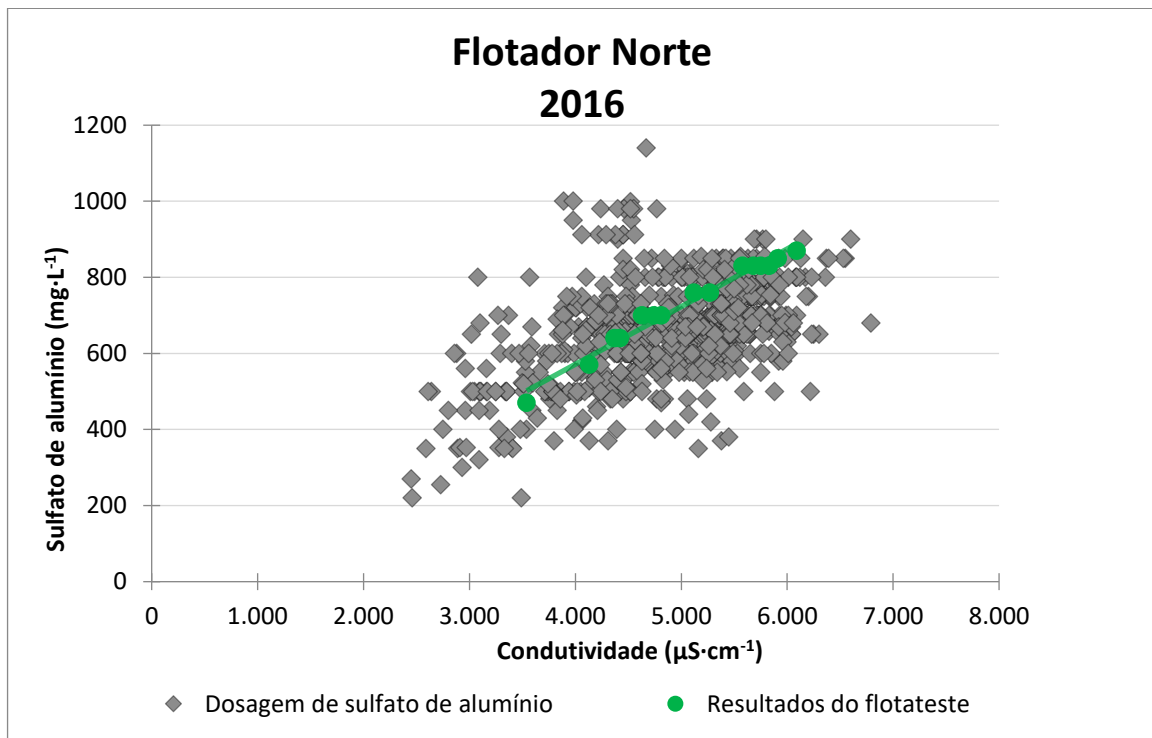
C_{efl} = Condutividade de entrada do efluente na etapa terciária de tratamento, em $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.

Os ensaios de flotatestes foram realizados com as condições reais da planta. A faixa de valores que a equação se aplica foi obtida em função das condutividades em que foi possível realizar os testes. Caso a condutividade atinja valores inferiores a $3540 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ou superiores a $6090 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, recomenda-se que sejam realizados ensaios de flotatestes (segundo a mesma metodologia descrita no trabalho) para verificar a dosagem apropriada de coagulante a ser adicionada.

5.2 OTIMIZAÇÃO DOS CUSTOS DE DOSAGEM DE SULFATO DE ALUMÍNIO

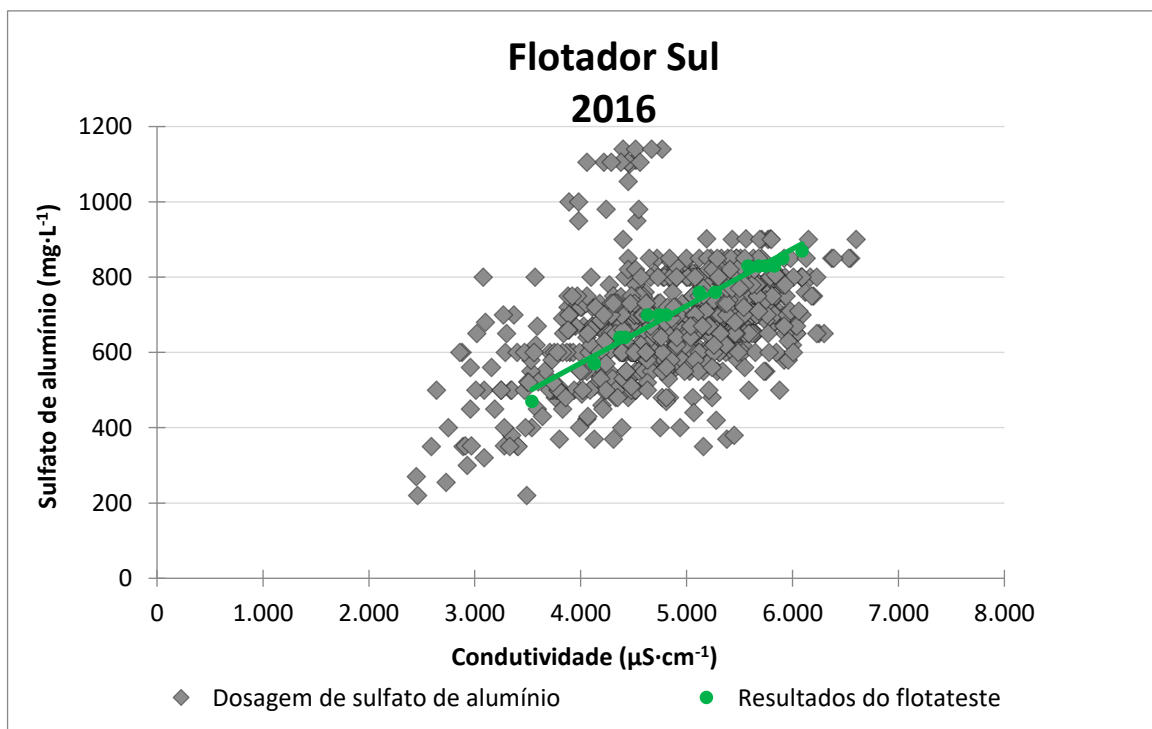
As Figuras 35 a 40 apresentam a forma em que foi dosado o sulfato de alumínio nos anos de 2016, 2017 e 2018 (até abril) na empresa (tanto para o flotador norte quanto para o flotador sul). Em cada um desses gráficos, foi plotado (em verde) a Equação 2, visando a comparação entre a equação proposta e o que foi dosado de sulfato de alumínio durante o período avaliado.

