

ANÁLISE DE PRODUTO RESIDUAL DE ÁCIDO SULFÚRICO COMO COAGULANTE NO TRATAMENTO DE EFLUENTES GALVÂNICOS

ANALYSIS OF RESIDUAL PRODUCT OF SULFURIC ACID AS A COAGULANT IN THE TREATMENT OF GALVANIC EFFLUENTS

Júlia Pita¹
Francisco Odisi²
Luciano Pinotti³
Vivien Rossbach⁴
Andrei Buse⁵
Eneias Mafezzolli⁶

RESUMO: A poluição química aquática, resultante do descarte de metais pesados da indústria galvânica, representa um dos problemas ambientais mais críticos. Este estudo investiga a reutilização de ácido sulfúrico (H_2SO_4) contaminado, um resíduo da indústria galvânica, como coagulante no tratamento de efluentes. Os resultados demonstram que o uso do H_2SO_4 contaminado alcançou uma redução superior a 80% nos percentuais de ferro e zinco e acima de 65% na Demanda Química de Oxigênio (DQO). A pesquisa sugere o potencial de substituição do policloreto de alumínio (PAC) por esse resíduo, alinhando-se com os parâmetros estabelecidos pela CONAMA 430/2011.

Palavras-chave: indústria galvânica; coagulante; reutilização; H_2SO_4 contaminado.

ABSTRACT: *Aquatic chemical pollution resulting from the discharge of heavy metals from the galvanic industry represents one of the most critical environmental problems. This study investigates the reuse of contaminated sulfuric acid (H_2SO_4), a waste product from the galvanic industry, as a coagulant in the treatment of effluents. The results demonstrate that the use of contaminated H_2SO_4 achieved a reduction of over 80% in the percentages of iron and zinc and above 65% in the Chemical Oxygen Demand (COD). The research suggests the potential for replacing aluminum polychloride (PAC) with this residue, aligning with the parameters established by CONAMA 430/2011.*

Keywords: *galvanic industry; coagulant; reuse; contaminated H_2SO_4 .*

¹ Acadêmica do curso de Eng. Química - UNIFEBE. E-mail: julia.pita@unifebe.edu.br

² Mestre em Eng. Química. Docente - UNIFEBE. E-mail: francisco.odisi@unifebe.edu.br

³ Especialista em Eng. Mecânica. Docente - UNIFEBE. luciano.pinotti@unifebe.edu.br

⁴ Doutora em Eng. Química. Docente - UNIFEBE. vivien.rossbach@unifebe.edu.br

⁵ Mestre em Física. Docente - UNIFEBE. E-mail: andreibuse@unifebe.edu.br

⁶ Mestre em Eng. Química. Docente - UNIFEBE. E-mail: eneias.mafezzolli@unifebe.edu.br

1 INTRODUÇÃO

A poluição química, proveniente de despejos industriais e residenciais, é um dos desafios ambientais mais urgentes na atualidade. A poluição aquática, em particular, acarreta alterações nas características físicas, químicas e biológicas da água, comprometendo a sua qualidade e adequação para o consumo humano (Aguiar; Novaes; Guarino; 2002). Metais pesados, presentes em efluentes industriais (como os da indústria galvânica), atividades de mineração e práticas agrícolas, representam uma preocupação devido à sua toxicidade e capacidade de bioacumulação (Fellenberg, 1980).

A indústria galvânica, que aplica revestimentos metálicos em superfícies para aumentar a resistência à corrosão, gera efluentes contendo metais pesados (Pereira Neto, 2008). O processo de galvanização, que visa proteger metais como o aço da oxidação, utiliza banhos de ácido sulfúrico (H_2SO_4), resultando em resíduos contendo íons metálicos (Ferrari; Moscoso, 2006). O descarte inadequado desses resíduos pode causar danos ambientais significativos. Tais resíduos têm sido objeto de estudos visando o seu reaproveitamento, inclusive em processos de reciclagem de cromo (Bordin; Bernardes, 2010).

Este estudo investiga a reutilização de resíduo galvânico de ácido sulfúrico (H_2SO_4), como coagulante no tratamento de efluentes, comparando a sua eficiência com o policloreto de alumínio (PAC) e avaliando a conformidade dos efluentes tratados com as normas CONAMA 430/2011 e CONSEMA.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 RESÍDUOS INDUSTRIALIS E A INDÚSTRIA GALVÂNICA

A geração excessiva de resíduos em processos industriais é uma fonte significativa de poluição. A minimização de resíduos, além de ser uma exigência legal, representa uma oportunidade de otimização econômica para as indústrias (Beltrame, 2000).

A indústria galvânica, que realiza o recobrimento de superfícies metálicas para aumentar a sua resistência à corrosão, gera efluentes líquidos contendo metais pesados (Pereira, 2008; Theodoro, 2010). O tratamento desses efluentes é essencial para mitigar os impactos ambientais associados à atividade.

