

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

Guilherme dos Santos Castro

**Avaliação de diferentes coagulantes para remoção de sólidos por
sedimentação**

LONDRINA

2022

Guilherme dos Santos Castro

Avaliação de diferentes coagulantes para remoção de sólidos por sedimentação

Evaluation of different coagulants for solids removal by sedimentation

Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Química, apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Prof. Dr. Joel Fernando Nicoleti.

Coorientador(a): Profa. Dra. Silvia P. D. Monte Blanco

Londrina

2022



Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

GUILHERME DOS SANTOS CASTRO

**Avaliação de diferentes coagulantes para remoção de sólidos por
sedimentação**

Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Química, apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Prof. Dr. Joel Fernando Nicoleti.

Coorientador(a): Profa. Dra. Silvia P. D. Monte Blanco

Data de aprovação: 01 de dezembro de 2022

Prof. Dr. Joel Fernando Nicoleti- Orientador
Doutorado em Engenharia de Alimentos
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof^a. Dr^a. Joseane Debora Peruço Theodoro - Membro
Doutorado em Engenharia Química
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof^a. Dr^a. Lucimara Lopes da Silva – Membro
Doutora em Engenharia Química
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Londrina

2022

AGRADECIMENTOS

Primeiramente aos meus pais, que sempre fizeram o possível e o impossível para prover uma educação de qualidade a mim e ao meu irmão, me incentivaram na decisão de me mudar de cidade para estudar em uma instituição pública e de qualidade e acima de tudo sempre me apoiaram.

Aos meus orientadores Joel e Sílvia, que me auxiliaram ao longo do trabalho de conclusão de curso. Vale ressaltar a professora Joseane, que gentilmente se dispôs a me acompanhar no laboratório para realizar os experimentos.

Aos meus amigos mais próximos, onde juntos pudemos enfrentar a jornada acadêmica e fazê-la ser muito mais leve e amena.

Aos professores da Universidade Tecnológica Federal do Paraná por todo conhecimento transmitido ao longo da graduação.

Por fim, a Supergasbras, empresa cujo qual me deu a oportunidade de realizar o estágio, onde pude adquirir muitos conhecimentos e ter a vivência cotidiana de uma indústria, evoluindo pessoal e profissionalmente.

RESUMO

CASTRO, Guilherme dos Santos. Avaliação de diferentes coagulantes para remoção de sólidos por sedimentação. 45 f. TCC (Curso de Engenharia Química), Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Londrina, 2022.

No processo de pintura dos vasilhames, ocorre a geração da borra de tinta, definida como o resíduo gerado durante o processo de aplicação da tinta, onde a tinta não aderida à superfície do objeto é coletada por exaustores que direcionam a névoa para as cortinas de água, localizadas na parede e na parte inferior da cabine de pintura. A estação de tratamento de resíduos da Supergasbras consiste no reaproveitamento da água proveniente da lavagem da cabine de pintura e da pintura dos vasilhames, a partir da utilização do coagulante sulfato de alumínio. Apesar do monitoramento dos efluentes químicos ainda atenderem ao CONAMA 430 e a IT.SMS-05 da Supergasbras, alguns parâmetros estão bem perto do limite aceito, desta forma, este estudo de caso almeja melhorar os resultados do monitoramento dos efluentes químicos através do teste de dois coagulantes: o coagulante orgânico tanino (Tanfloc) e o coagulante inorgânico cloreto férrico. O planejamento experimental seguiu então variando-se dois fatores, tempo de sedimentação e dosagem de coagulante, subdividido em 3 níveis codificados (+1, 0 -1), totalizando então 9 experimentos em duplicata. Após o experimento, foram realizadas as análises dos indicadores: pH, cor aparente, turbidez e DQO. O cloreto férrico se demonstrou extremamente eficiente para com a remoção da turbidez e da demanda química de oxigênio, com valores excedendo 90% de remoção, além disso, o indicador cor aparente também obteve um bom resultado. Contudo, em relação ao pH, todos os ensaios com cloreto férrico adquiriram caráter ácido, consequentemente faz necessário a utilização da Cal para correção da acidez. A aplicação do coagulante orgânico Tanfloc, por sua vez, ótima eficiência de remoção da cor aparente e da turbidez, valor de pH que cumpre a legislação vigente, além da remoção da demanda química de oxigênio ser de aproximadamente 90% para todas os ensaios. A utilização de coagulantes orgânicos como o Tanfloc é fundamental no quesito sustentabilidade, pois além de serem eficientes, não são tóxicos, possuem menor teor de metais, produzem lodo em menor quantidade e são biodegradáveis.

Palavras-chave: Coagulação; Eficiência; Tratamento de efluentes

ABSTRACT

In the process of painting containers, paint sludge is generated, defined as the residue generated during the paint application process, where the paint that does not adhere to the surface of the object is collected by exhaust fans that direct the mist to the water curtains, located on the wall and bottom of the spray booth. The Supergasbras waste treatment station consists of reusing water from washing the paint booth and painting containers, using aluminum sulfate coagulant. Despite the monitoring of chemical effluents still comply with CONAMA 430 and IT.SMS-05 of Supergasbras, some parameters are very close to the accepted limit, thus, this case study aims to improve the results of monitoring chemical effluents through the test of two coagulants: the organic tannin coagulant (Tanfloc) and the inorganic ferric chloride coagulant. The experimental planning then followed by varying two factors, sedimentation time and coagulant dosage, subdivided into 3 coded levels (+1, 0 -1), thus totaling 9 experiments in duplicate. After the experiment, analyzes of the indicators were carried out: pH, apparent color, turbidity, and COD. Ferric chloride proved to be extremely efficient for removing turbidity and chemical oxygen demand, with values exceeding 90% removal, in addition, the apparent color indicator also obtained a good result. However, in relation to the pH, all the tests with ferric chloride acquired an acid character, consequently it is necessary to use lime to correct the acidity. The application of Tanfloc organic coagulant, in turn, excellent efficiency in removing apparent color and turbidity, a pH value that complies with current legislation, in addition to removal of the chemical oxygen demand being approximately 90% for all tests. The use of organic coagulants such as Tanfloc is essential in terms of sustainability, as in addition to being efficient, they are non-toxic, have less metal content, produce less sludge and are biodegradable.

Keywords: Coagulation; Efficiency; Wastewater treatment

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Processo produtivo	3
Figura 2 - Processo de reutilização da água na Supergasbras	4
Figura 3 – Cabine de Pintura	5
Figura 4 - Processo de filtração utilizado no estudo de caso	6
Figura 5 – Processo de Coagulação/Floculação/Decantação	9
Figura 6 – pH após tratamentos com Tanfloc e cloreto férrico	16
Figura 7 – Cor Aparente após tratamento com Tanfloc	17
Figura 8 – Cor Aparente após tratamento com cloreto férrico	17
Figura 9 – Gráfico de Pareto (Cor aparente) – Tanfloc	18
Figura 10 – Gráfico de superfície (Cor aparente) – Tanfloc	18
Figura 11 – Gráfico de Pareto (Cor aparente) – Cloreto férrico	19
Figura 12 – Gráfico de superfície (Cor aparente) – Cloreto férrico	20
Figura 13 – Turbidez (NTU) após tratamento com Tanfloc	21
Figura 14 – Turbidez (NTU) após tratamento com Cloreto férrico	22
Figura 15 – Gráfico de Pareto (Turbidez) – Tanfloc	23
Figura 16 – Gráfico de Superfície (Turbidez) – Tanfloc	23
Figura 17– Gráfico de Pareto (Turbidez) – Cloreto férrico	24
Figura 18 – Gráfico de Superfície (Turbidez) – Cloreto férrico	24
Figura 19 – Eficiência de Remoção da DQO após tratamento com Tanfloc e cloreto férrico.	25
Figura 20 – Gráfico de Pareto (DQO) – Tanfloc	26
Figura 21 – Gráfico de Superfície (DQO) – Tanfloc	27
Figura 22 – Gráfico de Pareto (DQO) – Cloreto férrico	28
Figura 23 – Gráfico de Superfície (DQO) – Cloreto férrico	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fatores e níveis com maior êxito no pré ensaio	13
Tabela 2 - Ensaio com suas respectivas análises fatoriais	13
Tabela 3 - Equipamentos utilizados no experimento	14
Tabela 4 - Indicadores do efluente bruto	15

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Abs – Absorbância

cm – Centímetros

DQO - Demanda Química de Oxigênio

ETE - Estação de Tratamento de Efluentes

GLP – Gás Liquefeito do Petróleo

min – Minutos

mL – Mililitros

NTU – Unidade de Turbidez Nefelométrica (sigla em inglês)

pH – Potencial hidrogeniônico

PtCo – Escala de Platina-cobalto

UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	ESTUDO DE CASO	3
3	REFERENCIAL TEÓRICO	5
3.1	Estação de Tratamento de Efluentes	5
3.2	Água	6
3.3	Legislação Vigente	7
3.4	Tratamento e Indicadores de Qualidade do Efluente	8
3.4.1	Processos de tratamento de efluentes	8
3.4.2	pH	9
3.4.3	Turbidez	10
3.4.4	Demanda Química de Oxigênio (DQO)	10
4	OBSERVAÇÃO, ANÁLISE E PLANO DE AÇÃO	11
5	MATERIAIS E MÉTODOS	12
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	15
6.1	Efluente Bruto	15
6.2	pH	16
6.3	Cor aparente	17
6.4	Turbidez	21
6.5	Demanda Química de Oxigênio (DQO)	25
7	CONCLUSÃO	30
	REFERÊNCIAS	31
	APÊNDICE A	34

1 INTRODUÇÃO

A Supergasbras faz parte do grupo SHV Energy, líder mundial na distribuição de GLP (Gás Liquefeito do Petróleo), reconhecido como um dos combustíveis fósseis mais sustentáveis que existe, além disso, há mais de 75 anos distribuir o gás que abastece milhões de famílias brasileiras, estabelecimentos comerciais e indústrias (Supergasbras, 2016).

Segundo Oliveira (2013), as empresas têm sido pressionadas pela sociedade a cumprir um mínimo de exigências ambientais. Dessa forma, aquelas que além de se enquadrarem neste requisito, e buscarem novas alternativas ambientalmente favoráveis, ganham não só em imagem e aceitação no mercado, mas também podem obter benefícios com possíveis reduções dos resíduos e efluentes gerados. Dentre estes benefícios podem ser citados a economia com energia, água e matéria-prima, além de melhoria da saúde ocupacional e na qualidade de vida no trabalho.

O processo de pintura dos vasilhames é importante no quesito da experiência do cliente, pois um vasilhame com a pintura em bom estado é demonstra qualidade e comprometimento da empresa para com o cliente. Os botijões da Supergasbras são pintados com tinta dourada mono componente, a base de resina hidrocarbônica, pigmentada com pigmento metálico e orgânico. O solvente é alifático e com até 3% no máximo de aromáticos na composição.

Neste processo, ocorre a geração da borra de tinta, esta sendo definida como o resíduo gerado durante o processo de aplicação da tinta, onde a tinta não aderida à superfície do objeto (no caso o vasilhame) é coletada por exaustores que direcionam a névoa para as cortinas de água, localizadas na parede e na parte inferior da cabine de pintura. A borra é um resíduo que possui alto teor de agentes tóxicos e inflamáveis, configurando o material como perigoso ou Classe I (CAETANO, MANOSSO e SARTORI, 2021).

