

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

ISABELA MOREIRA

**ESTUDO E COMPARAÇÃO DA EFICIÊNCIA DA AÇÃO COAGULANTE
DO POLÍMERO NATURAL TANINO E DO CLORETO FÉRRICO NO
TRATAMENTO DE EFLUENTE TÊXTIL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA

2016

ISABELA MOREIRA

**ESTUDO E COMPARAÇÃO DA EFICIÊNCIA DA AÇÃO COAGULANTE
DO POLÍMERO NATURAL TANINO E DO CLORETO FÉRRICO NO
TRATAMENTO DE EFLUENTE TÊXTIL**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior de Engenharia Ambiental – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro.

Orientadora: Profa. Dra. Edilaine Regina Pereira

Coorientador: Prof. Dr. Joelmir André Borssoi

LONDRINA

2016



TERMO DE APROVAÇÃO

Título da Monografia

Estudo e comparação da eficiência da ação coagulante do polímero natural tanino e do cloreto férrico no tratamento de efluente têxtil

por

Isabela Moreira

Monografia apresentada no dia 29 de agosto de 2016 ao Curso Superior de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Profa. Dra. Tatiane Cristina Dal Bosco
(UTFPR)

Profa. Dra. Joseane Debora Peruço Theodoro
(UTFPR)

Profa. Dra. Edilaine Regina Pereira
(UTFPR)
Orientador

Profa. Dra. Ligia Flávia Antunes Batista
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Ambiental

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à Deus pela dádiva da vida.

Aos meus pais, Nelso e Dulce, por todo apoio, amor, cuidado, compreensão, exemplo e parceria de sempre. Grande parte dos esforços que antecedem as conquistas ficam escondidos atrás dos bastidores. Sem o apoio familiar, essa jornada teria sido muito mais difícil.

Às minhas queridas irmãs, Gabriela e Marina, pela amizade, pelos conselhos e pelo apoio psicológico nos tempos difíceis.

Aos grandes e eternos amigos que acompanharam todo o processo e fizeram parte das muitas histórias felizes e de superação durante a minha vida acadêmica.

Aos colegas da EngAmb 5 pelos momentos inesquecíveis de estudo e de brincadeira.

Ao meu namorado, Jhonatan, por suportar a distância tão dolorosa, por me apoiar em todas as minhas decisões e por se fazer presente quando o meu deslocamento não era possível.

Aos queridos professores dessa instituição pelo conhecimento transferido.

À minha orientadora e ao meu coorientador, Profa. Dra. Edilaine Regina Pereira e Prof. Dr. Joelmir André Borssoi, pela paciência e pelas contribuições para este trabalho.

RESUMO

MOREIRA, Isabela. **Estudo e comparação da eficiência da ação coagulante do polímero natural tanino e do cloreto férrico no tratamento de efluente têxtil**. 2016. 67 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Bacharelado em Engenharia Ambiental. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2016.

A indústria têxtil consome grande quantidade de água e insumos químicos, caracterizando-se como grande geradora de efluente rico em matéria orgânica, substâncias recalcitrantes, elevada cor e turbidez. A fim de minimizar os problemas ambientais oriundos da emissão inadequada de efluentes têxteis em corpos hídricos, muitos processos podem ser aplicados no tratamento desse tipo de efluente. Um dos processos mais populares no tratamento primário de efluentes têxteis, pela facilidade e baixo custo de aplicação, é o processo de coagulação-floculação seguido de sedimentação. Considerando isso, o presente trabalho se propôs a comparar a eficiência de tratamento do coagulante químico cloreto férrico, do coagulante natural tanino (Tanfloc SG) e da combinação de cloreto férrico e tanino (Tanfloc SG) na remoção de cor aparente, sólidos totais e turbidez de efluente têxtil. O efluente bruto de estudo foi coletado na saída do tanque de equalização da ETE de uma indústria têxtil localizada no norte do Paraná. O Delineamento Composto Central rotacional (DCCR) foi usado como planejamento estatístico, considerando como fatores a concentração de coagulante e o tempo de sedimentação e como variáveis dependentes a Eficiência de remoção de cor aparente, turbidez e sólidos totais. Os ensaios foram conduzidos no aparato Jar-test, sendo que as concentrações dos coagulantes utilizados variaram de 300 a 800 mgL⁻¹ e o tempo de sedimentação variou de 0 a 40 minutos. Para os ensaios com tanino e com a combinação de tanino e cloreto férrico, o tempo de mistura rápida (90 rpm) foi de 2 minutos e o de mistura lenta (35 rpm) foi de 20 minutos e, para os ensaios com cloreto férrico, o tempo de mistura rápida (150 rpm) foi de 5 minutos e o de mistura lenta (30 rpm) foi de 15 minutos. No intervalo estudado, o tanino utilizado isoladamente não apresentou bons resultados para os parâmetros avaliados. O ensaio com 800 mgL⁻¹ de cloreto férrico e 20 minutos de sedimentação apresentou os melhores resultados experimentais, atingindo remoção de 13,2% de sólidos totais, 25% de cor aparente e 47,6% de turbidez, reduzindo o pH do efluente para 4,29. Os modelos estatísticos gerados, no entanto, indicam que o tratamento com a combinação de tanino e cloreto férrico resultam em maiores eficiências máximas de remoção de cor aparente e turbidez (21,9% e 40,7%, respectivamente). Além disso, os ensaios experimentais indicaram que a redução do pH foi menos acentuada no tratamento com a combinação de coagulantes. Os baixos valores de eficiência de remoção dos parâmetros estudados podem ter como causa o excesso de matéria orgânica no efluente bruto, que pode prejudicar o processo de coagulação e floculação. A combinação de cloreto férrico e tanino é, portanto, a alternativa mais eficiente dentre as demais para o tratamento primário de efluente têxtil.

Palavras-chave: Tanino. Cloreto Férrico. Efluente têxtil. DCCR.

ABSTRACT

MOREIRA, Isabela. **A comparative study of coagulation efficiency of a natural tannin-based coagulant and ferric chloride in the treatment of textile wastewater.** 2016. 67 p. Capstone Project Final Paper. Bachelor degree in Environmental Engineering. Federal Technological University of Paraná. Londrina, 2016.

Textile industry consumes large amounts of water and chemicals in its production processes. In consequence of that, this type of industry is a big generator of wastewater with high color and turbidity and rich in organic matter and recalcitrant substances. To minimize environmental problems associated with inadequate emission of textile wastewater in water bodies, many processes has been used to treat this sort of effluent. Because of its easy application and low cost, one of the most popular processes applied in textile wastewater primary treatment is coagulation-flocculation followed by sedimentation. Considering these facts, this paper aimed to compare the removal efficiency of apparent color, total solids and turbidity using ferric chloride, a natural tannin-based coagulant (Tanfloc SG) and the combination of both ferric chloride and Tanfloc SG in the treatment of a textile wastewater by coagulation-flocculation-sedimentation process. The raw textile wastewater was collected in the equalization tank outlet of a Textile Industry's Treatment Plant located on northern Paraná. Central Composite Rotatable Design (CCRD) was used as experimental design. Coagulant concentration and settling time were considered as factors and removal efficiencies of color, turbidity and total solids were considered as dependent variables. Tests were run in the Jar Test apparatus. The coagulant concentration ranged from 300 to 800 mgL⁻¹ and sedimentation time varied from 0 to 40 minutes. For tests using Tanfloc SG and the combination of ferric chloride and Tanfloc SG, it was applied rapid mixing of 90 rpm during 2 minutes and slow mixing of 35 rpm during 20 minutes. For tests using only ferric chloride, it was used rapid mixing of 150 rpm for 5 minutes and slow mixing of 30 rpm for 15 minutes. The coagulant Tanfloc SG did not show good results for removal efficiencies of the evaluated parameters. The test ran with 800 mgL⁻¹ of ferric chloride and 20 minutes of sedimentation achieved the best results for removal efficiency of total solids (13.2%), apparent color (25%) and turbidity (47.6%), but reduced the pH to 4.29. Statistical Models, however, indicated that treatment using the combination of ferric chloride and Tanfloc SG could achieve the highest removal efficiencies of apparent color (21.9%) and turbidity (40.7%). Moreover, tests ran with combination of coagulants showed smaller drop in pH. Low removal efficiencies values could be caused by excess of organic matter in raw wastewater, which can make it harder for coagulation and flocculation to occur. Within the boundaries of this study, coagulation and flocculation using combination of ferric chloride and Tanfloc SG seems to be the most suitable alternative for primary treatment of textile wastewater.

Keywords: Tannin. Ferric chloride. Textile wastewater. CCRD.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Fluxograma da cadeia têxtil | 14 |
| Figura 2 – Espécie de <i>Acacia mearnsii</i> | 27 |
| Figura 3 - Laboratório de Saneamento (A) e Laboratório de Poluentes Atmosféricos (B) – UTFPR Câmpus Londrina | 30 |
| Figura 4 – Aparato Jar-test Nova Ética - Modelo 218 LDB..... | 34 |
| Figura 5 - Superfícies de resposta para a variável Eficiência de remoção de sólidos totais (%) com os fatores ajustados para o tratamento com (a) tanino, (b) FeCl_3 e (c) tanino + FeCl_3 | 40 |
| Figura 6 - Superfícies de resposta para a variável Eficiência de remoção de cor aparente (%) com os fatores ajustados para o tratamento com (a) tanino, (b) FeCl_3 e (c) tanino + FeCl_3 | 46 |
| Figura 7 - Superfícies de resposta para a variável Eficiência de remoção de cor aparente (%) com os fatores ajustados para o tratamento com (a) tanino, (b) FeCl_3 e (c) tanino + FeCl_3 | 52 |
| Figura 8 – Gráficos de Pareto para a variável resposta Eficiência de remoção de turbidez (%) para o tratamento com (a) tanino e (b) FeCl_3 | 53 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Características de Efluente de Indústria de Malharia, Tinturaria e Confecção | 16 |
| Tabela 2 – Planejamento Experimental para os três tratamentos aplicados | 33 |
| Tabela 3 – Tempos de mistura e as respectivas velocidades de rotação adotadas para cada tratamento aplicado | 35 |
| Tabela 4 – Características do efluente bruto | 37 |
| Tabela 5 – Resultados analíticos dos tratamentos com tanino, com FeCl_3 e com a combinação de tanino e FeCl_3 | 38 |
| Tabela 6 – Eficiências de remoção de sólidos totais para os tratamentos com tanino, cloreto férrico e com a combinação de tanino e cloreto férrico | 39 |
| Tabela 7 - Efeitos estimados dos fatores significativos para a variável resposta Eficiência de remoção de sólidos totais (%) para o tanino | 41 |
| Tabela 8 - Efeitos estimados dos fatores significativos para a variável resposta Eficiência de remoção de sólidos totais (%) para o cloreto férrico. | 42 |
| Tabela 9 – Efeitos estimados dos fatores significativos para a variável resposta Eficiência de remoção de sólidos totais (%) para a combinação de coagulantes | 42 |
| Tabela 10 – ANOVA para a variável resposta Eficiência de remoção de sólidos totais (%) com os fatores significativos para tratamento com tanino | 43 |
| Tabela 11 – ANOVA para variável resposta Eficiência de remoção de sólidos totais (%) com os fatores significativos para tratamento com cloreto férrico. | 43 |
| Tabela 12 – ANOVA para variável resposta Eficiência de remoção de sólidos totais (%) com os fatores significativos para o tratamento com a combinação de coagulantes | 44 |
| Tabela 13 – Eficiências de remoção de cor aparente para os tratamentos com tanino, cloreto férrico e com a combinação de tanino e cloreto férrico | 45 |
| Tabela 14 - Efeitos estimados dos fatores significativos para a variável resposta Eficiência de remoção de cor aparente (%) para o tanino..... | 47 |
| Tabela 15 – Efeitos estimados dos fatores significativos para a variável resposta Eficiência de remoção de cor aparente (%) para o cloreto férrico..... | 47 |
| Tabela 16 – Efeitos estimados dos fatores significativos para a variável resposta Eficiência de remoção de cor aparente (%) para a combinação de coagulantes | 47 |
| Tabela 17 - ANOVA para a variável resposta Eficiência de remoção de cor aparente (%) com os fatores significativos para tratamento com tanino | 48 |
| Tabela 18 – ANOVA para variável resposta Eficiência de remoção de cor aparente (%) com os fatores significativos para tratamento com cloreto férrico. | 49 |
| Tabela 19 – ANOVA para variável resposta Eficiência de remoção de cor aparente (%) com os fatores significativos para o tratamento com a combinação de coagulantes | 49 |
| Tabela 20 – Eficiências de remoção de turbidez para os tratamentos com tanino, cloreto férrico e com a combinação de tanino e cloreto férrico | 50 |

| | |
|---|----|
| Tabela 21 - Efeitos estimados dos fatores significativos para a variável resposta Eficiência de remoção de turbidez (%) para a combinação de coagulantes | 53 |
| Tabela 22 – ANOVA para variável resposta Eficiência de remoção de turbidez (%) com os fatores significativos para o tratamento com a combinação de coagulantes | 54 |
| Tabela 23 - Valores de pH dos ensaios realizados para os tratamentos com tanino, cloreto férrico e com a combinação de tanino e cloreto férrico | 55 |
| Tabela 24 - Valores de condutividade elétrica dos ensaios realizados para os tratamentos com tanino, cloreto férrico e com a combinação de tanino e cloreto férrico | 57 |
| Tabela 25 – Eficiências máximas de remoção experimentais e faixas de variação de pH e condutividade elétrica para os três tratamentos | 59 |
| Tabela 26 – Eficiências de remoção máximas de cor aparente, turbidez e sólidos totais previstas pelos modelos de cada tratamento aplicado | 61 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 10 |
| 2 | OBJETIVOS | 12 |
| 2.1 | OBJETIVO GERAL | 12 |
| 2.2 | OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 12 |
| 3 | REVISÃO DE LITERATURA | 13 |
| 3.1 | A INDÚSTRIA TÊXTIL NO BRASIL | 13 |
| 3.2 | A CADEIA TÊXTIL | 14 |
| 3.3 | CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE DA INDÚSTRIA TÊXTIL | 15 |
| 3.5 | TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS DA INDÚSTRIA TÊXTIL | 18 |
| 3.6 | COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO/SEDIMENTAÇÃO | 19 |
| 3.6.1 | Coagulação e Floculação | 19 |
| 3.6.2 | Sedimentação | 21 |
| 3.7 | COAGULANTES | 22 |
| 3.7.1 | Coagulantes Químicos | 23 |
| 3.7.1.1 | Cloreto Férrico | 23 |
| 3.7.2 | Coagulantes Naturais | 25 |
| 3.7.2.1 | Taninos | 25 |
| 3.7 | DELINEAMENTO COMPOSTO CENTRAL ROTACIONAL - DCCR | 28 |
| 4 | MATERIAL E MÉTODOS | 30 |
| 4.1 | LOCAL DE COLETA DO EFLUENTE TÊXTIL | 30 |
| 4.2 | LOCAL DE REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS | 30 |
| 4.3 | ENSAIOS | 31 |
| 4.3.1 | Pré-Ensaio | 31 |
| 4.3.2 | Preparo da solução de cloreto férrico | 31 |
| 4.3.3 | Preparo da solução de Tanfloc SG | 32 |
| 4.3.4 | Planejamento experimental e análise estatística dos resultados | 32 |
| 4.3.5 | Ensaio de Coagulação/Floculação/Sedimentação | 34 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 37 |
| 5.1 | EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE SÓLIDOS TOTAIS | 39 |
| 5.2 | EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE COR APARENTE | 44 |
| 5.3 | EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE TURBIDEZ | 50 |
| 5.4 | ACOMPANHAMENTO DO pH | 54 |
| 5.5 | VARIAÇÃO DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA | 56 |
| 5.6 | COMPARAÇÃO ENTRE OS TRATAMENTOS | 58 |
| 6 | CONCLUSÃO | 62 |
| | REFERÊNCIAS | 63 |

1 INTRODUÇÃO

O elevado consumo de água e de diversos insumos químicos nos processos produtivos da indústria têxtil é fonte de grande preocupação no que tange ao efluente gerado e aos impactos ambientais eventualmente causados por ele. A carga poluidora do efluente têxtil está majoritariamente associada à presença de tensoativos, resinas, solventes, alvejantes e corantes oriundos do processo de beneficiamento (BRAILE; CAVALCANTI, 1993).

Ainda que as características do efluente de indústria têxtil sejam altamente variáveis e determinadas pelos processos e material empregados, expressivos problemas ambientais relacionados ao despejo de efluente têxtil sem tratamento ou inadequadamente tratado em corpos d'água estão relacionados à elevada demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), concentração de substâncias tóxicas e metais, elevada temperatura, turbidez e grande variação de cor do efluente (BELTRAME, 2000).

Quando despejado sem tratamento prévio adequado em corpos hídricos, o efluente têxtil pode ser o causador de problemas estéticos, sérios danos ao meio ambiente e ao próprio ser humano, que acaba por ser vítima direta e indireta do descarte indevido.

Os corantes constituem uma classe de compostos químicos presente no efluente têxtil que exige atenção, visto que apresentam estrutura complexa, baixa biodegradabilidade e conferem cor ao efluente (VERMA; DASH; BHUNIA, 2011). Enquanto a cor verdadeira corresponde à quantidade de substâncias dissolvidas, a turbidez corresponde à presença de matéria em suspensão no efluente (RICHTER; NETTO, 1991). Esses componentes podem desencadear a diminuição da penetração da luz em corpos d'água, eutrofização e/ou a mortandade de organismos devido à toxicidade de complexos químicos.