2.2 METAIS PESADOS E OS SEUS IMPACTOS

A descarga de efluentes galvânicos não tratados em corpos hídricos pode levar à contaminação e bioacumulação de metais pesados em organismos vivos, representando riscos à saúde humana (Kurniawan *et al.*, 2006).

Tabela 1 - Toxicidade de metais pesados na forma de íons metálicos e suas quantidades máximas permitidas para o descarte.

Íon metálicos	Toxicidade	Quantidades máximas permitidas para o descarte do efluente (mg/L)		
		EPA/USA	Resolução CONAMA Nº 430/2011	Resolução CONSEMA Nº 181
Cr (IV)	Dor de cabeça, vômitos, diarréia, carcinogênico para humanos	0,05	< 0,1	< 0,1
Zn (II)	Depressão, letargia, sinais neurológicos como aumento de sede, apreensões e ataxia	1,0	< 5,0	< 1,0
Fe	Respiração rápida, frequência cardíaca rápida, coma, perda da consciência, convulsões e pressão arterial baixa	0,02	N/A	N/A

Fonte: adaptado de Kurniawan *et al.* (2006).

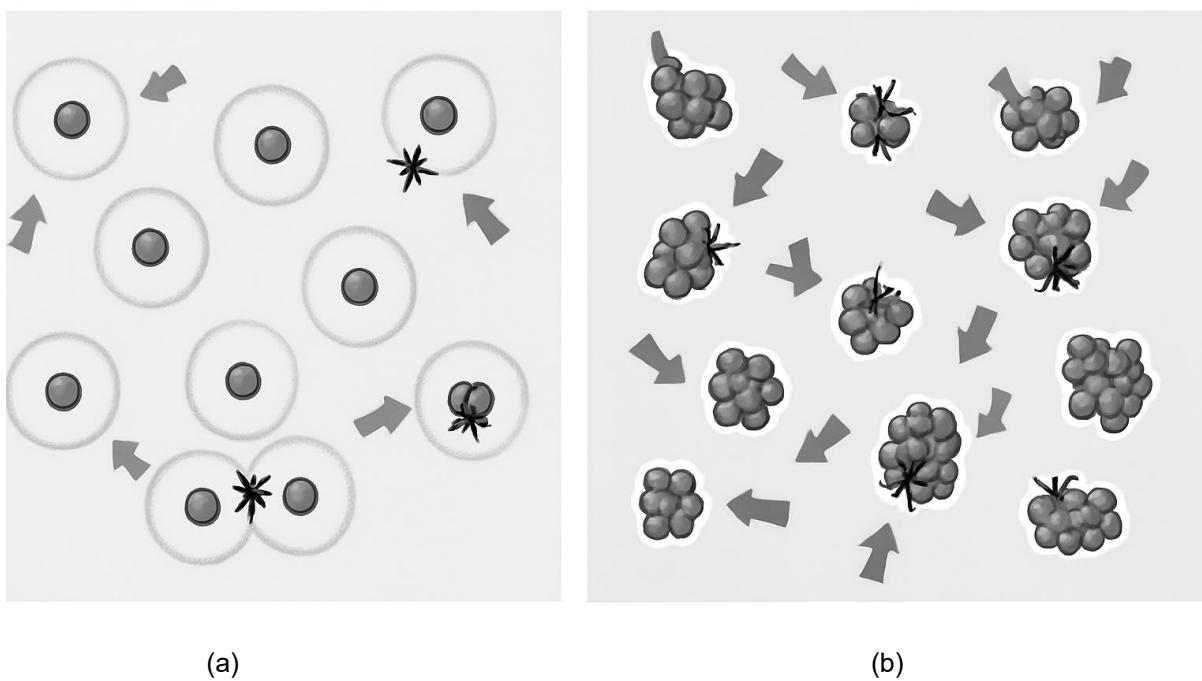
N/A - não disponível ou não avaliado

2.3 TRATAMENTO DE EFLUENTES E CLARIFICAÇÃO QUÍMICA

O tratamento de efluentes industriais é crucial para garantir que os lançamentos estejam em conformidade com a legislação ambiental (CONAMA N.º 430/2011; CONSEMA N.º 181) e com as boas práticas de engenharia de processos, como destacado por Metcalf & Eddy (2003).

A coagulação é um processo de desestabilização de partículas coloidais através da adição de eletrólitos, como sulfato de alumínio ($Al_2(SO_4)_3$) e policloreto de alumínio (PAC) (Da Silva, 2019). A floculação promove a aglomeração das partículas desestabilizadas em flocos maiores, facilitando a sua remoção por sedimentação (Di Bernardo; Dantas, 2006). Além dos coagulantes inorgânicos tradicionais, há também pesquisas voltadas ao uso de floculantes orgânicos no tratamento de água e efluentes, como demonstrado por Júnior e Abreu (2018).