A finalidade da coagulação/floculação na ETE da Supergasbras é transformar as impurezas da borra de tinta, que se encontram em suspensão fina, em partículas maiores (flocos) para que possam ser removidas pelo processo de filtração. Isto posto, a busca por alternativas para minimizar o impacto produzido por este tipo de efluente (borra de tinta) no meio ambiente torna-se de grande importância. Dessa forma é grande o interesse no uso de coagulantes, onde os inorgânicos são produzidos em larga escala e mais comumente aplicados nas indústrias, enquanto os orgânicos

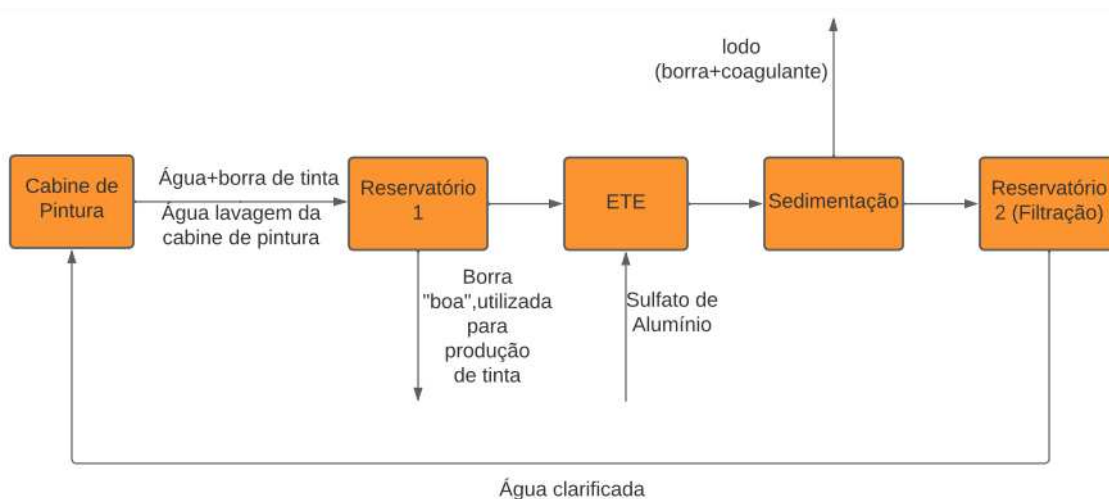
apresentam benefícios por serem biodegradáveis, resultarem em uma menor geração de lodo e ainda por não serem tóxicos, mas sem uma produção em larga escala (Alves, et al, 2022).

O sulfato de alumínio é o agente coagulante mais utilizado pelas indústrias que utilizam processos que envolvam o mecanismo de coagulação/floculação, devido a sua boa eficiência alinhado com seu acessível preço de mercado. Por outro lado, deve-se atentar a quantidade de alumínio na água, pois quando em excesso afeta bruscamente a turbidez da água (MENEZES, 2018).

Diante disso, como uma alternativa ao sulfato de alumínio, espera-se verificar a eficiência no tratamento do efluente ao utilizar os coagulantes Tanfloc e cloreto férrico, separadamente, em diferentes concentrações em relação às condições adequadas da água e ainda examinar qual a melhor dosagem para cada coagulante.

vasilhames, a partir do coagulante sulfato de alumínio, conforme ilustra a Figura 2. Apesar do monitoramento dos efluentes químicos ainda atenderem ao CONAMA 430 e a (IT.SMS-05) da Supergasbras, alguns parâmetros estão bem perto do limite aceito. O sulfato de alumínio, por exemplo, é amplamente utilizado devido seu preço acessível e boa eficiência, por outro lado é que ele pode afetar outros parâmetros do efluente que não são desejáveis, como a demanda química de oxigênio, pH, turbidez e cor. Desta forma, este estudo de caso almeja melhorar os resultados do monitoramento dos efluentes químicos através do teste de coagulantes alternativos como Tanfloc e cloreto férrico.

Figura 2 – Processo de reutilização da água na Supergasbras.



Fonte: Autor (2022).

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Estação de Tratamento de Efluentes

Dentro da cabine de pintura (Figura 3), ocorre a pintura dos vasilhames de gás GLP a partir da tinta dourada mono componente, a base de resina hidrocarbônica, pigmentada com pigmento metálico e orgânico. Durante este processo há a geração de partículas de tinta, estas que entram em contato com a cortina d'água. O ar passa através da cortina d'água, a névoa de tinta é capturada do ar e carregada para um tanque localizado abaixo da cabine de pintura. Nessa área, a solução (borra de tinta + água) é separada da água e então a água pode ser reciclada e as partículas removidas.

Figura 3 - Cabine de Pintura

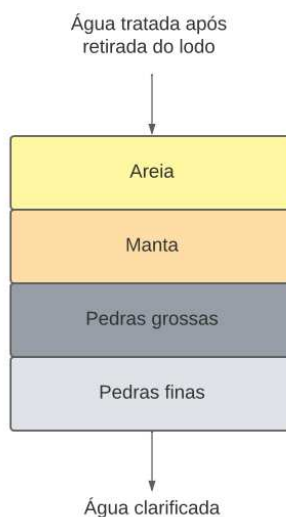


Fonte: Autor, 2022.

Em seguida, esta solução (borra de tinta + água) segue para um tanque, onde a borra se concentra na superfície, que em seguida é encaminhada para a Estação de Tratamento de Resíduos. Essa borra é retirada com uma pá, e em seguida é armazenada em tambores, que serão destinados para uma empresa que utiliza essa borra “ruim” para produção de cimento, a partir do coprocessamento deste resíduo. A lavagem da cabine de pintura é quinzenal, e esta água é encaminhada para a ETE também. Ao chegar na caixa, inicia-se o processo de tratamento de resíduos.

No processo tradicional utilizado na Supergasbras, o tratamento dos resíduos inicia-se ao ligar-se a bomba A (coagulante – sulfato de alumínio) por 30 minutos, observando o pH atingir a faixa entre 7 e 8. Após verificar o pH, adicionar manualmente com balde graduado, 6 litros do produto B (poliacrilamida), que visa o aumento do pH do efluente, e em seguida aguardar a reação por 10 segundos e fechar a entrada de ar comprimido. Após este processo, desliga-se a bomba e deixa-se a solução decantar por 2 horas (sedimentação dos flocos). Após este período, ativa-se outra bomba para transferir a água “limpa” para a caixa de filtração (Figura 4). Em seguida a água cai em uma outra caixa, onde (após ativação de uma terceira bomba) retorna à cabine de pintura para ser usada como cortina de água novamente.

Figura 4 – Processo de filtração utilizado no estudo de caso.



Fonte: Autor (2022).

3.2 Água

A água é um dos elementos mais importantes na natureza, além de ser essencial a vida ela representa cerca de 70% do planeta, onde 3% são águas doces, dessa forma torna-se prioridade a preservação, o controle e a utilização consciente das águas doces. No setor industrial, a utilização/reutilização eficiente da água resulta em inúmeras vantagens, pois além de reduzir o consumo deste recurso escasso e minimizar os impactos ambientais que o processo implica, favorece a imagem da empresa frente ao mercado e preserva o meio ambiente. (POSSAMAI, 2018).

A remoção de partículas é necessária pois estas podem reduzir a transparência da água (aumentar turbidez), impactar na cor da água (estéticas), ter agentes infecciosos (microrganismos), além disso ter compostos tóxicos em todo seu volume. Santos (2011) comenta que esta operação é resultado da reação do coagulante com a água, formando espécies hidrolisadas com carga positiva, e do contato destas espécies com as impurezas (partículas coloidais, organismos). Assim, a força iônica do meio é alterada, permitindo que partículas se aproximem e se juntem, formando flocos que podem ser removidos através por meio de sedimentação, flotação e/ou filtração.

A água bruta contém diversos compostos do próprio ambiente natural ou introduzidos a partir das diversas atividades humanas. Esses compostos configuram a água pelas características físico-químicas e microbiológicas. O excesso de impurezas na água pode causar sérios danos à saúde humana e às suas atividades econômicas (Ministério da Saúde, 2006). Assim, é indispensável realizar a caracterização física, química e biológica da água que, a partir de indicadores, classificarão a qualidade da mesma.

3.3 Legislação Vigente

Com relação aos efluentes industriais, a legislação brasileira exige o cumprimento do CONAMA 430: Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011 – Art. 16 – Seção 2. Em relação aos parâmetros analisados no presente trabalho, a resolução Conama 430/2011 configura limite apenas para o pH, que deve estar entre 5 e 9. A Portaria nº IAP nº 256/2013, por sua vez, indica apenas a frequência de monitoramento de alguns parâmetros, dentre eles pH e demanda química de oxigênio, sendo que os padrões de lançamento são determinados individualmente para cada indústria na ocasião do licenciamento ambiental das mesmas.

Segundo (CONAMA, 2011) o Artigo 16 salienta que: “Os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados diretamente no corpo receptor desde que obedeçam às condições e padrões previstos neste artigo, resguardadas outras exigências cabíveis”.

A Instrução de trabalho (IT.SMS-05) da Supergasbras para o tratamento dos efluentes da cabine de pintura salienta que deve haver uma remoção mínima de 60% da Demanda Química de Oxigênio do efluente tratado.

3.4 Tratamento e Indicadores de Qualidade do Efluente

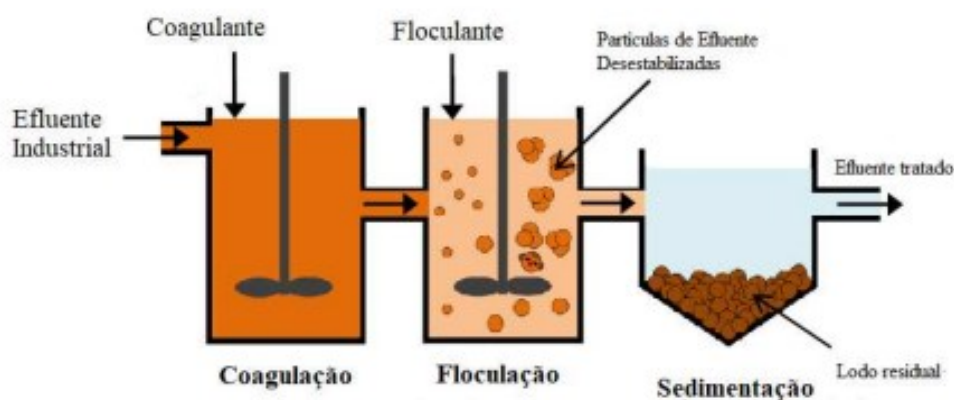
3.4.1 Processos de tratamento de efluentes

A combinação de etapas individuais como coagulação, floculação, sedimentação e filtração garante uma água de reuso tratada, com índices de qualidade dentro dos limites preconizados pelo CONAMA 430 e pela (IT.SMS-05) da Supergasbras.

A primeira etapa, que é a coagulação, consiste na adição de um coagulante químico visando a neutralização elétrica das partículas, o que resulta na aglutinação das mesmas em partículas “maiores” (flocos). O mecanismo de ação dos coagulantes baseia-se na eliminação da carga eletrostática da superfície das partículas por meio de agitação rápida, a qual promove o choque dessas partículas, diminuindo a repulsão entre elas (CACHEIRA, et al, 2012). Um coagulante eficiente hidrolisará os íons rapidamente quando misturado com a água a ser tratada. Conforme esses produtos químicos hidrolisam, formam precipitados insolúveis que desestabilizam partículas por adsorção à sua superfície e neutralizando a carga (reduzindo assim as forças repulsivas) (FRANTZ, 2020).

Na sequência ocorre a floculação que se dá pela agregação de partículas desestabilizadas (partículas das quais a carga da superfície elétrica foi reduzida por coagulação). Este agregado de partículas dão origem aos flocos por meio de agitação lenta, e por fim o floco formado pode ser removido por sedimentação, por gravidade e/ou filtração. (CRITTENDEN, et al, 2016). Em seguida ocorre a sedimentação, caracterizada pelo fenômeno físico em que as partículas suspensas formadas durante a floculação apresentam movimento descendente em meio líquido de menor massa específica devido à ação da gravidade, indo depositar-se no fundo, formando o lodo (RIBEIRO, 2007). Na Figura 5 é possível observar a ilustração das três etapas consecutivas – coagulação, floculação e sedimentação.

