

## ESTUDO E TRATAMENTO DO EFLUENTE LÍQUIDO ORIGINADO DO PROCESSO DE PINTURA DE ARTEFATOS EM MADEIRA

*Tailene Junges<sup>1</sup>*

*Fernanda Rosa Silveira<sup>2</sup>*

*Janice Botelho Souza Hamm<sup>3</sup>*

*Fernanda Siqueira Souza<sup>4</sup>*

**Resumo:** O presente trabalho estudou a eficiência dos testes de coagulação/floculação/sedimentação dos coagulantes cloreto férrico, sulfato de alumínio, tanino de acácia negra e aquafloc AST, em um efluente coletado diretamente da cabine de pintura de uma empresa do ramo de fabricação de artefatos em madeiras. Os ensaios foram realizados de acordo com um planejamento experimental 2<sup>2</sup> com ponto central, onde as variáveis modificadas foram a concentração e a velocidade de agitação na floculação, as variáveis fixas foram velocidade de coagulação, tempo de decantação, de floculação e de coagulação, e os parâmetros de resposta foram cor e DQO. Todos os resultados foram analisados mediante comparação com os padrões estabelecidos pela Resolução CONSEMA nº 355/2017. Em relação ao parâmetro cor, os coagulantes inorgânicos mostraram-se mais eficientes na remoção quando comparados com os coagulantes orgânicos. A DQO obteve melhores eficiência de remoção com os coagulantes cloreto férrico e tanino. Apesar do alto percentual de eficiência obtido, todos os resultados ficaram acima do que estabelece a legislação.

**Palavras-chaves:** Coagulação. Efluente industrial. Tratamento de efluentes.

## STUDY AND TREATMENT OF LIQUID EFFLUENT ORIGINATED FROM THE WOODEN ARTIFICIAL PAINTING PROCESS

**Abstract:** The present work studied the efficiency of the tests of coagulation/flocculation/sedimentation of inorganic coagulants, ferric chloride and aluminum sulphate, and organic coagulants tannin of *acacia negra* and aquafloc AST, in an effluent that was collected directly from the painting booth from company that manufactures wood artifacts. The tests were performed according to a 2<sup>2</sup> experimental design with a central point, where the modified variables were the concentration and agitation speed in the flocculation, the fixed variables were coagulation speed, decantation time, flocculation time and coagulation time, and the response parameters were color and DQO. All results' evaluation were performed by comparison with the standards established by CONSEMA Resolution nº 355/2017. Regarding the color parameter, inorganic coagulants were more efficient in removing when compared with organic coagulants. The DQO obtained better removal efficiency with ferric chloride and tannin coagulants. Despite the great efficiency, all the results were above what the legislation establishes.

**Keywords:** Coagulation. Industrial effluent. Wastewater treatment.

1 Acadêmico do Curso de Engenharia Ambiental, Universidade La Salle, [taijunges@gmail.com](mailto:taijunges@gmail.com)

2 Acadêmico do Curso de Eng. Ambiental, Universidade La Salle, [fernanda.rsilveira@outlook.com](mailto:fernanda.rsilveira@outlook.com)

3 Prof. Dra. em Engenharia Química, Universidade La Salle, [janice.hamm@unilasalle.edu.br](mailto:janice.hamm@unilasalle.edu.br)

4 Prof. Dra. em Engenharia Química, Universidade La Salle, [fernanda.siqsouza@gmail.br](mailto:fernanda.siqsouza@gmail.br)

## INTRODUÇÃO

Com a produção mundial em alta e o uso extensivo de tintas, a descarga de efluentes contendo tais substâncias sem o devido tratamento, tem-se a geração de graves impactos ambientais e problemas patológicos para a saúde humana, com reflexo direto na qualidade de vida da população (JAHNKE; HORNBUCKLE, 2019).

Visando minimizar os impactos ambientais gerados pelo uso incorreto e a disposição final imprópria de recursos naturais, exigências legais foram elaboradas, no qual o tratamento de efluentes, entre outros aspectos, passou a ser indispensável (FREIRE, FREITAS, 2010).

Segundo a legislação Brasileira, o lançamento direto de efluentes deve atender as normas do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, através da Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011, que dispõe sobre condições, padrões e diretrizes para gestão do lançamento de efluentes (BRASIL, 2011). No estado do Rio Grande do Sul deve-se atender, também, o Conselho Estadual do Meio Ambiente – CONSEMA, através da Resolução CONSEMA nº 355, de 13 de setembro de 2017, que impõem critérios e padrões de emissão de efluentes líquidos (CONSEMA-RS, 2017).

Dentre as tecnologias avançadas, as propostas como alternativa de tratamento de efluente industrial, destacam-se o processo de coagulação/floculação seguido de sedimentação, eletrocoagulação, flotação por ar dissolvido, processos oxidativos avançados, processos de adsorção, separação por membranas, entre outros (MANCUSO; SANTOS, 2003). A escolha de um ou mais tratamento a ser utilizado deve ser característica para cada indústria, a fim de alcançar a eficiência exigida pelas leis vigentes (MIERZWA; HESPANHOL, 2005).

O processo de coagulação/floculação com posterior sedimentação propicia a remoção de cor e turbidez do efluente a ser tratado (OLIVEIRA; et al, 2014). Esse processo é amplamente utilizado em indústrias para o tratamento de efluente têxtil, pois são eficientes na remoção de sólidos suspensos, fósforo, na redução da demanda química de oxigênio (DQO) e da cor (KIM, 2016).

O tratamento convencional desse tipo de efluente envolve processos físico-químicos de coagulação/floculação. Os processos usuais de tratamento alcançam boa eficiência de descoloração, mas elas têm duas restrições principais, o alto custo e a produção de uma quantidade significativa de lodo que requer descarte (SILVA, S.K.C.; et al 2022).

Com base neste contexto, o presente artigo tem como objetivo geral estudar e apresentar uma proposta de melhoria e adequação para o processo de tratamento dos efluentes industriais de uma empresa do ramo fabricação de artefatos em madeira, visando o atendimento integral dos parâmetros exigidos pela legislação ambiental.

## METODOLOGIA

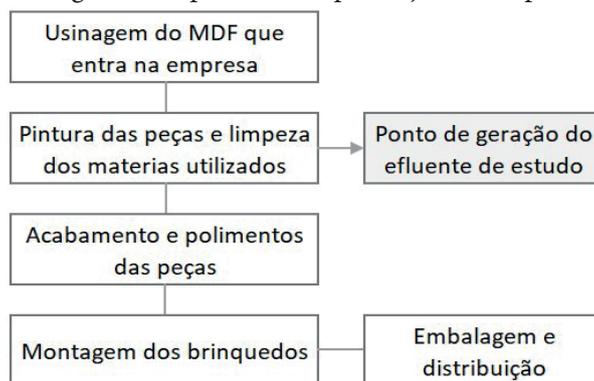
### Apresentação da empresa

A empresa objeto de estudo tem como atividade a fabricação de brinquedos e artefatos de madeira MDF. Localiza-se na região metropolitana do Rio Grande do Sul, possui área útil construída de aproximadamente 6.000 m<sup>2</sup>, porte médio.

Conforme pode ser observado, figura 1, inicialmente o MDF passa por um processo de usinagem e posteriormente, ocorre a pintura das peças já cortadas para acabamento e polimento. Nesta etapa ocorre a

limpeza dos materiais utilizados, sendo gerado o efluente contaminado, em virtude de tintas à base d'água, primers, pós e resíduos que são incorporados a ele.

**Figura 1.** Fluxograma do processo de produção da empresa em estudo.



## Coleta

As coletas foram realizadas em recipientes plásticos de 5 litros previamente higienizados, conforme NBR 9898/1987 - Preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores (ABNT, 1987), e em seguida, levados ao laboratório da Universidade La Salle em Nova Santa Rita, RS, para a realização dos ensaios físico-químicos.

**Figura 2.** Efluente da saída de água da cabine de pintura.



## Análises físico-químicas

Para as análises físico-químicas, inicialmente as amostras do efluente foram homogeneizadas. Posterior a isso, fez-se a análise da temperatura e do pH (desvio padrão de 0,006) medidos a partir do medidor de pH/mV e temperatura Portátil (Hanna - HI8424) com eletrodo. A cor foi medida através de Colorímetro Digital (Alfakit - AK530). Para a turbidez utilizou-se um Turbidímetro Microprocessado (Digimed - modelo DM-TU), e a determinação do Oxigênio Dissolvido (OD) foi realizada através de um oxímetro digital (Akso - AK87).