Figura 1 - Representação simplificada do comportamento das partículas coloidais em meio aquoso e a ação dos coagulantes que promovem a formação de flocos.



Fonte: adaptado de Cruz (2004).

A Figura 1 representa o processo de coagulação e floculação de partículas coloidais em meio aquoso, etapas fundamentais no tratamento de efluentes. Na Figura 1-a, observam-se partículas coloidais dispersas, cada uma cercada por uma camada de repulsão elétrica, sendo que algumas começam a se unir com a adição de coagulantes (indicados por estrelas pretas), neutralizando as suas cargas e permitindo a aproximação. Já na Figura 1-b, essas partículas se agrupam formando flocos maiores e mais densos, visíveis como aglomerados com contorno branco, facilitando a sua remoção por sedimentação ou flotação. As setas indicam o movimento contínuo das partículas e flocos no meio.

2.4 INSUMOS QUÍMICOS E MÉTODOS DE ENSAIOS

O controle do pH é um fator crucial no tratamento de efluentes, exercendo uma influência direta na eficiência dos coagulantes (Pavanelli, 2001; Bernardo; Paz, 2010). Coagulantes são substâncias químicas adicionadas à água para remover impurezas. O sulfato de alumínio e o sulfato ferroso são dois coagulantes amplamente utilizados nesse processo, cada um apresentando características específicas em relação à faixa de pH ideal para sua atuação e sua eficácia na formação de flocos. A formação de flocos é importante, por serem aglomerados de partículas que podem ser facilmente separados da água, auxiliando na purificação do efluente (Drew, 1979; Spinelli et al., 2001).

O Jar Test é um método experimental de laboratório que simula o processo de coagulação-flocação. Ele permite aos pesquisadores e operadores de estações de tratamento de efluentes otimizar as condições para a remoção de impurezas, como a dosagem de coagulantes e o pH ideal do processo (Knevitz, 2017; Hassemer; Sens, 2002).

A espectrometria de absorção atômica é uma técnica analítica que quantifica a concentração de metais em amostras de efluentes. Essa técnica é essencial para monitorar a presença de metais pesados, que podem ser tóxicos e prejudiciais ao meio ambiente, garantindo que os efluentes tratados estejam nos limites de segurança para descarte ou reuso (Cordeiro, 2023).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAL E AMOSTRAGEM

O resíduo de ácido sulfúrico (H_2SO_4) contaminado foi coletado em uma indústria de galvanoplastia localizada na região de Brusque, Santa Catarina, Brasil. A amostra de efluente bruto foi coletada no ponto de saída da estação de tratamento de efluentes (ETE) da referida indústria, em recipiente plástico descontaminado, e transportada ao laboratório para a realização dos testes. A concentração inicial de ferro no efluente bruto foi de 52,6 g/L, o que reforça a necessidade de um tratamento eficaz para remoção de metais pesados.

3.2 JAR TEST

Para avaliar a eficiência do resíduo de H_2SO_4 como coagulante, foi realizado o teste de Jarro (Jar Test). O teste foi conduzido em um equipamento de Jar Test com seis provetas de 2 L, utilizando diferentes dosagens do resíduo de H_2SO_4 e do coagulante de referência, o policloreto de alumínio (PAC). As amostras de efluente foram submetidas a um regime de agitação sequencial, consistindo em uma etapa inicial de mistura rápida a 100 rpm por um período de 30 minutos, seguida por uma fase de agitação lenta a 20 rpm durante 10 minutos, visando promover a flocação sem comprometer a integridade dos agregados formados. Após a etapa de flocação, a agitação foi interrompida, permitindo a sedimentação dos sólidos suspensos ao longo de um período de 7 horas. O estudo empregou cinco alíquotas de 500 mL do efluente, sendo uma destinada à análise da amostra bruta, três tratadas com resíduo galvânico de ácido sulfúrico como agente coagulante em distintas condições, e uma utilizando policloreto de alumínio (PAC) como coagulante.

O protocolo experimental para o tratamento do efluente contaminado com ácido galvânico envolveu as seguintes etapas: (i) ajuste inicial do pH da amostra bruta para 9,0; (ii) subsequente acidificação com solução de H_2SO_4 até atingir pH 3,0; (iii) elevação do pH para 6,5 mediante adição de solução de hidróxido de cálcio (cal); (iv) introdução do coagulante (PAC ou resíduo galvânico de ácido sulfúrico) até alcançar pH 4,0; (v) novo ajuste do pH para 8,7 com solução de cal; (vi) adição de solução de polímero aniónico para induzir a formação de flocos; e (vii) decantação dos flocos resultantes por um período de 7 horas. Concluídas as etapas de tratamento, alíquotas de aproximadamente 250 mL de cada ensaio e 250 mL do resíduo galvânico (H_2SO_4 contaminado) foram cuidadosamente coletadas para posterior análise.