No Brasil, o padrão de lançamento de efluentes em corpos hídricos é estabelecido pela Resolução nº 430 de 2011 do CONAMA. Além de cumprir com as exigências do padrão de lançamento previsto em lei, há que se verificar o cumprimento da Resolução nº 357 de 2005 do CONAMA, pois esta dá as condições para o enquadramento dos corpos hídricos em classes. Deve-se proceder com um estudo específico a respeito do corpo hídrico e do lançamento para que as

características do rio e sua classe não sejam alteradas à jusante do lançamento (BRASIL, 2005; BRASIL, 2011).

A coagulação/floculação/sedimentação é um processo muito empregado no tratamento de efluentes têxteis e consiste na adição de um composto químico capaz de causar a aglomeração e sedimentação de partículas pequenas (QUADROS, 2005). Esse processo de tratamento é eficiente na remoção dos parâmetros cor, DQO e turbidez, além de apresentar baixo custo de implantação e operação. Os coagulantes e floculantes tipicamente utilizados no tratamento de efluentes industriais incluem sais metálicos, sais metálicos pré-hidrolizados e polímeros orgânicos sintéticos ou naturais.

Apesar de geralmente apresentar eficiência de remoção, os coagulantes inorgânicos conferem característica inorgânica e não-biodegradável ao lodo produzido no processo. Neste sentido, os coagulantes naturais têm como vantagens a fácil acessibilidade, a produção de lodo residual de baixa toxicidade e maior biodegradabilidade e geração de menor quantidade de lodo. Além disso, a maioria dos coagulantes inorgânicos salinos consomem alcalinidade durante o processo, o que pode causar a diminuição do pH e alterar a solubilidade do sal, prejudicando todo o tratamento (DAVIS, 2010).

Muitos coagulantes naturais estão em estudo atualmente. Dentre eles, se destacam os compostos tânicos, ou taninos. Os taninos sempre foram muito utilizados na indústria, mas seu uso como coagulante eficiente no tratamento de águas e efluentes foi difundido nas últimas duas décadas. Estes compostos estão presentes nas cascas lenhosas, raízes, seiva, sementes, frutos ou folhas de diversas plantas (BATTESTIN; MATSUDA; MACEDO, 2004). O Tanfloc SG é um coagulante comercial à base de tanino fabricado pela TANAC S.A. e pode ser facilmente adquirido no mercado.

Diante do cenário apresentado, o presente trabalho teve como objetivo estudar e comparar a eficiência da remoção de cor aparente, turbidez e sólidos por coagulação, floculação e sedimentação, utilizando o polímero natural tanino (Tanfloc SG), o coagulante químico cloreto férrico, bem como a combinação desses dois compostos no tratamento de efluente têxtil.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar e comparar a eficiência da ação coagulante do Tanino, do cloreto férrico (FeCl_3) e da combinação desses dois coagulantes no tratamento primário de efluente da indústria têxtil pelo processo de coagulação, floculação e sedimentação.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar o efluente da indústria têxtil quanto aos parâmetros físico-químicos pH, cor aparente, turbidez, sólidos totais e condutividade elétrica;
- Analisar a eficiência de remoção dos parâmetros cor aparente, turbidez, e sólidos totais das amostras tratadas, bem como monitorar a variação de pH e condutividade elétrica para os três tratamentos aplicados;
- Apresentar modelo estatístico que relacione as eficiências de remoção dos parâmetros cor, turbidez e sólidos totais com as condições de tratamento no intervalo estudado;
- Verificar se os parâmetros analisados apresentam valores próximos ao padrão de lançamento de efluentes em corpos hídricos exigidos pela Resolução CONAMA 430/2011 e aos parâmetros exigidos pela Resolução CONAMA 357/2005 para corpos hídricos de Classe II;

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 A INDÚSTRIA TÊXTIL NO BRASIL

Segundo a Associação Brasileira de Indústria Têxtil e de Confecção (2015), a cadeia produtiva têxtil e de confecção brasileira abrange desde a produção de fibras até as confecções, figurando como a maior cadeia produtiva integrada do Ocidente. O Brasil é o quarto maior produtor mundial de artigos de vestuário e o quinto maior produtor mundial de manufaturas têxteis, contando com mais de 33 mil empresas relacionadas à atividade em todo o país.

Por ser um grande produtor, o setor têxtil brasileiro tem alto potencial de crescimento para exportação, uma vez que 92% de sua produção é retida pelo mercado nacional e sua participação atual no comércio mundial é inferior a 0,5% (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE INDÚSTRIA TÊXTIL E DE CONFECÇÃO, 2015).

De acordo com as análises feitas pela Associação Brasileira de Indústria Têxtil e de Confecção (2015), algumas das dificuldades em crescer e atingir o mercado externo estão associadas à concorrência desleal enfrentada frente ao baixo preço dos produtos fabricados, sobretudo na Ásia - no continente asiático se encontram os maiores produtores e exportadores de produtos têxteis do mundo, que se pautam na mão de obra barata e ausência de compromissos com o meio ambiente. Soma-se à dificuldades o encarecimento dos custos de produção, com destaque para a energia elétrica e tributação, que tem causado mudanças estratégicas no setor (MOREIRA, 2015).

Dados de 2013 demonstram que o Sudeste brasileiro é responsável pela maior fração produtiva da indústria têxtil brasileira, correspondente a 52,2%. O Sul configura como o segundo maior produtor do setor, detendo 28,3% da produção nacional, 30,4% dos estabelecimentos, além de possuir o segundo maior parque têxtil do Brasil. O Nordeste participa com 15,6%, Centro-Oeste com 3,5% e Norte com 0,4% da produção no Brasil. São Paulo (41,02%) e Santa Catarina (19,41%) são as unidades federativas mais expressivas no quesito produção do setor (BEZERRA, 2014).

3.2 A CADEIA TÊXTIL

O processo produtivo têxtil é, basicamente, separado em cinco etapas. Na Figura 1 ilustra-se o fluxograma simplificado da cadeia têxtil.

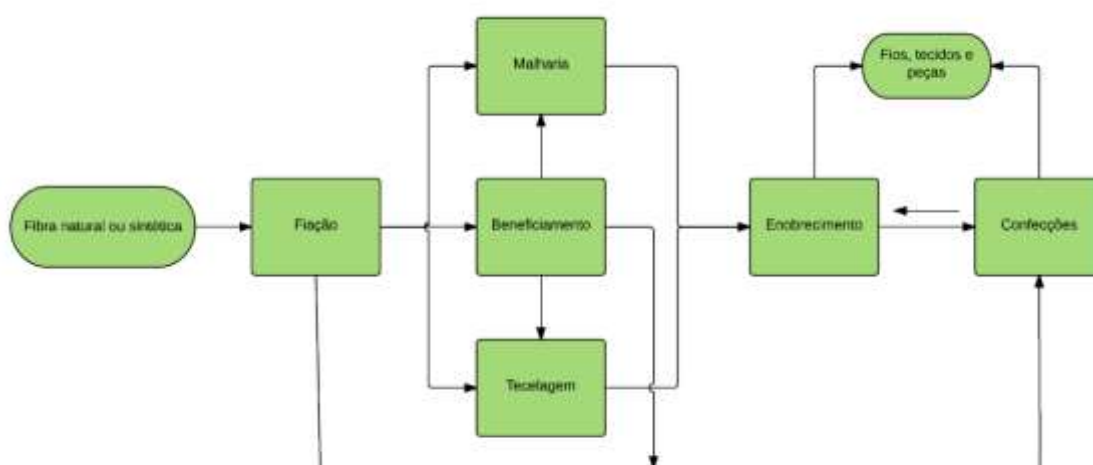


Figura 1 – Fluxograma da cadeia têxtil
 Fonte: Adaptado de CETESB (2009, p. 6)

Conforme descreve a Companhia Ambiental do estado de São Paulo – CETESB (2009), esses processos são:

- **Fiação:** obtenção dos fios a partir das fibras têxteis, que podem seguir para o beneficiamento ou para tecelagens e malharias.
- **Beneficiamento:** os fios são preparados por tingimento, engomagem, retorção (linhas, barbantes, fios especiais, etc.) e tratamentos especiais para uso na confecção ou podem, ainda, passar por outros processos.
- **Tecelagem e/ou Malharia:** o tecido plano é elaborado a partir dos fios têxteis.
- **Embrecimento:** tecidos, malhas ou peças são preparados por tingimento, estamparia e outros tipos de acabamento.
- **Confeções:** ocorre a aplicação diversificada de tecnologias para os produtos e adição de acessórios.

Todo o processo, desde a produção das fibras têxteis até a confecção das peças acabadas, constitui a cadeia produtiva têxtil. A indústria têxtil, no entanto, é entendida como a etapa dessa cadeia responsável pela produção dos tecidos, excluindo-se a confecção das peças (BEZERRA, 2014).

A fiação é a única parte da cadeia que não gera efluente líquido, pois se caracteriza como uma operação a seco. Nas confecções a geração de efluente não é crítica como a decorrente dos outros processos (beneficiamento, tecelagem, malharia e enobrecimento), visto que o efluente gerado na confecção é proveniente apenas de lavagem de peças (CETESB, 2009). Braile e Cavalcanti (1993) atribuem ao processo de beneficiamento a responsabilidade pela maior parte dos efluentes gerados pela cadeia produtiva do setor. Portanto, pode-se entender que a maior geração de efluentes têxtil ocorre nos processos englobados pela indústria têxtil.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE DA INDÚSTRIA TÊXTIL

A indústria têxtil se encontra entre os setores industriais que apresentam maior consumo de água e de complexos químicos em seus processos de produção (VERMA; DASH; BHUNIA, 2011; FEAM, 2013). Nunes (2012) relata que o consumo específico de água em indústrias de tinturaria é de 20 a 60 m³.ton⁻¹ de produto. Como consequência do elevado consumo de água associado ao uso intensivo de diversos compostos químicos, o efluente industrial configura como o aspecto ambiental mais significativo do setor (FEAM, 2013).

Os efluentes têxteis apresentam, de maneira generalizada, elevada demanda biológica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), cor, turbidez e concentração de substâncias tóxicas e metais (VERMA; DASH; BHUNIA, 2011). Cabe ressaltar que a quantidade de água utilizada na manufatura e os parâmetros físico-químicos do efluente gerado variam de acordo com os processos industriais empregados, do tipo de fibra e dos produtos químicos utilizados (BELTRAME, 2000; CETESB, 2009).

De acordo com Braile e Cavalcanti (1993), os efluentes líquidos originados de diversas seções da produção têxtil contém amidos, gomas, graxas, álcoois, sabões, detergentes, ácido acético, hidróxido de sódio, cloretos, sulfatos,

carbonatos, entre outros. O mesmo autor relata que o efluente é gerado em volume muito grande, 120 a 380 m³ por 1000 m de tecido processado, e apresenta pH entre 8 e 11, teor de sólidos totais de 1000 a 1600 mgL⁻¹, DBO de 200 a 600 mgL⁻¹, alcalinidade de 300 a 900 mgL⁻¹, teor de sólidos em suspensão de 30 a 50 mgL⁻¹ e cor variável.

A partir da análise de amostras fortuitas e compostas, Beltrame (2000) caracterizou o efluente de uma indústria têxtil, composta por malharia, tinturaria e confecção, localizada em Natal – RN. Os resultados demonstraram que o efluente possui elevada alcalinidade e pH, altas temperaturas de despejo (> 45° C), grande variação de cores e luminâncias, altos valores de DQO, presença de metais pesados, elevados valores de sólidos totais e dissolvidos e pouco material sedimentável. Os valores médios de alguns dos parâmetros analisados por Beltrame (2000) no efluente de indústria de malharia, tinturaria e confecção estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1 - Características de Efluente de Indústria de Malharia, Tinturaria e Confecção

| Parâmetro | Valor médio |
|---|-------------|
| Temperatura (°C) ^a | 49,18 |
| pH ^a | 12,2 |
| Alcalinidade (mg CaCO ₃ L ⁻¹) ^b | 2900,74 |
| DQO (mg O ₂ L ⁻¹) ^c | 799,91 |
| Sólidos Sedimentáveis (mLL ⁻¹) ^c | 0,13 |
| Sólidos Dissolvidos (mgL ⁻¹) ^c | 5034 |
| Sólidos Suspensos (mgL ⁻¹) ^c | 48,6 |
| Sólidos Totais (mgL ⁻¹) ^c | 5083 |
| Sólidos Totais Fixos (mgL ⁻¹) ^c | 4125 |
| Sólidos Totais Voláteis (mgL ⁻¹) ^c | 957 |

^a Média das coletas pontuais da amostra composta

^b Média das amostras fortuitas

^c Média das amostras fortuitas e compostas

Fonte: Beltrame, 2000.

Grande parte dos compostos químicos utilizados nos processos de produção não são retidos no substrato têxtil e, portanto, acabam fazendo parte da composição

do efluente industrial (FEAM, 2013). Os corantes constituem porção generosa dos compostos químicos presentes no efluente têxtil e são caracterizados, de maneira geral, como substâncias de alto peso molecular, estrutura complexa e baixa biodegradabilidade (VERMA; DASH; BHUNIA, 2011).

3.4 REGULAMENTAÇÃO AMBIENTAL

Em matéria de regulamentação ambiental federal que concerne ao despejo de efluentes em corpos hídricos, destacam-se as Resoluções nº 357 de 2005 e nº 430 de 2011 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, que dispõem sobre a classificação e enquadramento dos corpos d'água de acordo com seus usos preponderantes, bem como das condições e padrões de lançamento de efluentes.

O lançamento de efluentes de qualquer fonte poluidora em corpo receptor está condicionado às seguintes condições e padrões de lançamento, conforme CONAMA 430/11 (BRASIL, 2011):

- pH entre 5 a 9;
- 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;
- Materiais sedimentáveis: até 1 mL⁻¹ em teste de 1 hora em cone Imhoff;
- Óleos e graxas: até 20 mgL⁻¹ para óleos minerais e até 50 mgL⁻¹ para óleos vegetais e gorduras animais;
- Ausência de materiais flutuantes;
- 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;

Conforme preconizado no Artigo 5º da Resolução CONAMA nº 430 de 2011, “Os efluentes não poderão conferir ao corpo receptor características de qualidade em desacordo com as metas obrigatórias progressivas, intermediárias e final, do seu enquadramento” (BRASIL, 2011). Portanto, ainda que os padrões de lançamento estejam estabelecidos nessa resolução, há que se observar a classe do corpo

hídrico receptor e as condições estabelecidas pela Resolução CONAMA n° 357 de 2005.

A Resolução CONAMA n° 357 de 2005, em seu Artigo 42, determina que:

Enquanto não aprovados os respectivos enquadramentos, as águas doces serão consideradas classe 2, as salinas e salobras classe 1, exceto se as condições de qualidade atuais forem melhores, o que determinará a aplicação da classe mais rigorosa correspondente (BRASIL, 2005).

As condições e padrões, relevantes para os fins desta pesquisa, exigidos pela Resolução n° 357/05 do CONAMA, artigo 15, para as águas doces de classe 2 são (BRASIL, 2005):

- Cor verdadeira: até 75 mg PtL⁻¹ - não sendo permitida a presença de corantes provenientes de fontes antrópicas que não sejam removíveis por processos convencionais de coagulação, sedimentação e filtração;
- Turbidez: até 100 UNT;
- DBO 5 dias a 20°C: até 5 mgL⁻¹ O₂;
- OD não inferior a 5 mgL⁻¹ O₂, em qualquer amostra;
- pH: 6,0 a 9,0;
- Materiais flutuantes, inclusive espumas não naturais, óleos e graxas e substâncias que comuniquem cor ou odor: virtualmente ausentes;
- Sólidos dissolvidos totais: até 500 mgL⁻¹.

3.5 TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS DA INDÚSTRIA TÊXTIL

O tratamento de águas residuárias é constituído por processos químicos, físicos e biológicos que visam à remoção de matéria orgânica, sólidos, patógenos e compostos que possam comprometer a qualidade dos recursos hídricos. Em termos de nível de tratamento, os processos podem ser classificados em preliminar, primário, secundário, terciário e avançado. O tratamento preliminar é responsável pela eliminação de sólidos muito grosseiros e flutuantes. O material particulado e parte dos sólidos suspensos e DBO são removidos pelo tratamento a nível primário. Para atingir remoção quase completa de sólidos inorgânicos e DBO é necessário fazer uso do tratamento secundário. Em alguns casos é preciso lançar mão dos tratamentos terciário e/ou avançado. O tratamento terciário é aplicado para remoção

adicional de sólidos, enquanto o tratamento avançado tem como objetivo a remoção de substâncias específicas do efluente (ASANO, 1998).

Os critérios e processos empregados no projeto de uma estação de tratamento são determinados de acordo com as características do efluente bruto, padrões de lançamento definidos na regulamentação, confiabilidade do tratamento, tempo de vida do sistema, área de ocupação prevista e custo (DAVIS, 2010). Portanto, há que se estudar caso a caso quais os processos mais adequados a serem aplicados no tratamento do efluente.

A coagulação/floculação/sedimentação e a remoção biológica podem ser considerados processos de tratamento primário. A redução dos sólidos suspensos e da DBO na sedimentação primária (tipo floculenta) é de suma importância para diminuir a demanda de oxigênio, consumo de energia e problemas operacionais em processos biológicos que seguem a coagulação/floculação/sedimentação, além de remover material particulado e sobrenadante (DAVIS, 2010).