Figura 5 – Processo de Coagulação/Floculação/Decantação.



Fonte: Processo de coagulação/floculação.

Adaptado de: Wu, et al (2016).

Após a sedimentação, o sobrenadante segue para a última etapa do processo que é a filtração. Esta operação consiste na remoção de partículas sólidas a partir de uma suspensão (um sistema de duas fases contendo partículas num fluido) por meio de um sistema poroso, sendo este processo amplamente utilizado para a remoção de partículas da água (CRITTENDEN, et al. 2016).

A filtração ocorre pela passagem da suspensão por 4 camadas de materiais ilustradas na Figura 4, as quais vão reter as impurezas restantes na água ao longo dos níveis. Ao final a água então retorna para a cabine de pintura para ser reutilizada.

3.4.2 pH

É o potencial hidrogeniônico, o qual indica a concentração de íons de hidrogênio (H^+) presentes no meio. O pH é um dos parâmetros de maior frequência de monitoramento na rotina operacional de uma estação de tratamento de resíduos, pela interferência em diversos processos e operações unitárias (BERGAMASCO, 2014).

Em uma estação de tratamento de efluentes, a faixa mais adequada para realizar um processo de coagulação é entre 5,5 e 7,5, onde nestas condições se encontram os melhores resultados para remoção da turbidez. O pH influencia na precipitação de elementos químicos tóxicos, como metais pesados, assim como na atividade microbológica dos organismos. Ademais, por exemplo, um pH muito ácido pode promover a oxidação de materiais metálicos e pode interferir negativamente nas estruturas físicas, como tanques e tubulações (KNEVITZ, 2017).

3.4.3 Turbidez

Consiste em uma interferência da concentração de partículas suspensas na água obtida a partir da passagem de um feixe de luz através da amostra, sendo expressa por meio da unidade nefelométricas de turbidez (UNT) ou unidade de turbidez (uT). Este parâmetro de qualidade deve-se à presença de matéria particulada em suspensão na água (matéria orgânica, inorgânica, e outros organismos microscópicos) (BERGAMASCO, 2014).

Níveis de turbidez mais elevados são frequentemente associados com maiores níveis de microrganismos causadores de doenças tais como: vírus, parasitas e algumas bactérias. Esses organismos podem causar sintomas em curto prazo, como náuseas, cólicas, diarreia e dores de cabeça associadas (EPA, 2009).

3.4.4 Demanda Química de Oxigênio (DQO)

Um dos principais impactos ambientais do lançamento de efluente é a redução do nível de oxigênio na água, pois a matéria orgânica na água serve de “alimento” para as bactérias, se utilizando do O₂ dissolvido para realizar as reações.

Por consequência, a DQO surge como um indicador indispensável nos estudos de caracterização de efluentes industriais, indicando a matéria orgânica baseado na concentração de oxigênio consumido para oxidar a matéria orgânica (biodegradável ou não) em meio ácido por ação de um agente químico oxidante forte (Valente, Padilha e Silva, 2000).

4 OBSERVAÇÃO, ANÁLISE E PLANO DE AÇÃO

Ao notar que alguns parâmetros de qualidade da água não apresentavam bons resultados, aproximando-se aos limites de valores que a legislação (CONAMA 430) permite, e visando a melhoria da eficiência da ETE, considerou-se a mudança do coagulante sulfato de alumínio que atualmente é utilizado no tratamento do efluente (água + borra de tinta) da Supergasbras. Isto posto, chegou-se à conclusão de que a forma mais aplicável e com resposta mais rápida seria a mudança do coagulante, mensurando os parâmetros de qualidade como DQO, turbidez, cor e pH das amostras para validar a eficácia desta substituição. Desta forma, este estudo de caso almeja melhorar os resultados do monitoramento dos efluentes químicos através do uso de outros coagulantes como: Tanfloc e cloreto férrico.

O Tanfloc é um coagulante natural, um polímero orgânico catiônico, considerado um excelente coagulante por possuir uma alta eficiência na remoção da turbidez, não liberar resíduos metálicos, além de não consumir a alcalinidade da solução, alterando pouco o pH da água tratada (MENEZES, 2018). Ademais, o floco obtido após tratamento com o Tanfloc possui forma irregular e apresenta uma superfície maior, acarretando uma maior área de contato quando comparado ao floco gerado pela adição de sulfato de alumínio, proporcionando assim uma clarificação mais eficiente, resultando em valores menores de cor e turbidez (PIANTÁ, 2008).

O cloreto férrico, assim como o Tanfloc, também é amplamente utilizado no tratamento de resíduos industriais, apesar da sua manipulação demandar atenção tendo em vista suas propriedades corrosivas. Além disso, a aplicação do cloreto férrico geralmente implica em um carácter mais ácido do efluente tratado, acrescido de íons cloreto de ferro. Por outro lado, tal coagulante é conhecido pela alta eficiência na redução da turbidez e DQO, além de eliminar fosfatos e metais pesados (mercúrio, chumbo) (PAVANELLI, 2001).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

A coleta do efluente bruto foi realizada na ETE contida na Figura 2, antes do processo de tratamento da borra de tinta, na unidade engarrafadora da Supergasbras. Antes da coleta, foi ligada a bomba para misturar o resíduo, visando a preservação das características originais do efluente, objetivando que os resultados encontrados após os experimentos possam ser validados e eventualmente aplicados na rotina da Supergasbras.

Após coletado e colocado em galões de 5 litros, o efluente foi agitado e descartado, repetindo tal processo três vezes, visando a exclusão de qualquer impureza contida nos galões utilizados. Em seguida, os galões foram levados ao Laboratório de Recursos Hídricos e Hidráulica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (Londrina), onde ocorreram as análises dos indicadores: pH, turbidez, cor e demanda química de oxigênio (DQO).

Para realizar o pré ensaio, etapa esta que teve como objetivo definir a concentração de coagulante e o tempo de sedimentação ideal caracterizado pela maior formação de flocos no interior do efluente e com menor turbidez e cor possíveis, foram preparadas as soluções-mãe através da diluição de 10g L^{-1} de coagulantes com água destilada. Em seguida as soluções com o efluente bruto foram levadas para o equipamento JarTest utilizando-se 500 mL de efluente.

Para 500 mL de efluente, utilizou-se os volumes 50,60,70,80 e 90 mL de coagulante para 3 minutos de agitação rápida (100 rpm) + 10 minutos de agitação lenta (15 rpm), com 30 minutos para sedimentação. Após observação do pré ensaio, optou-se pela avaliação dos volumes de 50, 60 e 70 mL de coagulante nos ensaios definitivos.

O planejamento experimental seguiu então variando-se dois fatores, tempo de sedimentação e volume do coagulante, subdividido em 3 níveis codificados (+1, 0 -1), de acordo com a Tabela 1, totalizando então 9 experimentos, conforme a combinação dos fatores ilustrada na Tabela 2, sendo que cada ensaio realizado em duplicata. Assim como no pré-teste, na etapa de coagulação fixou-se agitação rápida em 100 rpm por 3 minutos, seguindo mais 10 minutos de a agitação lenta (15 rpm) para a floculação.

Tabela 1 – Fatores e níveis dos ensaios.

Fatores	Níveis		
	-1	0	1
Dosagem de Tanfloc (mL)	50	60	70
Dosagem de Cloreto Férrico (mL)	50	60	70
Tempo de Sedimentação (min)	10	20	30

Fonte: Autor, 2022.

Tabela 2 – Ensaios de acordo com a combinação de níveis e fatores.

Ensaio	Tempo de sedimentação (minutos)	Dosagem de coagulante Tanfloc (mL de solução mãe)	Dosagem de coagulante cloreto férrico (mL de solução mãe)
1	10	50	50
2	10	60	60
3	10	70	70
4	20	50	50
5	20	60	60
6	20	70	70
7	30	50	50
8	30	60	60
9	30	70	70

Fonte: Autor, 2022.

Após o experimento, também no Laboratório de Recursos Hídricos e Hidráulica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná foram realizadas as análises dos indicadores: pH, cor aparente, turbidez e DQO. A Tabela 3 mostra os equipamentos utilizados em cada análise.

Tabela 3 – Equipamentos utilizados no experimento

Indicador	Equipamento
pH	PHmetro Microprocessado Q400MT
Cor aparente	Espectrofotômetro DR-5000 - HACH – UV
Turbidez	Turbidímetro Policontrol AP-2000
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	Digestor HI839800 / Espectrofotômetro DR-5000 - HACH - UV

Fonte: Autor, 2022.

Para realizar a análise de DQO, foram colocados nos 18 ensaios 1,5 mL de dicromato de potássio, 2,5 mL de amostra (efluente) e 3,5 mL de solução ácida (ácido sulfúrico concentrado + catalisador sulfato de prata), em seguida os ensaios foram agitados manualmente e colocados no digestor HI839800 por 2 horas a 150°C. Então, ao final deste período a matéria orgânica foi oxidada em cromo trivalente Cr^{3+} , e dessa forma a DQO pode ser obtida através do Espectrofotômetro DR-5000 - HACH – UV.

Visando mensurar a eficiência de remoção dos coagulantes, utilizou-se a Equação 1 para seguintes os parâmetros: cor aparente, turbidez e demanda química de oxigênio.

$$\varepsilon = \frac{V_0 - V_f}{V_f} * 100 \quad (1)$$

Onde:

ε = Eficiência de remoção do parâmetro;

V_0 = Valor do inicial do parâmetro, medido na amostra bruta;

V_f = Valor do final do parâmetro, medido após aplicação do coagulante.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a finalização dos experimentos, os resultados foram gerados a partir da eficiência avaliada pela redução de cor, turbidez e DQO (Equação 1) de acordo com os coagulantes empregados, enquanto o pH foi avaliado de forma comparativa direta com o resultado do efluente bruto. Além disso, foi utilizado o Software Statistica 7, para a determinação dos efeitos das variáveis significativas na remoção das impurezas das amostras (Gráfico de Pareto), análise da variância (ANOVA) e obtenção da superfície de resposta em conjunto com o coeficiente de regressão da superfície obtida. Os resultados ANOVA são apresentados no Apêndice A.

6.1 Efluente Bruto

A Tabela 4 apresenta os resultados do efluente bruto gerado na lavagem da cabine de pintura dos vasilhames da Supergasbras.

Tabela 4 – Indicadores do efluente bruto.

Indicador	Equipamento
pH	7,13
Cor (PtCo)	1949
Turbidez (NTU)	444
Demanda Química de Oxigênio (mg. L ⁻¹)	4011,2

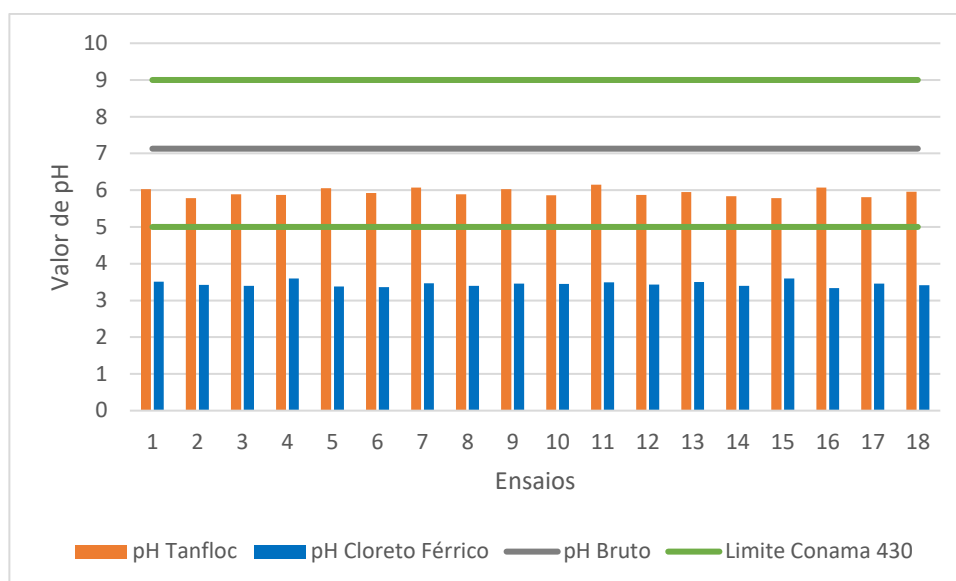
Fonte: Autor, 2022.