Figura 35. Comparação entre o padrão de dosagem de sulfato de alumínio pela operação no flotor norte e a curva proposta com os resultados do flotateste (jan a dez de 2016).



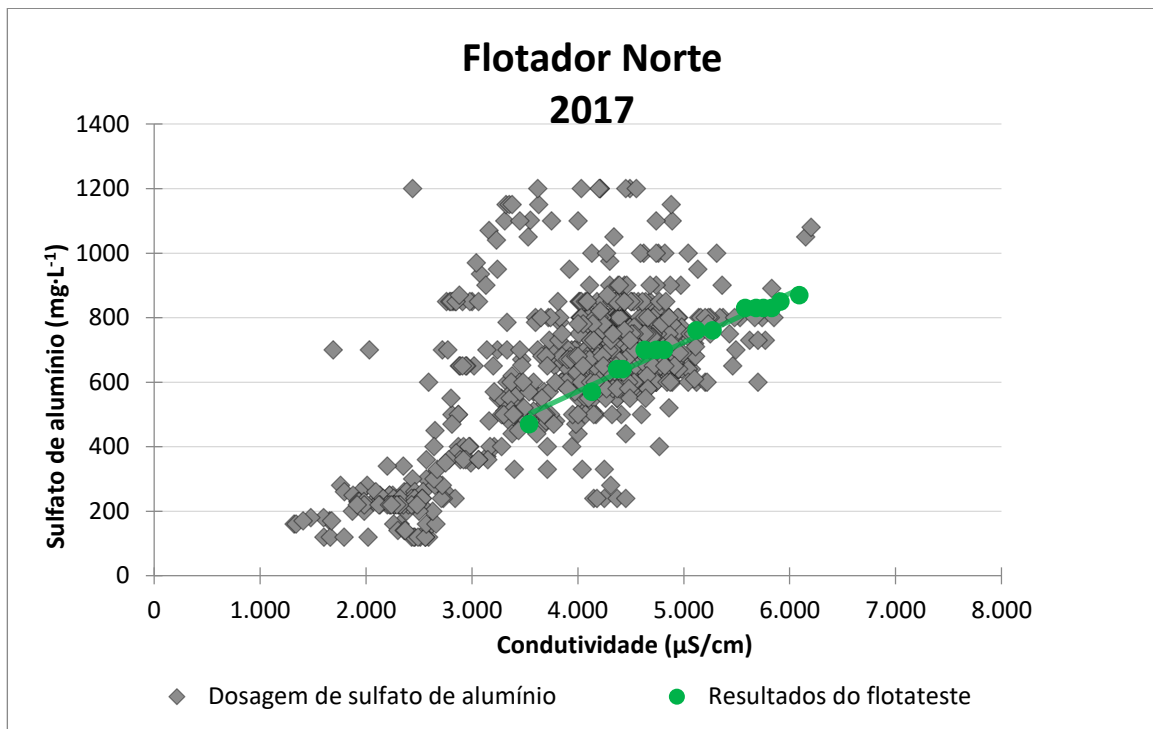
(Fonte: autora).

Figura 36. Comparação entre o padrão de dosagem de sulfato de alumínio pela operação no flotor sul e a curva proposta com os resultados do flotateste (jan a dez de 2016).



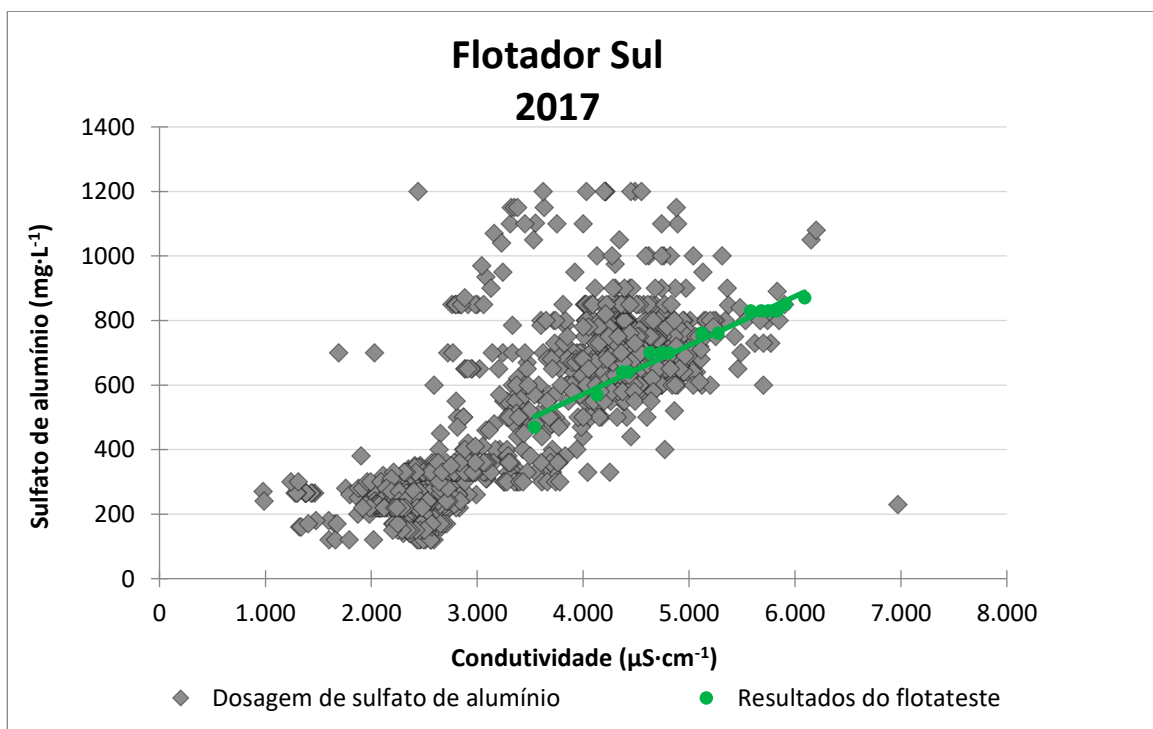
(Fonte: autora).