Para a análise dos sólidos totais, fixos e voláteis seguiu-se a Norma Técnica Interna NTS 013 – Método de Ensaio (SABESP, 1999). Para determinação de sólidos sedimentáveis foram seguidas as recomendações da NBR 10561 – Determinação de sólidos sedimentáveis – método do cone de Imhoff (ABNT, 1988). Os nitratos foram avaliados através do método geofísico de gravimetria. E, por fim, a análise de Demanda Química de Oxigênio (DQO) a partir do protocolo do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 1995).

## Testes experimentais do efluente real

Para a realização dos ensaios de coagulação/floculação/sedimentação seguiu-se um planejamento experimental  $2^2$  com ponto central, conforme pode ser visualizado na Tabela 1. As variáveis modificadas foram a concentração (C), entre 200 e 400  $\mu\text{l}$ , e a velocidade de agitação ( $V_a$ ) na floculação, entre 25 e 35 rpm. As variáveis fixas foram velocidade de coagulação ( $V_c$ ), de 120 rpm, tempo de decantação ( $T_d$ ), 60 min, tempo de floculação ( $T_f$ ), 2 min, e por fim, o tempo de coagulação ( $T_c$ ), de 10 min. Estes valores foram adaptados da metodologia de Da Silva et al, (2019).

**Tabela 1.** Planejamento experimental  $2^2$  com ponto central.

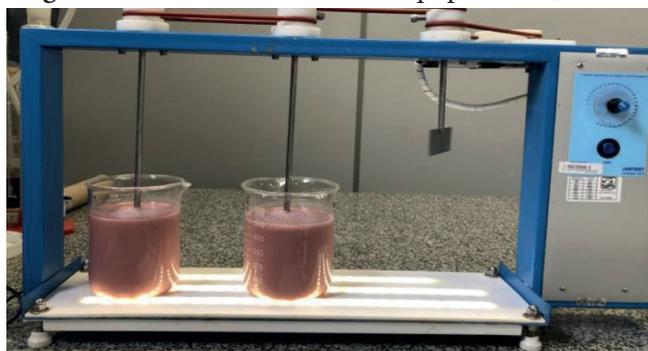
Ensaio - Variáveis modificadas		
Ensaio	Velocidade de agitação (rpm)	Concentração ( $\mu\text{l}$ )
1	35	200
2	35	400
3	25	200
4	25	400
5	30	300

Os resultados obtidos a partir da execução dos ensaios em *Jar test* e das análises dos parâmetros referentes às variáveis independentes foram analisados estatisticamente utilizando o software *Statistica 7.0*. Por meio desse software foram gerados os gráficos de pareto e de superfície das variáveis concentração e tempo em relação a eficiência de remoção de Cor e DQO.

Para a realização dos ensaios experimentais, foram tomadas 5 amostras do efluente e dispostas em béqueres de 500 ml. Logo após estas foram direcionadas para o equipamento *Jar Test* (EthiK - Modelo 2018-6) para os ensaios de coagulação/floculação, fundamentado no trabalho de Bezerra et al (2006), Figura 3.

O ensaio de bancada com o equipamento Jar Test é utilizado para simular o tratamento por coagulação química, envolvendo os processos de coagulação, floculação e sedimentação (M. P. MARQUES, et al 2017).

**Figura 3.** Efluente de estudo no equipamento *Jar Test*.



Os testes foram realizados a temperatura ambiente, utilizando os coagulantes inorgânicos cloreto férrico e sulfato de alumínio, e os orgânicos, tanino de acácia negra e o aquafloc AST, todos da marca Faxon Química. Todos estes foram escolhidos devido à ampla utilização e pesquisa no Brasil. Muitos autores consideram esse processo de tratamento eficiente na remoção dos parâmetros cor, DQO e turbidez, além de

apresentar baixo custo de implantação e operação (ALMADA, 2008).

O Cloreto Férrico  $FeCl_3$  comercial é bastante utilizado na indústria pois apresenta uma larga faixa de pH em que produz bons flocos, entre 5 e 11 (NUNES, 2001). Já o sulfato de alumínio ( $Al_2(SO_4)_3$ ), obtido por meio da reação química entre o óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) e o ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), é o coagulante químico mais usado no Brasil no tratamento de água de abastecimento público (FOGAÇA, 2020).

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### Análise Preliminar

Os resultados da caracterização do efluente bruto analisado nos ensaios físico-químicos comparado com a Resolução CONSEMA nº 355/2017 podem ser visualizados na Tabela 2.

**Tabela 2:** Resultados da caracterização do efluente bruto comparados com a Resolução CONSEMA nº 355/2017.

PARÂMETROS	EFLUENTE BRUTO	CONSEMA 355/2017
Temperatura (°C)	20	<40°C
pH	7,22	6 a 9
Turbidez (NTU)	9,16	≤100
Oxigênio Dissolvido (mg/L)	0,4	Não inferior a 5
Sólidos Totais (mg/L)	2743,33	≤500
Sólidos Fixos (mg/L)	565,33	NE
Sólidos Voláteis (mg/L)	2178	NE
Sól. Sedimentáveis (mg/L)	13,1	≤ 1,0 em cone de Imhoff
DQO (mg/L)	1706,73	≤330
Cor (mg/L)	945,6	≤75
Nitratos (mg/L)	3,57	≤10,0

(NE) Não estabelecido pela Resolução CONSEMA 355/2017.

A partir da análise dos resultados foi possível verificar que os parâmetros oxigênio dissolvido (OD), sólidos totais e sedimentáveis, DQO e cor encontraram-se em desacordo com os limites estabelecidos pela Resolução CONSEMA nº 355/2017. Demonstrando assim, o potencial de poluição desse efluente e a necessidade de aplicação de tratamento antes da disposição final.

Sendo assim, foram avaliados nos testes de coagulação os parâmetros de DQO e cor, as quais apresentaram concentrações acima dos limites estabelecidos pela legislação.

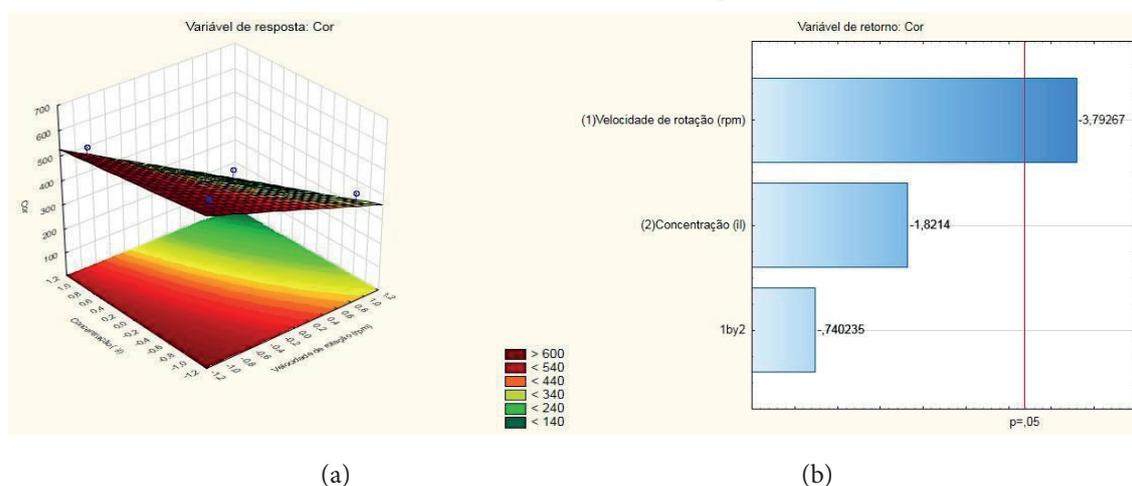
## Análise da Eficiência dos coagulantes utilizados

### Coagulantes inorgânicos

A Figura 4 apresenta o gráfico de pareto e de superfície, para verificar o efeito e significância (p) de cada variável independente (concentração e tempo) em relação a variável de resposta, cor, num intervalo de confiança de 95% para o planejamento experimental utilizado, item 2.4, com o coagulante cloreto férrico.