Os resultados obtidos são condizentes com a realidade, tendo em vista os altos valores de cor, turbidez e DQO são esperados de resíduos industriais.

6.2 pH

A Figura 6 demonstra como o pH do resíduo foi afetado após o tratamento com o Tanfloc e com o cloreto férrico, respectivamente:

Figura 6 – pH após tratamentos com Tanfloc e cloreto férrico.



Fonte: Autor, 2022.

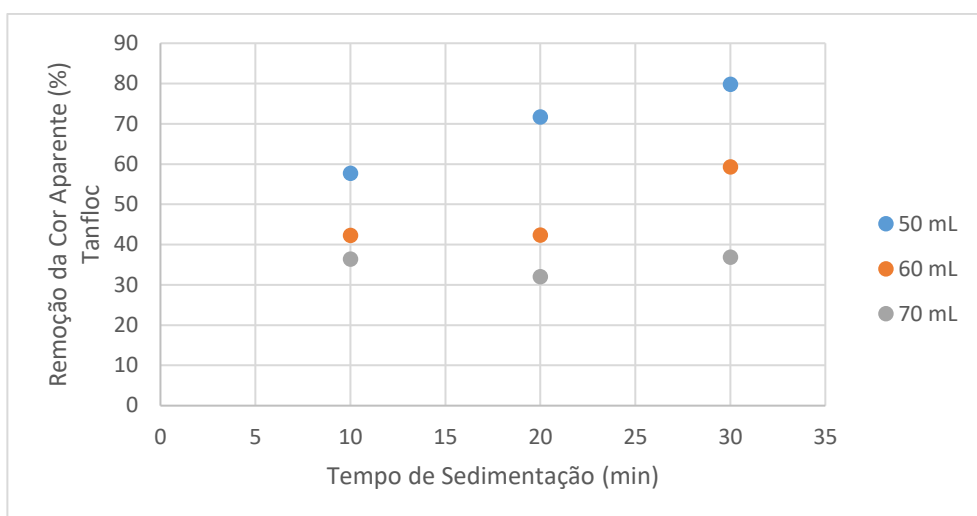
A aplicação do cloreto férrico apresentou uma grande redução do pH dos ensaios, conferindo caráter ácido ao efluente. Tal resultado era esperado, tendo em vista o caráter ácido da substância. O estudo realizado por SILVA, 2019 também constatou uma queda considerável do pH do efluente ao aplicar cloreto férrico no tratamento de esgotos sanitários.

Nota-se que houve a redução de aproximadamente “1” no pH das amostras após o tratamento com o Tanfloc, contudo os valores obtidos ainda atendem o CONAMA 430. Seria conveniente no tratamento do resíduo a partir do Cloreto Férrico a aplicação da Cal (hidróxido de Cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)), amplamente utilizada nas indústrias para correção da acidez, a qual acarreta o aumento do pH do meio, neutralizando o efluente.

6.3 Cor Aparente

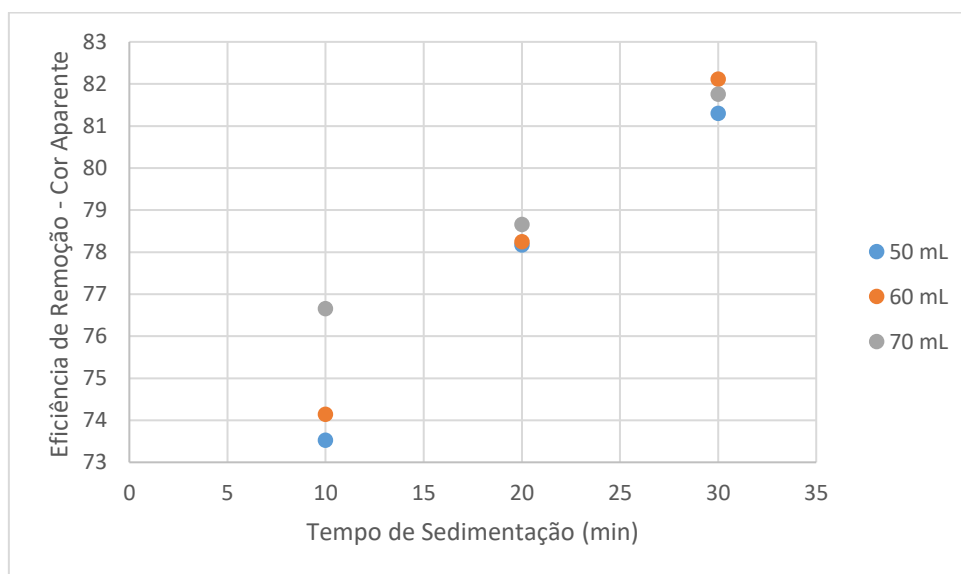
As figuras 7 e 8 expressam a eficiência dos coagulantes Tanfloc e cloreto férrico sobre a remoção da cor aparente, onde cada ponto do gráfico representa a média das duplicatas, realizadas para cada condição experimental ilustrada na Tabela 2. A abscissa expressa o tempo de sedimentação enquanto a ordenada é a redução de cor obtida pela Equação 1:

Figura 7 – Cor Aparente após tratamento com Tanfloc



Fonte: Autor, 2022.

Figura 8 – Cor aparente após tratamento com cloreto férrico

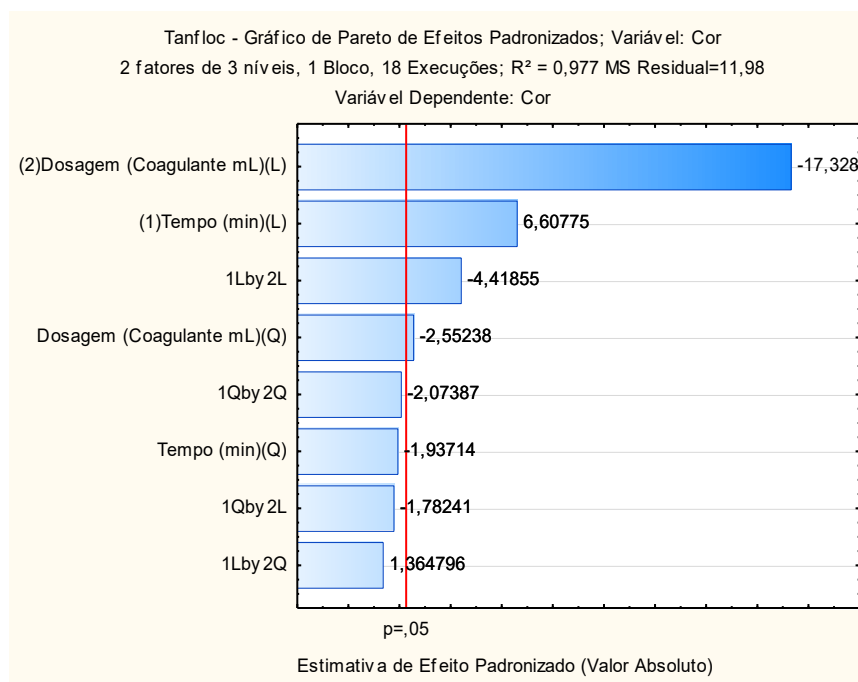


Fonte: Autor, 2022.

A partir dos resultados fica evidente uma característica do Tanfloc, que é o menor potencial da remoção da cor aparente mediante o aumento da concentração deste coagulante, tendo em vista que coagulantes orgânicos aumentam os valores de cor por possuir matéria orgânica em sua composição, sendo que os sólidos dissolvidos e suspensos provenientes destes compostos impactam negativamente na cor. O cloreto férrico, coagulante inorgânico, apresentou valores de remoção de cor aparente melhores que o Tanfloc, onde da Figura 8 se nota que o aumento do tempo de sedimentação é proporcional a remoção da cor aparente do efluente.

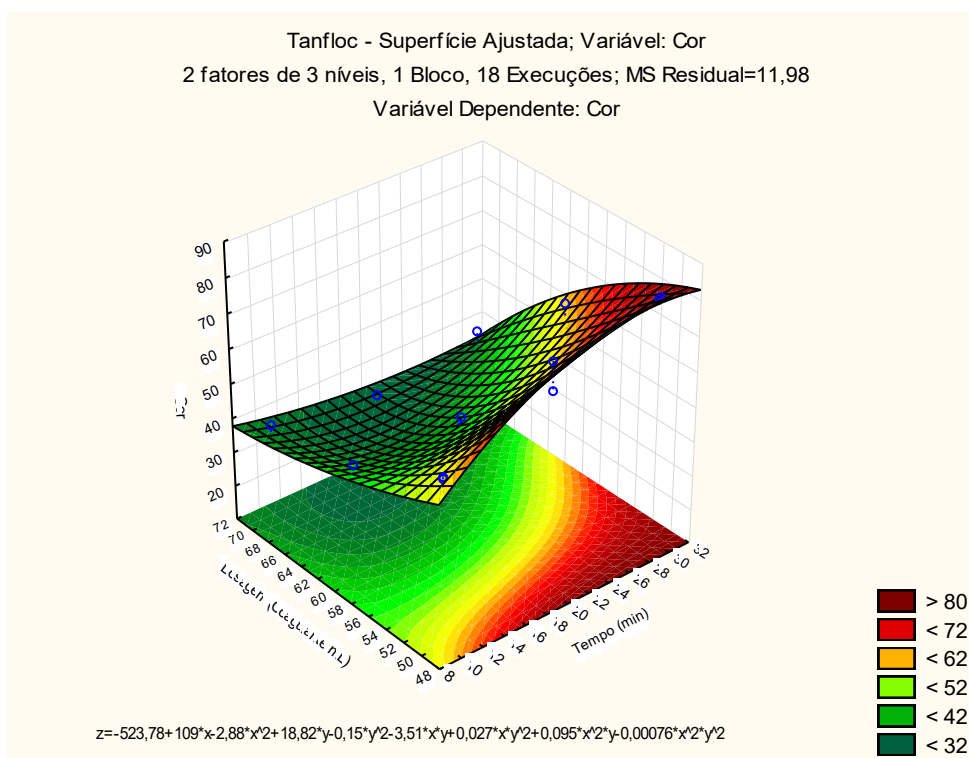
As Figuras 9 e 10 representam os gráficos de Pareto e de superfície do processo para o Tanfloc, respectivamente. No gráfico de Pareto, “L” significa linear e “Q” significa quadrático.

Figura 9 – Gráfico de Pareto (Cor aparente) - Tanfloc



Fonte: Autor, 2022.

