

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

**EFICIÊNCIA DE AGENTES COAGULANTES NO TRATAMENTO DE  
EFLUENTE DA INDÚSTRIA DE TERMOPROCESSADOS E ANÁLISE DO  
POTENCIAL ENERGÉTICO DO LODO GERADO**

Vitória Bernardino Fierro

Palotina  
2023

## Resumo

A indústria de processamento de carne de frango desempenha um papel crucial na produção global de proteína de origem animal, com o Brasil sendo líder nas exportações e o segundo maior produtor mundial. O aumento na produção, no entanto, resulta em um desafio crescente de gestão de resíduos pois o efluente gerado por essas indústrias contém altas concentrações de matéria orgânica, exigindo um tratamento eficiente devido não apenas a restrições legais, mas também a custos associados e a uma busca por soluções sustentáveis. O uso de coagulantes, como cloreto férrico e tanino, desempenha um papel crucial nesse tratamento. Diante disso, o objetivo deste estudo foi avaliar a eficiência de agentes coagulantes no tratamento de efluente de indústria de termoprocessados e analisar o potencial energético do lodo gerado. O efluente bruto foi inicialmente caracterizado quanto a alcalinidade, cor, pH e turbidez. Em seguida, foram conduzidos ensaios de coagulação e floculação utilizando um coagulante inorgânico (cloreto férrico) e um orgânico (tanino SL) em concentrações de 300, 450 e 600 mg L<sup>-1</sup> por meio de equipamento Jar Test. Os resultados revelaram variações significativas no pH com o uso de cloreto férrico em relação ao tanino SL. O tanino SL (600 mg L<sup>-1</sup>) demonstrou a melhor eficiência na remoção de turbidez, atingindo 99,57%, seguido do tanino SL (300 mg L<sup>-1</sup>) com remoção de 99,07%. A produção de lodo foi menor nos tratamentos com tanino SL, com valores variando de 1,88 a 2,68g L<sup>-1</sup>. A análise imediata do lodo revelou um maior potencial energético nos tratamentos com tanino SL, com teores de materiais voláteis entre 70 a 80%, baixa produção de cinzas (10-21%) e valores de carbono fixo entre 7 a 13%. Com base nos efeitos observados no pH, remoção de turbidez e características do lodo, o emprego de tanino SL mostrou-se uma alternativa eficiente e sustentável aos coagulantes convencionais, enquanto a biomassa do efluente de termoprocessados destacou-se como uma opção viável para geração de energia renovável.

**Palavras-chave:** coagulação e floculação; efluente da agroindústria; geração de energia.

## Abstract

The poultry processing industry assumes a crucial role in global animal protein production, with Brazil leading in exports and ranking as the second-largest producer worldwide. However, the increased production poses a growing challenge in waste management as the wastewater generated by these industries contains high concentrations of organic matter, requiring efficient treatment due to both legal restrictions and associated costs, coupled with a pursuit of sustainable solutions. The use of coagulants, such as ferric chloride and tannin, plays a crucial role in this treatment. In light of this, the objective of this study was to assess the efficiency of coagulant agents in treating wastewater from thermoprocessed industries and analyze the energy potential of the generated sludge. The raw wastewater was initially characterized for alkalinity, color, pH, and turbidity. Subsequently, coagulation and flocculation tests were conducted using an inorganic coagulant (ferric chloride) and an organic one (tannin SL) at concentrations of 300, 450, and 600 mg L<sup>-1</sup> through Jar Test equipment. Results revealed significant variations in pH with the use of ferric chloride compared to tannin SL. Tannin SL (600 mg L<sup>-1</sup>) showed the best efficiency in turbidity removal, reaching 99.57%, followed by tannin SL (300 mg L<sup>-1</sup>) with a removal of 99.07%.

Sludge production was lower in treatments with tannin SL, ranging from 1.88 to 2.68g L<sup>-1</sup>. Immediate sludge analysis revealed higher energy potential in treatments with tannin SL, with volatile matter content between 70 to 80%, low ash production (10-21%), and fixed carbon values between 7 to 13%. Based on observed pH effects, turbidity removal, and sludge characteristics, the use of tannin SL proved to be an efficient and sustainable alternative to conventional coagulants, while the thermoprocessed wastewater biomass emerged as a viable option for renewable energy generation.

**Keywords:** coagulation/flocculation; industrial wastewater; energy generation.

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria de processamento de carne de frango é uma parte fundamental na produção de proteína de origem animal em escala global. O Brasil, desempenha um papel de destaque nesse setor, sendo líder nas exportações e o segundo maior produtor mundial. O estado do Paraná tem um papel significativo nesse cenário, contribuindo com mais de um terço da produção nacional de carne de frango (USDA, 2022; ABPA, 2023).

Os alimentos termoprocessados desempenham um papel importante na indústria alimentícia, passando por tratamentos térmicos, como cozimento, esterilização e pasteurização, a fim de melhorar sua segurança, qualidade e durabilidade. Esses processos auxiliam na preservação dos alimentos, tornando-os seguros para consumo por períodos prolongados (CARVALHO, 2010).

No entanto, o aumento na produção de carne resulta em um aumento correspondente na geração de resíduos. As indústrias de processamento de carne geram grandes volumes de águas residuárias que contêm altas concentrações de matéria orgânica, incluindo gorduras e proteínas. O tratamento eficiente desses efluentes é crucial, não apenas devido a restrições legais, mas devido aos custos associados e à busca por soluções mais sustentáveis.

O tratamento de efluentes é dividido em etapas: preliminar, primário, secundário e terciário (tratamento avançado). Dentre as principais estratégias utilizadas, incluem-se sedimentação, flotação, coagulação e filtração. Em frigoríficos, são comuns sistemas como gradeamento e caixa de areia para tratar efluentes da linha de recepção, contendo fezes, areia e penas. O peneiramento, com peneiras estáticas e rotativas, é empregado para a segregação de sólidos, sendo as peneiras rotativas axiais comuns na segregação de vísceras e gorduras da água de drenagem (SCHATZMANN, 2009; IBRAHIN et al., 2015).

Neste contexto, o uso de coagulantes, como o cloreto férrico e o tanino, desempenha um papel fundamental no tratamento de efluentes. Estes produtos são utilizados para neutralizar as cargas elétricas nas partículas presentes nos efluentes, promovendo a formação de flocos que facilitam a remoção de sólidos em suspensão (RICHTER, 2009). A escolha do coagulante e suas condições de aplicação são fatores cruciais para garantir um tratamento eficaz.

Este trabalho aborda a aplicação desses coagulantes e a avaliação da eficiência do tratamento de efluentes da indústria de processamento de carne de frango. Além disso, analisa-se o potencial energético do lodo gerado durante o processo de tratamento. A compreensão e otimização desses processos são essenciais para promover a sustentabilidade e a eficiência na indústria de processamento de carne de frango e lidar com os desafios ambientais associados à gestão de efluentes e resíduos líquidos.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 INDÚSTRIA DE PROCESSAMENTO DE FRANGO**

A indústria de processamento de carne de frango desempenha um papel fundamental na produção de proteína de origem animal em escala global. O Brasil, em especial, tem sido um ator proeminente nesse setor, sendo o primeiro país em exportação e o terceiro maior produtor em nível mundial, marcando 14,524 milhões de toneladas produzidas em 2022, estando atrás apenas dos Estados Unidos com 21,005 milhões de toneladas (USDA, 2022; ABPA, 2022).

Em nível nacional o estado do Paraná, desempenha um papel de destaque, responsável por uma parcela significativa da produção avícola no país, que em 2022 representou 36,15% da produção nacional (ABPA, 2023). Além de seu impacto econômico, essa indústria enfrenta desafios relacionados à gestão de efluentes gerados em suas operações, tornando imperativa a pesquisa sobre o tratamento desses resíduos. O bem-estar animal, questões de sustentabilidade e a qualidade nutricional são também áreas de atenção no âmbito da indústria de processamento de frangos (SANTOS et al., 2017).

Alimentos termoprocessados são produtos que passaram por um processo de tratamento térmico, geralmente por meio de calor, com o objetivo

de melhorar sua segurança, qualidade e durabilidade. Os processos incluem: cozimento, esterilização, pasteurização, entre outros, que visam eliminar ou inativar microrganismos patogênicos e deteriorantes, bem como enzimas que causam danos aos alimentos (CARVALHO, 2010). O termoprocessamento ajuda a prolongar a vida útil dos alimentos, tornando-os seguros para o consumo por um período mais longo, e pode envolver diferentes técnicas, como enlatamento, embalagem a vácuo, esterilização em autoclave e muitas outras.