A partir da Figura 4 (a), pode-se concluir que velocidade de rotação obteve significância em relação a eficiência de remoção da cor, isto é, apresentou um “pvalor” maior que 5%. No entanto, a concentração e a interação destas variáveis (velocidade de rotação e concentração) não apresentaram significância em relação a variável de resposta, cor. Ainda se nota, Figura 4 (b), que uma maior concentração e velocidade de rotação levou a uma maior remoção da cor, confirmando o observado na Figura 4 (a).

**Figura 4.** Gráfico de pareto (a) e de superfície (b) das variáveis concentração e tempo em relação a eficiência de remoção de cor (%) a partir do cloreto férrico.



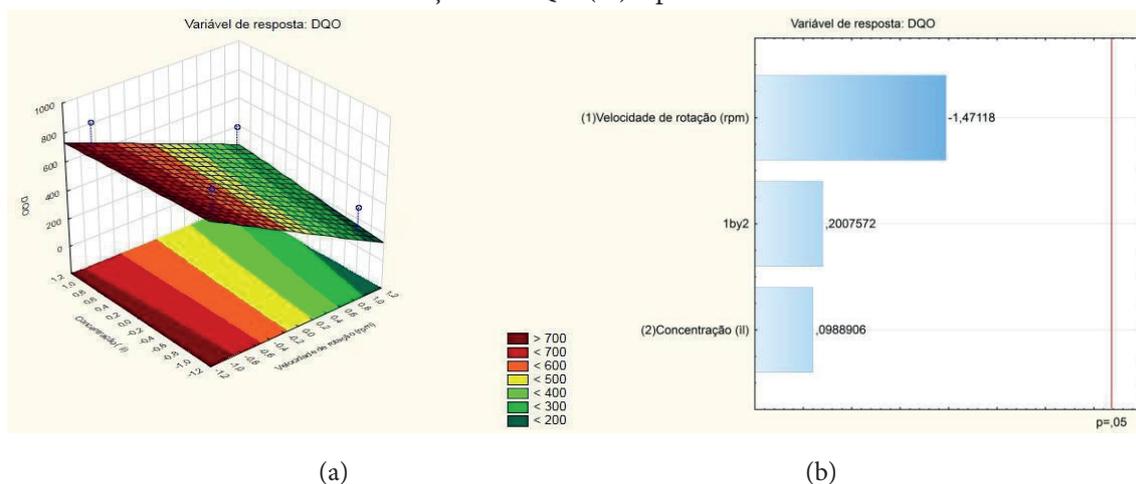
A remoção de cor com a utilização do cloreto férrico se deu de forma eficiente. O maior índice de remoção ocorreu no ensaio 2 com concentração de 400 µl e rotação 35 rpm com 76,55% de remoção. Já no ensaio do ponto central (PC) com concentração de 350 µl e rotação de 30 rpm obteve uma remoção menor com 62,81%.

Aboulhassan et al. (2006) realizaram ensaios de adsorção/floculação aplicando uma dosagem maior que a utilizada neste estudo, com 650 mg/L de cloreto férrico em efluente de uma tinturaria com pH 8,5 foi possível atingir remoção de 94% de cor. Acredita-se que os referidos autores, tenham encontrado percentuais maiores de remoção, uma vez que, utilizaram concentrações mais elevadas de coagulante.

A Figura 5 apresenta o gráfico de Pareto e a superfície de resposta para verificar o efeito e significância (p) de cada variável independente (velocidade de rotação e concentração) em relação a variável de resposta (DQO), num intervalo de confiança de 95% para o planejamento experimental utilizado.

É possível notar através da Figura 5 (a) que ambas variáveis analisadas, em um intervalo de confiança de 95%, possuem um efeito baixo em relação a variável de resposta DQO. Isto é, não atingiram o parâmetro de 0,05 para “p-valor”. Ainda, analisando a Figura 5 (b), percebe-se que a concentração exerce uma influência muito pequena sobre o parâmetro DQO, ratificando o encontrado na Figura 5 (a). Esta analogia pode ser aplicada ao parâmetro velocidade de rotação, o qual visualizando-se a Figura 5 (b), percebe-se uma maior influência na variável de resposta (DQO).

**Figura 5.** Gráfico de Pareto (a) e de superfície (b) das variáveis concentração e tempo em relação a eficiência de remoção de DQO (%) a partir do cloreto férrico.



(a)

(b)

É possível notar através da Figura 5 (a) que ambas variáveis analisadas, em um intervalo de confiança de 95%, possuem um efeito baixo em relação a variável de resposta DQO. Isto é, não atingiram o parâmetro de 0,05 para “p-valor”. Ainda, analisando a Figura 5 (b), percebe-se que a concentração exerce uma influência muito pequena sobre o parâmetro DQO, ratificando o encontrado na Figura 5 (a). Esta analogia pode ser aplicada ao parâmetro velocidade de rotação, o qual visualizando-se a Figura 5 (b), percebe-se uma maior influência na variável de resposta (DQO).

O maior índice de remoção de DQO ocorreu no ponto central do planejamento de experimentos, isto é, concentração de 350 µl e rotação 30 rpm com remoção de 80,28%, chegando a um resultado final de 336,54 mg/L de DQO.

Aboulhassan et al. (2006) realizaram ensaios de adsorção/floculação aplicando uma dosagem maior que a utilizada neste estudo, com 650 mg/L de cloreto férrico em efluente de uma tinturaria com pH 8,5 foi possível atingir remoção de 82% de DQO e de 94% de cor. Acredita-se que os referidos autores, tenham encontrado percentuais maiores de remoção, uma vez que, utilizaram concentrações mais elevadas de coagulante.

Os melhores resultados obtidos com o cloreto férrico estão apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3.** Resultado das análises físico-químicas dos ensaios com melhor eficiência utilizando o coagulante cloreto férrico.

PARÂMETROS	PC - Rotação 30 rpm		Ensaio 2 - Rotação 35 rpm	
	350 µl	Eficiência (%)	400 µl	Eficiência (%)
pH	6,05	NH	5,86	NH
Turbidez (ntu)	19,8	NH	21,93	NH
DQO (mg/L)	336,54	80,28	673,08	60,56
Cor (mg/L)	351,64	62,81	221,72	76,55

(NH) Não houve eficiência de remoção.

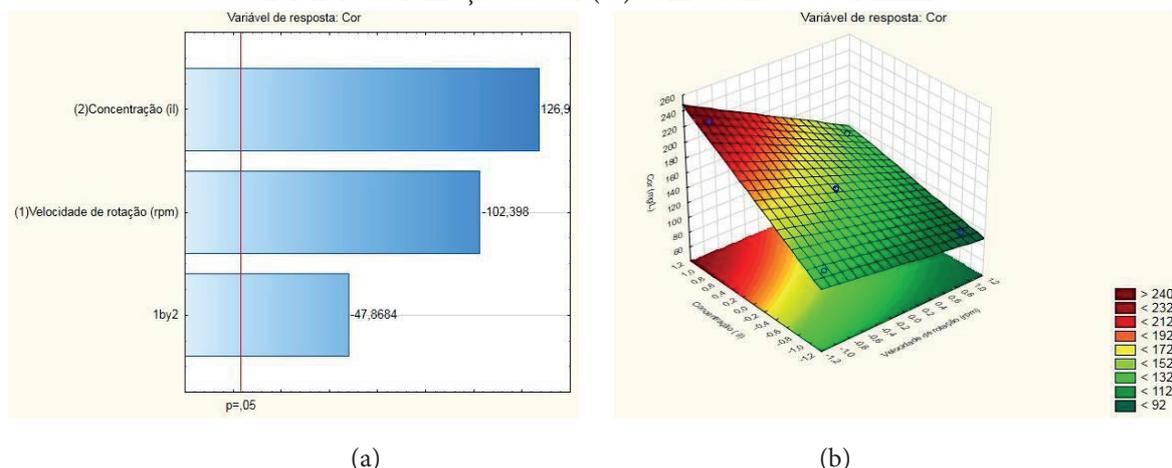
De maneira geral, apesar das grandes eficiências de remoção dos parâmetros cor e DQO através do coagulante cloreto férrico apresentado neste trabalho, os resultados ainda ficam acima do que estabelece a Resolução CONSEMA nº 355/2017 (DQO  $\leq$ 330mg/L e cor  $\leq$ 75mg/L). O parâmetro DQO foi o que mais se aproximou do estabelecido pela Resolução com 336,54 mg/L.