Figura 10 – Gráfico de Superfície (Cor aparente) - Tanfloc

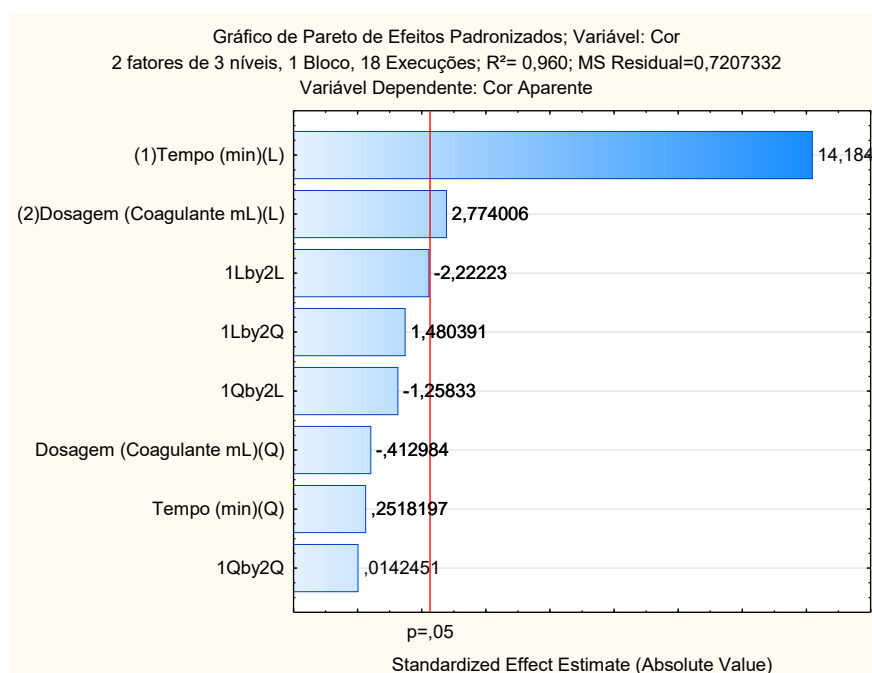


Fonte: Autor, 2022.

A Figura 9 resalta a grande importância do efeito linear da variável concentração para a remoção da cor nos ensaios com Tanfloc, esta que a partir Figura 10 demonstra que há uma diminuição da remoção da cor aparente à medida que se aumenta a dosagem de coagulante.

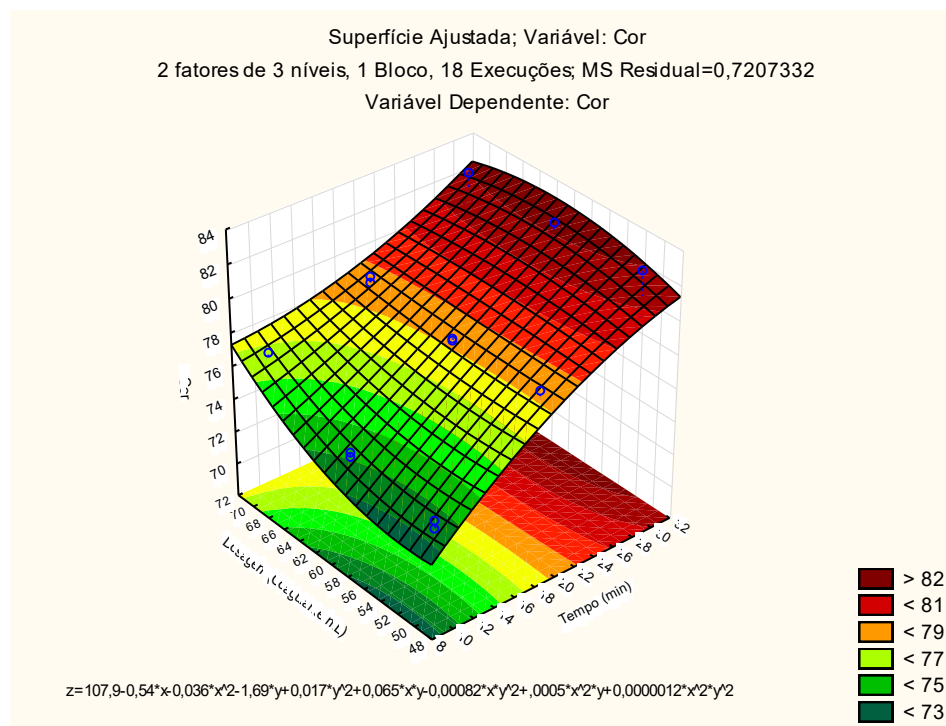
Em relação ao emprego do cloreto férrico sobre a cor aparente, as Figuras 11 e 12 retratam os gráficos de Pareto e de superfície de resposta.

Figura 11– Gráfico de Pareto (Cor aparente) – Cloreto Férrico



Fonte: Autor, 2022.

Figura 12 – Gráfico de Superfície (Cor aparente) – Cloreto Férrico

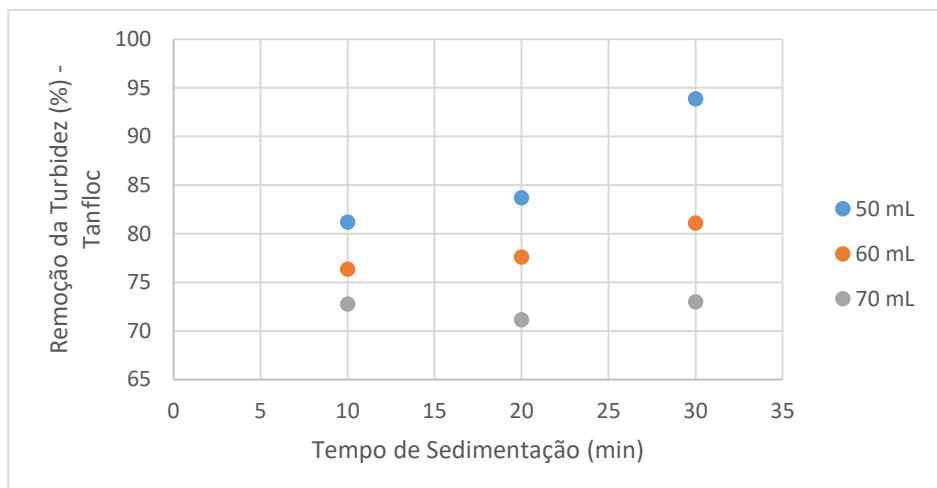


O tempo de sedimentação se mostrou muito significativo para a remoção da cor aparente do efluente tratado com cloreto férrico, onde o aumento do tempo acarreta uma maior remoção da cor, conforme ilustram as Figuras 11 e 12. A partir dos gráficos de Pareto, nota-se que para o cloreto férrico, o efeito linear do tempo de sedimentação é muito mais significativo do que o efeito linear da concentração. Por outro lado, para o Tanfloc, o efeito linear de dosagem do coagulante é muito mais significativo do que o efeito linear do tempo de sedimentação.

6.4 Turbidez

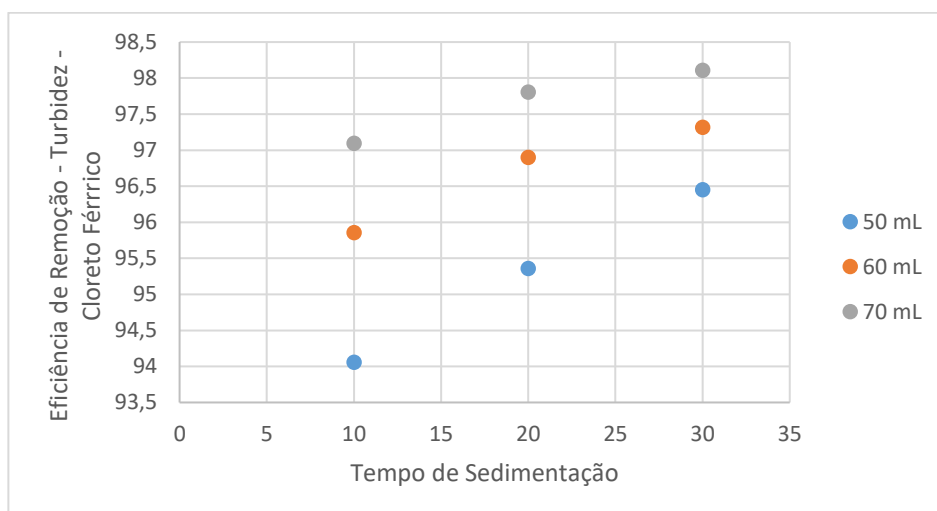
A Turbidez do efluente tratado é mensurada em NTU, representada através da média entre as duplicatas em cada caso da aplicação dos coagulantes, conforme as Figuras 13 e 14:

Figura 13 – Turbidez (NTU) após tratamento com Tanfloc



Fonte: Autor, 2022.

Figura 14 – Turbidez (NTU) após tratamento com cloreto férrico.



Fonte: Autor, 2022.

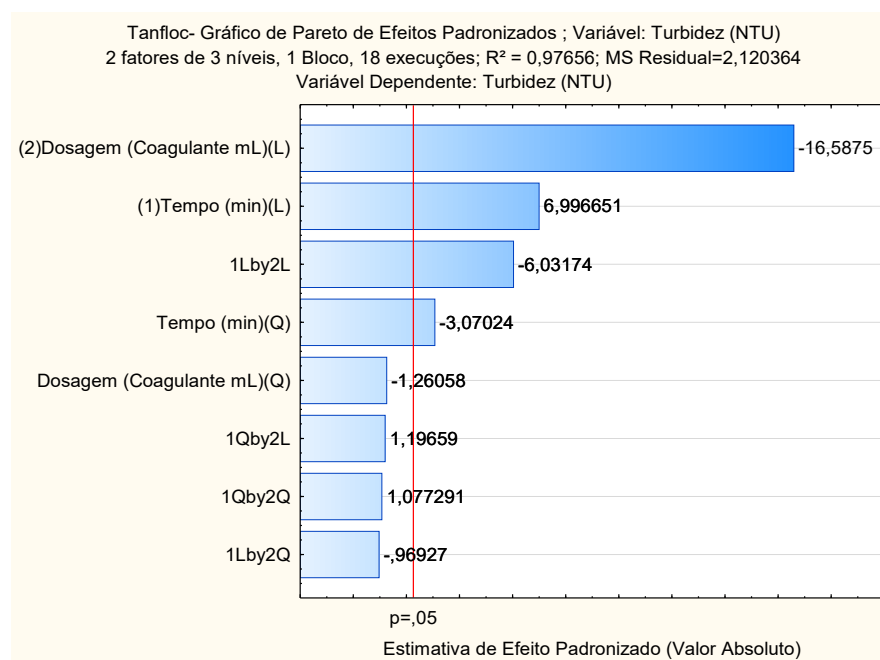
Como já salientado anteriormente, o fato do Tanfloc ser um coagulante orgânico e possuir sólidos dissolvidos e suspensos impacta na cor e na turbidez do efluente tratado. Em valores comerciais, o Tanfloc não possui grande diferença de preço quando comparado a coagulantes inorgânicos, por outro lado em termos ambientais, utilizar coagulantes biodegradáveis é de fato uma alternativa técnica aos inorgânicos, com benefícios a saúde pública, preservação ambiental, e menor produção de lodo juntamente com uma eliminação mais “verde”. O estudo conduzido por Piantá (2008), que utilizou o Tanfloc como alternativa ao sulfato de alumínio para o tratamento de água, constatou que os melhores resultados para remoção de

turbidez utilizando o coagulante são encontrados para tempos de sedimentação acima de 30 minutos, assim se assemelhando com a Figura 13.

Por outro lado, apesar de uma diminuição mais acentuada do pH, o cloreto férrico demonstrou grande potencial no que diz respeito a diminuição da turbidez, tendo em vista que todas as amostras apresentaram valores de eficiência de remoção acima de 93%. Guedes (2018) utilizou cloreto férrico para tratamento de efluentes gerados em uma indústria de tinta e obteve resultados excelentes para remoção de turbidez, com uma porcentagem de remoção de turbidez média de 98% para um tempo de sedimentação de 30 minutos.