Figura 37. Comparação entre o padrão de dosagem de sulfato de alumínio pela operação no flotor norte e a curva proposta com os resultados do flotateste (jan a dez de 2017).



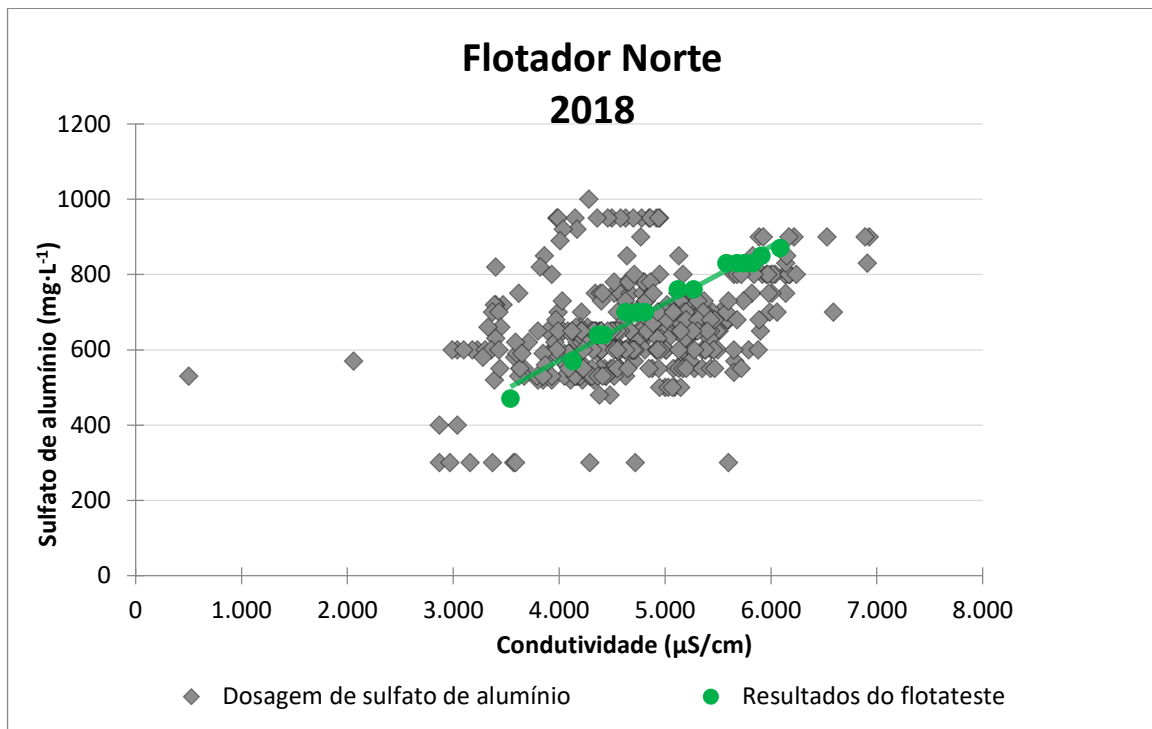
(Fonte: autora).

Figura 38. Comparação entre o padrão de dosagem de sulfato de alumínio pela operação no flotor sul e a curva proposta com os resultados do flotateste (jan a dez de 2017).



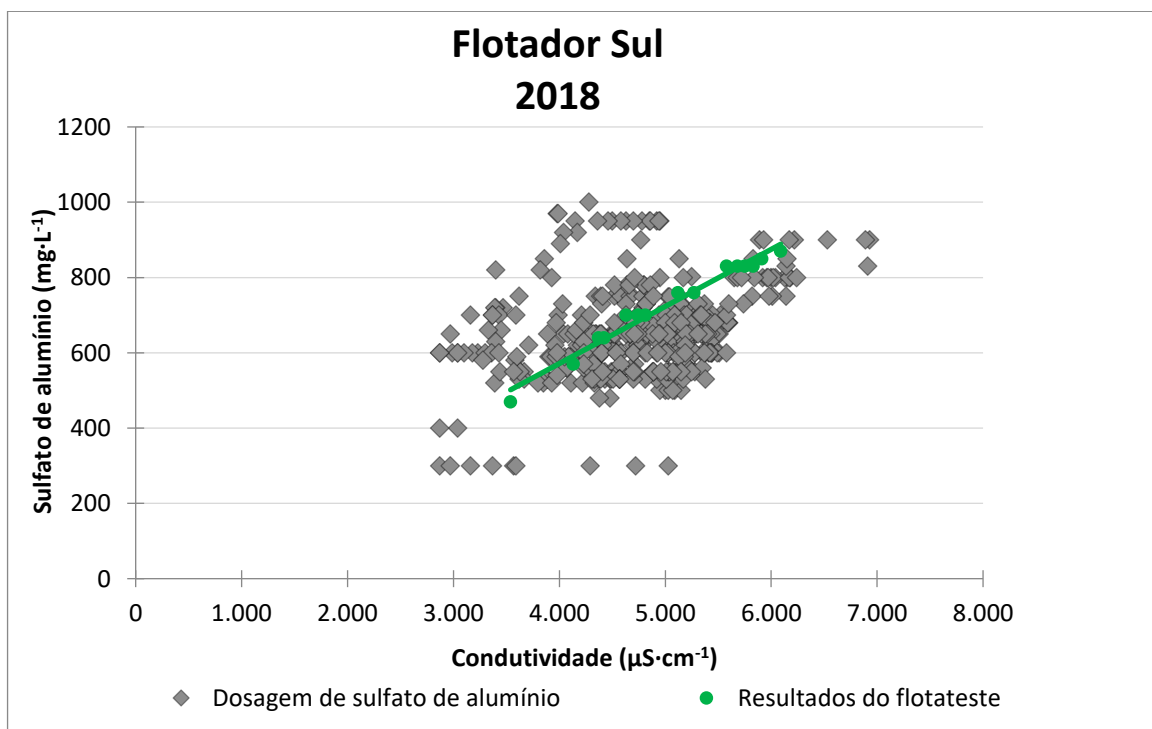
(Fonte: autora).

Figura 39. Comparação entre o padrão de dosagem de sulfato de alumínio pela operação no flotor norte e a curva proposta com os resultados do flotateste (jan a abr de 2018).



(Fonte: autora).

Figura 40. Comparação entre o padrão de dosagem de sulfato de alumínio pela operação no flotor sul e a curva proposta com os resultados do flotateste (jan a abr de 2018).



(Fonte: autora).