Os resultados finais de pH, mostraram que, no ensaio 2 ficou próximo ao limite inferior estabelecido pela Resolução com 6,05, e no ensaio PC ficou abaixo do exigido com 5,86. Todos ensaios tiveram resultados parecidos. Racar et al. (2017) explica que essa diminuição de pH acontece devido ao coagulante cloreto férrico ser altamente ácido (pH~2).

Quanto ao parâmetro turbidez foi observado um aumento de 58% e 53,7% que correspondem a 21,93 NTU e 19,8 NTU nos ensaios 2 e PC, respectivamente. O aumento na turbidez pode ser explicado pelo fato de que conforme a concentração do coagulante aumenta, menores são os flocos formados, acarretando no aumento da turbidez (NANDINI; SHEBA, 2016). Esse processo ocorre porque os coagulantes neutralizam as cargas nas partículas, provocando assim turbidez na água bruta e também hidrolisam para formar precipitados insolúveis, que atrapalham as partículas (GE POWER; WATER, 2013).

A partir dos resultados obtidos com a utilização do sulfato de alumínio  $Al_2(SO_4)_3$  como coagulante/floculante gerou-se um gráfico de pareto para verificar o efeito e significância (p) de cada variável independente (velocidade de rotação e concentração) em relação a variável de resposta cor, em intervalo de confiança de 95%, Figura 6 (a). Ainda, se construiu um gráfico de superfície, Figura 6 (b).

**Figura 6.** Gráfico de pareto (a) e de superfície (b) das variáveis concentração e tempo de em relação a eficiência de remoção de cor (%) com o sulfato de alumínio.



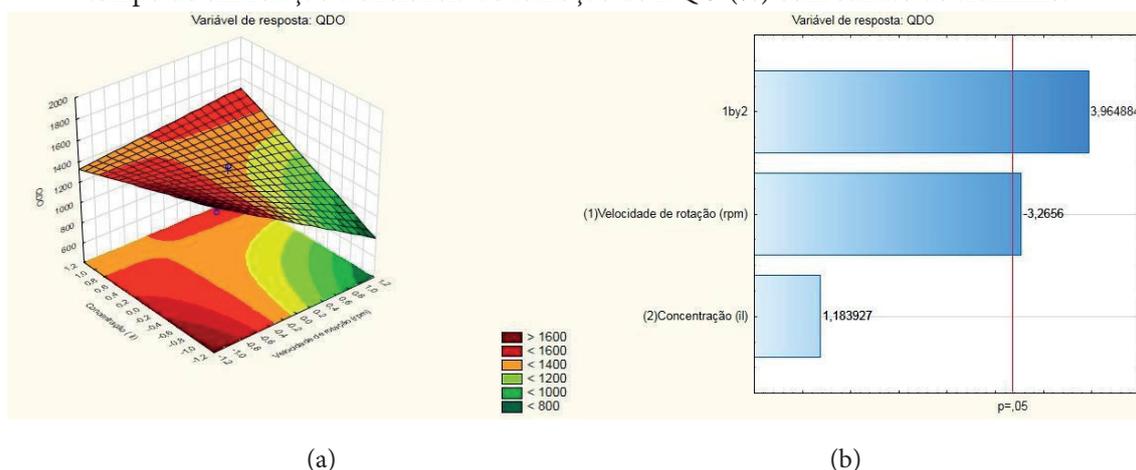
Ao realizar a análise da cor com a utilização do sulfato de alumínio, observou-se que o coagulante obteve uma grande eficiência de remoção de cor. A partir da Figura 6 (a), pode-se concluir que a velocidade de rotação, a concentração e a interação destas duas variáveis obtiveram significância em relação a eficiência de remoção da cor, ou seja, apresentaram um “p-valor” maior que 5%. Analisando a Figura 6 (b), percebe-se que as variáveis independentes (velocidade de rotação e concentração) exercem influência sobre o parâmetro cor, ratificando o encontrado na Figura 6 (a). A maior remoção foi de 89,7% na concentração de 400 µl e rotação de 25 rpm.

Souza et al. (2016) fizeram uma análise da utilização do coagulante sulfato de alumínio na remoção da cor, turbidez e DQO do efluente de uma lavanderia têxtil e também encontraram resultados parecidos. No estudo realizado, o tempo de mistura rápida foi de 5 minutos e a velocidade de mistura 95 rpm, a agitação lenta de 30 minutos a 35 rpm, e a sedimentação de 30 minutos. Com a dosagem de 200 mg/L, superior a utilizada neste trabalho, em béquer de 500 mL de efluente, obtiveram a remoção da cor aparente 91,67% e da turbidez de 77,14%.

A Figura 7 apresenta o gráfico de pareto e a superfície de resposta para verificar o efeito e significância (p) de cada variável independente (velocidade de rotação e concentração) em relação a variável de resposta (DQO), num intervalo de confiança de 95% para o planejamento experimental utilizado.

A remoção da DQO com a utilização do sulfato de alumínio ocorreu de forma eficiente. Analisando a Figura 7 (a), pode-se concluir que a velocidade de rotação e a interação das duas variáveis (velocidade de rotação e concentração) obtiveram significância em relação a eficiência de remoção da cor. Somente a concentração não atingiu o parâmetro de 0,05 para “p-valor”, determinado para definir a variável como significativa. Este fato pode ser ratificado ao analisar-se a Figura 07 (b), onde se observa que a concentração não exerceu influência sobre o parâmetro DQO.

**Figura 7.** Gráfico de Pareto (a) e de superfície (b) das variáveis concentração e tempo de em relação a eficiência de remoção de DQO (%) com sulfato de alumínio.



O maior índice de remoção ocorreu na concentração de 400 µl e rotação 25 rpm com 49,3% de remoção. Na análise de Souza et al. (2015) com a utilização do coagulante sulfato de alumínio na remoção da DQO do efluente de uma lavanderia têxtil, também encontraram resultados parecidos. Com a dosagem de 200 mg/L, superior a utilizada neste trabalho, em béquer de 500 mL de efluente, obtiveram a remoção de 53,49% de DQO.

Costa Junior et al. (2013) observaram grande eficiência de remoção de DQO em efluente têxtil

utilizando o sulfato de alumínio. Com o pH de 3,64 e dosagem igual a 960mg/L de coagulante, obtiveram a remoção de 83,2% DQO. Observa-se que a dosagem de coagulante utilizada pelos autores é bem superior a utilizada neste trabalho, assim como o valor do pH menor. Acredita-se que o maior percentual de remoção de DQO esteja relacionado a estas modificações experimentais. Os melhores resultados obtidos com o sulfato de alumínio  $Al_2(SO_4)_3$  estão dispostos na Tabela 4.

Apesar do sulfato de alumínio ter se mostrado eficiente na remoção dos parâmetros cor e DQO, chegando a 865 mg/L de DQO e 97,38 mg/L de cor, os resultados ainda ficam acima do que estabelece a Resolução CONSEMA nº 355/2017 (DQO  $\leq$ 330mg/L e cor  $\leq$ 75mg/L). O parâmetro cor foi o que mais se aproximou do estabelecido pela referida resolução. Quanto a turbidez, com a utilização do sulfato de alumínio, foi observada eficiência de remoção em todos os ensaios. A maior remoção foi de 63,54% no ensaio 4 (Tabela 4).

**Tabela 4.** Resultado do melhor ensaio com sulfato de alumínio.

PARÂMETROS	Ensaio 4 – Rotação 25 rpm	
	400 $\mu$ l	Eficiência (%)
pH	7,07	NH
Turbidez (NTU)	3,34	63,54
DQO (mg/L)	865,38	49,3
Cor (mg/L)	97,38	89,7

(NH) Não houve eficiência de remoção.

A formação de flocos maiores facilita sua posterior remoção por sedimentação sob ação da gravidade, flotação ou filtração (ABNT, 2004). Segundo Cacheira et al. (2012), quanto maior o tamanho dos flocos produzidos pelo sulfato de alumínio, maior é o grau de sedimentação.