As indústrias têxteis empregam frequentemente a coagulação/floculação como tratamento primário precedendo tratamento biológico a fim de reduzir a carga de poluentes inorgânicos, cor, metais pesados e matéria orgânica não biodegradável do afluente da unidade de tratamento biológico. Esse design de processo leva a uma redução de custos notória, pois permite projetar uma unidade de tratamento biológico com menor capacidade volumétrica (NUNES, 2012).

3.6 COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO/SEDIMENTAÇÃO

3.6.1 Coagulação e Floculação

Oriundo de raiz latina, o verbo “coagular” significa converter em sólido (LIBÂNIO, 2010). Coagulação é o processo de desestabilização de partículas coloidais, por meio da adição de coagulantes, com a finalidade de promover a agregação delas. Após a desestabilização dessas partículas, se inicia o processo de floculação, que se caracteriza pela formação e crescimento de flocos por meio de

colisões entre partículas desestabilizadas, viabilizando e acelerando a sedimentação do material (KAWAMURA, 2000).

O processo de coagulação e floculação é um dos mais utilizados na remoção da cor e turbidez dos efluentes têxteis (ASANO, 1998; SILVA et al., 2001; QUADROS, 2005) devido à eficácia e baixo custo do processo (KIMURA, 2001; VERMA; DASH; BHUNIA, 2011).

Segundo Nunes (2012), a coagulação ocorre muito rapidamente e deve ser feita em tanques de mistura rápida que forneçam energia suficiente para que ocorra dispersão total do coagulante. O autor afirma que o tempo de detenção nesses tanques deve ser de 0,5 a 1,5 minutos.

A desestabilização dos colóides pode ser alcançada por quatro mecanismos que podem atuar simultaneamente na prática:

1) Compressão da dupla camada elétrica: A compressão da camada dupla reduz a força repulsiva das partículas, que se aproximam devido ao movimento browniano e permanecem juntas com auxílio das forças de atração de van der Waals. A compressão é dependente tanto da força iônica quanto das cargas dos contraíons, assim, íons multivalentes são coagulantes muito mais eficientes do que os monovalentes (DAVIS, 2010).

2) Adsorção e neutralização de carga: Esse mecanismo ocorre imediatamente após a dispersão do coagulante no meio, que podem ser sais metálicos hidrolizados, pré-hidrolizados ou polímeros catiônicos. As moléculas do coagulante são adsorvidas às partículas em suspensão – geralmente, dotadas de carga negativa – desestabilizando-as eletricamente. A concentração e a área superficial dos colóides determinam a dosagem de coagulante necessária à neutralização de carga (LIBÂNIO, 2010).

3) Adsorção e formação de pontes poliméricas: Decorrente da adição de eletrólitos (polímeros com grupos funcionais ionizáveis) à solução com o intuito de adsorver, em um ou mais locais de sua cadeia polimérica, as partículas em suspensão. Cadeias poliméricas distintas podem interagir entre si e formar pontes poliméricas, que sedimentam mais rapidamente e formam lodo mais denso (METCALF & EDDY, 2003; LIBÂNIO, 2010).

4) Varredura: Ocorre quando sais de alumínio ou ferro, com dosagens acima da saturação, são acrescentados à água ou efluente. Esses sais formam

precipitados que captam os colóides por adsorção ou emaranhamento (DAVIS, 2010).

Após a coagulação realizada sob velocidade de mistura rápida, o efluente passará para o processo de floculação, caracterizado por mistura lenta. Essa etapa do processo se dá à medida que ocorrem colisões entre as partículas (NUNES, 2012).

De acordo com Metcalf & Eddy (2003), existem dois tipos de floculação: a microfloculação e a macrofloculação. A microfloculação, ou floculação pericinética, é significativa para partículas de diâmetros entre 0,001 a 1 μm , pois é causada pelo movimento browniano. Por outro lado, a macrofloculação, ou floculação ortocinética, se refere à agregação de partículas com diâmetros maiores que 1 ou 2 μm e é ocasionada por gradiente de velocidade e/ou sedimentação diferencial.

Ainda que o processo de coagulação/floculação tenha como função desestabilizar e condicionar o material coloidal e particulado, o objetivo principal desse processo é fazer com que ocorra a remoção do material floculado (DAVIS, 2010).

3.6.2 Sedimentação

A sedimentação pode ser empregada para atingir a remoção dos flocos originados no processo de coagulação e floculação que, por possuírem maior massa, podem precipitar num período de tempo mais curto. No entanto, existem outras aplicações desse processo que envolvem diferentes classes de sedimentação, de acordo com as propriedades das partículas a serem decantadas. Por convenção, as categorias de sedimentação são separadas em tipo I, II, III e IV e são caracterizadas da seguinte maneira:

1) Tipo I ou sedimentação discreta é caracterizada por partículas que decantam individualmente, sem interagir ou formar aglomerados. Esse tipo de sedimentação é típico de minerais e materiais inertes e predomina em caixas de areia, podendo ser modelado matematicamente utilizando a Lei de Stokes (JORDÃO; PESSÔA, 2005).

2) Tipo II ou sedimentação floculenta ocorre no decantador primário quando se lança mão do processo de coagulação e floculação e abrange as situações onde as partículas floculam enquanto decantam, aumentando sua velocidade de sedimentação durante o processo. Esse fenômeno não pode ser descrito matematicamente porque as partículas mudam constantemente em forma, tamanho e peso específico. Portanto, é necessário recorrer à determinação experimental para se estabelecer as condições de sedimentação das suspensões floculentas (JORDÃO; PESSÔA, 2005).

3) Tipo III ou sedimentação zonal é decorrente de altas concentrações de partículas que, por estarem muito próximas e com pouca área livre entre elas, interagem e mantêm posição relativa constante entre si, tendendo a decantar em zona como um manto. Esse fenômeno é mais comum após aplicação de abrandamento (remoção da dureza da água), sistema de lodo ativado e no espessamento de lodo. A taxa de sedimentação zonal é função da concentração das partículas e suas características (DAVIS, 2010).

4) Tipo IV ou sedimentação em compressão configura como a continuação da sedimentação zonal. Após a formação de uma camada de lodo, as partículas sofrem compressão em razão da massa que se sobrepõe sobre elas, fazendo com que o líquido que permeia a camada seja expulso dela (DAVIS, 2010).

Davis (2010) ainda destaca que os tipos III e IV de sedimentação podem ocorrer concomitantemente ao tipo I e/ou II.

3.7 COAGULANTES

Segundo Metcalf & Eddy (2003), coagulante é o termo utilizado para designar o agente químico adicionado à água ou efluente que se deseja tratar para desestabilizar as partículas coloidais presentes e iniciar a formação do floco. Os coagulantes podem ser químicos, orgânicos, sintéticos ou naturais.

3.7.1 Coagulantes Químicos

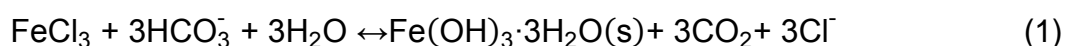
Coagulantes químicos tipicamente utilizados incluem sais metálicos pré-hidrolizados, como cloreto de polialumínio (PAC), cloreto férrico de polialumínio (PAFCI), sulfato poliferroso (PFS) e cloreto poliférrico (PFCI); e sais metálicos, como o sulfato de alumínio, cloreto férrico e sulfato férrico (KAWAMURA, 2000; METCALF & EDDY, 2003; DAVIS, 2010; VERMA; DASH; BHUNIA, 2011).

Verma, Dash e Bhunia (2011) destacam que, ainda que eficiência suficiente seja atendida quanto à remoção de cor com a aplicação de coagulantes inorgânicos, o lodo gerado apresenta características inorgânica e não-biodegradável.

3.7.1.1 Cloreto Férrico

O cloreto férrico é o sal de ferro mais comumente utilizado no processo de coagulação/floculação. A agregação de partículas propiciada pela adição de FeCl_3 é um processo complexo e é trazido à tona pelos produtos da hidrólise do sal metálico (METCALF & EDDY, 2003).

O hidróxido férrico ($\text{Fe}(\text{OH})_3$), produto da hidrólise do cloreto férrico (FeCl_3), forma na água uma estrutura coloidal gel e ocasiona o agrupamento das micelas (NUNES, 2012). De acordo com Davis (2010), ao adicionar cloreto férrico em uma solução que contenha alcalinidade, ocorre a reação de hidrólise descrita na Equação (1).



Quando em solução aquosa, os íons metálicos de ferro formam ligações fortes com os átomos de oxigênio, liberando os cátions H^+ da molécula de água, que acabam por abaixar o pH da solução, na ausência de alcalinidade (LIBÂNIO, 2010). A alteração do pH da solução afeta, conseqüentemente, a solubilidade do sal metálico. Portanto, para obter bons resultados na remoção do material em

suspensão, a solução deve apresentar alcalinidade. A alcalinidade é utilizada como uma medida da capacidade de uma solução para neutralizar ácidos e reflete a quantidade de bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos presentes nessa solução (DAVIS, 2010).

Costa Junior et al. (2013) avaliaram a eficiência de coagulantes químicos no tratamento de efluente de indústria têxtil. Foi constatado que o cloreto férrico foi mais eficiente do que o sulfato de alumínio no tratamento de efluentes têxteis, removendo 85,6% de DQO, 88,9% DBO e 96,2% de turbidez com a aplicação de 800 mgL^{-1} de FeCl_3 de efluente e tempo de sedimentação de 3 horas. No tratamento utilizando FeCl_3 , a remoção máxima de material em suspensão e matéria orgânica do efluente ocorreu em pH próximo de 3.

Os resultados obtidos no estudo feito por Aboulhassan et al. (2006) demonstraram que aplicando a dosagem de 650 mgL^{-1} de FeCl_3 no efluente de uma tinturaria com pH 8,5, foi possível atingir remoção de 82% de DQO e de 94% de cor.

Por outro lado, alguns estudos demonstram a ineficácia do cloreto férrico na coagulação de efluentes que apresentam pH muito elevado, como é o caso dos resultados apresentados por Silva et al. (2001). O tratamento com 120 mgL^{-1} de cloreto férrico do efluente bruto, com pH de 8,8, atingiu remoção máxima de 63% para cor e 60% para turbidez.

Importante destacar, no entanto, que a concentração do coagulante FeCl_3 utilizada por Silva et al. (2001) foi significativamente menor do que aquela utilizada por Aboulhassan et al. (2006). Isso pode ser uma das causas da grande diferença entre os resultados para remoção de cor.

Davis (2010) relata que a faixa de pH para coagulação efetiva com FeCl_3 está entre 4 e 9.

3.7.2 Coagulantes Naturais

Os coagulantes naturais são, basicamente, polieletrólitos de origem biológica e podem ser classificados como catiônicos, aniônicos ou não-iônicos (LIBÂNIO, 2010).

Algumas propriedades dos biopolímeros, ou coagulantes naturais, como a ausência de toxicidade, a alta biodegradabilidade e formação reduzida de lodo devido à baixa dosagem geralmente aplicada, fazem com que esses coagulantes se enquadrem numa posição promissora para o tratamento de efluentes (KIMURA, 2001; QUADROS, 2005; VERMA; DASH; BHUNIA, 2011). Outro fator interessante é que o processo de coagulação e floculação parece não ser afetado pelo pH ou pela alcalinidade do meio quando um polieletrólito é utilizado (LIBÂNIO, 2010).

Devido às vantagens da utilização de coagulantes naturais, a ação coagulante de diversos polímeros de origem biológica vem sendo estudadas atualmente. De maneira geral, esses biopolímeros atuam na neutralização das partículas em suspensão e na formação de pontes poliméricas, formando agregados que sedimentam mais facilmente (METCALF & EDDY, 2003; VERMA; DASH; BHUNIA, 2011). Por vezes, opta-se pela adição combinada de coagulantes químicos e polímeros orgânicos a fim de otimizar o processo de formação do floco e a sedimentação (ASANO, 1998).

Dentre os coagulantes mais estudados no tratamento de efluentes têxteis, pode-se citar a quitosana (SILVA et al., 2001; QUADROS, 2005), a *Moringa oleifera* (SILVA et al., 2001) e o tanino (VERMA; DASH; BHUNIA, 2011).

3.7.2.1 Taninos

Os taninos são metabólitos secundários vegetais que atuam na defesa das plantas, como fago-inibidores – tornando a planta impalatável - ou antimicrobianos, por exemplo. Eles são compostos fenólicos solúveis em água que possuem a

característica de formar complexos insolúveis ao entrar em contato com proteínas e outros compostos (MONTEIRO et al., 2005).

Diversos tipos de plantas podem apresentar altas taxas de taninos em suas cascas lenhosas, raízes, seiva, sementes, frutos ou folhas (BATTESTIN; MATSUDA; MACEDO, 2004). Os taninos são classificados em dois grandes grupos: taninos condensados – ou proantocianidinas - e taninos hidrolisáveis. As proantocianidinas são muito abundantes e comuns nos vegetais do que os taninos hidrolisáveis (JORGE et al., 2001).

Segundo Jorge et al. (2001), a aplicação mais antiga dos taninos consiste no curtimento de pele – inglês: tanning -, de onde surgiu o termo que denomina esses compostos. Com o passar do tempo, surgiram muitas outras aplicações na indústria e na medicina. Monteiro et al. (2005) citam diversos estudos avaliando o poder do tanino como anticarcinogênico, anti-inflamatório, cicatrizante e inibidor da replicação do vírus do HIV. Os taninos também têm aplicabilidade no processo de estabilização de alimentos, na produção de resinas e na produção de fármacos (BATTESTIN; MATSUDA; MACEDO, 2004). Sánchez-Martín, Beltrán-Heredia e Solera-Hernández (2010) destacam, ainda, a aplicação cada vez mais comum dos taninos ao tratamento de água ou efluentes industriais por coagulação e floculação.

Um dos coagulantes/floculantes derivados de tanino encontrados no mercado é o Tanfloc, fabricado e comercializado pela TANAC S.A.. O Tanfloc é um polímero orgânico-catiônico de baixo peso molecular que é fabricado a partir do tanino extraído das cascas lenhosas da espécie arbórea *Acacia mearnsii* (Figura 2) (CASTRO, 2002; TANAC, 2016).



Figura 2 – Espécie de *Acacia mearnsii*

Fonte:

<http://www.viveiroipe.com.br/?mudas=acacia-negra>

As vantagens do uso do coagulante Tanfloc são diversas. A primeira delas é a de formar aglomerados sem consumir alcalinidade do meio, atuando em ampla faixa de pH. Além disso, o agente é também um quelante, ou seja, apresenta a característica de formar quelatos com os metais dissolvidos na solução a ser tratada, aprisionando-os e fazendo-os sedimentar. Dentre os metais que podem ser capturados pelo Tanfloc, os íons de ferro se destacam pela eficiência com a qual são removidos (TANAC S.A., 2002).

Couto Junior et al. (2012) constataram o grande potencial do tanino em reduzir a concentração de metais em efluente de estamparia. Eles avaliaram a eficiência do processo de coagulação, floculação e sedimentação para tratar o efluente utilizando o tanino como coagulante. Na condição ótima do processo - dosagem de 400 mgL⁻¹ de tanino, 2 minutos de mistura rápida (90 rpm), 20 minutos de mistura lenta (35 rpm) e 30 minutos de sedimentação -, atingiu-se a remoção de 94,81% de DQO, 99,65% de cor e 99,17% de turbidez. Com o tratamento, foi possível atingir valores de concentração abaixo do padrão estabelecido pela

Resolução CONAMA 430/11 para a maioria dos metais presentes na água residuária.

O estudo realizado por Souza, Souza e Pereira (2014) demonstrou que o coagulante natural tanino, mesmo em concentrações mais baixas, é mais eficiente na remoção de cor de efluente de lavanderia industrial do que o coagulante inorgânico sulfato de alumínio. Utilizando dosagem de tanino de 80 mgL^{-1} , foram verificadas remoções máximas de 87% de cor, 90% da turbidez e 15% da matéria orgânica do efluente.

As vantagens da coagulação com tanino, quando comparada à coagulação utilizando sulfato de alumínio, incluem a maior redução de cloretos e sulfatos, geração de menor volume e massa de lodo e menor custo total do tratamento, conforme relatado por Cruz et al. (2005). O lodo gerado pelo processo de tratamento do estudo de Cruz et al. (2005) foi classificado como Classe II A – Não perigoso e Não inerte, segundo NBR 10.004 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004).

Utilizando como efluente de estudo a água residuária de uma lavanderia industrial, Ströher et al. (2013) concluíram que a concentração de tanino de 100 mgL^{-1} , com tempos de mistura rápida, lenta e sedimentação correspondentes a 2, 20 e 20 minutos, respectivamente, foi possível remover 95,2% de cor, 98,4% de turbidez e 60,5% de matéria orgânica do efluente.

O estudo feito por Gonçalves (2015), utilizando flotação por ar dissolvido em escala de bancada com aplicação de Tanfloc como coagulante, chegou a eficiências de remoção de 90% para cor aparente, 96,90% para turbidez, 61,4% para DQO e 94,1% para SST. As remoções máximas correspondem as faixas de 140 a 150 mgL^{-1} de dosagem do coagulante e pH de 6,5 a 7,0.