3.3 ANÁLISE LABORATORIAIS

As amostras de efluente bruto e tratado foram caracterizadas quanto aos seguintes parâmetros:

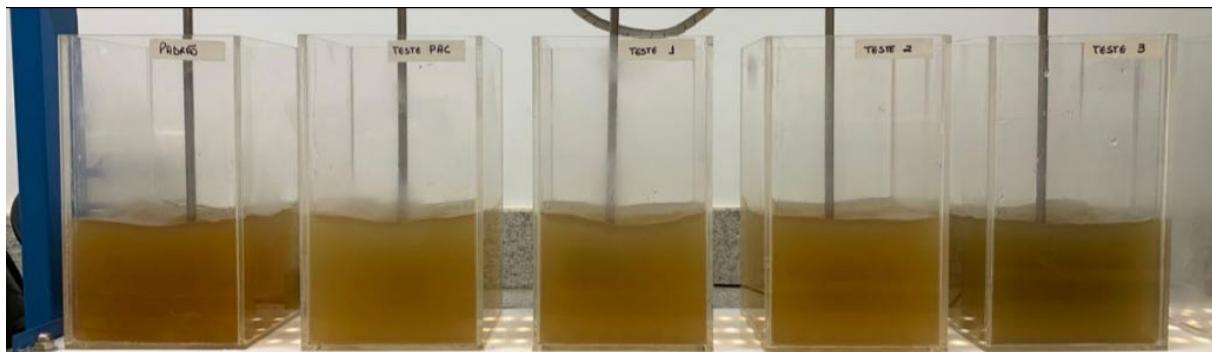
- Ferro (Fe) e Zinco (Zn): A concentração de Fe e Zn foi determinada por espectrometria de absorção atômica.
- Demanda Química de Oxigênio (DQO): A DQO foi medida segundo o método de refluxo fechado com titulação. No procedimento, uma amostra de efluente é digerida em uma solução ácida forte com um excesso conhecido de dicromato de potássio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) sob refluxo. A matéria orgânica e inorgânica oxidável na amostra reage com o dicromato. Após a digestão, o dicromato não consumido é titulado com uma solução padrão de sulfato ferroso amoniacial, utilizando um indicador redox como a ferroína. A quantidade de dicromato consumida é então utilizada para calcular a DQO, expressa em termos de equivalente de oxigênio (mg/L de O_2).

As análises foram realizadas em um laboratório externo acreditado, seguindo os procedimentos padrão estabelecidos.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

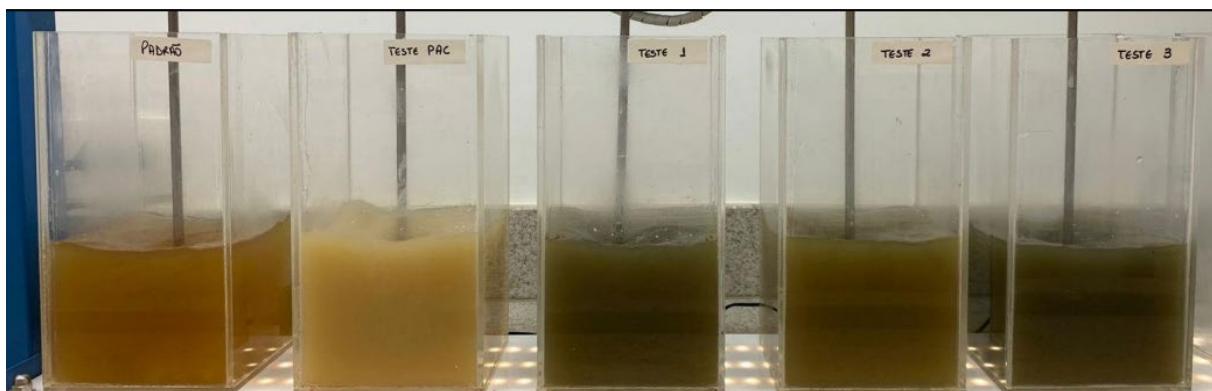
As Figuras 2, 3 e 4 apresentam uma sequência visual crucial para a compreensão do processo de tratamento do efluente galvânico realizado por meio do Jar Test. A Figura 2 mostra o ponto de partida da análise, retratando as amostras de efluente no seu estado bruto, ou seja, sem qualquer intervenção ou adição de produtos químicos. A uniformidade visual entre os jarros nesta figura indica a homogeneidade inicial das amostras antes do início do experimento e esta análise permite a comparação com as etapas posteriores.

Figura 2 - Amostras de efluente para Jar-Test antes da adição de reagentes.