### Coagulantes orgânicos

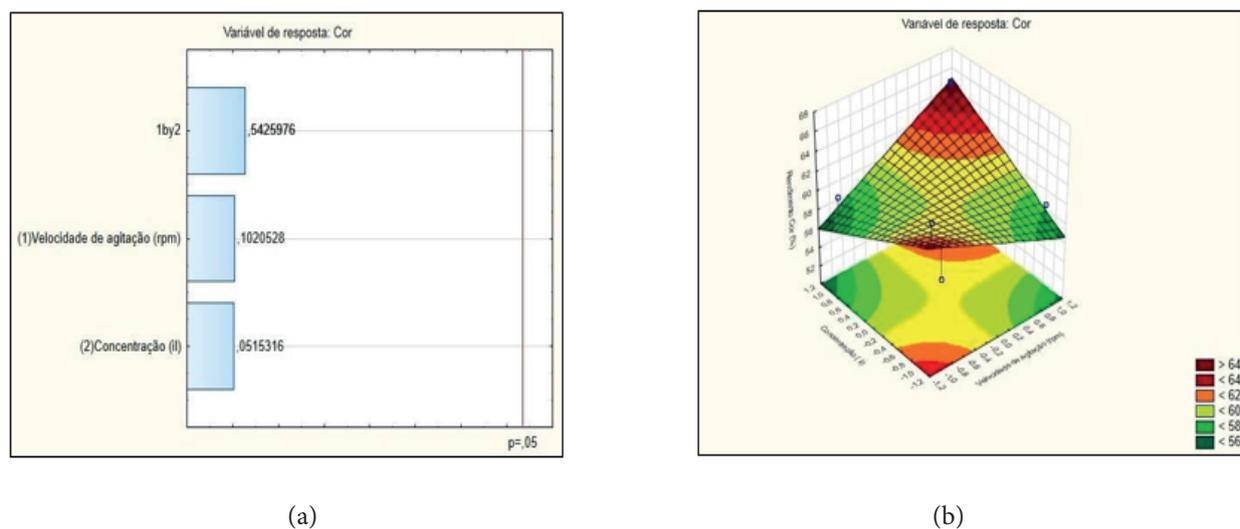
A partir dos resultados obtidos com a utilização do tanino de acácia negra gerouse um gráfico de pareto e de superfície de resposta para verificar o efeito de significância (p) de cada variável independente (vel. de rotação e concentração) em relação a variável de resposta (cor), num intervalo de confiança de 95% para o planejamento experimental utilizado, Figura 8.

A partir da Figura 8 (a), pode-se perceber que ambas variáveis analisadas, em um intervalo de confiança de 95%, não possuem significância diante da variável de resposta, visto que não atingem o parâmetro de 0,05 para “p-valor”, determinado para definir a variável como significante. Analisando a Figura 8 (b), percebe-se que um aumento na velocidade e na concentração levou a uma maior eficiência. No entanto, percebe-se que este valor não se mostra significativo mediante a variável de resposta avaliada. O maior índice de remoção da cor ocorreu na concentração de 400  $\mu$ l e rotação 35 rpm com 65,77% de remoção. Os demais ensaios mostraram remoção com porcentagem inferior.

A partir da Figura 8 (a), pode-se perceber que ambas variáveis analisadas, em um intervalo

de confiança de 95%, não possuem significância diante da variável de resposta, visto que não atingem o parâmetro de 0,05 para “p-valor”, determinado para definir a variável como significativa. Analisando a Figura 8 (b), percebe-se que um aumento na velocidade e na concentração levou a uma maior eficiência. No entanto, percebe-se que este valor não se mostra significativo mediante a variável de resposta avaliada. O maior índice de remoção da cor ocorreu na concentração de 400 µl e rotação 35 rpm com 65,77% de remoção. Os demais ensaios mostraram remoção com porcentagem inferior.

**Figura 8.** Gráfico de pareto (a) e de superfície (b) das variáveis concentração e tempo de em relação a eficiência de remoção de cor (%) a partir do tanino.



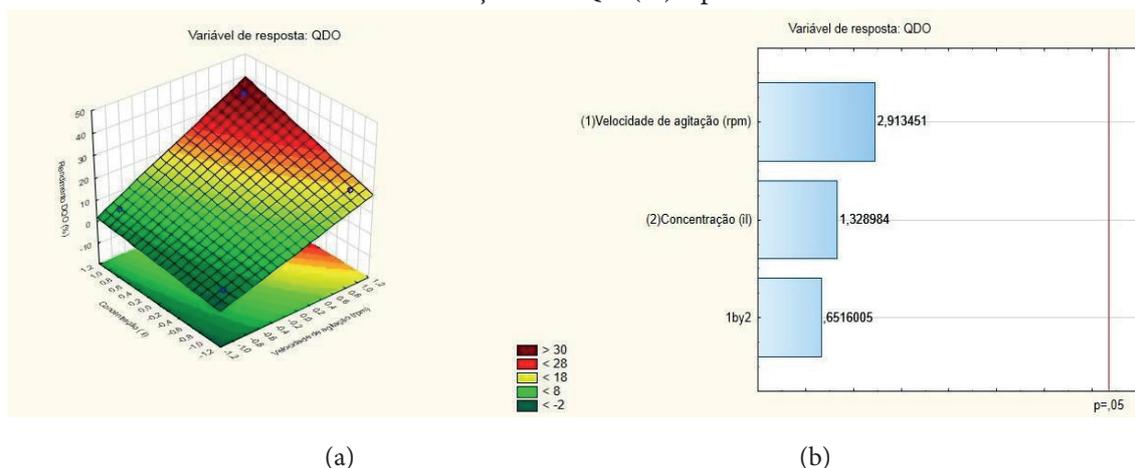
A Figura 9 apresenta o gráfico de pareto e a superfície de resposta para verificar o efeito e significância (p) de cada variável independente (velocidade de rotação e concentração) em relação a variável de resposta (DQO), num intervalo de confiança de 95%.

A partir da Figura 9 (a), pode-se perceber que ambas variáveis analisadas, em um intervalo de confiança de 95%, não possuem significância diante da variável de resposta DQO, visto que não atingem o parâmetro de 0,05 para “p-valor”. Já analisando a Figura 9 (b) percebe-se que menores concentrações levaram a menores valores de DQO, bem como, menores valores de velocidade. No entanto, nenhuma destas modificações apresentou-se como significativa.

O maior índice de remoção da DQO ocorreu na concentração de 400 µl e rotação de 35 rpm com aproximadamente 36,9% de remoção. Os demais ensaios mostraram remoção com porcentagem inferior.

No estudo de Souza et al. (2016) a análise da utilização do coagulante tanino em efluente de lavanderia têxtil na remoção da cor, turbidez e DQO, mostrou-se relevante. Com a e dosagem de 100 mg/L, superior a utilizada neste estudo, TMR de 5 minutos a 95 rpm, TML de 30 minutos a 35 rpm, sedimentação de 30 minutos, obtiveram a remoção da cor em 43,65%, turbidez em 28,82% e DQO em 56,45%.

**Figura 9.** Gráfico de pareto (a) e de superfície (b) das variáveis concentração e tempo de em relação a eficiência de remoção de DQO (%) a partir do tanino.



Os melhores resultados obtidos com o coagulante tanino de acácia negra estão na Tabela 5.