## 2.2 TRATAMENTO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS

O despejo de efluentes líquidos, com seus poluentes característicos, provoca alterações na qualidade dos corpos receptores, resultando em poluição. A poluição hídrica é definida como qualquer modificação física, química ou biológica que ultrapasse os padrões estabelecidos para a classe de água, envolvendo agentes físicos, químicos e biológicos. O tratamento adequado desses efluentes é essencial para mitigar esses impactos e garantir a conformidade com as regulamentações ambientais (GIORDANO, 2004).

O uso de várias etapas de tratamento é fundamental pela complexidade dos efluentes, que variam de acordo com o tipo de alimento processado e os métodos de produção (SUNDARAM e VISVANATHAN, 2010). Esses efluentes podem conter altas concentrações de matéria orgânica, sólidos suspensos e, em alguns casos, compostos químicos específicos associados aos alimentos processados. Portanto, é crucial adotar estratégias de tratamento apropriadas para minimizar o impacto no meio ambiente (TCHOBANOGLIOUS et al., 2003).

A produção de aves requer um consumo significativo de água, aproximadamente 25 L/ave, em processos como escalda/depenagem, evisceração, resfriamento e limpeza. Já na produção de termoprocessados, o consumo de água é em torno de 7,5 L/kg de produto. Para tratar esses resíduos, o processo de coagulação é uma abordagem adequada (SCHOENHALS, 2006; GONÇALVES; PAIXÃO; SILVA, 2016; CVALE, 2023).

Uma abordagem integrada na indústria de processamento de alimentos é fundamental para enfrentar os desafios ambientais e econômicos relacionados ao tratamento de efluentes de resíduos líquidos.

## 2.3 COAGULAÇÃO E FLOCULAÇÃO NO TRATAMENTO DE EFLUENTES

Efluentes industriais contém partículas finamente dispersas que não podem ser eliminadas por sedimentação simples. Para solucionar esse problema, a adição de coagulantes é necessária, neutralizando as cargas elétricas e resultando na formação de flocos capazes de adsorver partículas sólidas e impurezas. Esses flocos, uma vez formados, agem como agentes de aglomeração, facilitando a separação das partículas em suspensão presentes no efluente. Essa etapa envolve a aplicação de coagulantes que são em geral sulfato de alumínio e compostos de ferro (METCALFE e EDDY, 2003; TCHOBANOGLOUS et al., 2003; IBRAHIN et al., 2015).

Essa etapa se divide em três fases. A primeira é a coagulação que consiste na adição de coagulantes químicos que atuam reduzindo as forças que mantêm as partículas em suspensão separadas. Essa etapa desestabiliza as partículas, preparando-as para a aglomeração na próxima fase. Na segunda fase, a floculação, as partículas previamente desestabilizadas colidem devido ao movimento controlado do fluido. Isso resulta na formação de aglomerados visíveis a olho nu, chamados flocos. Os flocos são essenciais, pois são maiores e mais pesados do que as partículas coloidais originais, o que os torna facilmente passíveis de remoção por sedimentação. A sedimentação é um processo no qual os flocos afundam, separando-se da água tratada (IBRAHIN et al., 2015).

As partículas coloidais trazem consigo uma carga elétrica que resulta em uma força de repulsão mútua, o que as mantém separadas e em suspensão. Para viabilizar a aglomeração progressiva dessas partículas e permitir a sedimentação, é necessário reduzir ou neutralizar essa carga. Nesse contexto, a coagulação química tem como objetivo principal a diminuição das forças de repulsão, promovendo a agregação das partículas coloidais, o que possibilita o subsequente processo de sedimentação (RICHTER, 2009).

A aplicação de coagulantes metálicos, como sais de alumínio e ferro, resulta na produção de hidrogênio livre e pode diminuir a alcalinidade da água, liberando CO<sub>2</sub>. A alcalinidade é um fator crítico para a eficácia da coagulação, uma vez que a falta dela pode diminuir o pH para níveis ineficazes para os coagulantes metálicos, levando a uma coagulação inadequada. Para corrigir o

pH, é necessário adicionar um agente alcalinizante, o que pode aumentar a complexidade e o custo do processo de tratamento (RICHTER, 2009).

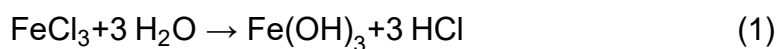
Essa necessidade de ajuste de pH devido à aplicação de coagulantes metálicos é relevante quando se considera o tratamento de efluentes industriais que podem variar significativamente em termos de alcalinidade. Portanto, uma análise cuidadosa da alcalinidade da água é essencial no planejamento do processo de coagulação e na previsão da dosagem de agente alcalinizante necessário para manter o pH controlado (IBRAHIN et al., 2015).

## 2.4 COAGULANTES APLICADOS NO TRATAMENTO DE EFLUENTES

Dos coagulantes inorgânicos mais comumente empregados no tratamento de efluentes, o cloreto férrico pode ser destacado no presente estudo.

Cloreto férrico ( $\text{FeCl}_3$ ), encontra-se disponível nas formas sólida e líquida. Para seu armazenamento e manipulação adequados, são indicados materiais como PVC, PRFV (plástico reforçado com fibra de vidro), polietileno, polipropileno e poliéster. Em termos de faixa de pH, coagulantes férricos, tem eficácia em um amplo espectro (4 a 11). São particularmente importantes na coagulação de cor a níveis de pH mais baixos, na remoção de ferro e manganês em níveis mais elevados de pH, e no processo de abrandamento, acelerando a formação de flocos, porém, sua aplicação ao efluente leva a liberação de íons hidrogênio, responsáveis pela acidificação do meio (RICHTER, 2009).

A reação de hidrólise do cloreto férrico é disposta na equação (1).



A aplicação de  $\text{FeCl}_3$  é altamente eficaz na redução de demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), coloração, turbidez, quantidade de sólidos em suspensão e, especialmente em ambientes como frigoríficos e abatedouros, na eliminação de óleos e gorduras presentes nos efluentes após o processo de coagulação e floculação (FAGNANI, 2019).

O tanino é obtido da *Acacia mearnsii* de Wildemann, conhecida como acácia negra, uma planta de origem australiana que desempenha um papel sustentável no tratamento de águas. No país, a acácia negra é cultivada

exclusivamente no Estado do Rio Grande do Sul (MANGRICH et al., 2014). Frequentemente empregada como coagulante em processos de tratamento de água e efluentes, é uma substância de composição orgânica com eficácia comprovada na remoção de impurezas presentes.

Extraído de fontes naturais, o tanino demonstra sua eficiência na coagulação de partículas coloidais e sólidos suspensos em uma ampla faixa de pH. Sua capacidade de reduzir a DQO, DBO, cor, turbidez, bem como a remoção de óleos e graxas, torna-o uma alternativa viável para a melhoria da qualidade da água e efluentes. Estudos anteriores têm explorado sua aplicação e impacto no tratamento de resíduos, destacando sua importância como coagulante natural (GIANUCA et al., 2015; SANTOS et al., 2017).

## 2.5 POTENCIAL ENERGÉTICO DO LODO GERADO

No âmbito do tratamento de efluentes, é crucial abordar o gerenciamento do lodo resultante, uma etapa muitas vezes negligenciada em projetos, o que compromete parcialmente os benefícios da coleta e tratamento de efluentes. A deposição final do lodo emerge como um desafio problemático, muitas vezes representando até 50% do orçamento operacional de sistemas de tratamento. Muitas alternativas para essa disposição final são discutidas, desde aterro sanitário, reuso industrial, incineração até recuperação de solos e uso agrícola e florestal. Notadamente, a aplicação agrícola e florestal é considerada uma opção econômica, aproveitando a riqueza do lodo em matéria orgânica e nutrientes para plantas. Contudo, é importante considerar que o lodo de processo de tratamento contém poluentes, como metais pesados, compostos orgânicos persistentes e, as vezes organismos patogênicos, demandando cuidados específicos ao avaliar essas alternativas (BETTIOL e CAMARGO, 2000).

Diversas características são fundamentais para a qualificação de um combustível destinado à geração de energia, sendo o poder calorífico a principal delas. Contudo, em relação a determinados combustíveis, propriedades físicas e químicas, tais como umidade, material volátil, carbono fixo e cinzas (obtidas por meio da análise imediata), assumem igual relevância. A amplitude dessas características pode comprometer a eficiência energética do combustível, como

ocorre no caso da biomassa, portanto é necessário avaliar o material a fim de descobrir seu potencial energético específico (BRAND, 2010).