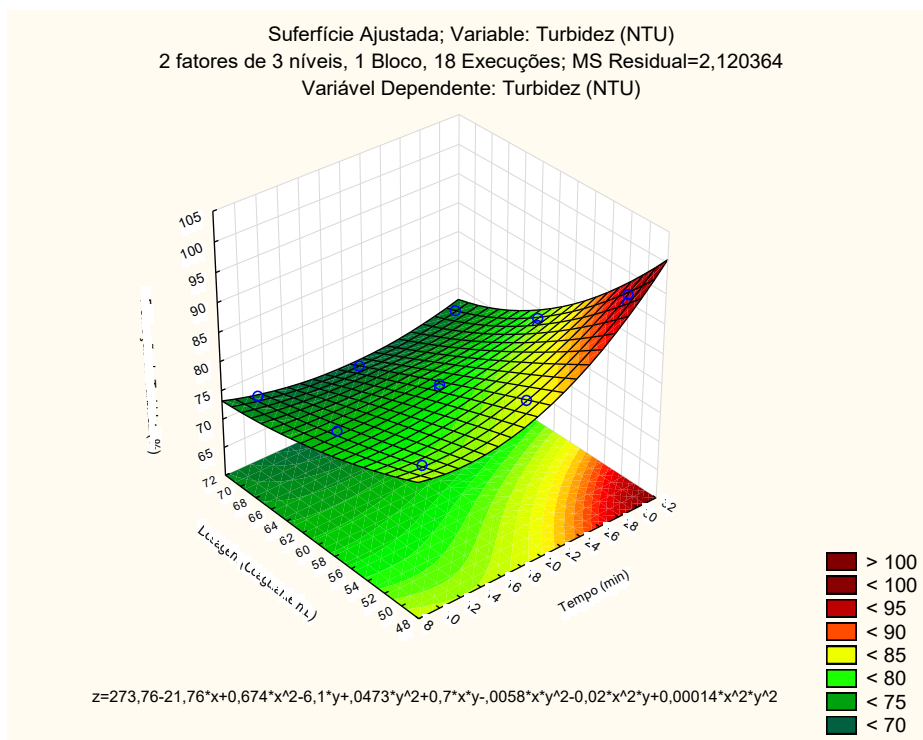
As Figuras 15 e 16, representam os gráficos de Pareto e superfície de resposta com emprego dos coagulantes tanfloc sobre a remoção de turbidez.

Figura 15 – Gráfico de Pareto (Turbidez) – Tanfloc



Fonte: Autor, 2022.

Figura 16 – Gráfico de Superfície (Turbidez) – Tanfloc

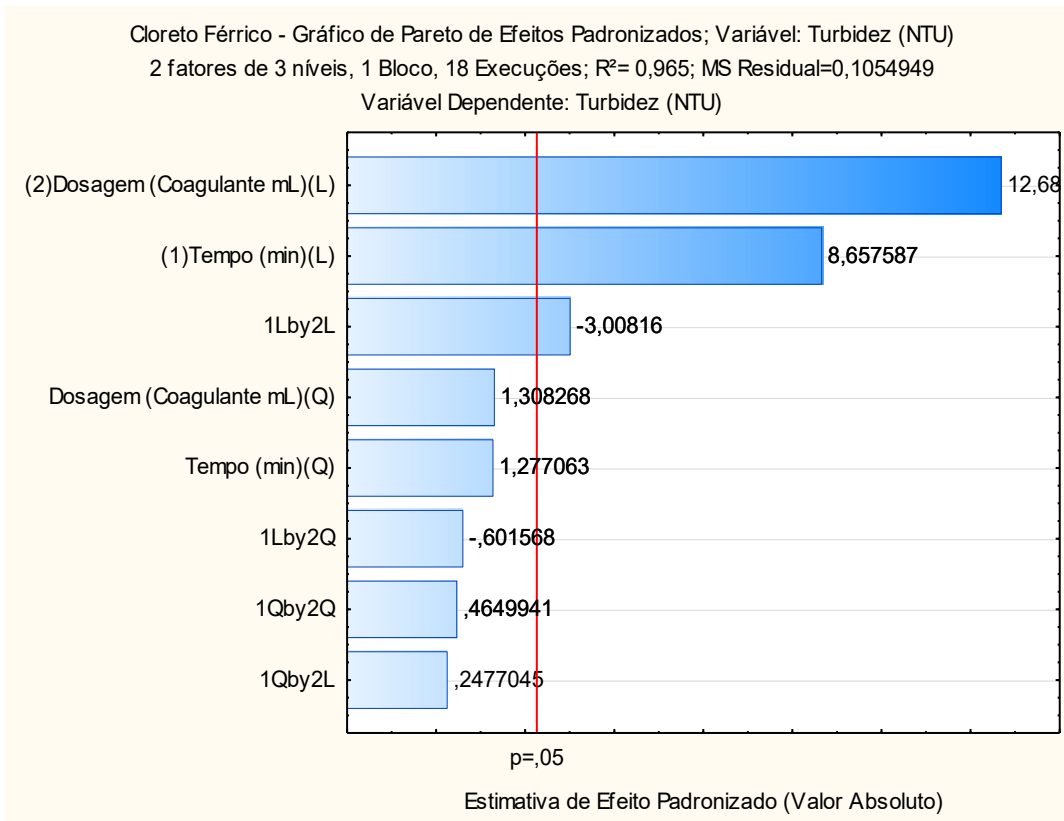


Fonte: Autor, 2022.

Apesar do tempo de sedimentação e da concentração serem parâmetros relevantes no uso do cloreto férrico, a concentração se mostra o mais importante, pois a partir da Figura 16 nota-se que o aumento da concentração acarreta a diminuição da eficiência de remoção da turbidez.

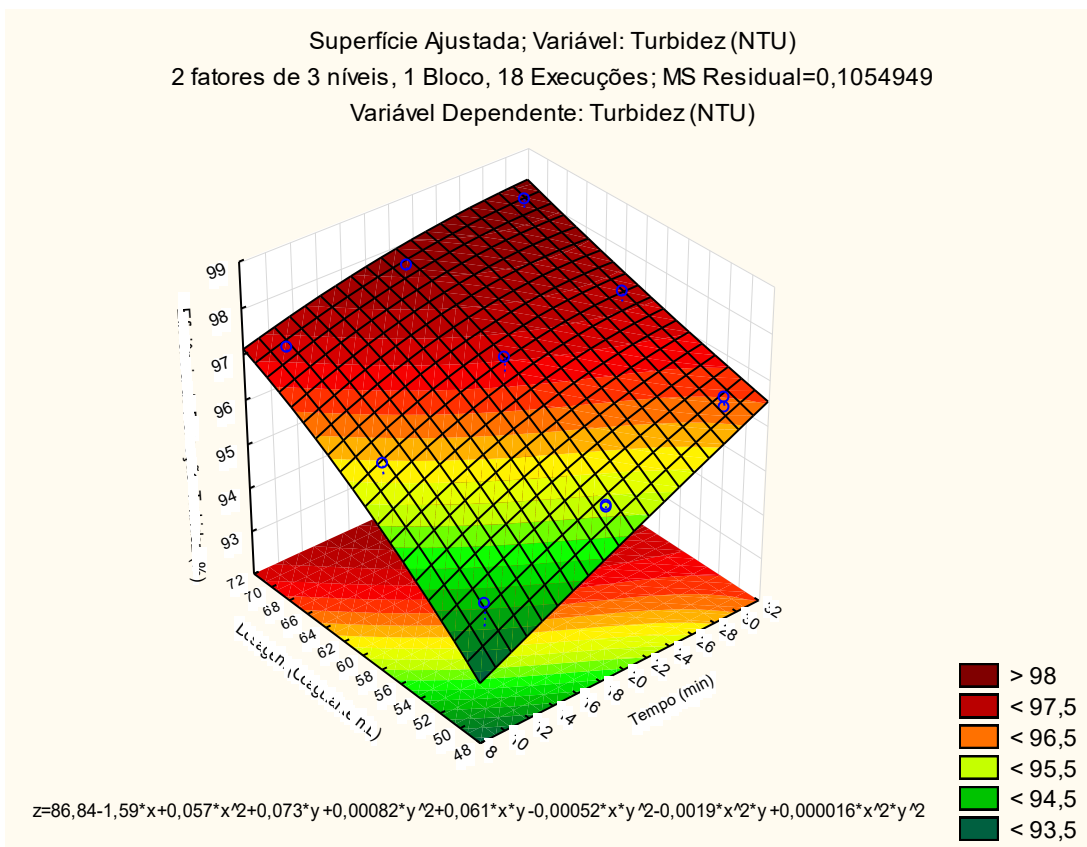
Com emprego do cloreto férrico, a redução de turbidez do efluente é ilustrada pelas Figuras 17 e 18, de acordo com os gráficos de Pareto e superfície de resposta, respectivamente.

Figura 17 – Gráfico de Pareto (Turbidez) – Cloreto Férrico



Fonte: Autor, 2022

Figura 18 – Gráfico de Superfície (Turbidez) – Cloreto Férrico.



Fonte: Autor, 2022.

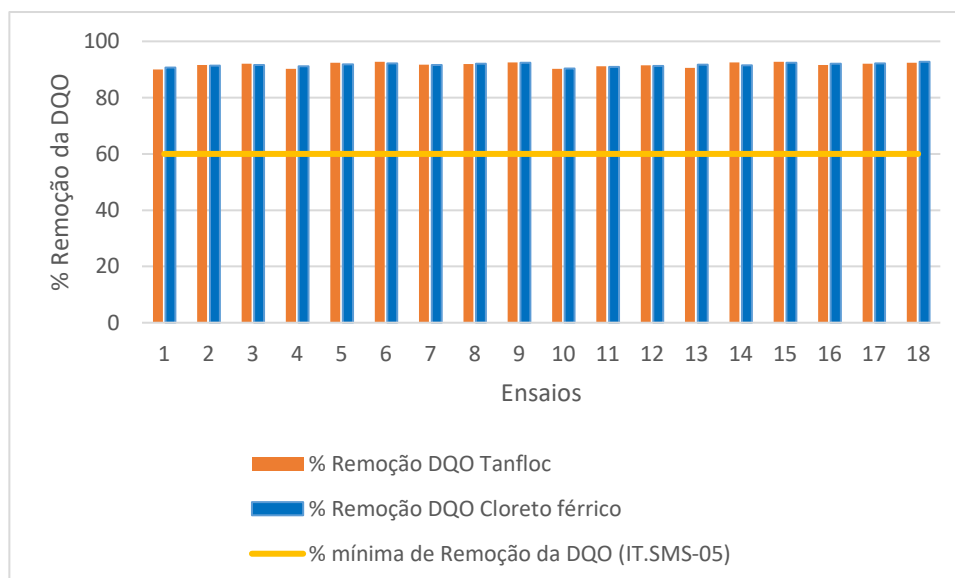
A Figura 18 constata a grande eficiência do cloreto férrico no que diz respeito a remoção da turbidez, onde os resultados são melhores proporcionalmente ao aumento do tempo de sedimentação e da concentração de coagulante nos ensaios.

O gráfico de Pareto (Figura 17) deixa claro a grande importância do efeito linear da dosagem de Tanfloc na remoção da turbidez do efluente. Por outro lado, para o cloreto férrico, além da grande relevância da dosagem de coagulante, o efeito linear do tempo de sedimentação também influencia bastante no resultado do indicador.

6.5 Demanda Química de Oxigênio (DQO)

A Figura 19 ilustra os valores de eficiência de remoção da DQO de ambos coagulantes, além de comparar com o valor mínimo de remoção de DQO estabelecido pela IT.SMS-05 (60%):

Figura 19 – Eficiência de Remoção da DQO após tratamento com Tanfloc e cloreto férrico.