**Tabela 5.** Resultado do melhor ensaio com o coagulante tanino.

PARÂMETROS	Ensaio 2 – Rotação 35 rpm	
	400 µl	Eficiência (%)
pH	6,41	NH
Turbidez (NTU)	26,70	NH
DQO (mg/L)	1076,92	36,90
Cor (mg/L)	323,69	65,77

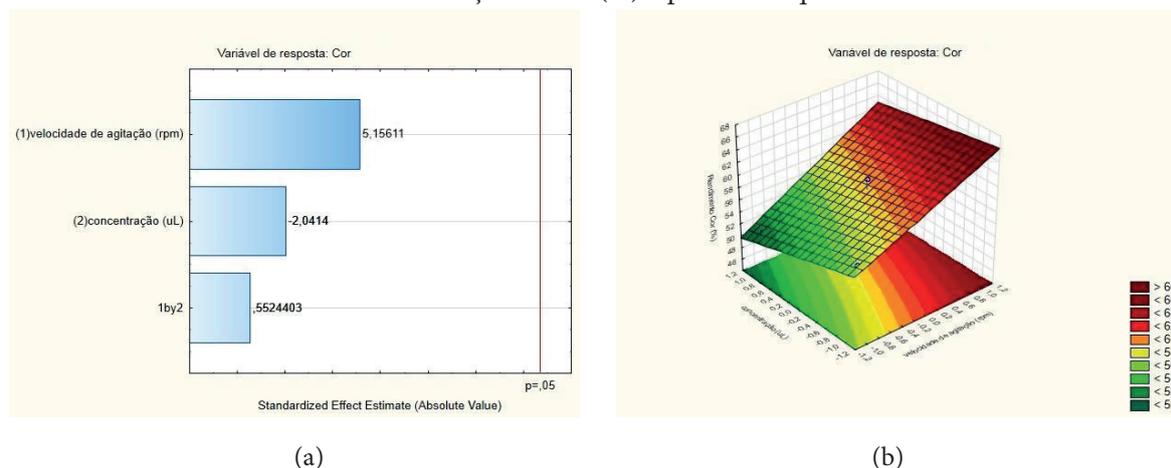
(NH) Não houve eficiência de remoção.

Com a utilização do tanino de acácia negra a concentração da DQO chegou em 1076,92 mg/L e a cor em 323,69 mg/L. Os resultados ficaram acima do que estabelece a Resolução CONSEMA nº 355/2017 (DQO  $\leq$  330mg/L e cor  $\leq$  75mg/L). Quanto aos resultados de pH, em todos os ensaios os valores ficaram dentro do limite estabelecido pela referida Resolução.

No parâmetro da turbidez foi observado um aumento, como ocorreu com o cloreto férrico, de 65,7% que correspondem a 26,7 NTU no ensaio 2 (Tabela 05). Nos demais ensaios também foram observados aumento.

A partir dos resultados obtidos com a utilização do coagulante aquafloc AST gerou-se o gráfico de pareto e a superfície de resposta, Figura 10.

**Figura 10.** Gráfico de pareto (a) e de superfície (b) das variáveis concentração e tempo de em relação a eficiência de remoção de cor (%) a partir do aquafloc AST.



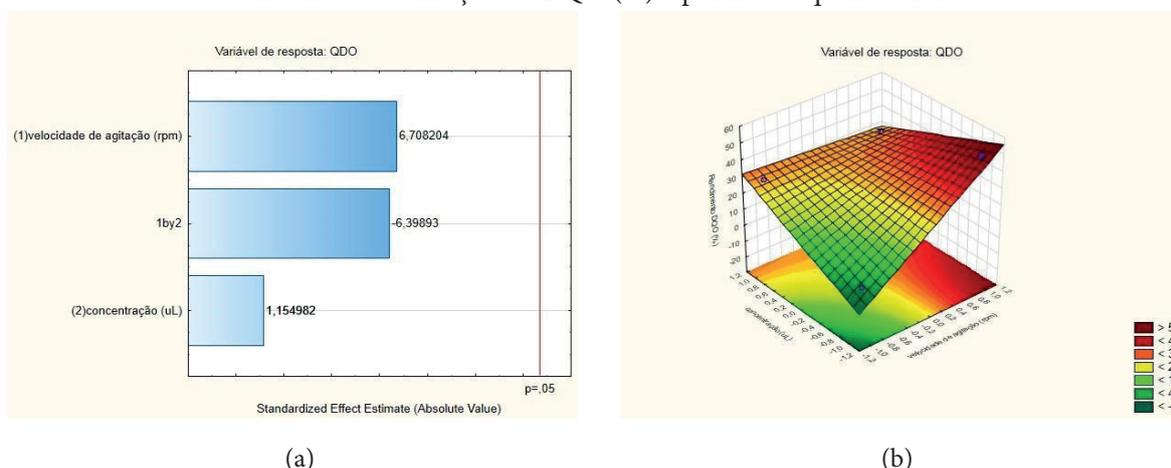
A partir da Figura 10 (a), pode-se concluir que ambas variáveis analisadas, em um intervalo de confiança de 95%, não possuem significância diante da variável de resposta cor, visto que não atingem o parâmetro de 0,05 para “p-valor”. Já na Figura 10 (b) percebe-se que com uma maior concentração de coagulante obtém-se uma melhor eficiência de remoção e uma menor velocidade de rotação. No entanto, nenhum destes parâmetros pode ser considerado significativo em relação a variável de resposta analisada.

O maior índice de remoção da cor com a utilização do coagulante orgânico aquafloc AST foi de 64,5%, ocorreu na concentração de 300  $\mu$ l e rotação de 35 rpm.

A Figura 11 apresenta o gráfico de pareto e a superfície de resposta para verificar o efeito e significância (p) de cada variável independente (velocidade de rotação e concentração) em relação a variável de resposta (DQO), num intervalo de confiança de 95%.

A partir da análise da Figura 11 (a) percebe-se que ambas as variáveis analisadas, no intervalo de confiança de 95%, não possuem significância diante da variável de resposta DQO, isto é, não atingem o parâmetro de 0,05 para “p-valor”. Já na Figura 11 (b), percebe-se que uma menor concentração, bem como uma menor velocidade leva a uma maior eficiência de remoção de DQO. No entanto, não podem ser consideradas significativas.

**Figura 11.** Gráfico de pareto (a) e de superfície (b) das variáveis concentração e tempo de em relação a eficiência de remoção de DQO (%) a partir do aquafloc AST.



O maior índice de remoção de DQO foi de 49,3% e ocorreu na concentração de 300 µl e rotação de 35 rpm.

Os melhores resultados obtidos com o coagulante aquafloc AST estão apresentados na Tabela 6.

**Tabela 6.** Resultado do melhor ensaio com aquafloc AST.

PARÂMETROS	Ensaio 1 - Rotação 35 rpm	
	400 µl	Eficiência (%)
pH	6,47	NH
Turbidez (NTU)	38,21	NH
DQO (mg/L)	865,38	49,30
Cor (mg/L)	335,66	64,50

(NH) Não houve eficiência de remoção.

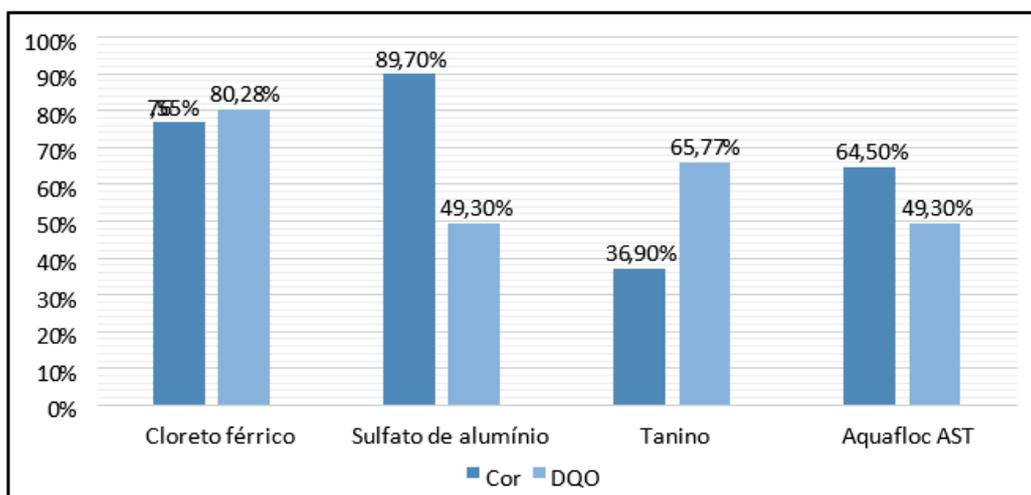
Os resultados com o coagulante aquafloc AST, assim como nos outros testes, não atenderam aos limites estabelecidos pela Resolução CONSEMA nº 355/2017 (DQO  $\leq$ 330mg/L e cor  $\leq$ 75mg/L). A concentração da DQO chegou em 865,38 mg/L e a cor 335,66 mg/L.