O teor de voláteis na biomassa é quantificado pela medida da fração de massa que se volatiliza durante o aquecimento de uma amostra padronizada e seca, em atmosfera inerte, até aproximadamente 850 °C. Esse material volátil influencia na ignição, pois teores mais elevados estão relacionados a uma maior reatividade e, portanto, maior facilidade de ignição. A decomposição química da biomassa gera um resíduo chamado "cinza" durante a combustão ao ar, sendo um parâmetro padrão para combustíveis. O teor de cinzas na biomassa influencia os custos de manuseio, processamento e a conversão total de energia. Já o teor de carbono fixo refere-se à massa que permanece após a liberação dos voláteis, excluindo os conteúdos de cinzas (MCKENDRY, 2002).

Assim sendo, com base no que foi mencionado, torna-se essencial realizar o adequado tratamento da água residuária e avaliar qual das alternativas apresentadas demonstra maior eficácia para o processo de tratamento.

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 DESCRIÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO**

A pesquisa foi realizada com o uso do efluente gerado por uma indústria de processamento de aves localizada em um município do oeste do estado do Paraná. A indústria opera três linhas de produção destinadas a fabricar diferentes variedades de carne de frango, que incluem cortes cozidos, fritos e assados. Essas linhas de produção são responsáveis por criar produtos como filés grelhados, filés empanados, coxinha de asas empanada, nuggets, entre outros. A capacidade total da indústria de termoprocessados permite a produção de até 45 mil toneladas de carne de frango por ano (CVALE, 2023).

#### **3.2 AMOSTRAGEM E CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE DE INDÚSTRIA DE TERMOPROCESSADOS**

O efluente líquido, em sua forma bruta, foi amostrado em 10 de abril de 2022, resultando em aproximadamente 40 L de resíduo, o qual foi acondicionado

em um recipiente de 50 L e encaminhado para o Laboratório de Química Analítica e Análises Ambientais da Universidade Federal do Paraná (UFPR) - Setor Palotina, onde, no mesmo dia, foi realizada a sua caracterização parcial. Posteriormente, o resíduo foi transferido para garrafas PET, que foram devidamente refrigeradas para a realização dos ensaios subsequentes.

Os parâmetros físico-químicos analisados e suas metodologias estão dispostos na Tabela 1. As análises foram realizadas em triplicata.

TABELA 1 - PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS ANALISADOS E METODOLOGIAS UTILIZADAS

Parâmetro	Metodologia*
pH	Potenciometria
Cor	Espectrofotometria
Turbidez	Turbidimetria
Alcalinidade	Potenciometria

\* APHA (2012)

FONTE: O autor (2023).

### 3.2.1 pH

O valor de pH das amostras foi medido utilizando um pHmetro da marca NS TECNOPON, modelo mPA 110, previamente calibrado.

### 3.2.2 Alcalinidade total

Para a análise da alcalinidade total utilizou-se o seguinte procedimento:

- Centrifugou-se a amostra por 3 min a 1500 rpm, e transferiu-se 50 mL da amostra centrifugada para um béquer no qual foi medido o pH;
- Titulou-se a amostra, sob agitação magnética, através da adição de solução padronizada de 0,01N de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> até pH 5,75. Anotou-se o volume V<sub>1</sub>; que é utilizado para calcular a alcalinidade parcial, podendo ser aproximada à alcalinidade a bicarbonato, uma vez que compreende 80% de bicarbonato e 20% de sais de ácidos orgânicos voláteis;
- Em seguida, continuou-se a titulação até pH 4,3 e anotou-se o volume V<sub>2</sub>. Essa alcalinidade é denominada intermediária, podendo ser aproximada àquela devida a sais de ácidos voláteis;
- A alcalinidade total foi expressa como  $V_3 = V_1 + V_2$ ;

e) Calculou-se as alcalinidades conforme equações da Tabela 2.

TABELA 2 – EQUAÇÕES DE ALCALINIDADE.

Tipo de alcalinidade	Equação (mg L <sup>-1</sup> , como CaCO <sub>3</sub> )
Parcial	$A_{\text{parcial}} = \frac{V_1 * [H_2SO_4] * 50000}{V_{\text{amostra}}}$
Intermediária	$A_{\text{intermediária}} = \frac{V_2 * [H_2SO_4] * 50000}{V_{\text{amostra}}}$
Total	$A_{\text{total}} = \frac{V_3 * [H_2SO_4] * 50000}{V_{\text{amostra}}}$

O valor 50.000 é o equivalente-grama do CaCO<sub>3</sub> em mg L<sup>-1</sup>, cujo mol é de 100 g.

V<sub>1</sub> = Volume do ácido utilizado para titular a amostra até pH 5,75 (mL).

V<sub>2</sub> = Volume do ácido utilizado para titular a amostra do pH 5,75 a 4,3 (mL).

V<sub>3</sub> = Volume total utilizado na titulação (mL)

V<sub>amostra</sub> = Volume da amostra.

[H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>] = Concentração padronizada do ácido utilizado na titulação.

### 3.2.3 Cor

A análise de cor foi conduzida da seguinte forma: a amostra do efluente foi transferida para uma célula de quartzo. Em seguida, a leitura foi realizada no espectrofotômetro da marca Femto, modelo 600s, com o comprimento de onda em 400 nm. Após obter o valor de absorvância, esse dado foi empregado no cálculo da cor, utilizando o método de calibração baseado em padrões externos.

### 3.2.4 Turbidez

O turbidímetro da marca Del Lab, modelo DLT-WV, foi calibrado com quatro padrões. Cada amostra foi inserida em uma cubeta de rosca hermeticamente fechada, que foi utilizada para medir o valor da turbidez em unidades nefelométricas (UNT).

## 3.3 ENSAIOS DE COAGULAÇÃO, FLOCULAÇÃO E SEDIMENTAÇÃO

Foram realizados testes prévios de coagulação e floculação em Jar Test utilizando coagulante inorgânico cloreto férrico, e orgânico tanino SL. Verificou-se concentrações e tempo de sedimentação comuns a esses tratamentos.

As condições nos ensaios foram: tempo de mistura rápida de 2 min e velocidade de agitação de 120 rpm (coagulação), tempo de mistura lenta de 15 min e velocidade de agitação de 30 rpm (floculação) e tempo de sedimentação de 20 min. Os ensaios foram executados no equipamento Jar Test, marca Milan 203 M, utilizando-se um volume de 1 L de efluente para cada ensaio.

Nos ensaios, dois coagulantes foram empregados: o cloreto férrico da marca Anidrol (coagulante inorgânico) e o tanino SL Tanfloc SL® (coagulante orgânico). Foram preparados volumes de 50 mL de soluções estoque de 40 g L<sup>-1</sup> de cada coagulante, que foram testados em três concentrações distintas cada um, resultando em 6 tratamentos (Tabela 3), todos realizados em triplicata.

TABELA 3 – TRATAMENTOS APLICADOS NOS ENSAIOS DE COAGULAÇÃO E FLOCULAÇÃO

Nº do tratamento	Tipo de coagulante	Concentração do coagulante (mg L <sup>-1</sup> )
1	Cloreto Férrico	300
2	Cloreto Férrico	450
3	Cloreto Férrico	600
4	Tanino SL	300
5	Tanino SL	450
6	Tanino SL	600

FONTE: O autor (2023).

Após os ensaios, foram coletadas amostras do sobrenadante clarificado de cada ensaio para a análise dos parâmetros de pH, cor (UC) e turbidez (UNT), utilizando as metodologias descritas na Tabela 1. Em seguida, calculou-se a eficiência de remoção de cor e turbidez utilizando-se a equação (2).

$$\text{Eficiência (\%)} = \left( \frac{X_{\text{inicial}} - X_{\text{final}}}{X_{\text{final}}} \right) \times 100 \quad (2)$$

Em que:

$X_{\text{inicial}}$  = Cor ou turbidez do efluente bruto;

$X_{\text{final}}$  = Cor ou turbidez do efluente após o tratamento de coagulação e floculação.

### 3.4 QUANTIFICAÇÃO DO LODO PRODUZIDO

Após os tratamentos de coagulação e floculação, o sobrenadante do efluente clarificado foi retirado com o auxílio de pipetas de 25 mL e descartado.

Já o lodo gerado foi despejado em frascos de poliestireno de 200 mL e armazenado para secagem, devido ao alto teor de umidade.