Observa-se, pelas Figuras 35 a 40 que a dosagem de sulfato de alumínio não estava sendo correlacionada com a condutividade do efluente. Comparando com a equação proposta, algumas situações nas quais foi dosada uma quantidade acima do necessário de sulfato de alumínio poderiam ter sido evitadas. Da mesma forma, também houve situações na qual foi dosada uma quantidade inferior ao que a equação proposta indica.

Ao comparar os dados analisados com a Equação 2 (no intervalo de 3540 a 6090 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), observa-se que existem momentos onde foi dosado menos sulfato de alumínio que o proposto na equação. Porém, na maioria das vezes houve uma dosagem maior do que a necessária de sulfato de alumínio, principalmente no ano de 2017.

Calculando-se essa diferença, foi encontrado que no período de janeiro de 2016 a abril de 2018, foram dosadas aproximadamente 150 toneladas de sulfato de alumínio a mais do que o necessário no flotor norte e 200 toneladas a mais de sulfato de alumínio do que o necessário no flotor sul, totalizando 350 toneladas. Cada tonelada de sulfato de alumínio custa R\$ 423,06 (valores de maio de 2018). Com isso, nesse período houve um gasto de R\$ 148.071 que poderia ter sido evitado com a aplicação da equação sugerida (Equação 2). Em média poderiam ter sido economizados R\$ 5.300 por mês e R\$ 176 por dia.

Além disso, analisando somente os pontos localizados acima da equação linear proposta, calculou-se que foram dosadas 2.477 toneladas em excesso no flotor norte e 2.625 toneladas em excesso no flotor sul. Isso resultou em um custo para a empresa de R\$ 2.158.425,12.

5.3 AVALIAÇÕES DOS EVENTOS DE ULTRAPASSAGEM DE SÓLIDOS SEDIMENTÁVEIS

No período de janeiro de 2016 a abril de 2018 foram registrados 65 episódios de ultrapassagem de sólidos sedimentáveis. Considerando que nesse período houve 850 dias, em 7,65% dos dias ocorreu a ultrapassagem desse parâmetro.

Avaliando as possíveis causas que ocasionaram essas situações e aplicando a Equação 2 nesses eventos (Tabela 3), observou-se que em vinte e seis das vezes em que o valor de sólidos sedimentáveis foi maior que 1,0 $\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$ a dosagem de sulfato de alumínio foi inferior ao que a equação indicava. Já em outras vinte e quatro ocasiões foram dosadas valores acima do indicado pela equação proposta. Em outras três datas ocorreram mudanças bruscas na

condutividade, que não foram acompanhadas pela mudança na dosagem de coagulante. Também houve três eventos em que provavelmente o motivo foi a baixa dosagem de polímero. Em nove desses eventos não foi possível realizar a investigação porque a condutividade estava muito abaixo do valor para o qual a equação proposta (Equação 2) aplica-se. Portanto, a causa mais provável, em 77% das ultrapassagens de sólidos sedimentáveis, é a de dosagem inadequada de sulfato de alumínio, tanto acima do recomendado pela Equação 2, quanto abaixo.

Tabela 3. Motivos prováveis para ultrapassagens de sólidos sedimentáveis.

Dosagem de sulfato de alumínio inferior ao indicado pela equação.	26
Dosagem de sulfato de alumínio superior ao indicado pela equação.	24
Não foi possível avaliar (condutividades abaixo de $3540 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$).	9
Mudança de condutividade não foi acompanhada pela mudança de dosagem de sulfato de alumínio.	3
Dosagem de polímero inferior ao valor médio aplicado.	3
Total	65

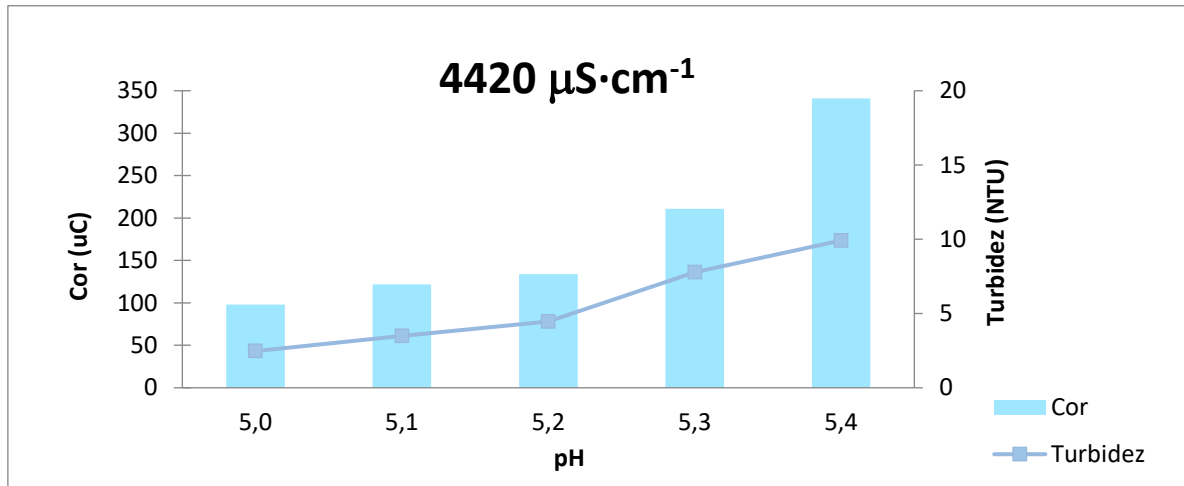
(Fonte: autora).

5.4 pH IDEAL DE FLOCULAÇÃO.

O efluente chega ao tratamento terciário com pH em torno de 7,0. Ao ser adicionado sulfato de alumínio ele atinge o valor de aproximadamente 6,4 e, então, é adicionado ácido sulfúrico para que se atinja uma faixa de valor adequada para o processo de coagulação. Atualmente a empresa utiliza uma faixa de pH de 5,2 a 5,4 para a etapa de coagulação-flotação com sulfato de alumínio.