Para o parâmetro do pH, todos os ensaios mostraram valores dentro do limite estabelecido pela referida Resolução. Já para a turbidez foi observado um aumento, como ocorreu com o cloreto férrico e tanino, de 76% que correspondem a 38,21 NTU no ensaio 1 (Tabela 06).

### Coagulantes orgânicos versus coagulantes inorgânicos

A Figura 12 apresenta os melhores resultados de eficiência de remoção, levando em consideração os parâmetros de resposta cor e DQO, para os quatro coagulantes avaliados.

**Figura 12.** Gráfico de melhores resultados de eficiência de remoção para as variáveis de resposta cor e DQO.



Comparando os resultados, na remoção de cor do efluente em estudo, os coagulantes inorgânicos cloreto férrico e sulfato de alumínio mostraram-se mais eficiente, do que os coagulantes orgânicos tanino de acácia negra e aquafloc AST. Em relação a DQO, os coagulantes cloreto férrico e tanino mostraram-se mais eficientes do que o sulfato de alumínio e aquafloc AST.

Ainda analisando a Figura 12, de forma geral, acredita-se que a utilização do coagulante cloreto férrico, foi a que se obteve melhores resultados para a remoção de cor e DQO.

### Proposta de tratamento do efluente

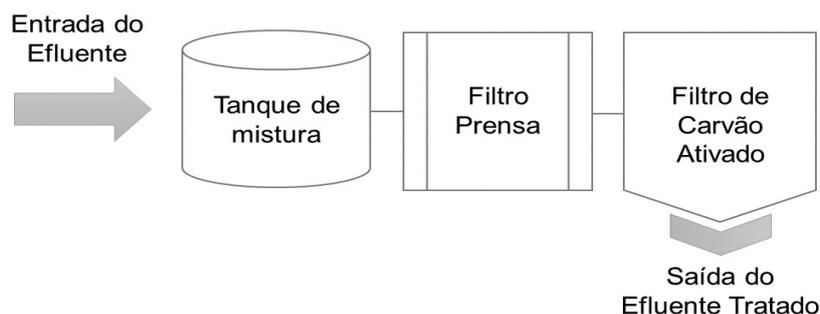
O tratamento físico-químico realizado em *jar test* resultou na redução dos valores de cor e DQO, mas apesar de eficiente não atendeu aos limites estabelecidos pela Resolução CONSEMA nº 355/2017. Sendo assim, sugere-se um aumento no tempo de decantação. Para Libânio (2010) os principais fatores que interferem na variação dos valores desses parâmetros estão relacionados ao tempo de detenção, tempo de floculação e o gradiente de velocidade.

Cardoso et al. (2008) observaram em seus estudos que, de forma geral, quanto maior o tempo de sedimentação, maior o valor obtido para a remoção dos parâmetros cor e turbidez. Isso se deve ao fato de que quanto maior o tempo de repouso, maior a quantidade de partículas floculadas que sedimentarão. Os ensaios realizados para um tempo de decantação superior a 60 minutos apresentaram bons valores de remoção dos parâmetros. Muitos autores ainda propõem para as características do efluente em estudo, além do tratamento primário (físico-químico), um tratamento avançado com adsorção por carvão ativado (CUSTÓDIO, 2014).

Quando a remoção de cor não atinge níveis considerados aceitáveis para lançamento, processos de adsorção em carvão ativado são utilizados como tratamento complementar, pois apresentam uma eficiência significativamente maior, sendo eficiente na remoção de uma extensa variedade de classes de corantes (AL-DEGS et al., 2000).

O carvão ativado tem se destacado nos processos de purificação, filtração, desodorização e separação (G. CRINI; LICHTFOUSE, 2019). Entre as principais características que fazem do carvão ativado um bom adsorvente, destacam-se sua grande área superficial, alta pureza, natureza microporosa, elevada capacidade de adsorção e fácil disponibilidade (GÜRSSES, 2019). Ele é eficiente na remoção de cor, nutrientes como fosfatos e nitratos, sólidos em suspensão, matéria orgânica não biodegradável, demanda química de oxigênio (DQO), entre outros (NUNES, 2004).

O sistema de tratamento dos efluentes provenientes da produção de tintas base água da empresa estudada por Custódio (2014) consiste no processo de clarificação química (coagulação e floculação), seguido de sedimentação e filtração por carvão ativado. Devido as características semelhantes do efluente com o estudado neste trabalho, será tomado como base.

**Figura 13.** Fluxograma proposto do sistema de tratamento de efluente.

Fonte: Adaptado de Custódio (2014).

O sistema proposto é composto por um reservatório de recebimento do efluente; um tanque de mistura dotado de aerador por borbulhamento; filtro prensa; um tanque de armazenamento para o efluente filtrado; e um filtro de carvão ativado (CUSTÓDIO, 2014).

Para o tratamento primário do efluente em estudo considera-se o coagulante cloreto férrico o mais eficiente na remoção dos poluentes, devido sua eficiência de remoção analisada no estudo prévio de coagulação/floculação/sedimentação realizado com auxílio do equipamento *Jar Test*.

Na estação de tratamento de efluente proposta, o reagente cloreto férrico deve ser disperso homogeneamente no efluente, com o auxílio de misturadores mecânicos ou hidráulicos em um tanque de mistura (CAVALCANTI, 2009). Todo o processo de clarificação química ocorre em mistura rápida, e logo em seguida o efluente é encaminhado ao filtro prensa (CUSTÓDIO, 2014).

O filtro prensa apresenta alto grau de confiabilidade e qualidade do efluente clarificado, produzindo tortas com teores elevados de sólidos (em torno de 35%) (ANDREOLI, 2001). Após a desidratação, o lodo passa para a fase semissólida, chamado de “lodo seco”, e a partir de então é considerado um resíduo sólido (NUNES, 2004).

A definição da destinação do lodo deve ser baseada na NBR 10004/2004, que classifica os resíduos sólidos em resíduos perigosos (Classe I), e em resíduos não perigosos (Classe II) (ABNT, 2004). Segundo Nunes (2004), os lodos secos classificados como não perigosos podem ter como destinação a incineração, aterros sanitários de lixo urbano, compostagem, entre outros.

O efluente do filtro prensa posteriormente é encaminhado para o filtro de carvão ativado. No tanque de mistura, conforme o lodo vai decantando, as saídas laterais são abertas e o efluente já clarificado é encaminhado para o filtro de carvão ativado, sem passar pelo filtro prensa. Ao final do processo de tratamento, o efluente tratado pode ser reutilizado para limpeza do piso da empresa, do pátio ou irrigação (REZENDE, 2016).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo da utilização dos coagulantes orgânicos e inorgânicos para o processo de coagulação/floculação/sedimentação propiciou a análise da eficiência dos coagulantes para o tratamento do efluente originado dos processos produtivos de uma empresa do ramo de fabricação de artefatos em madeiras no interior do Rio Grande do Sul.

Os melhores resultados obtidos com o cloreto férrico foram a remoção da cor com 76,55% no ensaio com concentração de 400 µl e rotação 35 rpm, e da DQO com remoção de 80,28% no ensaio com concentração de 350 µl e rotação 30 rpm. Com o sulfato de alumínio a maior eficiência de remoção da cor foi de 89,7% e de DQO 49,3% no ensaio com concentração de 400 µl e rotação 25 rpm. Com a utilização do coagulante tanino de acácia negra houve a remoção de 36,9% da cor e de 65,77% da DQO no ensaio com concentração de 400 µl e rotação 35 rpm. Já com o coagulante Aquafloc AST ocorreu a remoção de 64,5% da cor e 49,3% da DQO no ensaio com concentração de 300 µl e rotação de 35 rpm.

Na análise de cor aparente, pode ser observado que a eficiência de remoção foi maior nos coagulantes inorgânicos quando comparados com os coagulantes orgânicos. Já a demanda química de oxigênio (DQO) obteve melhores eficiência de remoção com os coagulantes cloreto férrico e tanino.

Foi observado que os resultados do pH com o coagulante cloreto férrico em alguns ensaios (2 e 4) ficaram abaixo do que estabelece a Resolução, nos demais ensaios (1, 3 e PC) ficaram dentro do estabelecido. Assim como, todos os outros ensaios com os coagulantes sulfato de alumínio, tanino e aquafloc AST permaneceram dentro do que estabelece a Resolução CONSEMA nº 355/2017.