Utilizando béqueres de 250 mL, o lodo foi levado para secagem em estufa, da marca SOLAB e modelo SG-102, onde foi mantido por 24 h a 65 °C, e, pesado em balança analítica, da marca SHIMADZU, modelo AY220. A massa da amostra após secagem é a massa de lodo gerada em 1 L de efluente. Em seguida, o lodo seco foi armazenado novamente em frascos de poliestireno de 250 mL e guardado em ambiente refrigerado para análises posteriores.

### 3.5 POTENCIAL ENERGÉTICO DO LODO GERADO

Para a análise imediata que compreende o teor de carbono fixo, cinzas e material volátil, foi empregada a metodologia de Sánchez (2010).

O teor de material volátil foi realizado utilizando uma mufla da marca LABOR e modelo SP-1200, pré-aquecida a uma temperatura de  $850 \pm 20$  °C. Uma amostra de 1 g de lodo seco foi inserido em um cadinho tampado e levado para a mufla. Após 6 min na mufla, cada cadinho foi disposto em um dessecador e, depois de frio, pesado em balança analítica para determinar a massa da amostra, representado pela Equação 3.

$$MV (\%) = \left( \frac{M_2 - M_1}{M_3} \right) \times 100 \quad (3)$$

Em que:

$M_2$  = massa final do cadinho + amostra, g

$M_1$  = massa inicial do cadinho - amostra, g

$M_3$  = massa inicial da amostra

MV (%) = teor de materiais voláteis

O teor de cinzas foi determinado com auxílio da mufla já descrita para medição do teor de material volátil. Os cadinhos com as amostras secas foram introduzidos e, após, foi programada uma rampa de aquecimento de 8 °C min<sup>-1</sup> para alcançar 500 °C em 1 h, seguida de uma rampa de aquecimento de 4 °C min<sup>-1</sup>, para atingir 750 °C em 1 h. A essa temperatura, os cadinhos foram

mantidos por 2 h e então foram retirados da mufla para esfriar no dessecador, sendo pesados. A equação (4) foi empregada para determinar o teor de cinzas.

$$CZ (\%) = \frac{M_r}{M_s} \times 100 \quad (4)$$

Em que:

$M_r$  = massa do resíduo, g

$M_s$  = massa seca da amostra, g

CZ (%) = teor de cinzas

Por último, o teor de carbono fixo pode ser determinado de modo indireto, segundo a equação 5.

$$CF (\%) = 100 - (M_v + CZ) \quad (5)$$

Em que:

CF (%) = teor de carbono fixo

$M_v$  (%) = teor de material volátil

CZ (%) = teor de cinzas

### 3.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Os dados foram submetidos a análise de variância (ANOVA). Quando verificada diferença estatística, através de probabilidade inferior a 0,05, foi aplicado o Teste de Tukey com 5% de significância, do modo a determinar a influência do coagulante e das concentrações de cada tratamento. Utilizou-se do software Sisvar versão 5.6 para realizar essas análises.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO INICIAL DO EFLUENTE DE INDÚSTRIA DE TERMOPROCESSADOS

A caracterização da água residuária na indústria de alimentos é muito importante para os processos e operações que visam o tratamento deste

resíduo. É realizada por meio de sua composição física, química e biológica, incluindo os parâmetros de pH, cor, turbidez, alcalinidade, oxigênio dissolvido, entre outros. Efluentes de abatedouros possuem características semelhantes, com grande potencial poluidor devido à alta concentração de matéria orgânica presente (PACHECO, 2006; BARANA, 2022).

Os parâmetros da análise inicial do efluente bruto estão apresentados na Tabela 4. Além disso, são incluídos os dados de efluentes de indústrias de processamento de aves, como abatedouros e frigoríficos, uma vez que há pouca informação disponível sobre efluentes da indústria de termoprocessados.

TABELA 4 – COMPARAÇÃO DA CARACTERIZAÇÃO DE EFLUENTE DE INDÚSTRIAS DE PROCESSAMENTO DE AVES.

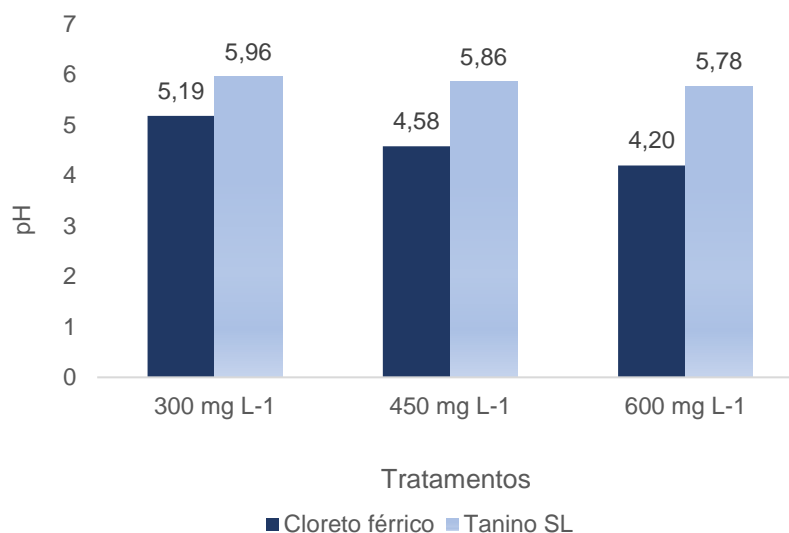
Autores	pH	Cor (UC)	Turbidez (UNT)	Alcalinidade (mg L <sup>-1</sup> )
Presente estudo	6,20	346,37	527,0	143,16
Schoenhals et al. (2006)	6,70	2.257	920,0	–
Lucyk et al. (2015)	6,99	5.720	819,0	–
Nalevaiko et al. (2021)	5,75	–	453,0	–
Schatzmann (2009)	7,28	148,33	372,31	–
Rinquest et al. (2019)	6,0-8,0	–	719-758	520-602

FONTE: O autor (2023).

Com relação ao parâmetro pH, o presente estudo obteve 6,2, próximo ao de Schoenhals et al. (2006). Lucyk et al. (2015) e Rinquest et al. (2019) registraram valores mais altos e Nalevaiko et al. (2021) teve um pH mais ácido. Quanto à cor e turbidez, este estudo obteve valores menores que Lucyk et al. (2015) e Rinquest et al. (2019), mas maiores que Schatzmann (2009). A alcalinidade é variável, com Rinquest et al. (2019) indicando valores entre 520-602 mg L<sup>-1</sup>. Essas diferenças refletem na diversidade dos processos de produção e nas condições de amostragem entre os estudos.

#### 4.2 pH APÓS O TRATAMENTO DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO DO EFLUENTE DE INDÚSTRIA DE TERMOPROCESSADOS

Conforme o aumento da concentração de cloreto férrico, houve uma acentuada queda no pH, tornando o meio mais ácido (Figura 1).



**Figura 1.** Valores médios de pH após tratamento para os coagulantes cloreto férrico e tanino SL

Em contrapartida, o tanino SL manteve o pH mais elevado e com uma estabilidade, independentemente da concentração utilizada, variando de 5,78 a 5,96. Esse comportamento evidencia a capacidade do tanino SL de manter o meio em uma faixa mais neutra, o que pode ser benéfico para processos posteriores de tratamento. Além da vantagem na estabilização do pH, o uso do tanino SL pode ser econômico, uma vez que não requer ajustes para manter o pH controlado, quando comparado ao cloreto férrico, que, por apresentar comportamento ácido no meio, requer o uso de agentes alcalinizantes para controle de pH (IBRAHIN, 2015).

A Tabela 5 apresenta os resultados da análise de variância (ANOVA) realizada para avaliar a influência dos tratamentos na resposta do pH.

**TABELA 5 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) PARA O PARÂMETRO DO pH NOS TRATAMENTOS APLICADOS.**

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F calc	Prob
Tratamento	5	8,08	1,62	626,61	0,00
Erro	12	0,03	0,003		
Total Corrigido	17	8,11			

GL: Graus de liberdade; SQ: Soma quadrática; QM: Média quadrática; Fcalc: F calculado; Prob: Probabilidade.

FONTE: O autor (2023).

Devido ao valor de probabilidade inferior a 0,05, conclui-se que os tratamentos são estatisticamente distintos uns dos outros. Portanto, foi conduzido

o Teste de Tukey para realizar comparações das médias entre os tratamentos, cujos resultados estão apresentados na Tabela 6.

TABELA 6 – TESTE DE TUKEY PARA O PARÂMETRO DE pH NOS TRATAMENTOS APLICADOS.