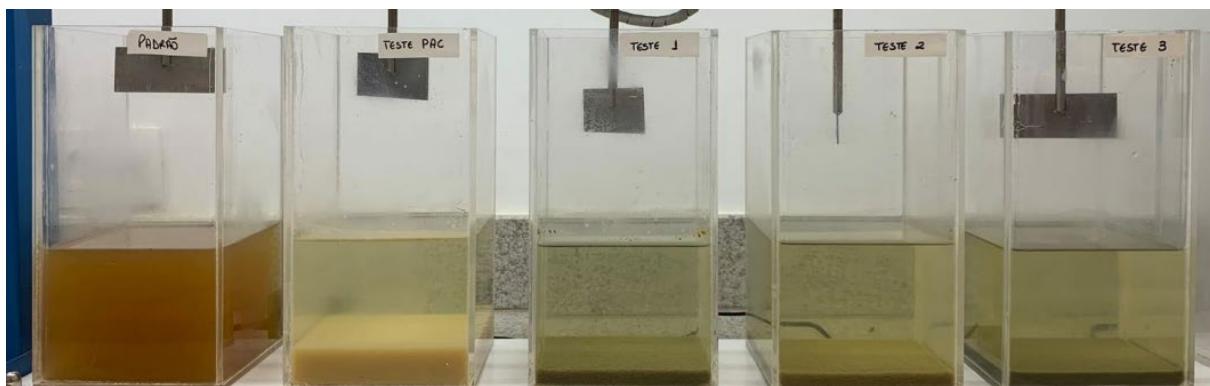
A Figura 3 demonstra uma transformação significativa nas amostras. Após a adição de soluções para ajuste do pH e coagulação, observa-se uma alteração na coloração do líquido. Essa mudança é interpretada como um indicativo visual dos processos químicos em andamento, especificamente a desestabilização de coloides e a oxidação de metais presentes no efluente. Há uma possível influência do cobre nesse fenômeno, que ao oxidar adquire coloração esverdeada.

Figura 3 - Amostras de efluente para Jar-Test com a adição de todos os reagentes, exceto o PAC.



A Figura 4 traz o resultado final do experimento de Jar Test. Após a adição do polímero aniónico para floculação e um período de decantação de 7 horas, as amostras apresentaram uma aparência visivelmente melhorada em comparação com o estado inicial (Figura 2). A redução da turbidez e a separação dos sólidos são evidentes, demonstrando a eficácia do tratamento na remoção de impurezas. Além disso, as amostras tratadas com o resíduo galvânico (Testes 1, 2 e 3) exibiram resultados visuais superiores ao tratamento com PAC, sugerindo uma possível maior eficiência do resíduo como coagulante neste contexto específico.

Figura 4 - Amostras de efluente após os processos de coagulação, floculação e decantação do Jar-Test.



A análise dos resultados obtidos neste estudo revela a eficácia do resíduo galvânico de H_2SO_4 como coagulante no tratamento de efluentes, demonstrando o seu potencial como alternativa ao PAC. A Tabela 3 apresenta os resultados detalhados das análises das amostras de efluente bruto e tratado com o resíduo de H_2SO_4 e PAC.

A Tabela 3 compara a composição do efluente em diferentes estágios do tratamento. A concentração de ferro na amostra padrão foi extremamente elevada, atingindo 52,6 g/L, valor muito acima dos limites legais para descarte e indicativo da severa contaminação inicial do efluente. As amostras incluem a "Amostra Padrão" (efluente bruto), a "Amostra com PAC" (tratada com Polichloreto de Alumínio, um coagulante comum) e três amostras tratadas com o resíduo de H_2SO_4 contaminado (Amostra 1, Amostra 2 e Amostra 3). Os parâmetros analisados são DQO (Demanda Química de Oxigênio), pH, Sólidos Totais, Turbidez, Cromo, Cromo Hexavalente, Ferro e Zinco.

Tabela 3 - Resultados das análises laboratoriais das amostras de efluente.

Parâmetros	Amostra Padrão	Amostra com PAC	Amostra 1 – H_2SO_4 contaminado	Amostra 2 – H_2SO_4 contaminado	Amostra 3 – H_2SO_4 contaminado
DQO (mg/L)	1.120,08	323,86	369,48	341,62	1356,11
pH	11,82	7,67	7,65	7,64	7,15
Sólidos totais (mg/L)	3.369,00	5.596,00	5.350,00	5.332,00	5.242,00
Turbidez (NTU)	365	16	27,6	13,4	28,3
Cromo (mg/L)	3,352	0,011	0,01	0,012	0,016

Cromo Hexavalente (mg/L)	0,153	0,011	0,01	0,012	0,016
Ferro (mg/L)	76,265	0,473	1,806	2,22	4,169
Zinco (mg/L)	89,574	0,325	0,938	1,211	1,461