3.7 DELINEAMENTO COMPOSTO CENTRAL ROTACIONAL - DCCR

Superfícies de resposta possibilitam aproximar um modelo empírico a uma relação entre fatores e variáveis resposta de um processo. Essa ferramenta estatística depende não apenas do método de estimativa dos parâmetros, mas também de um plano para coleta de dados, denominado delineamento. O

delineamento experimental e a análise de dados, em conjunto, auxiliam na determinação da importância dos fatores, da função deles no sistema e do porquê são importantes. O Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) tem como vantagem fornecer um plano experimental com número reduzido de combinações entre os fatores, o que confere a ele maior rentabilidade (MENDONÇA, 2012).

O DCCR, descrito por Rodrigues e Lemma (2009), é um delineamento simétrico e de segunda ordem que, para k fatores, é constituído por parte fatorial ($2k$), por um ou mais pontos centrais, e por parte axial (k^2). Assim, um delineamento composto central rotacional para dois fatores irá fornecer, no mínimo, nove combinações.

Segundo Mendonça (2012), os pontos cúbicos contribuem para a estimativa dos efeitos das interações entre os fatores (primeira ordem), ao passo que os pontos axiais contribuem majoritariamente para a estimativa dos termos quadráticos do modelo de segunda ordem e os pontos centrais, além de auxiliarem na estimativa dos efeitos quadráticos, possibilitam a determinação do erro puro quando mais de um ponto central é utilizado.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 LOCAL DE COLETA DO EFLUENTE TÊXTIL

A água residuária do processo têxtil foi coletada na saída do tanque de equalização da Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) de uma indústria têxtil, localizada no norte do Paraná, que realiza a produção completa dos tecidos, englobando os processos de fiação, malharia, tingimento, engomagem e estamparia. O volume coletado foi armazenado em galões de 25 L.

4.2 LOCAL DE REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

Os ensaios experimentais de coagulação/floculação/sedimentação, bem como o pré-ensaio e a análise dos parâmetros físico-químicos, foram realizados no Laboratório de Saneamento e no Laboratório de Poluentes Atmosféricos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) - câmpus Londrina (Figura 3).



Figura 3 - Laboratório de Saneamento (A) e Laboratório de Poluentes Atmosféricos (B) – UTFPR Câmpus Londrina

Fonte: Autoria própria

4.3 ENSAIOS

4.3.1 Pré-Ensaio

O pré-ensaio para determinar as concentrações dos coagulantes a serem utilizadas no planejamento experimental foi realizado com as dosagens de teste definidas com base na literatura de revisão. As concentrações utilizadas foram de 100, 200, 300, 500, 700 e 800 mgL⁻¹ para ambos os coagulantes, cloreto férrico e Tanfloc SG.

Béqueres de 500 mL contendo o efluente foram submetidos à agitação de homogeneização, as dosagens de teste foram adicionadas à amostra e procedeu-se com as misturas rápida, lenta e período de repouso, quando permite-se que os flocos sedimentem.

A dosagem mínima e máxima que apresentaram bom grau de coagulação (300 a 800 mgL⁻¹ para os dois coagulantes) foram dados de entrada para o planejamento experimental baseado na metodologia do Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR).

4.3.2 Preparo da solução de cloreto férrico

Para obter uma solução que pudesse ser utilizada para todas as concentrações contidas no planejamento experimental, diluiu-se 50 gramas de FeCl₃ em 500 mL de água deionizada, resultando em uma solução com concentração de 100 mgmL⁻¹.

4.3.3 Preparo da solução de Tanfloc SG

O produto Tanfloc SG é um produto líquido, por isso, no preparo da solução de tanino, foram adicionados 50 mL do produto a 500 mL de água deionizada. Assim, cada mL dessa solução forneceu 0,1 mL de Tanino – concentração considerada, a critério deste trabalho, 100 mgmL^{-1} .

4.3.4 Planejamento experimental e análise estatística dos resultados

Utilizando como dados de entrada os limites mínimos e máximos dos fatores estudados – tempo de sedimentação entre 0 e 40 minutos e concentração de coagulante entre 300 e 800 mgL^{-1} - gerou-se, com auxílio do programa Statistica 7.0, a matriz de delineamento composto central rotacional (DCCR) formada por 4 pontos axiais, 4 pontos fatoriais e 2 pontos centrais.

O plano experimental, descrito na Tabela 2, determinou as condições dos ensaios para os tratamentos com Tanfloc SG, cloreto férrico e coma combinação desses dois coagulantes. Ressalta-se que, no tratamento combinado, a concentração final foi obtida adicionando-se a metade da concentração de cloreto férrico e a outra metade de Tanfloc SG.

Tabela 2 – Planejamento Experimental para os três tratamentos aplicados

| Ensaio | Valores Codificados | | Valores Decodificados | |
|--------|---------------------|----------|-----------------------------------|-----------------|
| | Concentração | Tempo | Concentração (mgL ⁻¹) | Tempo (minutos) |
| 1 | -1,00000 | -1,00000 | 372,695 | 6 |
| 2 | 0,00000 | 0,00000 | 550 | 20 |
| 3 | 1,41421 | 0,00000 | 800 | 20 |
| 4 | 0,00000 | 1,41421 | 550 | 40 |
| 5 | 1,00000 | -1,00000 | 727,305 | 6 |
| 6 | 0,00000 | -1,41421 | 550 | 0 |
| 7 | 0,00000 | 0,00000 | 550 | 20 |
| 8 | -1,00000 | 1,00000 | 372,695 | 34 |
| 9 | 1,00000 | 1,00000 | 727,305 | 34 |
| 10 | -1,41421 | 0,00000 | 300 | 20 |

Fonte: Autoria própria

Os resultados obtidos a partir da execução dos ensaios em Jar-test e das análises dos parâmetros referentes às variáveis independentes (Eficiência de remoção de cor aparente, turbidez e sólidos totais) foram analisados estatisticamente utilizando o *software* Statistica 7.0. Por meio desse *software* foram geradas as superfícies de resposta, obtidos os coeficientes de regressão do modelo e feitas as análises de variância (ANOVA).

Na análise da influência dos fatores sobre as variáveis respostas, admitiu-se um nível de significância de 10%, ou seja, um p-valor < 0,10, devido à variabilidade inerente ao processo de tratamento.

Na análise da significância do modelo gerado, a partir da ANOVA, aplicou-se o teste F e usou-se um nível de 10% de significância. Se $F_{\text{calculado}} > F_{\text{tabelado}}$, há diferença significativa entre tratamentos ao nível de 10% de significância. Além disso, é apresentada a estatística R^2 , a qual mede a variação da variável resposta explicada pelas variáveis explicativas (independentes).

Importante ressaltar que, com exceção dos modelos sem variáveis significativas, os modelos apresentados foram gerados a partir dos coeficientes de

regressão das variáveis significativas após os ajustes e eliminação das variáveis não significativas.

4.3.5 Ensaio de Coagulação/Floculação/Sedimentação

Os ensaios de coagulação/floculação/sedimentação foram realizados utilizando o aparato Jar-test Nova Ética - Modelo 218 LDB, mostrado na Figura 4.

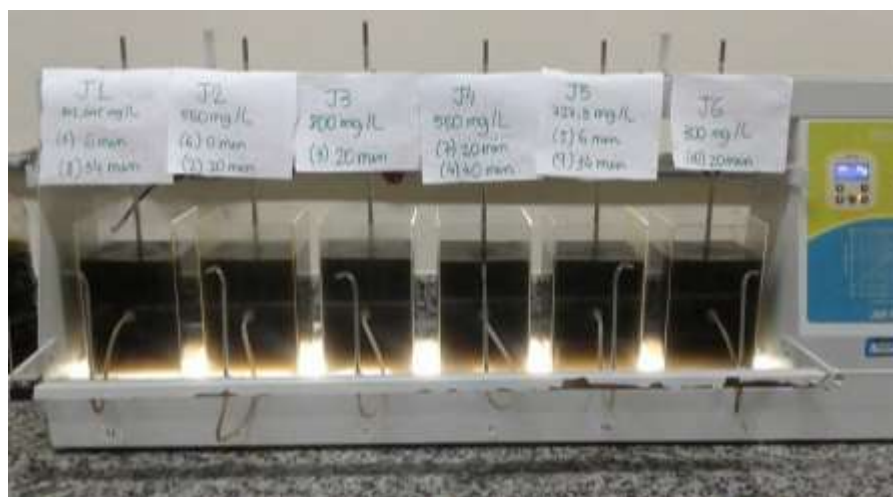


Figura 4 – Aparato Jar-test Nova Ética - Modelo 218 LDB
Fonte: Autoria própria

Primeiramente, 2 litros de efluente foram adicionados a cada jarro. Em seguida, o conteúdo foi homogeneizado e deu-se início à adição das dosagens determinadas pelo planejamento estatístico. Após a adição dos coagulantes, cronometrou-se o tempo de mistura rápida, seguido do tempo de mistura lenta e, finalmente, o tempo de sedimentação. A fim de garantir que o tempo de sedimentação fosse considerado apenas após o fim do movimento do fluido, aguardou-se 2 minutos antes de iniciar a contagem do tempo de sedimentação. Os tempos de mistura rápida e lenta e as respectivas velocidades de rotação adotadas estão descritas na Tabela 3.

Tabela 3 – Tempos de mistura e as respectivas velocidades de rotação adotadas para cada tratamento aplicado

| Tratamento | Tempo de mistura rápida (minutos) | Velocidade de mistura rápida (rpm) | Tempo de mistura lenta (minutos) | Velocidade de mistura lenta (rpm) |
|--------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| Tanfloc SG ^a | 2 | 90 | 20 | 35 |
| FeCl ₃ ^b | 5 | 150 | 15 | 30 |
| Combinação ^a | 2 | 90 | 20 | 35 |

^a Metodologia proposta por Couto Junior, 2012.

^b Metodologia proposta por Aboulhassam, 2015.

O tempo de sedimentação máximo foi de 40 minutos e, durante esse período, foram feitas coletas em intervalos de tempo de 0, 6, 20, 34 e 40 minutos, determinados pelo planejamento experimental.

4.3.6 Análise dos Parâmetros

Os testes analíticos dos parâmetros físico-químicos de controle foram realizados em conformidade com os métodos descritos no Standard Methods of Examination and Water and Wastewater (APHA, 2012) e estão detalhados no Quadro 1.

| Parâmetro | Equipamento | Metodologia |
|------------------------|---|-------------|
| pH | pHmetro Tecnocon mPA 210 | 4500-H+ B |
| Cor aparente | Espectrofotômetro Hach 4000 | 2120 C |
| Turbidez | Turbidímetro Hach 2100AN | 2130 B |
| Sólidos totais | Estufa SL 100, Mufla MA 385, Balança AW 220 | 2540 A |
| Condutividade elétrica | Condutivímetro Mca 150 | 2510 A |

Quadro 1 – Metodologias analíticas dos Parâmetros de Controle

Fonte: APHA, 2012.

Com a finalidade de avaliar a eficiência dos coagulantes utilizados nos ensaios, os valores de Eficiência de remoção de turbidez, cor aparente e sólidos totais foram calculados com base na Equação (2), onde X representa o parâmetro em estudo.

$$\% \text{ de Remoção} = \frac{X_{\text{bruto}} - X_{\text{amostra}}}{X_{\text{bruto}}} \quad (2)$$

Além de avaliar as eficiências de remoção de cor aparente, turbidez e sólidos totais, foi feito acompanhamento da variação do pH e da condutividade elétrica para os ensaios de cada tratamento.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As características físico-químicas do efluente bruto submetido aos tratamentos propostos por este trabalho estão descritas na Tabela 4.

Tabela 4 – Características do efluente bruto

| Parâmetro | Valor |
|--|--------------|
| pH | 6,95 |
| Turbidez (NTU) | 193 |
| Condutividade elétrica (mScm ⁻¹) | 6,04 |
| Sólidos Totais (mgL ⁻¹) | 6247 |
| Cor aparente (uH) | 2067 |

Fonte: Autoria própria

Os resultados analíticos dos cinco parâmetros analisados após os tratamentos com tanino, cloreto férrico e com a combinação desses dois coagulantes para cada ensaio estão descritos na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultados analíticos dos tratamentos com tanino, com FeCl_3 e com a combinação de tanino e FeCl_3

| | Identificação do ensaio | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|--|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Condições de ensaio | Concentração (mgL^{-1}) | 372,7 | 550,0 | 800,0 | 550,0 | 727,3 | 550,0 | 550,0 | 372,7 | 727,3 | 300,0 |
| | Tempo (min) | 6 | 20 | 20 | 40 | 6 | 0 | 20 | 34 | 34 | 20 |
| Tratamento com Tanfloc SG | ST (mgL^{-1}) | 6500 | 6570 | 6290 | 6370 | 6470 | 6390 | 6330 | 6040 | 5810 | 6090 |
| | pH | 7,08 | 6,9 | 6,91 | 6,96 | 6,86 | 6,87 | 7,21 | 7,17 | 7,07 | 7,23 |
| | Cor (uH) | 1920 | 1970 | 1880 | 1920 | 1930 | 2000 | 1910 | 1980 | 1860 | 2060 |
| | Condutividade (mScm^{-1}) | 6,14 | 6,1 | 6,11 | 6,11 | 6,07 | 6,06 | 6,07 | 6,09 | 6,11 | 6,08 |
| | Turbidez (NTU) | 180 | 179 | 166 | 164 | 161 | 122 | 123 | 149 | 165 | 165 |
| Tratamento com cloreto férrico (FeCl_3) | ST (mgL^{-1}) | 6580 | 5610 | 5420 | 6350 | 6290 | 6170 | 5750 | 6300 | 5870 | 6130 |
| | pH | 4,4 | 4,98 | 4,29 | 4,86 | 5,68 | 4,95 | 4,92 | 5,67 | 4,5 | 5,93 |
| | Cor (uH) | 4040 | 2150 | 1550 | 2100 | 2940 | 3320 | 2140 | 2240 | 1880 | 2370 |
| | Condutividade (mScm^{-1}) | 6,49 | 6,39 | 6,61 | 6,49 | 6,26 | 6,34 | 6,37 | 6,38 | 6,59 | 6,26 |
| | Turbidez (NTU) | 322 | 106 | 101 | 110 | 210 | 94,2 | 100 | 119 | 97,1 | 153 |
| Tratamento com Tanfloc SG + FeCl_3 | ST (mgL^{-1}) | 6830 | 6620 | 6080 | 6700 | 6870 | 7310 | 6880 | 6680 | 6400 | 5880 |
| | pH | 5,82 | 5,48 | 4,84 | 5,47 | 4,94 | 5,49 | 5,49 | 5,84 | 4,94 | 6 |
| | Cor (uH) | 2230 | 1820 | 1690 | 1680 | 3510 | 3330 | 1940 | 1710 | 1620 | 1860 |
| | Condutividade (mScm^{-1}) | 6,25 | 6,35 | 6,47 | 6,35 | 6,41 | 6,29 | 6,34 | 6,28 | 6,49 | 6,24 |
| | Turbidez (NTU) | 196 | 141 | 120 | 128 | 163 | 207 | 144 | 147 | 121 | 172 |

5.1 EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE SÓLIDOS TOTAIS

Os detalhes experimentais de cada ensaio e as respectivas eficiências de remoção de sólidos totais (%) para os tratamentos com tanino, cloreto férrico e com a combinação destes estão descritos na Tabela 6.

Tabela 6 – Eficiências de remoção de sólidos totais para os tratamentos com tanino, cloreto férrico e com a combinação de tanino e cloreto férrico

| Concentração (mgL ⁻¹) | Tempo (min) | Eficiência de Remoção de ST (%) | | |
|-----------------------------------|-------------|---------------------------------|-------------------|--------------------------------|
| | | Tanfloc SG | FeCl ³ | Tanfloc SG + FeCl ³ |
| 300 | 20 | 2,5 | 1,9 | 5,9 |
| 372,695 | 6 | -4,1 | -5,3 | -9,3 |
| 372,695 | 34 | 3,3 | -0,9 | -6,9 |
| 550 | 0 | -2,3 | 1,2 | -17,0 |
| 550 | 20 | -5,2 | 10,2 | -6,0 |
| 550 | 20 | -1,3 | 8,0 | -10,1 |
| 550 | 40 | -2,0 | -1,7 | -7,3 |
| 727,305 | 6 | -3,6 | -0,7 | -10,0 |
| 727,305 | 34 | 7,0 | 6,0 | -2,5 |
| 800 | 20 | -0,7 | 13,2 | 2,7 |

As tendências da eficiência de remoção de sólidos totais para cada tratamento são demonstradas nas superfícies de resposta para a variável Eficiência de remoção de sólidos totais (%), apresentadas na Figura 5, obtidas a partir dos ajustes dos modelos considerando apenas as variáveis independentes significativas.