Coagulante	Concentração (mg L <sup>-1</sup> )	pH
Cloreto férrico	300	5,19 ± 0,05 c
Cloreto férrico	450	4,58 ± 0,02 d
Cloreto férrico	600	4,20 ± 0,04 e
Tanino SL	300	5,96 ± 0,006 a
Tanino SL	450	5,86 ± 0,04 ab
Tanino SL	600	5,78 ± 0,10 b

Letras iguais indicam médias iguais para o pH nos tratamentos aplicados (valor de  $p > 0,05$ ).

Fonte: O autor (2023).

Os valores de pH obtidos para os tratamentos variaram significativamente. O tanino SL (300 mg L<sup>-1</sup>), apresentou um valor estatisticamente igual ao tratamento de 450 mg L<sup>-1</sup> com valor médio de pH (5,96), indicado pela letra "a", o que demonstra que estes tratamentos resultaram em um pH mais elevado em comparação aos tratamentos com cloreto férrico. Assim também é observado no tratamento com tanino SL (600 mg L<sup>-1</sup>). No entanto, em uma concentração de 600 mg L<sup>-1</sup>, o tanino SL registrou um valor médio de pH inferior (5,78) à concentração de 300 mg L<sup>-1</sup>, indicado pela letra "b". Por outro lado, o cloreto férrico apresentou valores médios de pH notavelmente mais baixos (entre 4,20 e 4,58), indicados pelas letras "c," "d," e "e".

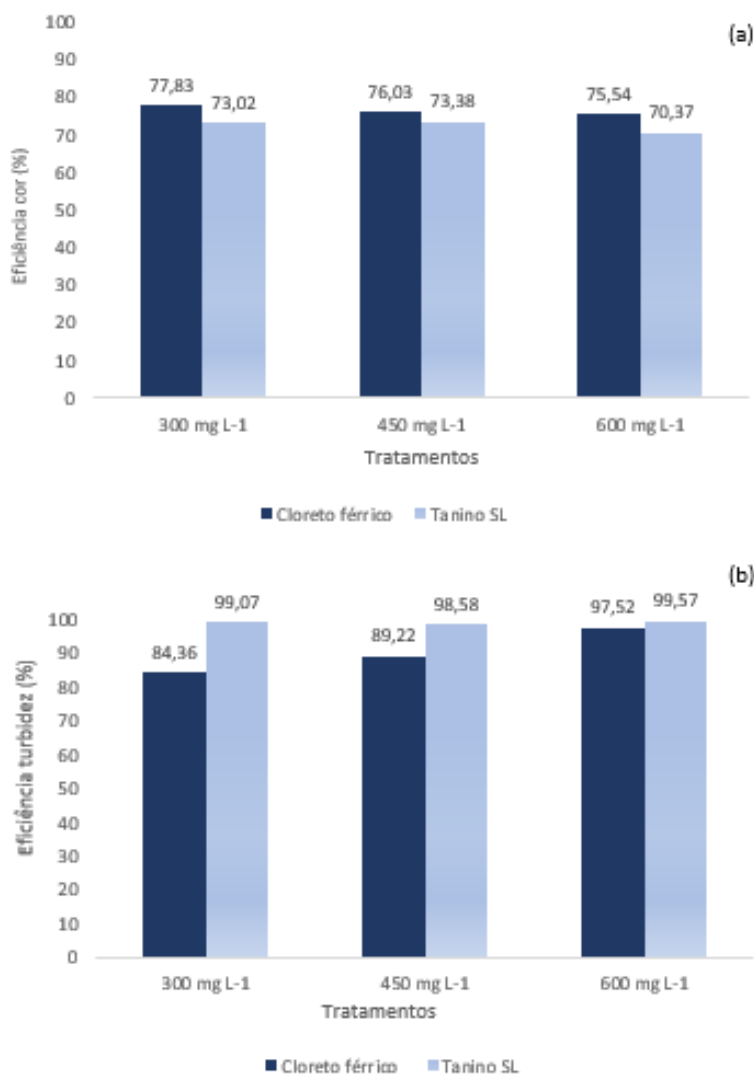
Souza e Chagas (2020) compararam a eficiência de policloreto de alumínio, sulfato de alumínio e tanino no tratamento de efluente de indústria frigorífica e constataram que o tanino apresentou a menor variação, se mantendo próximo ao pH inicial do efluente de termoprocessados. Castro et al. (2023) apresentaram resultados de pH similares ao do presente estudo em seu trabalho no tratamento de efluentes industriais. O tratamento utilizando cloreto férrico apresentou valores de pH variando entre 3 e 4 e, para o tanino, o pH teve uma redução de aproximadamente "1" do pH inicial que foi de 7,13.

Observa-se que o tanino SL, na menor concentração, obteve um valor médio de pH (5,96) que está no intervalo para o lançamento de efluentes segundo a Resolução CONAMA nº430 (BRASIL, 2011). Isso significa que, sob essa condição, o efluente tratado atende aos padrões para lançamento.

Concentrações maiores resultaram em valores de pH mais baixos em ambos os coagulantes, indicando que os produtos agem baixando o pH e maiores quantidades de coagulante levam a um maior impacto sobre o parâmetro.

#### 4.3 EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE COR E TURBIDEZ APÓS O TRATAMENTO DE COAGULAÇÃO E FLOCULAÇÃO DO EFLUENTE DE INDÚSTRIA DE TERMOPROCESSADOS

Nota-se na Figura 2 que tanto o cloreto férrico como o tanino SL atingiram eficiência de remoção da cor acima de 70% e de turbidez superior a 84%.



**Figura 2.** Valores médios de eficiência na remoção de cor (a) e turbidez (b) para os coagulantes cloreto férrico e tanino SL.

A Tabela 7 exibe a análise de variância (ANOVA) referente à eficiência de remoção de cor e turbidez nos tratamentos realizados.

TABELA 7 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) PARA EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE COR E TURBIDEZ NOS TRATAMENTOS APLICADOS.

Remoção de cor (%)					
Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F calc	Prob
Tratamento	5	104,73	20,95	2,81	0,07
Erro	12	89,52	7,46		
Total Corrigido	17	194,25			
Remoção de turbidez (%)					
Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F calc	Prob
Tratamento	5	608,39	121,68	15,73	0,00
Erro	12	92,82	7,73		
Total Corrigido	17	701,21			

GL: Graus de liberdade; SQ: Soma quadrática; QM: Média quadrática; Fcalc: F calculado; Prob: Probabilidade.

FONTE: O autor (2023).

A ANOVA evidencia que, para a remoção de cor, não há diferenças significativas entre os tratamentos, como indicado pela probabilidade de 0,07. Isso descarta a necessidade de realizar o teste de Tukey para esse parâmetro. No entanto, para a remoção de turbidez, a probabilidade de 0,00 sugere diferenças estatisticamente significantes entre os tratamentos. Portanto, o teste de Tukey é pertinente para identificar quais tratamentos se distinguem na eficiência de remoção de turbidez.

TABELA 8 – TESTE DE TUKEY PARA A REMOÇÃO DE TURBIDEZ (%) NOS TRATAMENTOS APLICADOS.

Coagulante	Concentração (mg L <sup>-1</sup> )	Remoção de turbidez (%)
Cloreto férrico	300	84,36 ± 6,53 b
Cloreto férrico	450	89,22 ± 1,87 b
Cloreto férrico	600	97,52 ± 0,39 a
Tanino SL	300	99,07 ± 0,09 a
Tanino SL	450	98,58 ± 0,27 a
Tanino SL	600	99,57 ± 0,03 a

Letras iguais indicam médias iguais para a eficiência de remoção de cor nos tratamentos aplicados (valor de  $p > 0,05$ ).

Fonte: O autor (2023).