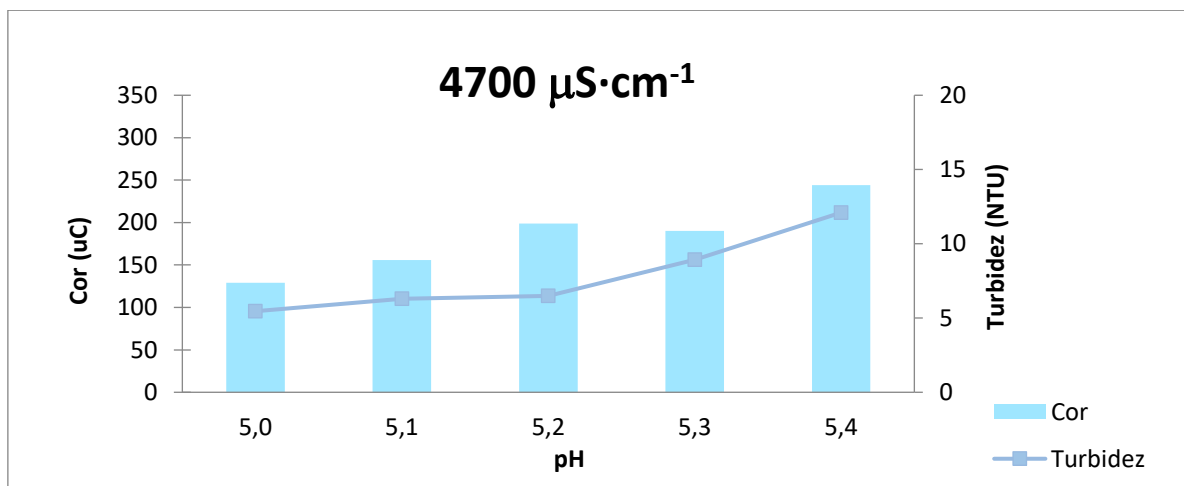
Foram realizados cinco ensaios de flotatestes para avaliar a influência do pH em diferentes condutividades. Foram testadas as condutividades de 4420, 4700, 5690, 5800 e $6000 \mu\text{S cm}^{-1}$ (Figuras 41 a 45).

Figura 41. Variação do pH para condutividade de $4420 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.



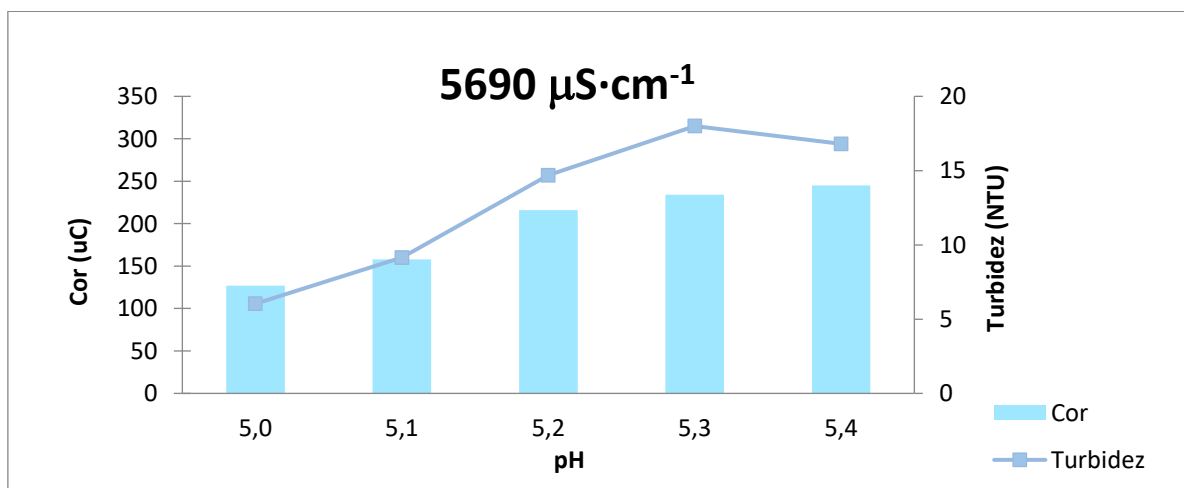
(Fonte: autora).

Figura 42. Variação do pH para condutividade de $4700 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.



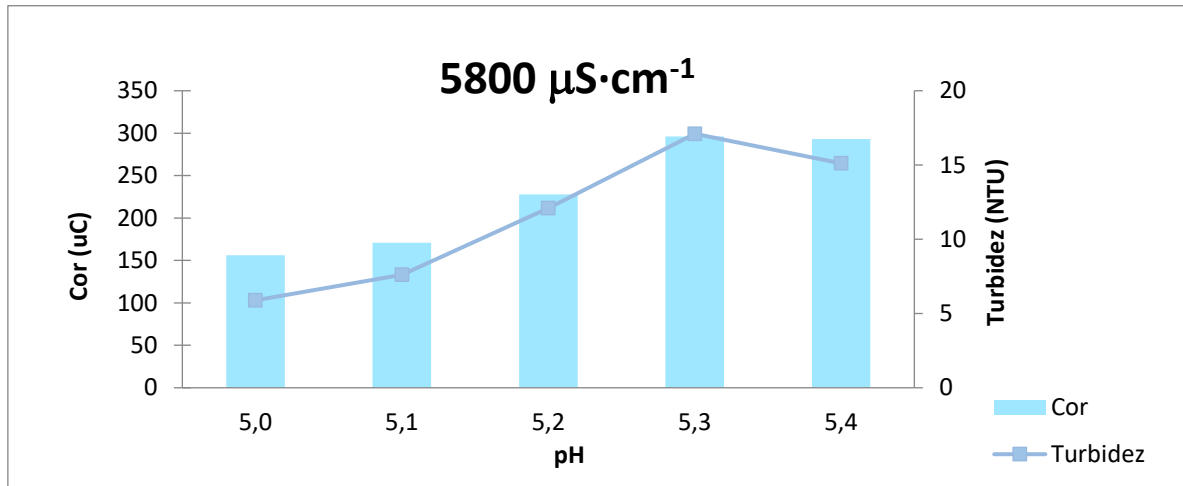
(Fonte: autora).

Figura 43. Variação do pH para condutividade de $5690 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.