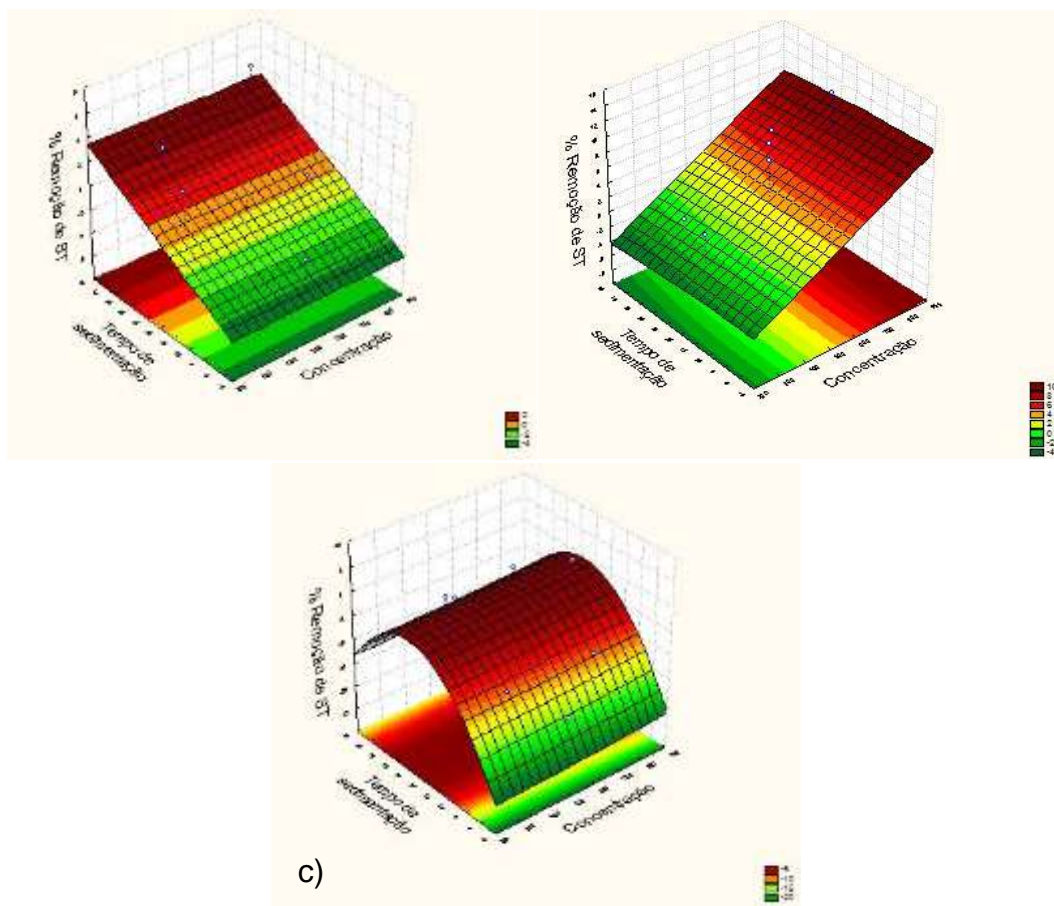


Figura 5 - Superfícies de resposta para a variável Eficiência de remoção de sólidos totais (%) com os fatores ajustados para o tratamento com (a) tanino, (b) FeCl₃ e (c) tanino + FeCl₃

A maior Eficiência de remoção de sólidos totais (7%) para o tratamento com tanino ocorreu com concentração 727,3 mgL⁻¹ e tempo de sedimentação de 34 minutos. Os ensaios demonstraram, de maneira generalizada, que o tempo de sedimentação se mostrou mais influente na remoção de sólidos totais do que a concentração do coagulante.

Para o tratamento com cloreto férrico, a maior Eficiência de remoção de sólidos totais obtida experimentalmente (13,2%) corresponde à concentração de 800 mgL⁻¹ de FeCl₃ e tempo de sedimentação de 20 minutos. Os maiores valores de porcentagem de remoção foram atingidos em concentrações do coagulante superiores a 550 mgL⁻¹. De acordo com o modelo estatístico, a concentração de coagulante teve mais peso sobre a remoção de sólidos totais do que o tempo de sedimentação.

No tratamento utilizando a combinação de tanino e cloreto férrico, o maior valor de Eficiência de remoção de sólidos totais foi atingido com a aplicação de 300 mgL⁻¹ de coagulante (150 mgL⁻¹ de cada um dos coagulantes) e 20 minutos de tempo de sedimentação. Esse ensaio resultou em 6 % de remoção de ST. A amostra tratada com 800 mgL⁻¹ de concentração e tempo de sedimentação de 20 minutos também resultou em remoção de sólidos, porém, com uma eficiência mais baixa (2,7%). O modelo indicou maior influência do tempo de sedimentação sobre a remoção de sólidos, onde tempos intermediários resultam em maiores eficiências de remoção.

A legislação não prevê um padrão de emissão em corpos hídricos para o parâmetro sólidos totais. No entanto, esse parâmetro é um instrumento importante na avaliação da remoção de diversos contaminantes que podem estar dissolvidos ou em suspensão no efluente.

Após realizar ajuste dos modelos, eliminando os fatores menos significativos, as variáveis explicativas que foram estatisticamente significativas ao nível de 10% - p-valor < 0,10 – foram Tempo linear para o tratamento com tanino, Tempo quadrático e Concentração linear para o tratamento com FeCl³ e Tempo linear, Concentração quadrática e Tempo quadrático para o tratamento com a combinação dos coagulantes.

Os efeitos estimados dos fatores sobre os modelos da eficiência de remoção de sólidos totais para os tratamentos com tanino, cloreto férrico e com a combinação desses dois coagulantes estão expostos na Tabela 7, 8 e 9, respectivamente.

Tabela 7 - Efeitos estimados dos fatores significativos para a variável resposta Eficiência de remoção de sólidos totais (%) para o tanino

| Fator | Efeito | Erro padrão | t(8) | p-valor | Estimativas por intervalo | |
|-------------------|-----------|-------------|-----------|----------|---------------------------|----------|
| | | | | | -90% | 90% |
| Intercepto | -0,629669 | 1,047311 | -0,601224 | 0,564334 | -2,57720 | 1,317857 |
| Tempo (L) | 4,550306 | 2,330002 | 1,952919 | 0,086601 | 0,21755 | 8,883056 |

Tabela 8 - Efeitos estimados dos fatores significativos para a variável resposta Eficiência de remoção de sólidos totais (%) para o cloreto férrico.

| Fator | Efeito | Erro padrão | t(7) | p-valor | Estimativas por intervalo | |
|------------------|----------|-------------|----------|----------|---------------------------|----------|
| | | | | | -90% | 90% |
| Intercepto | 7,03705 | 1,632188 | 4,31142 | 0,003517 | 3,9447 | 10,12936 |
| Concentração (L) | 6,90863 | 2,506595 | 2,75618 | 0,028251 | 2,1597 | 11,65757 |
| Tempo (Q) | -9,50470 | 2,939822 | -3,23309 | 0,014390 | -15,0744 | -3,93498 |

Tabela 9 – Efeitos estimados dos fatores significativos para a variável resposta Eficiência de remoção de sólidos totais (%) para a combinação de coagulantes

| Fator | Efeito | Erro padrão | t(7) | p-valor | Estimativas por intervalo | |
|------------------|----------|-------------|----------|----------|---------------------------|----------|
| | | | | | -90% | 90% |
| Intercepto | -8,08105 | 1,999942 | -4,04064 | 0,006798 | -11,9673 | -4,19480 |
| Concentração (L) | 10,73269 | 2,663327 | 4,02980 | 0,006882 | 5,5574 | 15,90801 |
| Tempo (L) | 5,90861 | 1,989865 | 2,96935 | 0,024979 | 2,0419 | 9,77527 |
| Tempo (Q) | -5,58257 | 2,603995 | -2,14385 | 0,075747 | -10,6426 | -0,52254 |

Os modelos matemáticos gerados através dos coeficientes de regressão dos fatores significativos para os tratamentos com tanino, cloreto férrico e com a combinação desses coagulantes são apresentados nas Equações (3), (4) e (5), respectivamente, onde T corresponde ao tempo de sedimentação e C à concentração do coagulante utilizado.

$$\% \text{ Remoção de } ST_{(\text{tanino})} = - 3,87989 + 0,16251 T \quad (3)$$

$$\% \text{ Remoção de } ST_{(\text{FeCl}_3)} = - 7,22908 + 0,01948 C - 0,00052 T^2 \quad (4)$$

$$\% \text{ Remoção de } ST_{(\text{tanino} + \text{FeCl}_3)} = - 17,144891 + 0,000002 C + 1,237121 T + - 0,025652 T^2 \quad (5)$$

No intervalo estudado, o modelo indica maior eficiência de remoção de sólidos totais para o tratamento com tanino (2,6%) com concentração de 550 mgL⁻¹ e 40 minutos de sedimentação. Para o tratamento com FeCl₃, a maior eficiência de

remoção de sólidos totais (8,1%), segundo o modelo estatístico, ocorre com concentração de 800 mgL^{-1} de cloreto férrico e 20 minutos de sedimentação. O modelo estatístico da eficiência de remoção de sólidos totais para o tratamento com a combinação de cloreto férrico e tanino não indica remoção de sólidos totais, mas aumento de sólidos totais, chegando no valor mínimo de aumento (-2,7 % da eficiência de remoção de sólidos totais) para tempos de sedimentação intermediários (20 minutos).

As análises de variância (ANOVA) dos modelos matemáticos da remoção de sólidos totais para os tratamentos com tanino, cloreto férrico e com a combinação deles, considerando nível de 10% de significância, estão descritas nas Tabelas 10, 11 e 12, respectivamente.

Tabela 10 – ANOVA para a variável resposta Eficiência de remoção de sólidos totais (%) com os fatores significativos para tratamento com tanino

| Fonte de Variação | Soma de Quadrados | Graus de Liberdade | Quadrado Médio | F _{calculado} | F _{tabelado} | R ² |
|-------------------|-------------------|--------------------|----------------|------------------------|-----------------------|----------------|
| Regressão | 41,8331 | 1 | 41,8331 | 3,8139 | 3,458 | 0,32283 |
| Resíduos | 87,7489 | 8 | 10,9686 | | | |
| Total | 129,5820 | 9 | | | | |

Tabela 11 – ANOVA para variável resposta Eficiência de remoção de sólidos totais (%) com os fatores significativos para tratamento com cloreto férrico.

| Fonte de Variação | Soma de Quadrados | Graus de Liberdade | Quadrado Médio | F _{calculado} | F _{tabelado} | R ² |
|-------------------|-------------------|--------------------|----------------|------------------------|-----------------------|----------------|
| Regressão | 226,1343 | 2 | 226,1343 | 18,0494 | 3,257 | 0,72055 |
| Resíduos | 87,7005 | 7 | 12,5286 | | | |
| Total | 313,8348 | 9 | | | | |

Tabela 12 – ANOVA para variável resposta Eficiência de remoção de sólidos totais (%) com os fatores significativos para o tratamento com a combinação de coagulantes

| Fonte de Variação | Soma de Quadrados | Graus de Liberdade | Quadrado Médio | F _{calculado} | F _{tabelado} | R ² |
|-------------------|-------------------|--------------------|----------------|------------------------|-----------------------|----------------|
| Regressão | 237,2176 | 3 | 237,2176 | 25,0564 | 3,289 | 0,87898 |
| Resíduos | 47,9996 | 6 | 7,9999 | | | |
| Total | 285,2172 | 9 | | | | |

O modelo matemático para o tanino é significativo, visto que $F_{\text{calculado}}$ é maior do que F_{tabelado} . Entretanto, o modelo explica apenas cerca de 32% da variação da variável resposta, ajustando-se insatisfatoriamente aos dados experimentais.

O modelo matemático gerado para o tratamento com cloreto férrico apresentou $F_{\text{calculado}} > F_{\text{tabelado}}$ e $R^2 = 0,72$, sendo, portanto, significativo e ajustando-se satisfatoriamente aos dados experimentais.

A ANOVA do modelo matemático para a combinação de coagulantes indica que o modelo é significativo ($F_{\text{calculado}} > F_{\text{tabelado}}$) e capaz de explicar cerca de 88% da variação da Eficiência de remoção de sólidos totais, ajustando-se muito bem aos dados experimentais.

5.2 EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE COR APARENTE

Na Tabela 13 estão detalhadas as condições experimentais e as eficiências de remoção de cor aparente (%) dos ensaios realizados para os tratamentos com tanino, cloreto férrico e com a combinação de tanino e cloreto férrico.

Tabela 13 – Eficiências de remoção de cor aparente para os tratamentos com tanino, cloreto férrico e com a combinação de tanino e cloreto férrico

| Concentração (mgL ⁻¹) | Tempo (min) | Eficiência de Remoção de cor aparente (%) | | |
|-----------------------------------|-------------|---|-------------------|--------------------------------|
| | | Tanfloc SG | FeCl ³ | Tanfloc SG + FeCl ³ |
| 300 | 20 | 0,3 | -14,7 | 10,0 |
| 372,695 | 6 | 7,1 | -95,5 | -7,9 |
| 372,695 | 34 | 4,2 | -8,4 | 17,3 |
| 550 | 0 | 3,2 | -60,6 | -61,1 |
| 550 | 20 | 4,7 | -4,0 | 11,9 |
| 550 | 20 | 7,6 | -3,5 | 6,1 |
| 550 | 40 | 7,1 | -1,6 | 18,7 |
| 727,305 | 6 | 6,6 | -42,3 | -69,8 |
| 727,305 | 34 | 10,0 | 9,0 | 21,6 |
| 800 | 20 | 9,0 | 25,0 | 18,2 |

Todos os ensaios realizados para o tanino resultaram em remoção de cor aparente. As maiores eficiências de remoção de cor foram atingidas nos ensaios com maior dosagem de coagulante. A amostra tratada com concentração de 727,3 mgL⁻¹ de tanino e tempo de sedimentação de 34 minutos atingiu a eficiência máxima de remoção de 10% de cor aparente. A segunda maior Eficiência de remoção de cor aparente foi atingida no ensaio realizado com 800 mgL⁻¹ de tanino e 20 minutos de tempo de sedimentação.

No tratamento com cloreto férrico, houve remoção de cor aparente apenas nos ensaios realizados com 727 mgL⁻¹ de cloreto férrico e 34 minutos de sedimentação (9%) e com 800 mgL⁻¹ de cloreto férrico e 20 minutos de sedimentação (25%). No ensaio com concentração de 727 mgL⁻¹ de cloreto férrico e 6 minutos de sedimentação, a cor foi aumentada em 42%. Todos os ensaios com concentrações iguais e tempos diferentes seguiram a mesma tendência de maior Eficiência de remoção de cor aparente com o aumento do tempo de sedimentação.

Para o tratamento com a combinação de tanino e cloreto férrico, a amostra tratada com 727 mgL⁻¹ da combinação de coagulantes e tempo de sedimentação de 34 minutos apresentou a maior Eficiência de remoção de cor (21,6%). De maneira geral, o tempo de sedimentação se mostrou mais influente no tratamento do que a concentração de coagulantes utilizada.

Após realização da análise estatística e desconsideração dos fatores não significativos na determinação da variável resposta, gerou-se as superfícies de

resposta para a Eficiência de remoção de cor aparente para cada tratamento, expostas na Figura 6, que mostram o comportamento da variável com relação aos fatores estudados.

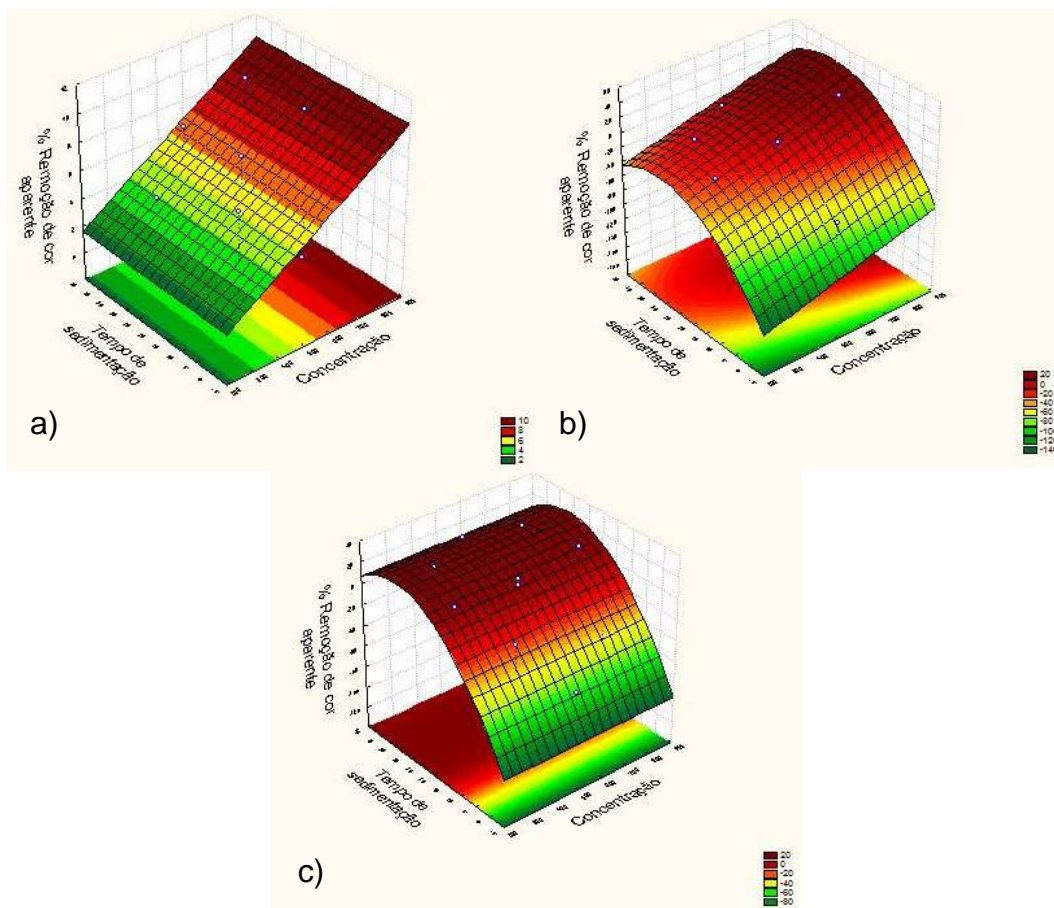


Figura 6 - Superfícies de resposta para a variável Eficiência de remoção de cor aparente (%) com os fatores ajustados para o tratamento com (a) tanino, (b) FeCl₃ e (c) tanino + FeCl₃

A Resolução 430 do CONAMA não estabelece limite para o parâmetro cor para emissão de efluentes em corpos hídricos, mas a resolução 357/05 do CONAMA estabelece que a cor verdadeira de corpos hídricos de Classe II não deve ultrapassar 75 mg PtL⁻¹. Após o tratamento, a cor aparente das amostras tratadas com tanino variou entre 1860 e 2067 uH, das amostras tratadas com cloreto férrico variou entre 1550 e 4040 uH e das amostras tratadas com a combinação de coagulantes variou entre 1620 e 3510 uH. Os resultados experimentais obtidos não indicam remoção de cor aparente alta o suficiente para emissão em corpos hídricos.