Os resultados revelam que os tratamentos com cloreto férrico nas concentrações de 300, 450 e 600 mg L<sup>-1</sup> exibem eficiências graduais, com

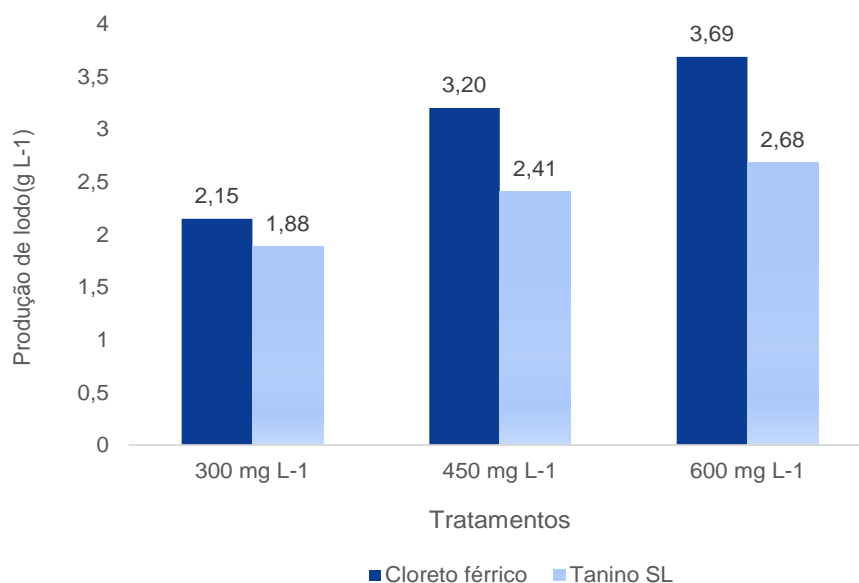
médias de 84,36%, 89,22% e 97,52%, respectivamente e as duas primeiras concentrações são estatisticamente iguais, indicadas pelas letras "b". Já o tanino SL, em todas as concentrações (300, 450 e 600 mg L<sup>-1</sup>), demonstra eficiência maior, com médias superiores a 98% e indicadas pela letra "a". A análise destaca a superioridade do tanino SL na remoção de turbidez em comparação com o cloreto férrico em todas as concentrações testadas.

Nepomuceno et al. (2018) revelaram em seu estudo que não foram observadas diferenças significativas no parâmetro de turbidez ao comparar concentrações de tanino entre 20 e 70 mg L<sup>-1</sup>. Isso mostra que a aplicação de 20 mg L<sup>-1</sup> para a redução da turbidez da água em questão oferece a possibilidade de obter economias substanciais, tanto na aquisição de coagulante quanto na produção de lodo, sem afetar a qualidade da água tratada.

Souza e Chagas (2020) observaram que o tanino demonstrou uma eficiência superior na remoção de turbidez, alcançando uma taxa de 99,75% no tratamento de efluente de frigorífico. Skoronski et al. (2014) realizaram um estudo utilizando tanino para tratamento de água para o abastecimento. Os resultados da pesquisa indicaram que a aplicação de 2,5 mg L<sup>-1</sup> de tanino permitiu a obtenção de água tratada com turbidez nula e cor aparente de 5,4 uC. Mesmo em amostras de água bruta com elevada cor aparente e turbidez, a água tratada permaneceu em conformidade com os padrões da Portaria nº 2914, que regulamenta a qualidade da água para consumo humano.

#### 4.4 PRODUÇÃO DE LODO APÓS O TRATAMENTO COAGULAÇÃO E FLOCULAÇÃO DO EFLUENTE DE INDÚSTRIA DE TERMOPROCESSADOS

É evidente que, de maneira geral, a produção de lodo aumenta à medida que se aumenta a concentração do coagulante, independentemente do tipo utilizado (Figura 3). Isso sugere que doses mais elevadas de coagulantes resultam em uma maior geração de lodo durante o processo de tratamento.



**Figura 3.** Produção média de lodo após os tratamentos com os coagulantes cloreto férrico e tanino SL.

Uma observação é que o Tanino SL tende a gerar quantidades significativamente menores de lodo em comparação com o cloreto férrico nas concentrações testadas. Esse é um fator crítico a ser considerado, pois a quantidade de lodo gerada desempenha um papel crucial na operação eficaz e ambientalmente responsável das instalações de tratamento de efluentes. Diversos trabalhos destacam a vantagem da produção de lodo relativamente menor (YIN, 2010; JÚNIOR; ABREU, 2018; MUNIZ, 2018).

A Tabela 9 exibe a análise de variância (ANOVA) relacionada à produção de lodo nos tratamentos utilizados.

**TABELA 9 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) PARA PRODUÇÃO DE LODO NOS TRATAMENTOS APLICADOS.**

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F calc	Prob
Tratamento	5	6,83	1,37	18,19	0,00
Erro	12	0,90	0,076		
Total Corrigido	17	7,74			

GL: Graus de liberdade; SQ: Soma quadrática; QM: Média quadrática; Fcalc: F calculado; Prob: Probabilidade.

FONTE: O autor (2023).

Conforme evidenciado, o valor de probabilidade para os tratamentos é inferior a 0,05, indicando que os tratamentos diferem estatisticamente entre si. Diante deste resultado, o teste de Tukey para comparação de médias foi realizado, com os detalhes disponibilizados na Tabela 10.

TABELA 10 – TESTE DE TUKEY PARA PRODUÇÃO DE LODO NOS TRATAMENTOS APLICADOS.

Coagulante	Concentração (g L <sup>-1</sup> )	Produção de lodo (g L <sup>-1</sup> )
Cloreto férrico	300	2,15 ± 0,08 cd
Cloreto férrico	450	3,20 ± 0,24 ab
Cloreto férrico	600	3,69 ± 0,33 a
Tanino SL	300	1,89 ± 0,42 d
Tanino SL	450	2,41 ± 0,23 cd
Tanino SL	600	2,68 ± 0,23 bc

Letras iguais indicam médias iguais para produção de lodo nos tratamentos aplicados (valor de  $p > 0,05$ ).

Fonte: O autor (2023).

Os tratamentos com cloreto férrico, nas concentrações de 300, 450 e 600 mg L<sup>-1</sup>, mostraram produções de lodo significativamente diferentes. O tratamento com 600 mg L<sup>-1</sup> de cloreto férrico resultou na maior produção de lodo (3,69 g L<sup>-1</sup>), enquanto o tratamento com 300 mg L<sup>-1</sup> apresentou a menor produção (2,15 g L<sup>-1</sup>). No caso do Tanino SL, as concentrações de 300, 450 e 600 mg L<sup>-1</sup> também mostraram diferenças significativas na produção de lodo. O tratamento com 300 mg L<sup>-1</sup> resultou na menor produção de lodo (1,89 g L<sup>-1</sup>), e o tratamento com 600 mg L<sup>-1</sup> obteve a maior produção (2,68 g L<sup>-1</sup>).

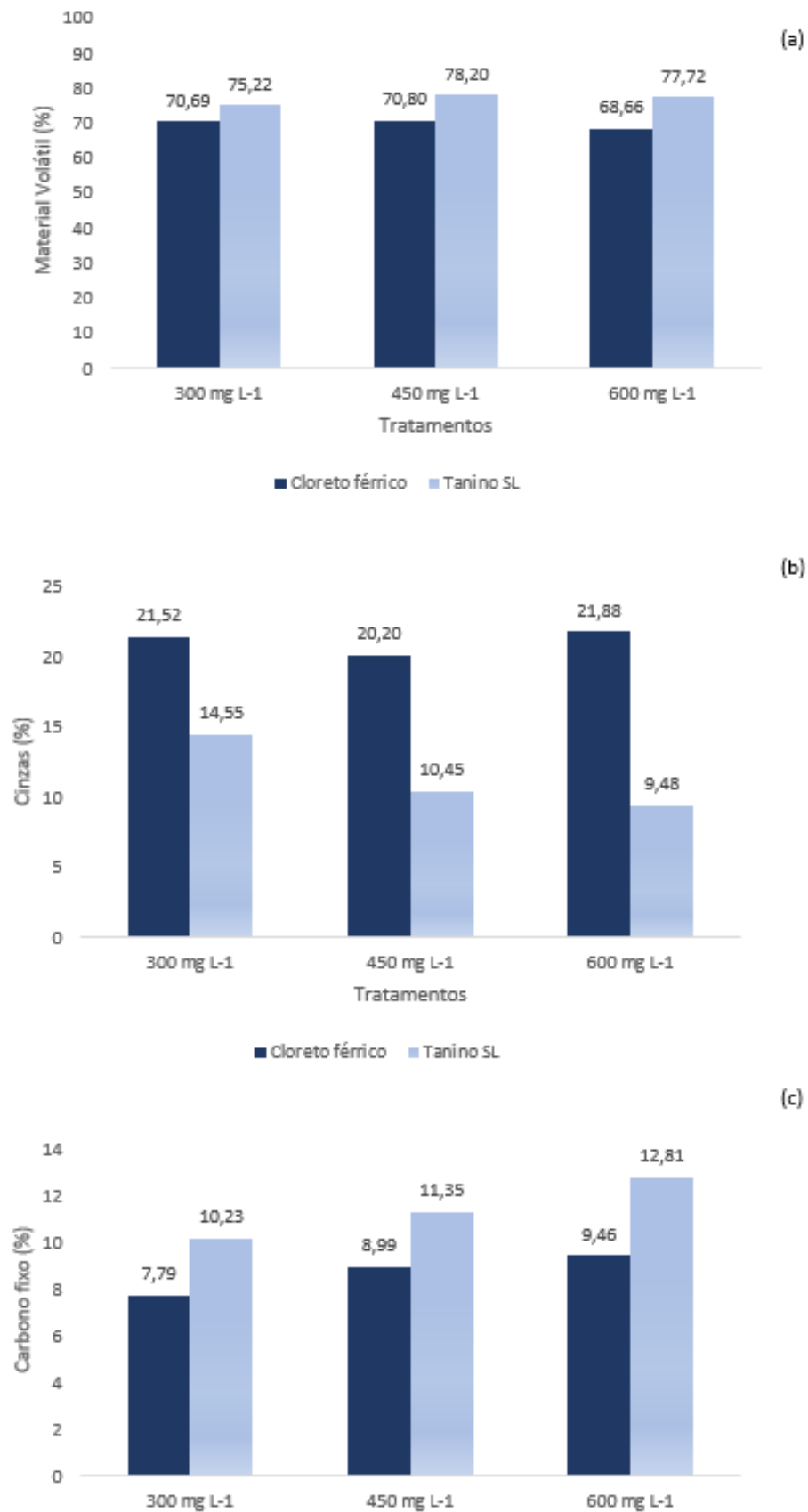
Os tratamentos que apresentam menor produção de lodo estão representados pela letra d, que nesse caso são os tratamentos com tanino SL nas concentrações de 300 e 450 mg L<sup>-1</sup> e com cloreto férrico na concentração 300 mg L<sup>-1</sup>. Esses resultados sugerem que o cloreto férrico tende a gerar mais lodo em todas as concentrações testadas em comparação com o Tanino SL, o que pode ter implicações na gestão de resíduos e custos associados. De acordo com Madrona (2010), coagulantes naturais, como semente de moringa, tanino vegetal e quitosana, demonstram uma reduzida geração de resíduos sólidos em comparação aos coagulantes químicos.