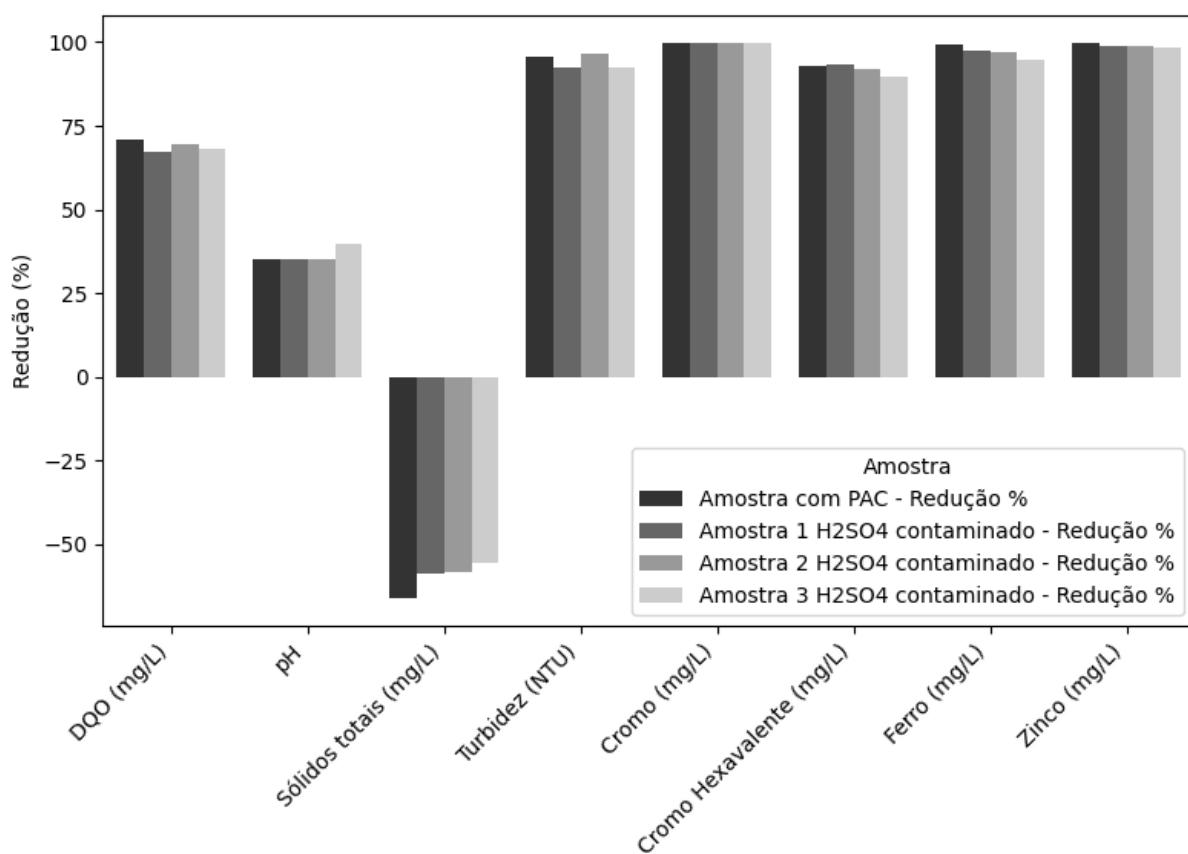
Houve uma redução significativa da DQO em todas as amostras tratadas em comparação com a Amostra Padrão, indicando a remoção de matéria orgânica oxidável. A Amostra com PAC apresentou a menor DQO (323,86 mg/L), sugerindo uma melhor eficiência na remoção de matéria orgânica por este tratamento. O pH da Amostra Padrão era alcalino (11,82). Após o tratamento, o pH se aproximou da neutralidade (em torno de 7) em todas as amostras, o que é importante para atender aos padrões de descarte e reduzir o impacto ambiental. Observou-se um aumento nos sólidos totais após o tratamento. Isso pode ser explicado pela adição dos coagulantes, que contribuem para a formação de flocos e, consequentemente, aumentam a quantidade de sólidos sedimentáveis.

A turbidez diminuiu drasticamente após o tratamento, indicando a remoção eficiente de partículas em suspensão. A Amostra 2 H₂SO₄ contaminada apresentou a menor turbidez (13,4 NTU). As concentrações de cromo, ferro e zinco reduziram significativamente após o tratamento, demonstrando a eficácia dos coagulantes na remoção desses metais pesados.