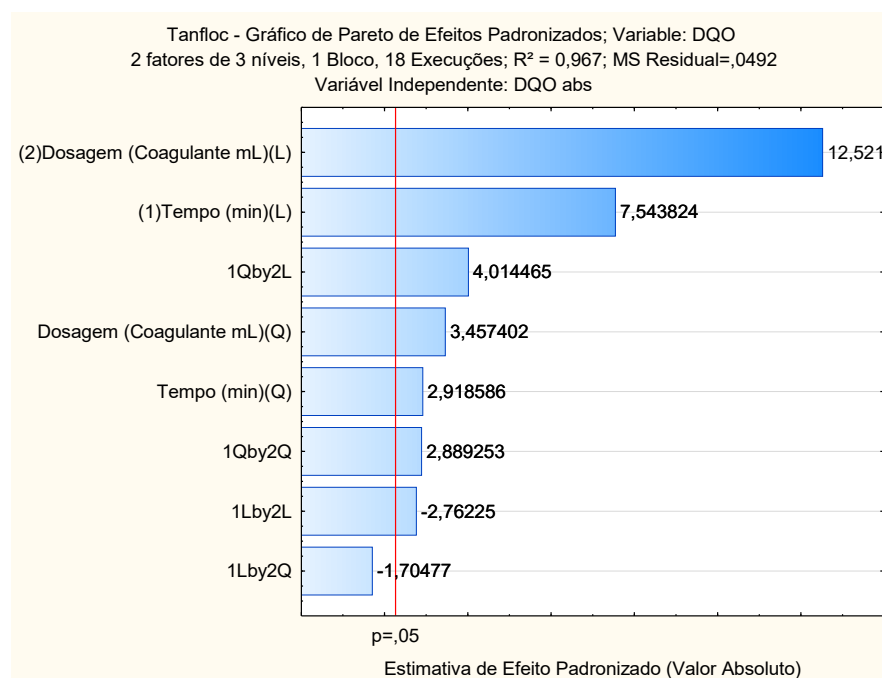
Fonte: Autor, 2022.

Nota-se a partir dos gráficos que após o tratamento do efluente com ambos os coagulantes, houve uma notável redução no valor da DQO do efluente tratado,

onde todos os ensaios obtiveram uma eficiência de remoção de no mínimo 90%, valores estes que compactuam com a porcentagem de remoção mínima estabelecida pela IT.SMS-05 da Supergasbras. O estudo realizado por Barros, 2022 no qual utiliza-se Tanfloc para tratamento de efluentes em uma indústria têxtil, obteve uma remoção de DQO entre 86 e 94% entre todos os ensaios, resultado condizente com o presente estudo.

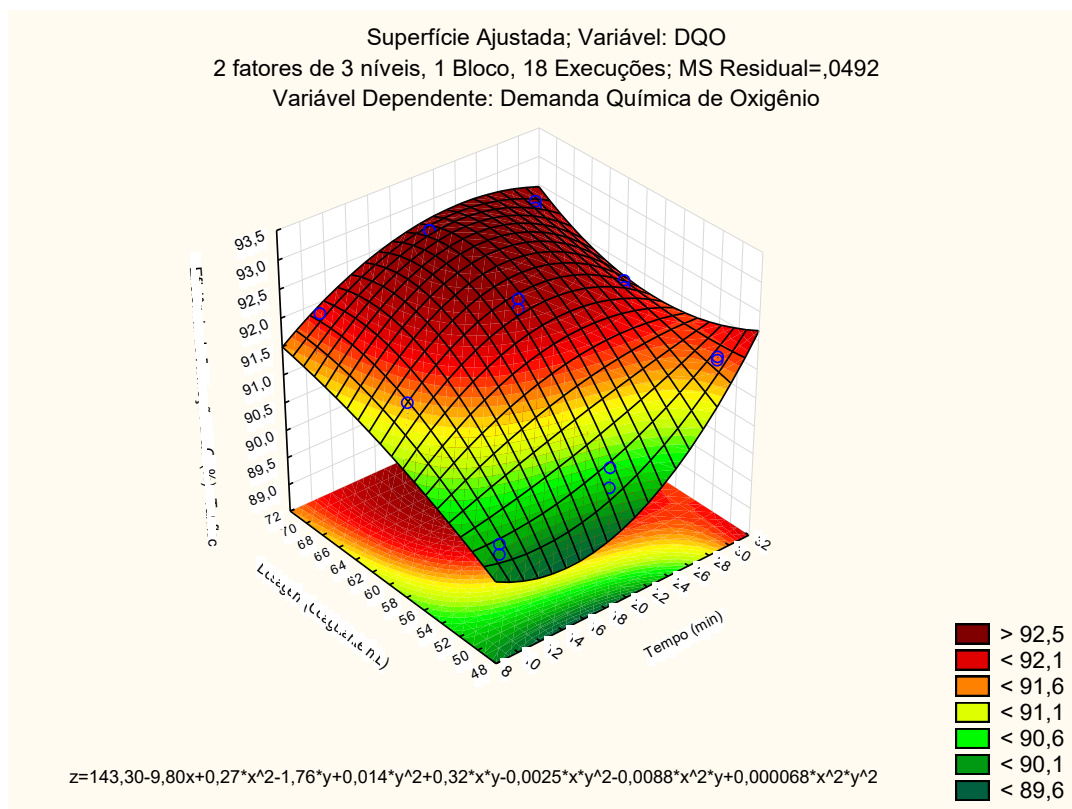
As Figuras 20 e 21 representam os gráficos de Pareto e de superfície de resposta, para o Tanfloc.

Figura 20 – Gráfico de Pareto (DQO) – Tanfloc



Fonte: Autor, 2022.

Figura 21 – Gráfico de Superfície (DQO) – Tanfloc.

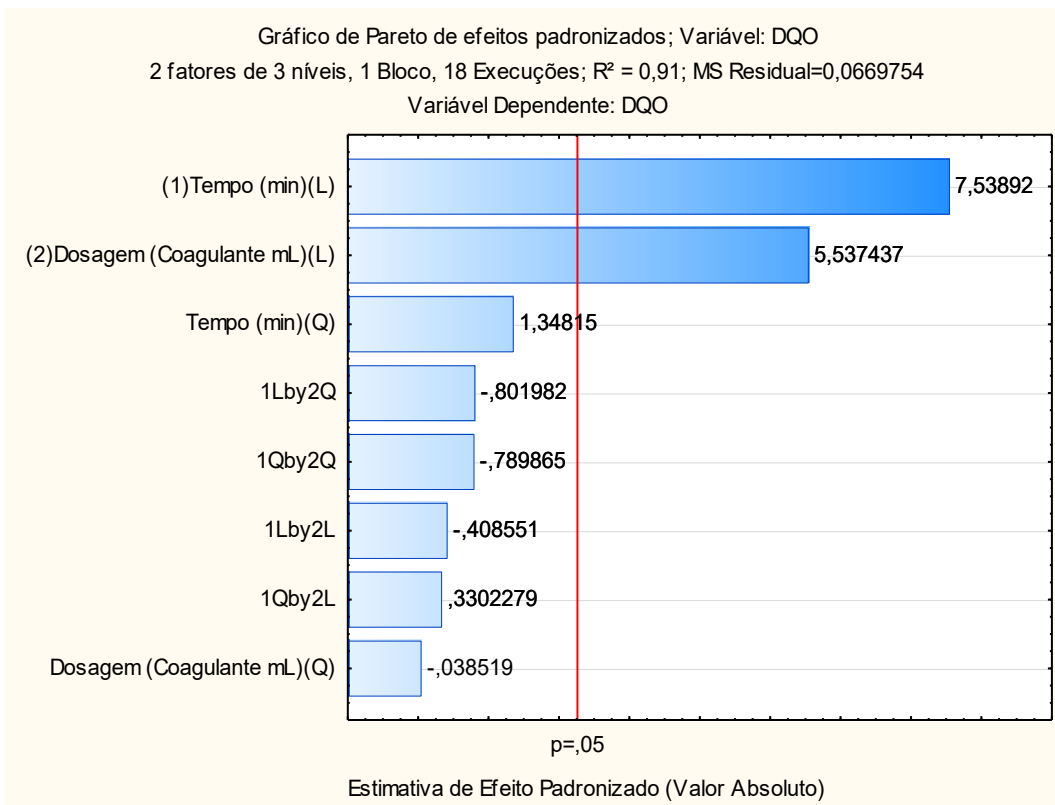


Fonte: Autor, 2022.

Dentre os oito termos obtidos como resposta do gráfico de Pareto, apenas o fator iterativo linear de tempo de sedimentação e quadrático de dosagem (1L by 2Q) não foi significativo ($p \leq 0,05$). Dentre os demais fatores que tiveram significância, o efeito linear da concentração do coagulante (dosagem) foi o que apresentou maior grau.

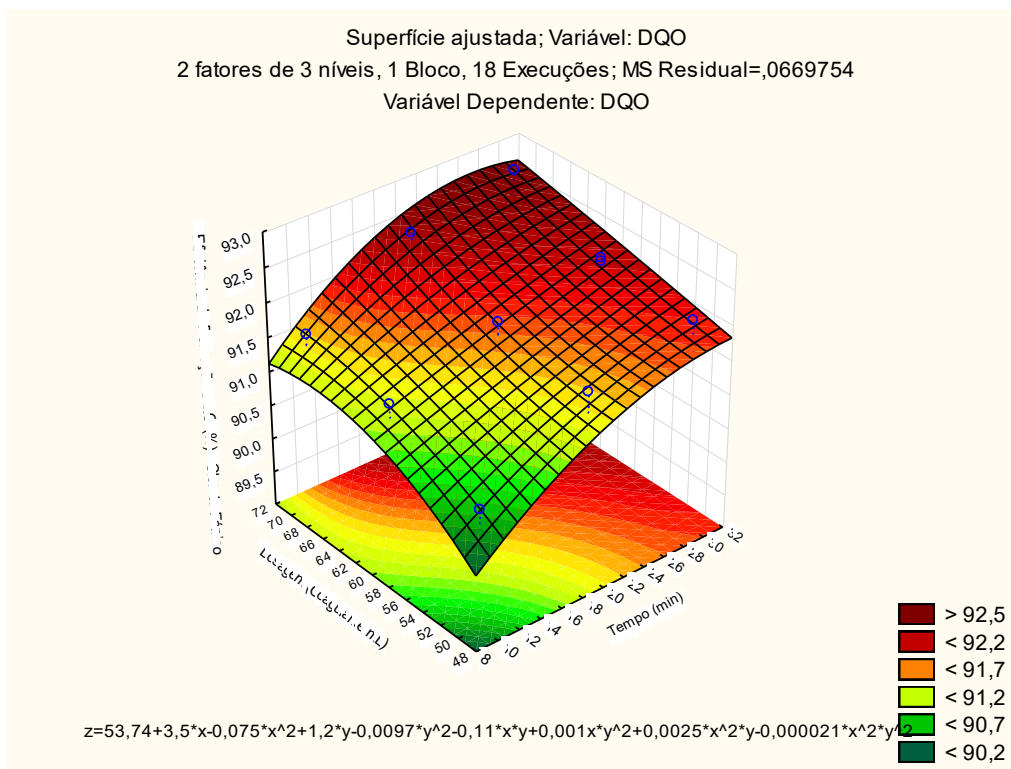
As figuras seguintes (22 e 23) ilustram os gráficos de Pareto e de superfície de resposta para a eficiência de remoção da DQO após o uso do cloreto férrico.

Figura 22 – Gráfico de Pareto (DQO) – Cloreto Férrico



Fonte: Autor, 2022.