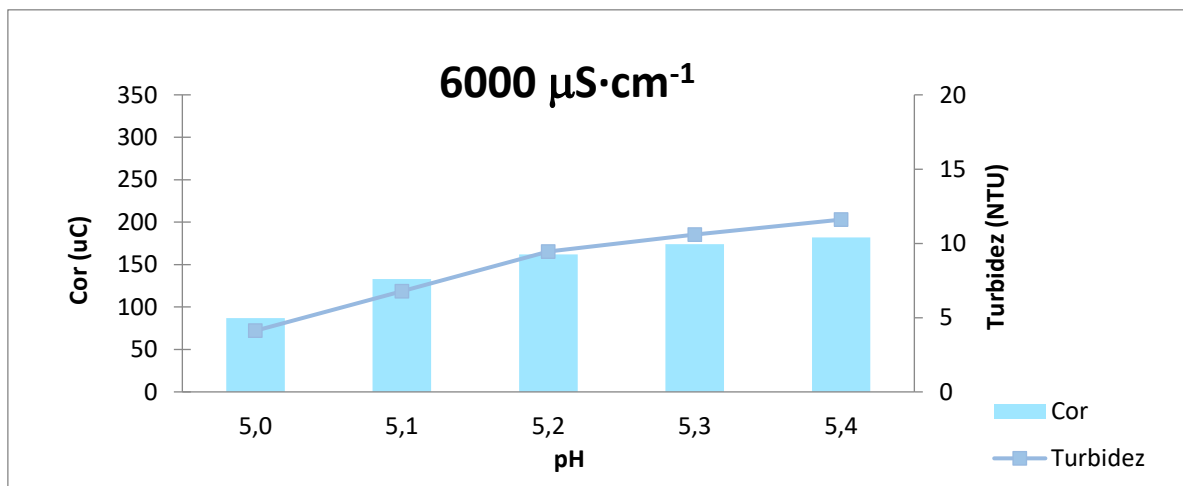
(Fonte: autora).

Figura 44. Variação do pH para condutividade de $5800 \mu\text{S cm}^{-1}$.



(Fonte: autora).

Figura 45. Variação do pH para condutividade de $6000 \mu\text{S cm}^{-1}$.



(Fonte: autora).

Observa-se pelas Figuras 41 a 45 que há uma tendência de aumento de cor e condutividade a partir do aumento do pH. O pH 5,0 foi o que apresentou os melhores resultados para todas as análises. Além disso, pode-se inferir que o pH não possui correlação com a condutividade, visto que as análises apresentaram tendências semelhantes.

Todavia, é observado acréscimo de cor e turbidez à medida que o pH aumenta, havendo variações expressivas mesmo em variações pequenas de pH (0,1). Visto que o valor de 5,2 atende aos parâmetros ambientais da licença de operação (sólidos sedimentáveis) assim como apresenta bons resultados de cor e turbidez, é possível aferir que seja mantido esse valor para a etapa de floculação. Os valores de pH 5,0 e 5,1 apresentam melhores resultados de cor e turbidez. Todavia, a redução do pH para esse valor acarretaria em um maior consumo de

ácido sulfúrico, assim como a elevação do pH para o efluente final (que deve ser na faixa de 6,0 a 8,0), implicaria em um maior consumo de soda cáustica.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Esse trabalho foi oriundo do objetivo de encontrar uma solução para que a empresa de celulose e papel CMPC Celulose Riograndense não registrasse mais eventos de ultrapassagem de sólidos sedimentáveis no efluente tratado. Para isso, a etapa terciária da estação de tratamento de efluentes da linha Guaíba 2 da empresa foi estudada. Buscou-se uma correlação matemática para indicar aos operadores da ETE qual a quantidade de coagulante (sulfato de alumínio) que deve ser adicionada de acordo com a condição de entrada do efluente nessa etapa do processo.

O objetivo geral do estudo foi atingido, pois foi notado que a condutividade do efluente que está entrando na etapa terciária de tratamento possui correlação matemática com a quantidade de sulfato de alumínio que precisa ser adicionada para garantir um efluente tratado de boa qualidade. Assim, conseguiu-se encontrar para diferentes valores de condutividade, uma dosagem de coagulante que permitisse bons valores de cor e turbidez finais, e, principalmente, que não apresentasse sólidos sedimentáveis. Da mesma forma, também foi encontrado qual o melhor valor de pH para realizar a etapa de coagulação-floculação.

Com a criação dessa correlação, que gerou como produto final uma equação linear, será possível realizar uma padronização da operação. Dessa forma, quando o operador verificar a condutividade do efluente que está chegando na etapa terciária de tratamento, ele poderá aplicar a equação e verificar quanto de sulfato de alumínio deve ser adicionado. Caso seja instalado um condutivímetro online nessa etapa de tratamento, pode-se ainda, automatizar essa operação.

Além disso, a equação proposta também mostrou bons resultados quanto à otimização dos custos da dosagem de químicos. Comparando a dosagem realizada com a dosagem que poderia ter sido aplicada na ETE, viu-se que poderiam ter sido economizados cento e cinquenta mil reais no período de dois anos e quatro meses se a equação tivesse sido aplicada nos valores de 3540 a 6090 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.

A correlação matemática entre a condutividade e a dosagem de sulfato de alumínio pode ser justificada pelo fato de que os efluentes setoriais das empresas de celulose e papel que têm maior potencial poluidor possuem também condutividades elevadas. Por isso, quando a condutividade está mais baixa, menos coagulante é necessário para atingir um efluente final

de boa qualidade. Da mesma forma, quando há um aumento de condutividade, deve haver também um aumento da dosagem de coagulante para que o efluente tratado esteja dentro dos padrões legislados. Assim, a hipótese do estudo foi confirmada e chegou-se a uma equação da reta com bom coeficiente de determinação (R^2).

A aplicação do equipamento flotateste foi fundamental para a realização desse estudo. Esse equipamento conseguiu simular a etapa de flotação por ar dissolvido da ETE, sendo possível ajustar todos os seus parâmetros conforme a situação real. Demonstra-se, assim, a importância da realização de ensaios de bancada para a tomada de decisão das práticas operacionais mais adequadas a serem aplicadas em escala real.

Durante a execução do estudo foi encontrado como dificuldade o fato de que nem todas as faixas de condutividade puderam ter sido avaliadas. Priorizou-se a condição real do efluente, sem diluí-lo ou concentrá-lo. Por isso, a faixa de condutividade estudada dependeu das circunstâncias operacionais. Além disso, como a empresa estava em processo de mudança de fornecedor de polímero, não puderam ser realizados flotatestes para identificar se existe alguma correlação entre a dosagem de polímero e algum parâmetro de entrada do efluente.