#### 4.5 ANÁLISE IMEDIATA DO LODO GERADO NO TRATAMENTO DE COAGULAÇÃO E FLOCULAÇÃO DO EFLUENTE DE INDÚSTRIA DE TERMOPROCESSADOS

O poder calorífico de um material representa o seu conteúdo energético, liberado durante a queima no ar. Assim como a umidade, o teor de cinzas

também afeta o poder calorífico, resultando em perda de energia e prejudicando a transferência de calor, portanto um equilíbrio adequado entre materiais voláteis, teor de cinzas e carbono é crucial para otimizar o poder calorífico de um combustível (VIEIRA, 2012).

Pode-se observar que o coagulante Tanino SL, em concentrações de 450 e 600 mg L<sup>-1</sup>, resultou em teores mais elevados de materiais voláteis em comparação com o Cloreto Férrico, o que sugere uma maior quantidade de material orgânico presente no lodo. Além disso, a concentração de 600 mg L<sup>-1</sup> de Tanino SL apresentou o menor teor de cinzas, indicando uma menor presença de componentes inorgânicos no lodo. Por outro lado, o tanino SL a 600 mg L<sup>-1</sup> apresentou o maior teor de carbono fixo, sugerindo uma maior concentração de carbono orgânico estável (Figura 4).



**Figura 4.** Valores de teor de material volátil (a), teor de cinzas (b) e teor de carbono fixo (c) no lodo obtido após tratamento com os coagulantes cloreto férrico e tanino SL.

A análise imediata do lodo foi submetida a uma análise de variância (ANOVA), conforme apresentado na Tabela 11.

TABELA 11 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) PARA A ANÁLISE IMEDIATA DO LODO OBTDO APÓS OS TRATAMENTOS APLICADOS.

Teor de materiais voláteis (%)					
Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F calc	Prob
Tratamento	5	244,14	48,83	13,66	0,00
Erro	12	42,88	3,57		
Total Corrigido	17	287,02			
Teor de cinzas (%)					
Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F calc	Prob
Tratamento	5	472,61	94,52	40,10	0,00
Erro	12	28,28	2,36		
Total Corrigido	17	500,89			
Teor de carbono fixo (%)					
Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F calc	Prob
Tratamento	5	47,71	9,54	17,78	0,00
Erro	12	6,44	0,54		
Total Corrigido	17	54,15			

GL: Graus de liberdade; SQ: Soma quadrática; QM: Média quadrática; Fcalc: F calculado; Prob: Probabilidade.

FONTE: O autor (2023).

Nota-se que, em todos os parâmetros da análise imediata, a probabilidade associada aos tratamentos é menor que 0,05, o que indica diferenças estatisticamente significativas. Em decorrência desses resultados, procedeu-se ao teste de comparação das médias de Tukey (Tabela 12).

TABELA 12 – TESTE DE TUKEY PARA ANÁLISE IMEDIATA NOS TRATAMENTOS APLICADOS.

Coagulante	Concentração (mg L <sup>-1</sup> )	Teor de materiais voláteis (%)	Teor de cinzas (%)	Teor de carbono fixo (%)
Cloreto férrico	300	70,69 ± 1,51 bc	21,52 ± 0,52 a	7,79 ± 1,09 d
Cloreto férrico	450	70,80 ± 1,02 bc	20,20 ± 0,87 a	8,99 ± 0,74 cd
Cloreto férrico	600	68,66 ± 0,19 c	21,88 ± 0,51 a	9,46 ± 0,53 bcd
Tanino SL	300	75,22 ± 0,75 ab	14,55 ± 1,45 b	10,23 ± 1,76 bc
Tanino SL	450	78,20 ± 0,60 a	10,45 ± 0,58 bc	11,35 ± 0,50 ab
Tanino SL	600	77,72 ± 0,94 a	9,48 ± 0,23 c	12,81 ± 0,73 a

Letras iguais na coluna indicam médias iguais para o teor de materiais voláteis (%) nos tratamentos aplicados (valor de p > 0,05).

Fonte: o autor (2023).

No que diz respeito ao teor de materiais voláteis (%), observa-se que as médias diferem estatisticamente entre alguns tratamentos. Os tratamentos com cloreto férrico apresentaram menor teor de matérias voláteis que os tratamentos de tanino a 450 mg e 600 mg L<sup>-1</sup>, sendo esses dois últimos os que obtiveram as maiores porcentagens nesse parâmetro. Quanto à sua constituição química, os materiais voláteis constituem a fração residual volátil do carvão, sendo predominantemente formados por hidrogênio, hidrocarbonetos, monóxido de carbono e dióxido de carbono, portanto os materiais voláteis têm uma importância crucial no processo de ignição e nas etapas iniciais da liberação de energia durante a queima de combustíveis. (SANTOS, 2010).

No que se refere ao teor de cinzas (%), as médias também diferem significativamente entre os tratamentos com coagulantes orgânicos e inorgânicos. Os tratamentos com cloreto férrico são estatisticamente iguais apresentando um maior teor de cinzas em relação aos tratamentos com tanino SL. Tratamentos com tanino a 450 mg e 600 mg L<sup>-1</sup> revelaram um menor teor de cinza dentre todos os tratamentos. A avaliação da eficiência do processo de combustão inclui a análise da composição das cinzas. Altos teores de carbono não queimado nas cinzas indicam não apenas uma eficiência reduzida na queima do combustível, mas também diminuem a estabilização das cinzas (tempera química), resultando em um aumento no volume de cinzas. Esse cenário, por sua vez, eleva os custos associados à manipulação, transporte e disposição desses resíduos, portanto, o uso de tanino pode mais vantajoso considerando esse parâmetro (VIRMOND, 2007).

Finalmente, em relação ao teor de carbono fixo (%), as médias mostram semelhanças estatísticas entre os tratamentos. O tratamento com cloreto férrico a 300 mg L<sup>-1</sup> apresentou um valor menor aos tratamentos com tanino, enquanto o tratamento com tanino a 600 mg L<sup>-1</sup> possui um maior teor em relação ao tanino 300 mg L<sup>-1</sup>, mas estatisticamente igual a concentração de tanino 450 mg L<sup>-1</sup>. É importante observar que a presença de elevados níveis de carbono fixo implica em um período mais prolongado de permanência no interior do equipamento, logo, concentrações reduzidas de carbono fixo apresentam vantagens mais significativas. Assim, o cloreto férrico apresenta uma pequena vantagem em relação ao tanino nesse parâmetro (FAGNANI, 2019).

Dessa forma, a análise dos dados obtidos revela que o coagulante orgânico tanino SL sobressai em comparação ao cloreto férrico. Ele demonstra elevado teor de matérias voláteis, baixo teor de cinzas residuais e uma produção de lodo reduzida. Além disso, sua baixa toxicidade e alta biodegradabilidade contribuem para um desempenho eficaz no tratamento, promovendo a sustentabilidade do processo.