Quanto a turbidez, somente com a utilização do sulfato de alumínio obteve-se eficiência de remoção. Os demais coagulantes cloreto férrico, tanino e aquafloc AST aumentaram a turbidez do efluente, mas esse aumento não apresentou modificações relevantes, permanecendo dentro do estabelecido pela Resolução CONSEMA nº 355/2017 em todos os ensaios.

Apesar das grandes eficiências providas pelos coagulantes estudados, todos os resultados de cor e DQO ficaram acima do que estabelece a Resolução CONSEMA nº 355/2017 (DQO  $\leq$  330mg/L, cor  $\leq$  75mg/L). O valor mais próximo para DQO foi o apresentado pelo cloreto férrico com 336,54 mg/L, e para cor, o sulfato de alumínio com 97,38 mg/L.

Os testes empregados apresentam potencialidade de aplicação como tratamento do efluente da indústria em questão. No entanto, acredita-se que seja necessário a utilização de um tratamento avançado, visando a remoção de parte da matéria orgânica, bem como, redução da cor. Além disso, ainda se sugere um aumento no tempo de sedimentação.

## REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Águas - Determinação de resíduo sedimentável - Método do cone de Imhoff - Método de ensaio. 1988.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Planejamento de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores – Procedimento. **NBR 9.898**. 1987.
- ABOULHASSAN, M.A.; et al. Improvement of Paint Effluents Coagulation Using Natural and Synthetic Coagulant Aids. **Journal of Hazardous Materials**, v. B138, p. 40-45, 2006.
- AL-DEGS, Y.; KHRAISHEH, M. A. M., et al. Effect of carbon surface chemistry on the removal of reactive dyes from textile effluent. **Water Resourch**, [S.l.], v. 34, n. 3, Feb. 2000.
- ALMADA, R. B. Processos físico-químicos acoplados para tratamento de efluente industrial para fins de reuso [Rio de Janeiro] 2008, 141p. M.Sc., Engenharia Química, **Dissertação** – Universidade Federal do Rio de Janeiro, CCOPPE/UFRJ.

- ANDREOLI, C. V. (Coordenador). **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. Curitiba: FINEP, 2001. 257 p.
- APHA - American Public Health Association. **Standard Methods**. 19th Edition. 1995.
- BEZERRA, A. A. M.; et al. Aplicação Da Coagulação/Floculação Como Pré-Tratamento Ao Processo Uv-Peróxido No Tratamento De Efluentes Têxteis. **XXX Congresso De La Asociación Interamericana De Ingeniería Sanitaria y Ambiental**. 2006.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - **Resolução CONAMA n° 357**, de 17 de março de 2005. Classificação de águas, doces, salobras e salinas do Território Nacional. Diário Oficial da República Federativa do Brasil N° 053.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - **Resolução CONAMA n° 430**, de 13 de maio de 2011. Condições e padrões de lançamento de efluentes. Complementa e altera a Resolução n° 357.
- CACHEIRA, C. S.; SANTOS, J. P. S.; FARIA, J. P. N. VARANDAS, M. M.; SILVA, M. F. de.; C. R. P. DA COSTA, M.Â. P. da. **Processo de Coagulação-Floculação**. Mestrado Integrado de Engenharia do Ambiente. Universidade do Porto, 2012.
- CARDOSO, K. C.; et al. Otimização dos tempos de mistura e decantação no processo de coagulação/floculação da água bruta por meio da Moringa oleifera Lam. **Act Scientiarum. Technology**, Universidade Estadual de Maringá, v. 30, n. 2, p.193-198, 2008.
- CAVALCANTI, J. E. W. A. **Manual de tratamento de efluentes industriais**. São Paulo: Engenho, 2009. 453 p.
- CONSEMA-RS. Conselho Estadual de Meio Ambiente – **Resolução CONSEMA n° 355**, de 19 de julho de 2017. Dispõe sobre os critérios e padrões de emissão de efluentes líquidos no Estado do Rio Grande do Sul. 2017.
- COSTA JUNIOR, S. S.; MANGUEIRA, E. S. V.; RODRIGUES, E. G. S.; DE SENA, R. F; Tratamento de efluente têxtil utilizando coagulação/floculação. **Congresso Brasileiro de Química**, LIII, 2013.
- CUSTÓDIO, B. P. **Otimização do sistema de tratamento de efluentes. Estudo de caso: indústria de tintas base água**. Engenharia Ambiental da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC. Criciúma. 2014.
- DA SILVA, L. D.; et al. Eficiência da coagulação, floculação e decantação como tratamento primário de efluente têxtil. **Revista Geama**, [S.l.], Recife, v. 5, p. 36-40, 2019.
- FOGAÇA, J. R. V. Coagulação e Floculação. **Brasil Escola**. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/quimica/coagulacaofloculacao.htm>> Acesso em 29/03/2023.
- FREIRE, F. B. FREITAS, S. I. de. Avaliação da remoção de cor de um efluente têxtil sintético. **Pesquisa e Tecnologia, Espírito Santo do Pinhal**, v. 7, n. 3, p. 241-249, 09 set. 2010.
- CRINI, G.; LICHTFOUSE. **Environmental Chemistry Letters**, n. 17, p. 145-155, 2019. 1311, 2019.
- GE POWER E WATER. **Water e Process technologies**. Chapter 05 - Clarification, 2013.
- JAHNKE J. C.; HORNBuckle K. C. PCB Emissions from Paint Colorants. **Environ Sci Technol**. 2019 May 7.
- KIM, S. C. Application of response surface method as an experimental design to optimize coagulation–floculation process for pre-treating paper wastewater. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 38, p. 93-102, 2016.
- LIBÂNIO, P. A. C.; et al. A dimensão da qualidade de água: avaliação da relação entre indicadores sociais, de disponibilidade hídrica, de saneamento e de saúde pública. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 10, n 3, Rio de Janeiro, 2010.
- M. P. MARQUES. Avaliação da eficiência do tratamento do efluente de uma estamparia por coagulação química. **REEC – Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. XX- n. X, 2017.
- MANCUSO, P. C. S.; SANTOS, H. F. Coord.: Philippi, A. Jr. **Reúso de água**. São Paulo. Editora Manole, 2003.

- MIERZWA, J. C., HESPANHOL, I. **Água na indústria – Uso racional e reúso**. São Paulo. Oficina de Textos, 2005.
- NANDINI, G. K. M.; SHEBA, M. C. Emanating Trends in the Usage of Biocoagulants in Potable Water Treatment: a Review. **International Research Journal of Engineering and Technology**, v. 3, p. 970-974, 2016.
- NUNES, J. A. **Tratamento físico-químico de águas residuárias industriais**. 3. ed. revista e ampliada, Editora Triunfo LTDA, 2001.
- NUNES, J. A. **Tratamento físico-químico de águas residuárias industriais**. 4. ed. Aracaju, SE: Gráfica Editora J. Andrade, 2004. 298 p.
- OLIVEIRA; D. M. C.; PEREIRA, E. R.; COSTANZI, R. N. Coagulante químico sulfato de alumínio para o tratamento do efluente originado da lavagem de veículos. **V Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental** Belo Horizonte/MG – 24 a 27/11/2014.
- RACAR, M.; et al. Optimization of coagulation with ferric chloride as a pretreatment for fouling reduction during nanofiltration of rendering plant secondary effluent. **Chemosphere**, v. 181, p. 485–491, 2017.
- REZENDE, A. T. **Reúso urbano de água para fins não potáveis no brasil**. Faculdade de Engenharia da UFJF, Juiz de Fora, 2016.
- SABESP. Norma Técnica Interna - **NTS 013**. São Paulo. Junho, 1999.
- SILVA, S. K. C.; SANTOS, A. G.; LEITE, R. H. L; et al. Adsorção de corante azul reativo BF 5G utilizando casca de Manihot Esculenta Crantz. **Revista Matéria**, v. 27, n. 1, 2022.
- 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. **Congresso Brasileiro de Engenharia Química**, 20., 2014, Florianópolis. 2015.
- SOUZA, P. C.; et al. Estudo do tratamento de efluente têxtil através de processos de coagulação/floculação e eletrocoagulação. **E-Xacta**, Belo Horizonte, v. 9, n. 2, p. 123 132. 2016. Editora UniBH.