Dessa forma, recomenda-se para estudos futuros que sejam realizados mais ensaios de flotateste, buscando aumentar a faixa de aplicação da equação proposta e aumentar o coeficiente de determinação da equação. Também se sugere que o mesmo estudo seja realizado para buscar uma otimização da dosagem de polímero na etapa terciária de tratamento de efluentes.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, J. E. *Processos de tratamento terciário para redução da DQO e cor dos efluentes de uma fábrica integrada de celulose Kraft branqueada e papel*. 2013. 68f. Dissertação (Mestrado Profissional em Tecnologia de Celulose e Papel). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

ASHRAFI, O.; YERUSHALMI, L.; HAGHIGHAT, F. Wastewater treatment in the pulp-and-paper industry: a review of treatment processes and the associated greenhouse gas emission. **Journal of Environmental Management**. v. 158, p. 146-157, agosto de 2015.

BRASIL, 1997. Lei Federal nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional dos Recursos Hídricos. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19433.htm> Acesso em: março de 2018.

CASAGRANDE, L. E. M.; FREITAS, B. O.; NASCIMENTO, M. F. Sistema combinado de flotação por ar dissolvido e filtração adsortiva em zeólita para tratamento de efluente de reator UASB. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**. v. 12, n, p. 1-11. 2016.

CAVALCANTI, J. E. W. A. **Manual de Tratamento de efluentes industriais**. 2 ed. São Paulo, 2012. 500 p.

CELULOSE RIOGRANDENSE. **História**. Guaíba. 2017. Disponível em: <<http://www.celuloseriograndense.com.br/empresa/historia>> Acesso em: dezembro de 2017.

CELULOSE RIOGRANDENSE. **Celulose**. Guaíba. 2018. Disponível em: <<http://www.celuloseriograndense.com.br/produtos>> Acesso em: abril de 2018.

CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos, 2008. Resolução nº 91, de 05 de novembro de 2008. Dispõe sobre procedimentos gerais para o enquadramento dos corpos de água superficiais e subterrâneos. Disponível em: <<http://portalpnqa.ana.gov.br/Publicacao/RESOLU%C3%87%C3%83O%20CNRH%20n%C2%BA%2091.pdf>> Acesso em: março de 2018.

COMITÊ DO LAGO GUAÍBA. Enquadramento. Disponível em: <<http://comitedolagoguaiba.com.br/enquadramento/>> Acesso em: março de 2018.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente, 1997. Resolução nº 237, de 19 de dezembro de 1997. Dispõe sobre a revisão e complementação dos procedimentos e critérios utilizados para o licenciamento ambiental. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=237>> Acesso em: março de 2018.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2005. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>> Acesso em: março de 2018.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2011. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res11/res43011.pdf> > Acesso em: março de 2018.

CONSEMA – Conselho Estadual do Meio Ambiente, 2017. Resolução nº 355, de 19 de julho de 2017. Dispõe sobre os critérios e padrões de emissão de efluentes líquidos para as fontes geradoras que lancem seus efluentes em águas superficiais no Estado do Rio Grande do Sul. Disponível em: < http://www.laboratoriogreenlab.com.br/images/pdf_gerais/Consema_355-2017.pdf> Acesso em: março de 2018.

COUTINHO, W. *Emprego da flotação por ar dissolvido no tratamento de cursos d'água – avaliação de desempenho da estação de tratamento dos córregos Ressaca e Sarandi afluentes à represa da Pampulha*. 2007. 118 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

DA COSTA, L. P. B. *Modelagem caixa-preta e otimização de uma caldeira de recuperação Kraft*. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Química).2017. 52 f. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

DA SILVA, L. A. A. *Separação de cristais de estruvita de percolado de lodo por flotação por ar dissolvido*. 2013. 57 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

DE MARINS, G. *Caracterização do licor negro de eucalipto para avaliação do potencial de incrustação em evaporadores*. 2012. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

DI BERNARDO, L.; CENTURIONE FILHO, P. L. Procedimento para execução de ensaios de flotação/filtração em equipamento de bancada. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 8, n. 1;2, p. 39-44, Rio de Janeiro, 2003.

FEPAM – FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUÍS ROESSLER. **Guia básico do licenciamento ambiental**. 2016. Disponível em: <http://www.fepam.rs.gov.br/licenciamento/documentos/Guia_Basico_Lic.pdf> Acesso em: março de 2018.

FOELKEL, C. Aspectos práticos e conceituais sobre a fabricação de celulose de mercado tipo Kraft branqueada a partir de madeira de eucalipto. In: **Eucalyptus Online Book**. 2013. cap. 31. Disponível em: <http://eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT31_ProcessoKraftEucalipto.pdf> Acesso em: março de 2018.

FOELKL, C. Aplicações da biotecnologia em processos ambientais da fabricação de celulose Kraft e de papel de eucalipto: processos aeróbicos por lodos ativados para tratamento de efluentes. In: **Eucalyptus Online Book**. 2014. cap. 34. Disponível em: <http://eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT34_Lodos_Ativados.pdf> Acesso em: janeiro de 2018.

FURLEY, T. H.; DE MELLO, F. A.; SIQUEIRA, J. B. L. Principais questões ambientais causadas pelos efluentes de fábricas de celulose da América Latina. **O Papel**. São Paulo, vol. 79, n 4, p 70-77. Abril de 2018.

GIORDANO, G. Tratamento e controle de efluentes industriais. **Revista ABES**, v. 4, n. 76. Rio de Janeiro, 2004.

IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES **Celulose**. São Paulo, 16 de abril de 2015. Disponível em: < <http://iba.org/pt/produtos/celulose>> Acesso em: 30 de abril de 2018.

IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES **Relatório 2017**. São Paulo. Disponível em: <http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf> Acesso em: 30 de abril de 2018.

KAMALI, M.; KHODAPARAST, Z. Review on recent developments on pulp and paper mill wastewater treatment. **Ecotoxicology and Environmental Safety**. n 114. p. 326-342. 2015.

KLIDI, N.; CLEMATIS, D.; DELUCCHI, M.; GADRI, A.; AMMAR, S.; PANIZZA, M. Applicability of electrochemical methods to paper mill wastewater for reuse. Anodic oxidation with BDD and TiRuSnO₂ anodes. **Journal of Electroanalytical Chemistry**. v. 815. p. 16-23. 2018.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 3. ed. Campinas, 2010. 494 p.

LOMBARDI, J. B. & FURLEY, T. H. Avaliação do efeito da condutividade no tratamento biológico de um efluente de fábrica de celulose. **O Papel**. São Paulo, v. 76, n 12, p 91-96. 2015.