## 5 CONCLUSÃO

Os resultados desta pesquisa apontam para a eficácia do processo de coagulação e floculação empregando cloreto férrico e tanino SL no tratamento de efluentes termoprocessados, evidenciando uma considerável remoção dos sólidos presentes. Adicionalmente, a biomassa gerada revelou-se uma fonte altamente eficaz de energia renovável, oferecendo uma solução sustentável para a gestão subsequente desse resíduo por apresentar alto teor de materiais voláteis. O tanino SL destacou-se em diversos aspectos em comparação ao cloreto férrico, apresentando variação mínima no pH do efluente, maior eficiência na remoção de turbidez, menor produção de lodo e uma biomassa mais reativa com menor cinza residual. Suas características, como baixa toxicidade e alta biodegradabilidade, têm significância à indústria quando se busca desempenho adequado do processo de tratamento.

## REFERÊNCIAS

ABPA. **Relatório Anual 2022**. São Paulo, 2023.

BARANA, A. C.; TOMMASO, G.; GOMES, S. D. **Geração, disposição e tratamento de resíduos em indústria de bebidas. Indústria de bebidas: inovação, gestão e produção**. v. 3. Tradução. São Paulo: Blucher, 2022. Acesso em: 27 nov. 2023.

BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto. Jaguariúna** : Embrapa Meio Ambiente, 2000. 312 p.

BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. 131 p. Rio de Janeiro: Interciência, 2010.

BRASIL. Resolução nº 430, de 1 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-

CONAMA. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>. Acesso em: 30 out. 2023.

CARVALHO, M. V. de O. **Análise nutricional e sensorial de refeições termoprocessadas**. 2010. xiii, 132 f., il. Dissertação (Mestrado em Nutrição Humana) - Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

CASTRO, G.; THEODORO, J.; BLANCO, S.; NICOLETI, J. Avaliação do Emprego de Cloreto Férrico e Tanino como Coagulantes na Remoção de Sólidos de Efluentes Industriais. **Ecotoxicology and Environmental Contamination**, v. 18, n. 1, p. 90-96, 11 nov. 2023.

CVALE (Palotina - Pr). **Indústria de Termoprocessados**. Disponível em: <https://www.cvale.com.br/site/complexo-agroindustrial/industria-de-termoprocessados>. Acesso em: 25 out. 2023.

COMBATT, M. P. M., MENDONÇA, R. C. S., VALENTE, G. de F. S., & SILVA, C. M. Validação do processo de eletrocoagulação e avaliação da eletrodissolução de eletrodos no tratamento de efluentes de abatedouros de aves. **Química Nova**, 40(4), 447–453, 2017.

FAGNANI, K. C.; ALVES, H. J.; CASTRO, L. E. N.; KUHN, S. S., COLPINI, L. M. S. An alternative for the energetic exploitation of sludge generated in the physico-chemical effluent treatment from poultry slaughter and processing in Brazilian industries. **J. Environ. Chem. Eng.**, v. 7, n. 2, 2019.

GIANUCA, D. et al. Estudo da Utilização de Tanino Comercial no Tratamento de Água para Fins Potáveis. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, 20(3), 241-248, 2015.

GIORDANO, G. **Tratamento e controle de efluentes industriais**. 2004. Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente/UERJ. Disponível em: <http://metalcleanaguas.com.br/pdf/tratamento-controle-efluentes-industriais.pdf>. Acesso em: 24 nov. 2023.

GONÇALVES, J. E.; PAIXÃO, R. M.; SILVA, L. H. B. R. da. Estudos Físico-Químicos e Microbiológicos da Eficiência do Tratamento de Efluente Proveniente de Abatedouro Avícola. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 9, n. 2, p. 473, 2016.

IBRAHIN, F. J.; IBRAHIN, F. I. D.; CANTUÁRIA, E. R. **Análise ambiental: gerenciamento de resíduos e tratamento de efluentes**. São Paulo: Erica, 2015.

JÚNIOR, R. N. L.; ABREU, F. O. M. S. Produtos Naturais Utilizados como Coagulantes e Floculantes para Tratamento de Águas: Uma Revisão sobre Benefícios e Potencialidades. **Revista Virtual de Química**, v. 10, p. 709-735, 2018.

- LUCYK, N.; HERMES, E.; PUJARRA, S.; SILVA, R. P.; SIMIONE, R.J.; ZENATTI, D. C. Uso de Coagulantes Naturais no Tratamento de coagulação/Floculação de Efluente Proveniente de Abatedouro de Aves. **Gestão e Sustentabilidade Ambiental**, v. 4, p.576-587, 2015.
- MADRONA, G.S.; SERPELLONI, G.B.; VIEIRA, A.M.S.; NISHI, L.; CARDOSO, K.C.; BERGAMASCO, R. Study of the Effect of saline solution on the extraction of the Moringa oleifera seed's active component for water treatment. **Water Air and Soil Pollution**, v. 211, p. 409-415, 2010.
- MANGRICH, A. S.; DOUMER, M. E.; MALLMANN, A. S.; WOLF, C. R. Química verde no tratamento de águas: uso de coagulante derivado de tanino de *Acacia mearnsii*. **Revista Virtual de Química**, v. 6, p. 2-15, 2014.
- MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. **Bioresource Technology**, v. 83, p. 37-46, 2002.
- METCALF & EDDY, et al. **Wastewater Engineering: treatment and reuse**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2003.
- MUNIZ, G. L. **Otimização do tratamento de efluente lácteo sintético com o uso de coagulantes alternativos**. 181p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018.
- NALEVAIKO, J. Z.; RUFATO, E. D.; TELEKEN, J. G. Redução de DQO e turbidez em efluente de abatedouro de aves tratado por eletrocoagulação. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 10, n. 3, p. 341–357, 2021.
- NEPOMUCENO, T. C.; FERREIRA, W. B.; PAIVA, W. de; DINIZ, T. R.; SANTOS, W. B. dos. **Aplicabilidade de coagulantes a base de tanino em estações de tratamento de água**. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v. 9, n. 7, p. 110-123, 2018.
- PACHECO, J. W. Guia técnico ambiental de frigoríficos - industrialização de carnes (bovina e suína). São Paulo: CETESB, 2006.
- RICHTER, C. A. **Água: Métodos e Tecnologia de Tratamento**. Editora Blucher, 2009. E-book. ISBN 9788521217244.
- RINQUEST, Z.; BASITERE, M.; NTWAMPE, S.K.O.; NJOYA, M.. Poultry slaughterhouse wastewater treatment using a static granular bed reactor coupled with single stage nitrification-denitrification and ultrafiltration systems. **Journal Of Water Process Engineering**, v. 29, p. 100778, 2019.
- SANTOS, R. C. **Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto**. Dissertação (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira. Lavras, 2010.

SANTOS, S. C. et al. (2017). **Tratamento de Efluentes com Uso de Tanino de Acácia Negra**. Trabalho apresentado no Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental.

SCHATZMANN, H. C. **Tratamento avançado de efluentes de frigorífico de aves e o reúso da água**. 2009. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Química), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

SKORONSKI, E. et al. **Estudo da aplicação de tanino no tratamento de água para abastecimento captada no rio Tubarão, na cidade de Tubarão, SC**. *Ambiente e Água*, v. 9, n. 4, p. 680-687, 2014.

SOUZA, A. T.; CHAGAS, D. Avaliação da eficiência de agentes coagulantes em efluente de frigorífico. *Colloquium Exactarum*, v. 12, n. 1, p. 11-19, 2020.

SUNDARAM, M., VISVANATHAN, C. (2010). **Environmental Impacts of Food Production and Consumption**. CRC Press.

SCHOENHALS, M.; SENA, R. F.; JOSÉ, H. J. **Avaliação da Eficiência do Processo de Coagulação/Flotação Aplicado como Tratamento Primário de Efluentes de Abatedouro de Frangos**. Engenharia Ambiental, 2006.

TCHOBANOGLIOUS, G., THEISEN, H., & VIGIL, S. (2003). **Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues**. McGraw-Hill.

USDA. Foreign Agricultural Service. Livestock and Poultry: World Markets and Trade. Estados Unidos, 2022.

VIEIRA, A. C. **Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas**. 72 f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2012.

VIRMOND, E. **Aproveitamento do lodo de tratamento primário de efluentes de um frigorífico como fonte de energia**. 134 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Química), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

YIN, C. Y. Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment. *Process Biochemistry*, v. 45, n. 9, p. 1437-1444, 2010.