As amostras tratadas com H₂SO₄ contaminado apresentaram concentrações ligeiramente maiores de ferro e zinco em comparação com a amostra tratada com PAC, mas ainda assim houve uma redução considerável em relação à Amostra Padrão. Os resultados demonstram que tanto o PAC quanto o resíduo de H₂SO₄ contaminado foram eficazes no tratamento do efluente galvânico, promovendo a remoção de matéria orgânica, turbidez e metais pesados. A concentração inicial de ferro no efluente bruto era de 52.600 mg/L, valor extremamente elevado. Após o tratamento com o resíduo de H₂SO₄, os níveis de ferro foram reduzidos para menos de 5 mg/L, indicando uma remoção superior a 99,99% e desempenho semelhante ao obtido com PAC (0,47 mg/L). Embora os valores finais ainda estejam acima do limite recomendado pela EPA (0,02 mg/L), a redução foi significativa, demonstrando a eficiência do processo. Esses resultados reforçam o potencial do resíduo como alternativa viável e sustentável no tratamento de efluentes altamente contaminados. No entanto, em situações com teores metálicos tão elevados, pode ser necessário complementar o tratamento com etapas adicionais, como filtração ou polimento, para atender a padrões internacionais mais restritivos.

A Figura 5 apresenta um gráfico de barras que mostra a porcentagem de redução de valores de parâmetros de qualidade da água após tratamento, conforme os dados apresentados na Tabela 3. As barras representam a eficiência percentual de redução de cada parâmetro, permitindo comparar o desempenho do tratamento entre as diferentes amostras.

Figura 5 - Percentuais de redução dos parâmetros analisados nas amostras em comparação com o efluente bruto.



Os resultados evidenciam uma elevada eficiência na remoção de turbidez e metais pesados, como ferro (Fe), zinco (Zn), cromo total (Cr) e cromo hexavalente (Cr^{6+}), com reduções superiores a 90% em todas as amostras, inclusive naquelas contaminadas com resíduo de H_2SO_4 . A remoção de ferro e zinco superou 80% em todas as amostras contaminadas, indicando alta eficiência na precipitação e remoção desses metais — desempenho comparável ou até superior ao obtido com PAC, coagulante tradicionalmente utilizado. A expressiva redução dos teores de cromo total e cromo hexavalente também demonstra a capacidade do resíduo de H_2SO_4 em tratar diferentes tipos de metais presentes no efluente galvânico.

Além da remoção de metais, a DQO apresentou reduções em torno de 65% a 70%, indicando uma significativa remoção de matéria orgânica. Essa diminuição é essencial para garantir que o efluente tratado atenda aos padrões ambientais, uma vez que a matéria orgânica em excesso pode comprometer a qualidade da água e a vida aquática ao consumir oxigênio dissolvido. O pH sofreu alterações moderadas, possivelmente aproximando-se da neutralidade, dependendo das condições iniciais do efluente. Por outro lado, os sólidos totais apresentaram aumento após o tratamento, com valores negativos de redução. Esse aumento pode estar associado à adição de sais oriundos dos coagulantes ou às reações químicas ocorridas durante o processo, o que pode exigir etapas complementares de tratamento, dependendo do destino final da água tratada.

Para avaliar a significância das diferenças observadas entre os tratamentos com PAC e com o resíduo de H₂SO₄ contaminado, foi aplicado o teste t de Student, considerando os dados das três amostras tratadas com o resíduo como grupo experimental e os valores obtidos com PAC como referência. Os resultados do teste estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultados do teste-t das amostras de efluente

Parâmetro	t (estatística)	p-valor	Significativo (p < 0,05)
DQO (mg/L)	3,9625	0,0582	Não
pH	-1,1513	0,3687	Não
Sólidos totais (mg/L)	-8,6211	0,0132	Sim
Turbidez (NTU)	1,4626	0,2811	Não
Cromo (mg/L)	0,9449	0,4444	Não
Cromo Hexavalente (mg/L)	0,9449	0,4444	Não
Ferro (mg/L)	3,1003	0,0902	Não
Zinco (mg/L)	5,8158	0,0283	Sim

A análise estatística indicou que, para a maioria dos parâmetros avaliados (DQO, pH, turbidez, cromo total, cromo hexavalente e ferro), não houve diferença estatisticamente significativa ($p > 0,05$) entre os dois tipos de coagulante. Isso sugere que o resíduo de H₂SO₄ apresenta desempenho semelhante ao PAC na remoção

desses contaminantes, reforçando o seu potencial como alternativa viável e sustentável. No entanto, observou-se diferença significativa para os parâmetros de sólidos totais ($p = 0,0132$) e zinco ($p = 0,0283$). No caso dos sólidos totais, o aumento pode estar relacionado à própria composição do resíduo utilizado como coagulante, que pode introduzir sais ou outras substâncias ao meio. Já no caso do zinco, a concentração final nas amostras tratadas com H_2SO_4 foi estatisticamente maior do que na amostra tratada com PAC, embora ainda significativamente menor em relação ao efluente bruto. Esses resultados reforçam a necessidade de um monitoramento específico para esses parâmetros em aplicações práticas, mas também evidenciam o potencial do resíduo como substituto do PAC, considerando especialmente a sua origem residual e o seu baixo custo.