Os efeitos estimados dos fatores estatisticamente significativos ao nível de 10% (p -valor $< 0,10$) sobre os modelos da eficiência de remoção de cor aparente para os tratamentos com tanino, cloreto férrico e com a combinação desses dois coagulantes estão expostos na Tabela 14, 15 e 16, respectivamente.

Tabela 14 - Efeitos estimados dos fatores significativos para a variável resposta Eficiência de remoção de cor aparente (%) para o tanino

| Fator | Efeito | Erro padrão | t(8) | p-valor | Estimativas por intervalo | |
|------------------|----------|-------------|----------|----------|---------------------------|----------|
| | | | | | -90% | 90% |
| Intercepto | 5,983871 | 0,676053 | 8,851180 | 0,000021 | 4,726717 | 7,241025 |
| Concentração (L) | 4,413938 | 1,513955 | 2,915501 | 0,019425 | 1,598666 | 7,229211 |

Tabela 15 – Efeitos estimados dos fatores significativos para a variável resposta Eficiência de remoção de cor aparente (%) para o cloreto férrico.

| Fator | Efeito | Erro padrão | t(6) | p-valor | Estimativas por intervalo | |
|------------------|----------|-------------|----------|----------|---------------------------|----------|
| | | | | | -90% | 90% |
| Intercepto | -4,9911 | 7,71892 | -0,64661 | 0,541815 | -19,9904 | 10,00814 |
| Concentração (L) | 31,7420 | 11,85415 | 2,67771 | 0,036648 | 8,7073 | 54,77677 |
| Tempo (L) | 55,1173 | 11,77657 | 4,68025 | 0,003395 | 32,2333 | 78,00130 |
| Tempo (Q) | -36,3050 | 13,90296 | -2,61131 | 0,040050 | -63,3209 | -9,28901 |

Tabela 16 – Efeitos estimados dos fatores significativos para a variável resposta Eficiência de remoção de cor aparente (%) para a combinação de coagulantes

| Fator | Efeito | Erro padrão | t(7) | p-valor | Estimativas por intervalo | |
|-----------------|----------|-------------|----------|----------|---------------------------|----------|
| | | | | | -90% | 90% |
| Intercepto | 10,0408 | 5,86656 | 1,71153 | 0,137828 | -1,3590 | 21,4406 |
| Tempo (L) | 57,0846 | 8,95046 | 6,37783 | 0,000698 | 39,6922 | 74,4769 |
| Tempo (Q) | -33,5100 | 10,56657 | -3,17133 | 0,019286 | -54,0428 | -12,9773 |
| C (L) por T (L) | 33,1452 | 12,72228 | 2,60528 | 0,040375 | 8,4235 | 57,8669 |

Os modelos matemáticos da remoção de cor aparente gerados através dos coeficientes de regressão dos fatores significativos para os tratamentos com tanino, cloreto férrico e com a combinação desses coagulantes são apresentados nas

Equações (6), (7) e (8), respectivamente, onde T corresponde ao tempo de sedimentação e C à concentração do coagulante utilizado.

$$\% \text{ Remoção de cor aparente}_{(\text{tanino})} = -0,862146 + 0,012447 C \quad (6)$$

$$\% \text{ Remoção de cor aparente}_{(\text{FeCl}_3)} = -130,638 + 0,09 C + 5,673 T - 0,093 T^2 \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \% \text{ Remoção de cor aparente}_{(\text{tanino} + \text{FeCl}_3)} = & -64,92780 + 5,45155 T + \\ & -0,08548 T^2 + 0,00001 CT \end{aligned} \quad (8)$$

O modelo para a eficiência de remoção de cor para o tratamento com tanino prevê remoção máxima de 9,1% com concentração de 800 mgL⁻¹ de tanino e tempo de sedimentação de 20 minutos. Para o tratamento com cloreto férrico, o modelo indica remoção máxima (20,2%) sob concentração de 727,3 mgL⁻¹ de FeCl₃ e 34 minutos de sedimentação. Já para o tratamento com a combinação de coagulantes, o modelo da eficiência de remoção de cor prevê remoção máxima de 21,9% para concentração de 727,3 mgL⁻¹ da combinação de coagulantes e 34 minutos de sedimentação.

Na Tabelas 17, 18 e 19 estão detalhadas as análises de variância (ANOVA) dos modelos matemáticos da remoção de cor aparente, considerando nível de 10% de significância, para os tratamentos com tanino, cloreto férrico e com a combinação deles, respectivamente.

Tabela 17 - ANOVA para a variável resposta Eficiência de remoção de cor aparente (%) com os fatores significativos para tratamento com tanino

| Fonte de Variação | Soma de Quadrados | Graus de Liberdade | Quadrado Médio | F _{calculado} | F _{tabelado} | R ² |
|-------------------|-------------------|--------------------|----------------|------------------------|-----------------------|----------------|
| Regressão | 38,8498 | 1 | 38,8498 | 8,5001 | 3,458 | 0,51516 |
| Resíduos | 36,5639 | 8 | 4,5705 | | | |
| Total | 75,4136 | 9 | | | | |

Tabela 18 – ANOVA para variável resposta Eficiência de remoção de cor aparente (%) com os fatores significativos para tratamento com cloreto férrico.

| Fonte de Variação | Soma de Quadrados | Graus de Liberdade | Quadrado Médio | F _{calculado} | F _{tabelado} | R ² |
|-------------------|-------------------|--------------------|----------------|------------------------|-----------------------|----------------|
| Regressão | 10057,6558 | 3 | 10057,6558 | 35,8938 | 3,289 | 0,85678 |
| Resíduos | 1681,2334 | 6 | 280,2056 | | | |
| Total | 11738,8892 | 9 | | | | |

Tabela 19 – ANOVA para variável resposta Eficiência de remoção de cor aparente (%) com os fatores significativos para o tratamento com a combinação de coagulantes

| Fonte de Variação | Soma de Quadrados | Graus de Liberdade | Quadrado Médio | F _{calculado} | F _{tabelado} | R ² |
|-------------------|-------------------|--------------------|----------------|------------------------|-----------------------|----------------|
| Regressão | 9310,2373 | 3 | 9310,2373 | 50,7341 | 3,289 | 0,90554 |
| Resíduos | 971,1389 | 6 | 161,8565 | | | |
| Total | 10281,3762 | 9 | | | | |

O modelo matemático da remoção de cor aparente para o tratamento com tanino é significativo, pois $F_{\text{calculado}}$ é maior do que F_{tabelado} , mas não se ajusta bem aos dados experimentais, explicando, aproximadamente, 52% da variação da Eficiência de remoção de cor aparente.

Para o tratamento com cloreto férrico, o modelo matemático da remoção de cor aparente é significativo ($F_{\text{calculado}} > F_{\text{tabelado}}$) e ajusta-se bem aos dados experimentais ($R^2 = 0,86$).

O modelo matemático gerado para o tratamento com a combinação de coagulantes apresentou $F_{\text{calculado}} > F_{\text{tabelado}}$ e R^2 de aproximadamente 0,9. Importando que é significativo e se ajusta muito bem aos dados experimentais.

5.3 EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE TURBIDEZ

As eficiências de remoção de turbidez (%) de cada ensaio realizado para os tratamentos com tanino, cloreto férrico e com a combinação de tanino e cloreto férrico estão expostos na Tabela 20.

Tabela 20 – Eficiências de remoção de turbidez para os tratamentos com tanino, cloreto férrico e com a combinação de tanino e cloreto férrico

| Concentração (mgL ⁻¹) | Tempo (min) | Eficiência de Remoção de turbidez (%) | | |
|-----------------------------------|-------------|---------------------------------------|-------------------|--------------------------------|
| | | Tanfloc SG | FeCl ³ | Tanfloc SG + FeCl ³ |
| 300 | 20 | 14,4 | 20,6 | 10,7 |
| 372,695 | 6 | 6,6 | -67,1 | -1,7 |
| 372,695 | 34 | 22,7 | 38,2 | 23,7 |
| 550 | 0 | 36,7 | 51,1 | -7,4 |
| 550 | 20 | 7,1 | 45,0 | 26,8 |
| 550 | 20 | 36,2 | 48,1 | 25,3 |
| 550 | 40 | 14,9 | 42,9 | 33,6 |
| 727,305 | 6 | 16,4 | -9,0 | 15,4 |
| 727,305 | 34 | 14,4 | 49,6 | 37,2 |
| 800 | 20 | 13,8 | 47,6 | 37,7 |

Todos os ensaios realizados com o coagulante tanino foram efetivos na remoção de turbidez do efluente testado. As maiores eficiências de remoção de turbidez foram obtidas nos experimentos contendo 550 mgL⁻¹ de tanino com tempo de sedimentação de 0 e de 20 minutos, atingindo até 36,7 %. A Eficiência de remoção de turbidez no tratamento com tanino é maior para concentrações baixas e tempos elevados ou para concentrações altas e tempos baixos.

Para o tratamento com cloreto férrico, os ensaios com tempo de sedimentação superior a 6 minutos forneceram resultados positivos de Eficiência de remoção de turbidez. O ensaio que apresentou maior Eficiência de remoção, no entanto, foi o ensaio conduzido com concentração de 550 mgL⁻¹ de cloreto férrico e 0 minutos de tempo de sedimentação, chegando a 51,1 % de remoção. Todos os ensaios que receberam concentração de FeCl₃ acima de 550 mgL⁻¹ e tiveram tempo de sedimentação igual ou superior a 20 minutos apresentaram Eficiência de

remoção de turbidez entre 42 e 50%. Eficiência de remoção de turbidez para o tratamento com cloreto férrico aumenta com a concentração do coagulante e com o tempo de sedimentação.

A maior Eficiência de remoção de turbidez (aproximadamente, 38%) no tratamento com a combinação de tanino e cloreto férrico foi obtida com concentração de 800 mgL^{-1} da combinação de coagulantes e 20 minutos de sedimentação. O ensaio realizado com 727 mgL^{-1} da combinação de coagulantes e 34 minutos de sedimentação chegou à resultado similar (37,2% de Eficiência de remoção de turbidez). Os melhores resultados para a remoção de turbidez no tratamento com a combinação são atingidos em concentrações mais elevadas – próximas a 800 mgL^{-1} - e tempos de sedimentação maiores – 20 a 40.

As superfícies de resposta que ilustram a tendência da remoção de turbidez com a concentração e tempo de sedimentação dos tratamentos estão exibidas na Figura 7. A superfície de resposta para o tratamento com a combinação de coagulantes (c) foi ajustada com as variáveis significativas ao nível de 10%. Para os tratamentos apenas com tanino (a) ou com cloreto férrico (b), as superfícies de respostas foram geradas com os fatores de maior significância, visto que nenhuma variável foi significativa ao nível de 10%. Assim, as superfícies de resposta para o tratamento utilizando apenas tanino ou cloreto férrico são apenas ilustrativas, pois não expressam um comportamento estatisticamente significativo.

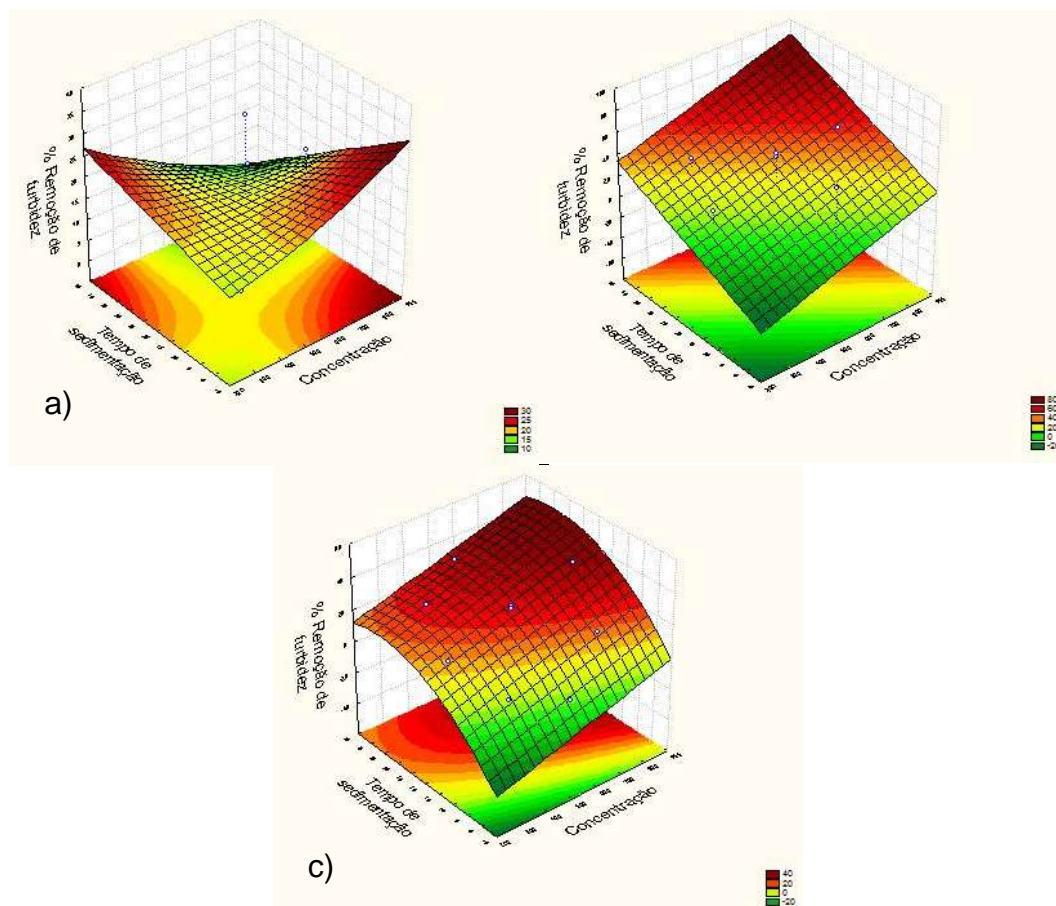


Figura 7 - Superfícies de resposta para a variável Eficiência de remoção de cor aparente (%) com os fatores ajustados para o tratamento com (a) tanino, (b) FeCl₃ e (c) tanino + FeCl₃

Ainda que não haja padrão de emissão em corpos hídricos para o parâmetro turbidez, A Resolução CONAMA 357/05 estipula 100 NTU como limite de turbidez para corpos d'água de Classe II. Assim, mesmo que a diluição seja pequena, um efluente que apresente turbidez próxima de 100 NTU não irá afetar a qualidade do corpo receptor no que diz respeito a este parâmetro. Os ensaios com concentração de 550 mgL⁻¹ de tanino e tempo de sedimentação de 0 e 20 minutos alcançaram 122 e 123 NTU, respectivamente. Os ensaios com concentração de FeCl₃ acima de 372 mgL⁻¹ e tempo de sedimentação igual ou superior a 20 minutos apresentam turbidez, se não menor, pouco maior de 100 NTU. O tratamento com 800 mgL⁻¹ da combinação de tanino e cloreto férrico e 20 minutos de sedimentação chegaram a valores de turbidez bem próximos de 100 NTU.

Conforme evidenciado na Figura 8, os modelos da Eficiência de remoção de turbidez para os tratamentos com tanino e também para o tratamento apenas com FeCl₃ não foram representativos, pois, mesmo após tentativas de reajuste

eliminando as variáveis menos significativas, nenhuma variável apresentou p-valor $<0,10$.

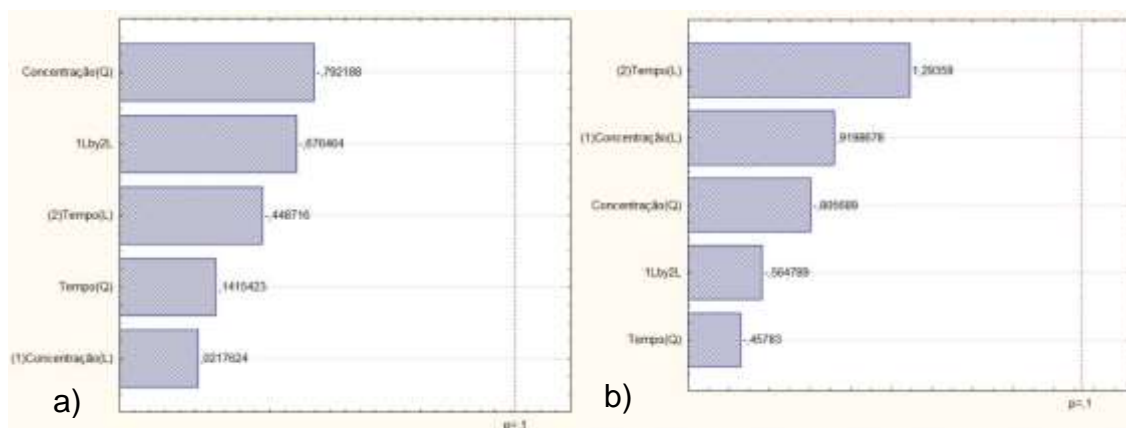


Figura 8 – Gráficos de Pareto para a variável resposta Eficiência de remoção de turbidez (%) para o tratamento com (a) tanino e (b) FeCl₃

Os efeitos estimados dos fatores estatisticamente significativos ao nível de 10% (p-valor $< 0,10$) sobre o modelo da eficiência de remoção de turbidez para o tratamento com a combinação de tanino e cloreto férrico estão expostos na Tabela 21.