MAMINSKA, R. T. Limits and perspectives of pulp and paper industry wastewater treatment – a review. **Renewable and sustainable energy reviews**. v. 78. p. 764-772. 2017.

MANAGÓ, B. L.; NEVES, L.; CAVALLINI, G. S.; VIDAL, C. M. S.; DE SOUZA, J. B. Avaliação do emprego da flotação por ar dissolvido para remoção/recuperação de fibras geradas no processo produtivo da indústria de papel. **Celulose online**. 2014. Disponível em: <https://www.celuloseonline.com.br/wp-content/uploads/2014/10/BRUNA_MANAGO_AVALIACAO_DO_EMPREGO_DA_FLOTACAO_POR_AR DISSOLVIDO_PARA_REMOCAO_DE_FIBRAS_GERADAS_NO_PROCESSO_PRODUTIVO.pdf> Acesso em: março de 2018.

METCALF & EDDY. **Wastewater Engineering – treatment and reuse**. 4. ed. New York, 2003. 1819 p.

NAVARRO, R. M. S; NAVARRO, F. M. S. TAMBOURGI, E. B. Estudo de diferentes processos de obtenção da pasta celulósica para fabricação de papel. **Revista Ciências & Tecnologias**. São Paulo, ano 1, n 1. 2007.

POKHREL, D. & VIRARAGHAVAN, T. Treatment of pulp and paper mill wastewater – a review. **Science of the Total Environment**. v. 333. p. 37-58. 2004.

QUARTAROLI, L.; KURITZA, J. C.; CAVALLINI, G. S.; VIDAL, C. M. S.; SOUZA, J. B. Aplicação de polímeros aniônico e catiônico na flotação por ar dissolvido como forma de pós-tratamento de efluente de indústria de papel e celulose. **Scientia Forestalis**. Piracicaba, v. 42, n. 101, p. 57-67. 2014.

RAMOS, V. H. S.; CRUZ, B. V.; REIS, E. N.; CARNEIRO, M. R. P.; DE JESUS, E. Tratamento de água por flotação com ar dissolvido: efeitos do uso de polímeros na remoção de poluentes. **Anais...** 22º CBECiMat Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Natal, 2016.

RIO GRANDE DO SUL, 1995. Lei nº 10.350, de 30 de dezembro de 1995. Institui o Sistema Estadual de Recursos Hídricos, regulamentando o artigo 171 da Constituição do Estado do Rio Grande do Sul. Disponível em: <<http://www.al.rs.gov.br/filerepository/repLegis/arquivos/10.350.pdf>> Acesso em: março de 2018.

VON SPERLING. **Introdução a qualidade das águas e tratamento de esgoto**. 2 ed. Belo Horizonte, 1996. 243 p.

ANEXO 1 – Resultados das análises de flotatete

Condutividade ($\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$)	Cor inicial (uC)	Turbidez inicial (NTU)	Sulfato de Alumínio ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	Cor final (uC)	Turbidez final (NTU)	pH final	Sólidos sedimentáveis ($\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$)
3540	544	15,00	400	208	11,30	5,59	0,00
			470	103	4,83	5,49	0,00
			520	126	7,20	5,54	0,00
			570	107	4,86	5,50	0,00
			640	98	3,50	5,55	0,00
4130	467	5,32	520	181	16,80	5,66	0,00
			570	96	3,57	5,48	0,00
			640	116	9,67	5,62	0,00
			700	154	9,54	5,47	0,00
			770	163	9,51	5,59	0,00
4370	534	6,60	570	236	11,50	5,50	<0,1
			640	116	3,88	5,40	0,00
			700	134	4,64	5,40	0,00
			770	122	4,90	5,50	0,00
			830	126	4,72	5,50	0,00
4420	568	7,22	570	183	9,01	5,32	<0,1
			640	163	5,81	5,38	0,00
			700	190	6,97	5,36	0,00
			770	203	8,12	5,41	0,00
			830	210	9,07	5,46	<0,1
4630	600	8,67	570	328	17,10	5,53	0,10
			640	251	11,00	5,44	0,00
			700	197	7,87	5,52	0,00
			770	227	10,90	5,56	0,00
			830	233	9,74	5,58	0,00
4740	540	7,32	570	196	15,70	5,52	0,50
			640	118	3,63	5,43	0,10
			700	85	2,26	5,40	0,00
			770	117	5,53	5,55	0,00
			830	124	5,46	5,46	<0,1
4810	583	7,29	570	238	9,85	5,33	0,00
			640	212	7,51	5,31	0,00
			700	182	7,29	5,49	0,00
			770	199	7,47	5,53	0,01
			830	209	9,11	5,52	0,01
5120	549	7,45	570	203	11,40	5,44	0,00
			640	170	8,18	5,46	<0,1
			700	132	5,58	5,44	0,00
			770	141	6,67	5,58	0,00
			830	159	9,00	5,46	0,00

5270	539	6,19	570	254	12,80	5,67	0,10
			640	169	8,03	5,58	0,00
			700	158	7,63	5,62	0,00
			770	132	5,05	5,54	0,00
			830	132	5,91	5,59	0,00
5580	507	5,25	640	265	17,50	5,50	0,00
			700	245	13,19	5,61	0,00
			770	204	12,50	5,53	0,00
			830	162	11,90	5,52	0,00
			890	185	12,40	5,60	0,00
5680	580	9,80	570	257	14,40	5,44	0,20
			640	256	13,70	5,39	0,00
			700	239	12,80	5,48	0,00
			770	222	11,00	5,47	0,01
			830	205	9,78	5,46	0,00
5770	472	4,55	570	343	21,90	5,51	0,00
			640	306	19,00	5,43	0,00
			700	302	22,80	5,39	0,00
			770	258	17,20	5,37	0,00
			830	241	14,90	5,31	0,00
5830	560	9,84	640	235	12,10	5,39	0,00
			700	220	11,70	5,48	0,00
			770	198	9,60	5,51	0,00
			830	172	6,37	5,47	0,00
			890	195	7,15	5,49	0,00
5910	540	12,10	570	216	9,62	5,44	0,10
			640	188	7,43	5,38	0,10
			700	199	9,47	5,39	0,10
			770	181	7,24	5,42	0,00
			850	160	6,97	5,47	0,00
6090	519	7,08	640	235	12,10	5,25	0,00
			700	220	11,70	5,40	0,20
			770	198	9,60	5,42	1,00
			830	172	6,37	5,37	0,00
			890	195	7,15	5,44	0,00