Figura 23 – Gráfico de Superfície (DQO) – Cloreto férrico



Fonte: Autor, 2022

Ambos resultados para a eficiência de remoção da demanda química de oxigênio foram promissores, tendo em vista que para os coagulantes empregados, ambos apresentaram eficiências de pelo menos 90%. Além disso, Aboulhassan (2006) realizou o tratamento de um efluente real em uma indústria de tintas a partir do cloreto férrico e constatou uma eficiência de remoção da DQO na casa dos 90%, similar ao presente estudo.

A partir das Figuras 20 e 22, observa-se ainda que o Tanfloc apresentou como o fator mais significativo o efeito linear da dosagem (concentração), enquanto para o cloreto férrico, o efeito linear do tempo de sedimentação foi o mais representativo. De qualquer forma, ambos os coagulantes obtiveram ótimos resultados perante a remoção da DQO no efluente.

7 CONCLUSÃO

O cloreto férrico se demonstrou extremamente eficiente em relação à remoção da turbidez e da demanda química de oxigênio, obtendo resultados acima de 90% para todas as dosagens de coagulante. Além disso, o indicador cor aparente também obteve um bom resultado após 30 minutos de sedimentação, conduzindo a um grau de remoção de cor em 80%. Contudo, em relação ao pH, todos os ensaios adquiriram caráter ácido após o tratamento com o coagulante, conseqüentemente, ao utilizar o cloreto férrico se faz necessário a utilização da Cal (hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)) para correção da acidez, conseqüentemente aumentando o pH do meio, neutralizando o efluente e assim cumprindo a legislação vigente (CONAMA 430).

A aplicação do coagulante orgânico Tanfloc, por sua vez, também apresentou ótimos resultados, onde pode-se constatar a eficiência de remoção da cor aparente e da turbidez. Também foi observado que o valor de pH cumpre o CONAMA 430, e a remoção da demanda química de oxigênio é muito próxima do observado com o emprego do cloreto férrico, além de ambos coagulantes acatarem a IT.SMS-05 da Supergasbras.

Por fim, a substituição do coagulante sulfato de alumínio pelo cloreto férrico ou Tanfloc no tratamento do efluente gerado na pintura dos vasilhames e na limpeza da cabine de pintura pode ser promissora. Ademais, a utilização de coagulantes orgânicos como o Tanfloc é fundamental no quesito sustentabilidade, pois além de serem eficientes, não são tóxicos, possuem menor teor de metais, produzem lodo em menor quantidade e são biodegradáveis.

REFERÊNCIAS

- BARROS, M. A. S. D.; JUNIOR, O. M. C.; PEREIRA, N. C.; STROHER, A. P. Caracterização e Otimização do Tratamento de Efluente Têxtil por Coagulação-Floculação, Utilizando Coagulante Natural Tanino. UEM – PR. *Revista Ciências Exatas e Naturais*, Vol.14, nº 1, Jan/Jun 2012.
- BERGAMASCO, R.; SANTOS, O. A. A.S.; VALVERDE, K. C. Avaliação do processo de tratamento de água utilizando associação do coagulante natural Moringa oleifera LAM e coagulantes químicos, 2014. Universidade Estadual de Maringá, *IX Fórum Ambiental da Alta Paulista*, v. 9, n. 11, 2013, p. 55-64.
- BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B.; SLOBODA, E.; VIEIRA, E. M. Influência das características das substâncias húmicas aquáticas na eficiência da coagulação com o cloreto férrico. *Quím. Nova* 32 (4) • 2009.
- CACHEIRA, C. S.; COSTA, M. A. P.; FARIA, J. P. N.; SANTOS, J. P. S. S.; SILVA, M. F. C. R. P.; VARANDAS, M. M. Processo de Coagulação - Floculação. FEUP – Faculdade de Engenharia do Porto. 2012. Mestrado Integrado de Engenharia do Ambiente.
- CAETANO, W.; MANOSSO, F. P.; SARTORI, R. Roadmap tecnológico para o tratamento do resíduo borra de tinta. *Revista Tecnologia e Sociedade* v. 18, n. 53 (2021).
- CONAMA; Conselho Nacional do Meio Ambiente. *Resolução CONAMA N° 357, 17 de março 2005*, p. 36.
- CRITTENDEN, J. C.; HAND, D. W.; HOWE, K. J.; TCHOBANOGLIOUS, G. TRUSSELL. R. R. Princípios de tratamento de água. São Paulo: Cengage Learning; 1ª edição (21 março 2016).
- EPA; Guidance Manual for Compliance with the Surface Water Treatment Rules: Turbidity Provisions; *Environmental Protection Agency, United States Environmental Protection Agency*; 2020.
- FRANTZ, Me. T. S; Obtenção de um adsorvente e de novos coagulantes de fontes renováveis para tratamento de águas superficiais. Universidade Federal do Rio Grande (RS), como requisito parcial para obtenção do título de DOUTORA EM QUÍMICA., 2020.
- GUEDES, M. R.. Estudo dos processos de coagulação floculação e decantação para o tratamento de efluentes gerados em uma indústria de tintas local. Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Engenharia Química. 29-Ago-2018.
- KNEVITZ, L. A. Avaliação da eficiência de remoção de turbidez de um sistema de clarificação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Trabalho de diplomação em Engenharia Química, 2017.

MENEZES, P. H. N. Estudo do desempenho do sulfato de alumínio no processo de clarificação da água de uma refinaria de petróleo e avaliação do Tanfloc como agente coagulante alternativo. Mestrado em Engenharia Industrial; Universidade Federal da Bahia, 2019.

NASCIMENTO, F. C; Tratamento de efluentes da produção de tintas industriais, automotivas e de repintura por irradiação com feixe de elétrons; Autarquia associada à Universidade de São Paulo; Tese requisitos para obtenção do Grau de Doutor em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear.

OLIVEIRA, F. R. Produção mais limpa no contexto da sustentabilidade. Oportunidades em uma indústria moveleira de Contagem/MG.; Dissertação (Mestrado em Sustentabilidade) – Universidade Federal de Ouro Preto, 2013.

PAVANELLI, G. Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor ou turbidez elevada. Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, Dissertação de Mestrado; São Carlos, 2001.

PEREIRA, E. R, et al. Ação de diferentes tipos de coagulantes orgânicos e inorgânicos no tratamento de efluente têxtil. *Brazilian Journal of Development, Curitiba, v.8, n.3, p.21466-21478, mar.,2022.*

PIANTÁ, C. A. V. Emprego de coagulantes orgânicos naturais como alternativa ao uso do sulfato de alumínio no tratamento de água. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Trabalho de conclusão de curso, 2008, Porto Alegre.

RIBEIRO, F. L. M. Quantificação e caracterização química dos resíduos da ETA de Itabirito - MG.; Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. PROÁGUA, Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-graduação, Universidade Federal de Ouro Preto, 2007.

RICHTER, C. A. Tratamento de lodos de estações de tratamento de água. *São Paulo: Blucher, 1ª edição, 2001.*

RIPI, L. I. R. Uso de diferentes agentes coagulantes no tratamento de efluente de abatedouro de aves. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Energia, Universidade Federal do Paraná, Palotina, 2021.

SANTOS, G. R. Estudo de Clarificação de Água de Abastecimento Público e Otimização da Estação de Tratamento de Água, 2011. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Pós-graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos.

SILVA, A. M.L. Estudo de produção e aplicação de cloreto férrico obtido de rejeito de mineração de ferro no tratamento de esgotos sanitários. Universidade Federal de Itajubá. Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

SUPERGASBRAS, 2016. Nossa História. Disponível em: <https://www.supergasbras.com.br/supergasbras/nossa-historia>. Acesso em: 20 nov. 2022.

WU, Y.T.; TEH, C. Y.; SHAK, K. P. Y.; BUDIMAN, P. M. Recent Advancement of Coagulation–Flocculation and Its Application in Wastewater Treatment. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2016, 55, 16, 4363–4389. *Publication Date: March 4, 2016.*

APÊNDICE A

Figura A-1 – ANOVA, parâmetro: Turbidez - Tanfloc

ANOVA; Var.:Turbidez (NTU); R-sqr=,97656; Adj:,95573 (Tanfloc) 2 3-level factors, 1 Blocks, 18 Runs; MS Residual=2,120364 DV: Turbidez (NTU)					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Tempo (min) L+Q	123,7858	2	61,8929	29,1898	0,000116
(2)Dosagem (Coagulante mL) L+Q	586,7748	2	293,3874	138,3665	0,000000
1*2	84,6316	4	21,1579	9,9784	0,002297
Error	19,0833	9	2,1204		
Total SS	814,2754	17			

Figura A-2 – ANOVA, parâmetro: Cor aparente - Tanfloc

ANOVA; Var:Cor; R²=,97704; Adj:,95664 (Tanfloc) 2 fatores de 3 níveis, 1 Bloco, 18 Execuções; MS Residual=11,98 Variável Dependente: Cor					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Tempo (min) L+Q	567,933	2	283,967	23,7074	0,000259
(2)Dosagem (Coagulante mL) L+Q	3674,620	2	1837,310	153,3910	0,000000
1*2	345,733	4	86,433	7,2160	0,006895
Error	107,802	9	11,978		
Total SS	4696,088	17			

Figura A-3 – ANOVA, parâmetro: Demanda química de oxigênio - Tanfloc

ANOVA; Var:DQO abs; R²=0,96764; Adj:,93888 (Tanfloc) 2 fatores de 3 níveis, 1 Bloco, 18 Execuções; MS Residual=,0492 Variável Dependente: DQO (abs)					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Tempo (min) L+Q	3,22476	2	1,612378	32,71371	0,000074
(2)Dosagem (Coagulante mL) L+Q	8,31648	2	4,158238	84,36694	0,000001
1*2	1,72506	4	0,431266	8,75000	0,003626
Error	0,44359	9	0,049288		
Total SS	13,70988	17			

Figura A-4 – ANOVA, parâmetro: Turbidez - Cloreto férrico

ANOVA; Var: Turbidez (NTU); R ² =0,96511; Adj.: 9341(Cloreto Férrico) 2 fatores de 3 níveis, 1 Bloco, 18 Execuções; MS Residual=0,105 Variável Dependente: Turbidez (NTU)					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Tempo (min) L+Q	8,07929	2	4,039646	38,29235	0,000040
(2)Dosagem (Coagulante mL) L+Q	17,16133	2	8,580664	81,33727	0,000002
1*2	1,02209	4	0,255521	2,42212	0,124402
Error	0,94945	9	0,105495		
Total SS	27,21216	17			

Figura A-5 – ANOVA, parâmetro: Cor aparente - cloreto férrico

ANOVA; Var: Cor; R ² =0,96032; Adj.: 92505 (Cloreto Férrico) 2 fatores de 3 níveis, 1 Bloco, 18 Execuções; MS Residual=0,722 Variável Dependente: Cor					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Tempo (min) L+Q	145,0484	2	72,52421	100,6256	0,000001
(2)Dosagem (Coagulante mL) L+Q	5,6690	2	2,83452	3,9328	0,059235
1*2	6,2801	4	1,57002	2,1784	0,152657
Error	6,4866	9	0,72073		
Total SS	163,4842	17			

Figura A-6 – ANOVA, parâmetro: Demanda química de oxigênio - cloreto férrico

ANOVA; Var: DQO; R ² =0,91; Adj.: 82976 (Cloreto Ferrico) 2 fatores de 3 níveis, 1 Bloco, 18 Execuções; MS Residual=0,0669 Variável Dependente: DQO					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Tempo (min) L+Q	3,928296	2	1,964148	29,32641	0,000114
(2)Dosagem (Coagulante mL) L+Q	2,053780	2	1,026890	15,33234	0,001263
1*2	0,103345	4	0,025836	0,38576	0,813746
Error	0,602779	9	0,066975		
Total SS	6,688200	17			