Tabela 21 - Efeitos estimados dos fatores significativos para a variável resposta Eficiência de remoção de turbidez (%) para a combinação de coagulantes

| Fator | Efeito | Erro padrão | t(7) | p-valor | Estimativas por intervalo | |
|------------------|----------|-------------|----------|----------|---------------------------|----------|
| | | | | | -90% | 90% |
| Intercepto | 24,9613 | 1,012935 | 24,64255 | 0,000000 | 22,9930 | 26,92962 |
| Concentração (L) | 17,2208 | 1,555591 | 11,07025 | 0,000032 | 14,1980 | 20,24358 |
| Tempo (L) | 26,1849 | 1,545411 | 16,94362 | 0,000003 | 23,1818 | 29,18787 |
| Tempo (Q) | -11,9783 | 1,824452 | -6,56540 | 0,000598 | -15,5235 | -8,43302 |

O modelo matemático da Eficiência de remoção de turbidez gerado através dos coeficientes de regressão dos fatores significativos para o tratamento com a combinação de coagulantes é apresentado na Equação (9), onde T corresponde ao tempo de sedimentação e C à concentração.

$$\% \text{ Remoção de turbidez (tanino + FeCl}_3) = - 32,6743 + 0,0486 C + 2,1574 T + - 0,0306 T^2 \quad (9)$$

O modelo da eficiência de remoção de turbidez para o tratamento com a combinação de coagulantes indica eficiência máxima (40,7%) para 727,3 mgL⁻¹ de coagulante e 34 minutos de sedimentação.

A análise de variância (ANOVA) do modelo matemático da eficiência de remoção de turbidez, considerando nível de 10% de significância, para o tratamento com a combinação de tanino e cloreto férrico está descrita na Tabela 22. Considerando que $F_{\text{calculado}}$ é maior do que F_{tabelado} e que a variação explicada é de 98,7%, o modelo é significativo e se ajusta muito bem aos dados experimentais.

Tabela 22 – ANOVA para variável resposta Eficiência de remoção de turbidez (%) com os fatores significativos para o tratamento com a combinação de coagulantes

| Fonte de Variação | Soma de Quadrados | Graus de Liberdade | Quadrado Médio | $F_{\text{calculado}}$ | F_{tabelado} | R^2 |
|-------------------|-------------------|--------------------|----------------|------------------------|-----------------------|---------|
| Regressão | 2184,6260 | 3 | 2184,6260 | 409,6367 | 3,289 | 0,98692 |
| Resíduos | 28,9520 | 6 | 4,8253 | | | |
| Total | 2213,5780 | 9 | | | | |

5.4 ACOMPANHAMENTO DO pH

Os valores de pH obtidos nos ensaios realizados para os tratamentos com tanino, cloreto férrico e com a combinação de tanino e cloreto férrico estão expostos na Tabela 23.

Tabela 23 - Valores de pH dos ensaios realizados para os tratamentos com tanino, cloreto férrico e com a combinação de tanino e cloreto férrico

| Ensaio | Concentração (mgL ⁻¹) | Tempo (min) | pH | | |
|--------|-----------------------------------|-------------|------------|-------------------|--------------------------------|
| | | | Tanfloc SG | FeCl ³ | Tanfloc SG + FeCl ³ |
| 1 | 372,695 | 6 | 7,08 | 4,4 | 5,82 |
| 2 | 550 | 20 | 6,9 | 4,98 | 5,48 |
| 3 | 800 | 20 | 6,91 | 4,29 | 4,84 |
| 4 | 550 | 40 | 6,96 | 4,86 | 5,47 |
| 5 | 727,305 | 6 | 6,86 | 5,68 | 4,94 |
| 6 | 550 | 0 | 6,87 | 4,95 | 5,49 |
| 7 | 550 | 20 | 7,21 | 4,92 | 5,49 |
| 8 | 372,695 | 34 | 7,17 | 5,67 | 5,84 |
| 9 | 727,305 | 34 | 7,07 | 4,5 | 4,94 |
| 10 | 300 | 20 | 7,23 | 5,93 | 6,00 |

A Resolução 430/11 do CONAMA estabelece que, para emissão em corpo receptor, o efluente deve apresentar pH na faixa de 5,0 a 9,0. Os valores de pH dos ensaios realizados para os três tratamentos aplicados, bem como o valor de pH do efluente bruto e os limites de pH estabelecidos pela Resolução 430/11 do CONAMA, estão apresentados graficamente no Gráfico 1.

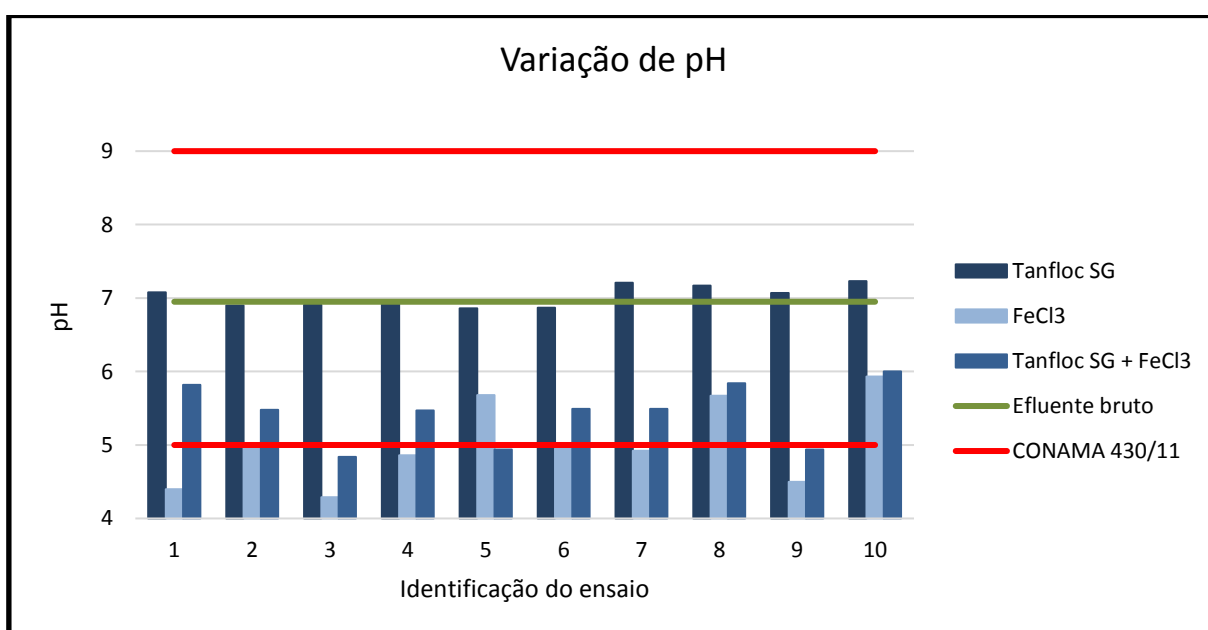


Gráfico 1 – pH do efluente bruto, limites de pH estabelecidos pela Resolução 430/11 do CONAMA e valores de pH das amostras tratadas com tanino, cloreto férrico e com a combinação de tanino e cloreto férrico

O pH das amostras tratadas com tanino variou entre 6,86 e 7,23, indicando pequena variação de pH nas amostras tratadas em relação ao pH do efluente bruto (pH 6,95). Os resultados de pH dos ensaios realizados com cloreto férrico variaram de 4,29 a 5,93, sendo que apenas 3 ensaios apresentaram resultados de pH acima de 5,0. Os valores de pH resultantes do tratamento com a combinação de cloreto férrico e tanino variou entre 4,84 e 6. As três amostras que receberam as maiores dosagens da combinação dos coagulantes (727 e 800 mgL⁻¹) tiveram seu pH reduzido para aquém de 5, contrariando as exigências da Resolução 430/11 do CONAMA.

Para o intervalo estudado, o tratamento com tanino atende a regulamentação para o parâmetro pH. No entanto, alguns ensaios para o tratamento apenas com cloreto férrico ou com a combinação de tanino e cloreto férrico não atenderam à faixa de pH exigida pela Resolução 430/11 do CONAMA. Como a alcalinidade do efluente bruto estava baixa devido à neutralização do pH feita por adição de ácido no tanque de equalização da ETE, a redução de pH dos tratamentos que levaram cloreto férrico se deve, essencialmente, à formação de hidróxidos de ferro, consumindo íons carbonato do meio. Isso reflete a necessidade de adição de carbonatos para aumentar a alcalinidade antes de se iniciar o processo de coagulação utilizando cloreto férrico, conforme explicado por Davis (2010).

5.5 VARIAÇÃO DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

Na Tabela 24 estão listados os valores de condutividade elétrica dos ensaios realizados para os tratamentos com tanino, cloreto férrico e com a combinação de tanino e cloreto férrico.

Tabela 24 - Valores de condutividade elétrica dos ensaios realizados para os tratamentos com tanino, cloreto férrico e com a combinação de tanino e cloreto férrico

| Ensaio | Concentração (mgL ⁻¹) | Tempo (min) | Condutividade (mScm ⁻¹) | | |
|--------|-----------------------------------|-------------|-------------------------------------|-------------------|--------------------------------|
| | | | Tanfloc SG | FeCl ³ | Tanfloc SG + FeCl ³ |
| 1 | 372,695 | 6 | 6,14 | 6,49 | 6,25 |
| 2 | 550 | 20 | 6,10 | 6,39 | 6,35 |
| 3 | 800 | 20 | 6,11 | 6,61 | 6,47 |
| 4 | 550 | 40 | 6,11 | 6,49 | 6,35 |
| 5 | 727,305 | 6 | 6,07 | 6,26 | 6,41 |
| 6 | 550 | 0 | 6,06 | 6,34 | 6,29 |
| 7 | 550 | 20 | 6,07 | 6,37 | 6,34 |
| 8 | 372,695 | 34 | 6,09 | 6,38 | 6,28 |
| 9 | 727,305 | 34 | 6,11 | 6,59 | 6,49 |
| 10 | 300 | 20 | 6,08 | 6,26 | 6,24 |

O parâmetro condutividade elétrica não deve atender a nenhum limite padrão para emissão de efluentes em corpos hídricos, visto que reflete apenas a quantidade de sais presentes no líquido. Esse parâmetro serve ao propósito de monitoramento, para que se compreenda se há ocorrência concomitante de precipitação de sais durante o tratamento ou aumento deles no processo.

Todos os ensaios resultaram em leve aumento de condutividade elétrica, independente de tempo de sedimentação, tipo ou concentração do coagulante utilizado. No tratamento com tanino, a condutividade elétrica final dos ensaios variou de 6,06 a 6,14 mScm⁻¹. Os ensaios realizados para o tratamento com cloreto férrico apresentaram condutividade elétrica entre 6,26 e 6,61 mScm⁻¹. O tratamento com a combinação de tanino e cloreto férrico resultou em faixa de condutividade variando entre 6,24 e 6,49 mScm⁻¹.

No Gráfico 2 estão evidenciadas as variações de condutividade elétrica dos ensaios realizados para cada tratamento com relação à condutividade elétrica do efluente bruto.

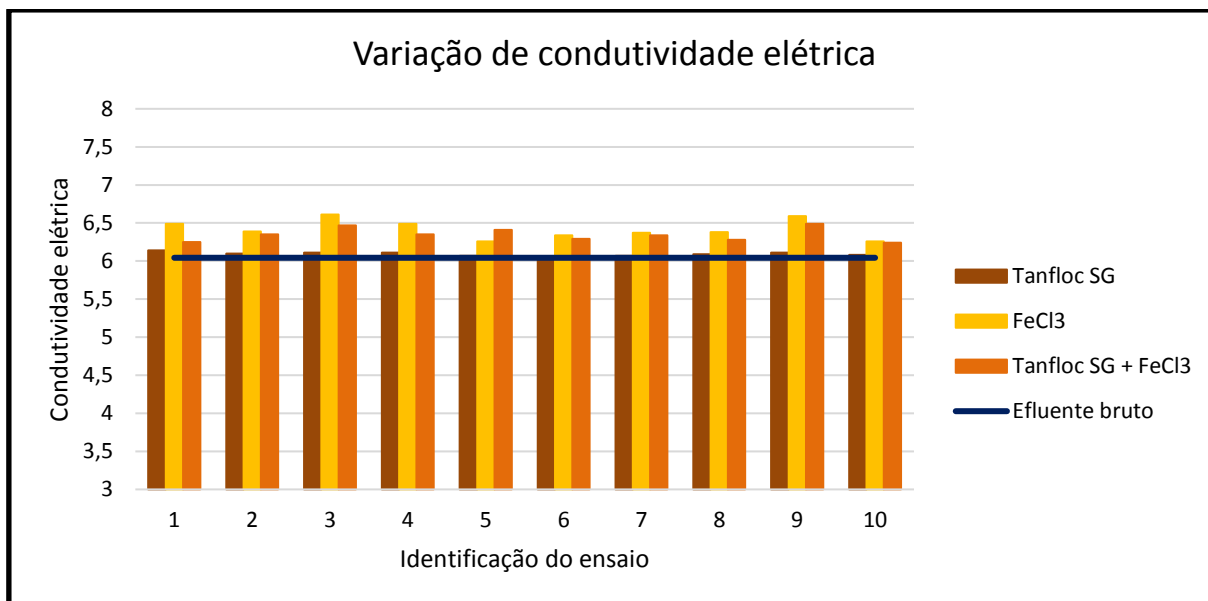


Gráfico 2 – pH do efluente bruto, limites de pH estabelecidos pela Resolução 430/11 do CONAMA e valores de pH das amostras tratadas com tanino, cloreto férrico e com a combinação de tanino e cloreto férrico

Como é possível observar no Gráfico 2, os tratamentos que levaram cloreto férrico (tratamento com cloreto férrico e com a combinação de cloreto férrico e tanino) apresentaram maior aumento na condutividade elétrica do efluente tratado. Isso pode ser explicado pela liberação do íon Cl^- durante a hidrólise do cloreto férrico. Como o íon Cl^- não participa da formação do floco após a formação de hidróxido de ferro, ele fica livre na solução e, provavelmente, contribui para o aumento da condutividade elétrica.

5.6 COMPARAÇÃO ENTRE OS TRATAMENTOS

As eficiências máximas de remoção de sólidos totais, cor aparente e turbidez, bem como as variações de pH e condutividade elétrica, obtidos experimentalmente estão detalhados na Tabela 25.

Tabela 25 – Eficiências máximas de remoção experimentais e faixas de variação de pH e condutividade elétrica para os três tratamentos

| Parâmetro avaliado | Coagulante | | |
|--|--|--|--|
| | Tanfloc SG | FeCl ₃ | Tanfloc SG + FeCl ₃ |
| Eficiência de remoção de sólidos totais (%) | 7,0% (727,305 mgL ⁻¹ e 34 min) | 13,2% (800 mgL ⁻¹ e 20 min) | 5,9% (300 mgL ⁻¹ e 20 min) |
| Eficiência de remoção de cor aparente (%) | 10,0% (727,305 mgL ⁻¹ e 34 min) | 25,0% (800 mgL ⁻¹ e 20 min) | 21,6% (727,305 mgL ⁻¹ e 34 min) |
| Eficiência de remoção de turbidez (%) | 36,2% (550 mgL ⁻¹ e 20 min) | 51,1% (550 mgL ⁻¹ e 0 min) | 37,7% (800 mgL ⁻¹ e 20 min) |
| Variação de pH | 6,86 a 7,23 | 4,29 a 5,93 | 4,84 a 6,0 |
| Variação de condutividade elétrica (mScm ⁻¹) | 6,06 a 6,14 | 6,26 a 6,61 | 6,24 a 6,49 |

O cloreto férrico se mostrou o coagulante mais eficiente na remoção de sólidos totais (13,23%), de cor aparente (25%) e de turbidez (51,1%) dentro das condições estudadas. A combinação de Tanfloc SG e FeCl₃ apresentou Eficiência de remoção de cor aparente próxima àquela apresentada pelo cloreto férrico (21,6%), mas foi menos eficiente na remoção de sólidos totais e turbidez, chegando a 5,9% e 37,7%, respectivamente. O Tanino (Tanfloc SG), apresentou as menores eficiências de remoção para os três parâmetros, mas atingiu uma Eficiência de remoção de turbidez relativamente boa (36,16%) quando comparada às eficiências de remoção para os outros parâmetros.

Ainda que as porcentagens de remoção para o cloreto férrico tenham sido mais satisfatórias em termos de resultados laboratoriais, há que se atentar para a redução de pH causada pela utilização desse coagulante. Como toda a alcalinidade do efluente havia sido consumida no processo de neutralização de pH, houve redução do pH do efluente para aquém da faixa de pH permitida pela Resolução CONAMA 430/11.

A porcentagem de remoção de turbidez do tratamento com cloreto férrico se aproxima do valor máximo obtido por Silva et al. (2001), que correspondeu a 60%

utilizando 120 mgL^{-1} de FeCl_3 em pH de 8,8. A dosagem utilizada por Silva et al. (2001), no entanto, foi muito inferior à dosagem ótima determinada por este estudo. Aboulhassam et al. (2006) e Costa Junior et al. (2013) chegaram a resultados superiores a 90% de remoção de cor e turbidez utilizando 650 e 800 mgL^{-1} de FeCl_3 , respectivamente.

Para o coagulante tanino, Couto Junior et al. (2012), Souza, Souza e Pereira (2014) e Ströher et al. (2013) chegaram a eficiências máximas de remoção de cor e turbidez entre 87 a 99,17%.

A baixa eficiência de remoção dos parâmetros avaliados por esse estudo, quando comparada às eficiências de remoção apresentadas pela literatura, apontam para uma maior inviabilidade da aplicação do processo de coagulação e floculação – nas condições estudadas – no tratamento do efluente utilizado. Pode-se considerar como origem dessa ineficácia as características inerentes ao efluente

Já foi destacado anteriormente que o efluente têxtil é muito variável, seja em decorrência dos processos empregados ou dos insumos utilizados. Assim, pode haver muita diferença entre efluentes de diferentes indústrias e, até mesmo, variações das características do efluente de uma mesma indústria. Considerando que o efluente não foi caracterizado em alcalinidade, DBO, DQO e cor verdadeira, muitas das características que interferem no processo – como o excesso de compostos orgânicos, que possui remoção deficiente no processo (KUNZ et al., 2002) – podem ter sido desconsideradas.

Dos parâmetros avaliados por esse estudo, a Resolução 430/11 do CONAMA estabelece padrão para emissão apenas para o pH do efluente, permitindo emissão de efluentes com pH entre 5,0 e 9,0. O tratamento com tanino atendeu a esse limite para todos os ensaios realizados. Dos 10 ensaios executados com FeCl_3 , apenas 3 ensaios indicam o cumprimento da resolução. Quanto à combinação dos coagulantes, 7 dos 10 ensaios atenderam a faixa de pH estabelecida pela resolução, sendo que os 3 ensaios que apresentaram pH abaixo de 5,0 foram aqueles com as maiores dosagens (727 e 800 mgL^{-1}).

Os limites para os parâmetros cor e turbidez não estão previstos pela Resolução 430/11 do CONAMA. No entanto, a Resolução 357/05 do CONAMA estabelece padrão de cor e turbidez para as classes de corpos hídricos, o que permite fazer uma aproximação para o valor de emissão – cabe destacar que essa aproximação é grosseira, pois a qualidade final depende do grau de diluição do

efluente na água e das características prévias do corpo hídrico. Para a Classe II, a referida resolução estabelece o limite de cor verdadeira de 75 uH e turbidez de 100 NTU. Nenhum dos três tratamentos atingiu valores próximos a 75 uH de cor aparente, indicando que nenhum deles atenderia a esse padrão. Utilizando a dosagem de 550 mgL^{-1} e 20 minutos de sedimentação, o tratamento com Tanfloc SG chegou à turbidez de 123 NTU. No tratamento com cloreto férrico, dosagens e tempos de sedimentação iguais ou maiores do que 372 mgL^{-1} e 20 minutos chegaram à valores de turbidez próximos de 100 NTU. Para a combinação de coagulantes, chegou-se à valores próximos de 100 NTU nos ensaios com concentração e tempo de sedimentação iguais ou maiores do que 727 mgL^{-1} e 20 minutos.

Em termos de influência dos fatores sobre as variáveis, o modelo da remoção de cor aparente pelo coagulante tanino se mostrou dependente da concentração linear, enquanto que a remoção de ST pelo mesmo coagulante foi dependente do tempo de sedimentação linear. Para o cloreto férrico, essa tendência foi invertida, ou seja, a remoção de cor aparente foi mais dependente do tempo de sedimentação linear, ao passo que a remoção de ST foi mais dependente da concentração linear. No tratamento utilizando a combinação dos dois coagulantes, tanto a remoção de cor aparente quanto a de ST e turbidez, foram mais dependentes do tempo de sedimentação linear.

As eficiências de remoção máximas dos parâmetros, levando em consideração apenas os modelos estatísticos para os tratamentos, estão expostas na Tabela 26.

Tabela 26 – Eficiências de remoção máximas de cor aparente, turbidez e sólidos totais previstas pelos modelos de cada tratamento aplicado

| Coagulante | Eficiência de remoção de sólidos totais (%) | Eficiência de remoção de cor aparente (%) | Eficiência de remoção de turbidez (%) |
|--------------------------------|--|---|---|
| Tanfloc SG | 2,6 ^b (550 mgL^{-1} e 40 minutos) | 9,1 ^c (800 mgL^{-1} e 20 minutos) | - a |
| FeCl ₃ | 8,1 ^{bc} (800 mgL^{-1} e 20 minutos) | 20,2 ^{bc} ($727,3 \text{ mgL}^{-1}$ e 34 minutos) | - a |
| Tanfloc SG + FeCl ₃ | - 2,7 ^{bc} (550 mgL^{-1} e 20 minutos) | 21,9 ^{bc} ($727,3 \text{ mgL}^{-1}$ e 34 minutos) | 40,7 ^{bc} ($727,3 \text{ mgL}^{-1}$ e 34 minutos) |

^aParâmetro estatisticamente não significativo

^bParâmetro Dependente de tempo

^cParâmetro Dependente de concentração

6 CONCLUSÃO

O tratamento com 800 mgL^{-1} da combinação de cloreto férrico e tanino apresentou Eficiência de remoção de cor aparente experimental (18,2%) próxima àquela obtida com o tratamento utilizando a mesma concentração do coagulante químico cloreto férrico (25%). Com relação à Eficiência de remoção de turbidez e de ST, a combinação de coagulantes chegou a eficiências de remoção (37,7% e 2,7%, respectivamente) menores do que aquelas apresentadas obtidas pela aplicação isolada de cloreto férrico (47,6% e 13,2%). O tanino, na concentração de 727 mgL^{-1} , não apresentou remoção máxima satisfatória de cor aparente (10%) e de sólidos totais (7%). Na concentração de 550 mgL^{-1} , o Tanfloc SG apresentou remoção aproximada de turbidez de 36%.

No intervalo estudado, os modelos estatísticos para o tratamento com tanino preveem eficiências máximas de remoção de 2,6% de sólidos totais e 9,1% de cor aparente. Para o tratamento com cloreto férrico, os modelos estatísticos indicam eficiências máximas de remoção de 8,1% de sólidos totais e 20,2% de cor aparente. Os modelos para o tratamento com a combinação de tanino e cloreto férrico preveem Eficiências máximas de remoção de -2,7% de sólidos totais, 21,9% de cor aparente e 40,7% de turbidez.

Nenhum dos tratamentos estudados apresentaram resultados satisfatórios de remoção de cor aparente a critério de atendimento à Resolução 357/05 do CONAMA (limite de cor para corpos hídricos de Classe II). Para a remoção de turbidez, os três tratamentos podem atender à essa resolução na sua concentração ótima, observado o grau de diluição no corpo receptor. Quanto ao padrão de emissão para pH, estipulado pela Resolução 430/11 do CONAMA, apenas o tratamento com tanino atendeu a faixa de pH de 5,0 a 9,0 para todos os ensaios realizados.

O tratamento com cloreto férrico foi experimentalmente mais eficiente na remoção de cor aparente, sólidos totais e turbidez. No entanto, as previsões dos modelos estatísticos indicam que a combinação de tanino e cloreto férrico chega a resultados superiores de Eficiências máximas de remoção de cor aparente e turbidez.

REFERÊNCIAS

ABOULHASSAN, M.A. et al., 2005. **Improvement of Paint Effluents Coagulation Using Natural and Synthetic Coagulant Aids**. Journal of Hazardous Materials, v. B138, p. 40-45, 2006.

APHA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 22. ed. Washington, 2012.

ASANO, Takashi (Editor). **Wastewater Reclamation and Reuse**. New York: CRC Press, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE INDÚSTRIA TÊXTIL E DE CONFECÇÃO. **Agenda de Competitividade da Indústria Têxtil e de Confecção Brasileira 2015 a 2018**. Disponível em: <<http://www.abit.org.br/Publicacao.aspx#26>>. Acesso em: 30 ago. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro, 2004.

BATTESTIN, Vania; MATSUDA, Luis K.; MACEDO, Gabriela A. Fontes e aplicações de taninos e tanases em alimentos. **Alimentos e Nutrição**, Araraquara, v. 15, n. 1, p. 63-72, 2004. Disponível em: <<http://serv-bib.fcfar.unesp.br/seer/index.php/alimentos/article/viewArticle/58>>. Acesso em: 18 mar. 2016.

BELTRAME, Leocádia T. C. **Caracterização de Efluente Têxtil e proposta de Tratamento**. 2000. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2000.

BEZERRA, Francisco D. Análise retrospectiva e prospectiva do setor têxtil no Brasil e no Nordeste. **Informe Macroeconomia, Indústria e Serviços**, Fortaleza, ano VIII, n. 2, ago. 2014. Disponível em: <http://www.bnb.gov.br/documents/88765/89729/iis_ano8_n03_2014_textil.pdf/d9c9bcd3-38ac-4991-bf84-d25669d9c818>. Acesso em: 22 mai. 2016.

BRAILE, Pedro M.; CAVALCANTI, José E. W. A. **Manual de Tratamento de Águas Residuárias Industriais**. São Paulo: CETESB, 1993.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. **Diário Oficial da União República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 18 mar. 2005. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>>. Acesso em: 31 ago. 2015.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. **Diário Oficial da União República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 16 mai. 2011. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>>. Acesso em: 31 ago. 2015.

CASTRO, Fernando C. **Ambiente: Polímero orgânico natural trata água e efluentes**. Portal Química, 14 ago. 2002. Disponível em: <<http://www.quimica.com.br/pquimica/25003/ambiente-polimetro-organico-natural-trata-agua-e-efluentes/>>. Acesso em 29 jan. 2016.

CETESB. **Guia técnico ambiental da indústria têxtil**: Série P+L. São Paulo, 2009. 81 p. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/Tecnologia/producao_limpa/documentos/guia_textil.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2015.

COSTA JUNIOR et al. **Tratamento de efluente têxtil utilizando coagulação/floculação**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE QUÍMICA, 53, 2013, Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.abq.org.br/cbq/2013/trabalhos/5/3386-17002.html>>. Acesso em: 30 set. 2015.

COUTO JUNIOR, Osorio M. et al. Caracterização e Otimização do Tratamento de Efluente Têxtil por Coagulação-Floculação, Utilizando Coagulante Natural Tanino. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, v.14, n. 1, p. 79-90, 2012. Disponível em: <<http://revistas.unicentro.br/index.php/RECEN/article/view/1747>>. Acesso em: 28 jan. 2016.

CRUZ, João G. H. et al. Aplicação de coagulante vegetal à base de tanino no tratamento por coagulação/floculação e adsorção/ coagulação/floculação do efluente de uma lavanderia industrial. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23., 2005, Campo Grande. **Saneamento ambiental Brasileiro: Utopia ou realidade?** Rio de Janeiro: ABES, 2005. Disponível em: <<http://bases.bireme.br/cgi-bin/wxislind.exe/iah/online/?IsisScript=iah/iah.xis&src=google&base=REPIDISCA&lang=p&nextAction=lnk&exprSearch=37527&indexSearch=ID>>. Acesso em: 20 fev. 2016.

DAVIS, Mackenzie L. **Water and Wastewater Engineering: Design Principles and Practice**. 1. ed. New York: McGraw-Hill, 2010.

FEAM. **Guia técnico ambiental da indústria têxtil**. Minas Gerais, 2014. 65 p.

Disponível em:

<http://www.feam.br/images/stories/producao_sustentavel/GUIAS_TECNICOS_AMBIENTAIS/guia_textil.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2015.

GONÇALVES, Leandro V. **Tratamento eletroquímico e físico-químico para efluente de lavanderia industrial têxtil**. 2015, 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015. Disponível em:

<<http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/1229>>. Acesso em: 12 jan. 2016.

JORDÃO, Eduardo P.; PESSÔA, Constantino A. **Tratamento de esgotos domésticos**. 4. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2005.

JORGE, Fernando C. et al. Aplicações para as Cascas de Árvores e para os Extractos Taninosos: Uma Revisão. **Silva Lusitana**, Lisboa, Portugal, v. 9, n. 2, p. 225-236, 2001. Disponível em:

<https://bibliotecadigital.ipb.pt/bitstream/10198/1273/1/2001_sl_Jorge_et_al.pdf>. Acesso em: 07 fev. 2016.

KAWAMURA, Susumu. **Integrated Design and Operation of Water Treatment Facilities**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 2000.

KIMURA, Irene Y. **Remoção de corantes reativos contendo grupos vinilsulfona e triazina por adsorção e coagulação/floculação com quitosana**. 2001. 200 f. Tese (Doutorado em Química). Universidade Federal De Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2001.

KUNZ, Airton et al. Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis. **Química Nova**, São Paulo, v. 25, n. 1, p. 78-82, 2002.

LIBÂNIO, Marcelo. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 3. ed. Campinas: Editora Átomo, 2010.

MENDONÇA, Layanne A. **Desempenho do delineamento composto central em experimentos com alto coeficiente de variação**. 2012, 68 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Estatística Aplicada e Biometria, Universidade Federal de Viçosa, 2012. Disponível em:

<<http://www.locus.ufv.br/bitstream/handle/123456789/4052/texto%20completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 14 mai. 2016.

METCALF & EDDY, Inc.; TCHOBANOGLIOUS, George (revisor); BURTON, Franklin L. (revisor); STENSEL, David H. (revisor). **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2003.

MONTEIRO, Júlio M. et al. Taninos: Uma abordagem a química à ecologia. **Química Nova**, São Paulo, v. 28, n. 5, 892-896, 2005. Disponível em: <http://quimicanova.sbq.org.br/detalhe_artigo.asp?id=3220>. Acesso em: 18 mar. 2016.

MOREIRA, Marli. **Indústria têxtil prevê retomada de crescimento só em 2016**. Exame, São Paulo: Abril, jan. 2015. Seção Economia. Disponível em: <<http://exame.abril.com.br/economia/noticias/industria-textil-preve-retomada-de-crescimento-so-em-2016>>. Acesso em: 30 ago. 2015.

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

QUADROS, Silvana S. de. **Tratamento e reutilização de efluentes têxteis gerados nos tingimentos de tecidos de algodão**. 2005. 110 f. Dissertação (Mestrado em Química) - Centro de Ciências Exatas e Naturais, Universidade Regional De Blumenau, Blumenau, 2005.

RICHTER, Carlos A.; NETTO, José M. A. **Tratamento de Água: Tecnologia atualizada**. São Paulo: Blucher, 1991.

RODRIGUES, Maria I.; IEMMA, Antônio F. **Planejamento de Experimentos e Otimização de Processos**. 2. ed. Campinas: Casa do Espírito Amigo Fraternidade Fé e Amor, 2009.

SÁNCHEZ-MARTÍN, J.; BELTRÁN-HEREDIA, J.; SOLERA-HERNÁNDEZ, C. Surface water and wastewater treatment using a new tannin-based coagulant. Pilot plant trials. **Journal of Environmental Management**, v. 91, n. 10, 2051-2058, 2010. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479710001428>>. Acesso em: 02 fev. 2016.

SILVA, Fernando J. A. et al. **Descolorização de efluente de indústria têxtil utilizando coagulante natural (Moringa oleifera e quitosana)**. In: CONGRESSO

BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21, 2001, João Pessoa. Disponível em: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/aresidua/brasil/ii-113.pdf>>. Acesso em: 18 abr. 2015.

SOUZA, A. P. C.; SOUZA, E. A. M; PEREIRA, N. C. Análise da utilização do coagulante tanino na remoção da cor, turbidez e DQO do efluente têxtil de uma lavanderia industrial. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 20., 2014, Florianópolis. **Anais...** São Paulo: Blucher, 2015. Disponível em: <<http://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/anlise-da-utilizao-do-coagulante-tanino-na-remoo-da-cor-turbidez-e-dqo-do-efluente-textil-de-uma-lavanderia-industrial-18688>>. Acesso em: 05 fev. 2016.

STRÖHER, Ana Paula et al. Utilização de coagulantes naturais no tratamento de efluente proveniente de lavagem de jeans. **Engevista**, v. 15, n. 3, p. 255-260, 2013. Disponível em: <<http://www.uff.br/engevista/seer/index.php/engevista/article/view/445>>. Acesso em: 13 fev. 2016.

TANAC S.A. Lamb, L.; Decusati, O. Manufacturing Process for Quaternary Ammonium Tannate, a Vegetable Coagulating and Flocculating Agent. US Patent 6478986 B1, 12 nov. 2002.

TANAC. **Produtos**: Tratamento de águas. Disponível em: <<http://www.tanac.com.br/pt-br/produtos/aguas>>. Acesso em 30 jan. 2016.

VERMA, Akshaya. K.; DASH, Rajesh R.; BHUNIA, Puspendu; 2011. **A review on chemical coagulation/flocculation technologies for removal of colour from textile wastewaters**. Journal of Environmental Management, v. 93, p.154 - 168, 2012.