4.4 CONFORMIDADE COM A LEGISLAÇÃO AMBIENTAL

A análise dos resultados também demonstrou que o efluente tratado com o resíduo de H_2SO_4 atendeu aos padrões de qualidade estabelecidos pela CONAMA 430/2011 e CONSEMA para descarte em corpos hídricos. Isso é um aspecto crucial, por garantir que a utilização do resíduo como coagulante não apenas é eficaz, mas também ambientalmente segura.

Os resultados deste estudo corroboram a importância da busca por alternativas sustentáveis para o tratamento de efluentes industriais. A reutilização de resíduos, como o H_2SO_4 contaminado, não apenas reduz os custos associados ao tratamento, mas também minimiza os impactos ambientais negativos do descarte inadequado desses materiais.

A eficácia do resíduo de H_2SO_4 na remoção de metais pesados e DQO pode ser atribuída à sua capacidade de desestabilizar as partículas coloidais presentes no efluente, promovendo a formação de flocos e a sua posterior sedimentação. A acidez do resíduo também pode contribuir para a solubilização de determinados poluentes, facilitando a sua remoção.

Embora os resultados sejam promissores, é importante ressaltar que este estudo representa uma etapa inicial na investigação do uso do resíduo de H_2SO_4 como coagulante. Estudos futuros devem aprofundar a otimização do processo, avaliando diferentes dosagens, tempos de reação e condições de pH, a fim de maximizar a eficiência do tratamento e reduzir ainda mais os custos. Além disso, é fundamental investigar a composição do lodo gerado no processo de tratamento, visando a sua adequada destinação ou possível reutilização, como em aplicações agrícolas (Kaminata, 2008). A análise da toxicidade do efluente tratado também é relevante para garantir a sua segurança ambiental em longo prazo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados deste estudo demonstram o potencial do resíduo galvânico de ácido sulfúrico (H_2SO_4) como coagulante eficaz no tratamento de efluentes industriais, especialmente na remoção de metais pesados. Observou-se que o resíduo de H_2SO_4 foi capaz de reduzir significativamente as concentrações de ferro, zinco, cromo total e cromo hexavalente, alcançando desempenhos comparáveis ou superiores ao coagulante convencional, o policloreto de alumínio (PAC). Além disso, o tratamento com o resíduo promoveu uma redução relevante na Demanda Química de Oxigênio (DQO), contribuindo para a melhoria da qualidade do efluente tratado.

A aplicação do teste t de Student permitiu uma análise estatística mais robusta da eficácia do resíduo. Os resultados indicaram ausência de diferença estatisticamente significativa ($p > 0,05$) entre o desempenho do H_2SO_4 contaminado e o PAC para a maioria dos parâmetros analisados, incluindo DQO, pH, turbidez, ferro, cromo total e cromo hexavalente. No entanto, foram identificadas diferenças significativas para os sólidos totais ($p = 0,0132$) e o zinco ($p = 0,0283$), sugerindo que o tratamento com o resíduo pode introduzir maiores concentrações desses componentes, o que requer atenção em aplicações futuras.

A reutilização do resíduo de H_2SO_4 como coagulante representa uma alternativa promissora e ambientalmente segura, uma vez que o efluente tratado atendeu aos padrões estabelecidos pela CONAMA 430/2011. Tal prática contribui para a economia circular, ao valorizar um resíduo que, de outra forma, seria descartado, e ao reduzir a dependência de coagulantes químicos convencionais.

Embora os resultados sejam positivos, recomenda-se realizar de estudos complementares para otimizar as condições operacionais do processo, avaliar a toxicidade do efluente tratado em longo prazo e definir estratégias adequadas para a gestão do lodo gerado. Pesquisas futuras também poderão investigar diferentes dosagens, faixas de pH e tempos de reação, visando maximizar a eficiência e reduzir custos.

Em síntese, este estudo reforça a viabilidade técnica e ambiental da substituição parcial ou total do PAC por resíduos industriais no tratamento de efluentes, contribuindo para o avanço de tecnologias mais sustentáveis e eficazes na gestão de poluentes.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, A. J.; NOVAES, F. F.; GUARINO, C. I. Águas de abastecimento e efluentes sanitários e industriais. In: REIS, D.; CARVALHO, R.; AGUIAR, A. J. (Eds.). **Tratamento de águas de abastecimento e efluentes sanitários e industriais.** 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2002.
- BELTRAME, L. F. **Minimização de resíduos sólidos industriais.** 2000. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.
- BERNARDO, L.; PAZ, L. **Qualidade da água para abastecimento.** 3. ed. São Carlos: Rima, 2010.
- BORDIN, D. L.; BERNARDES, A. M. Caracterização de resíduos galvânicos contendo cromo visando sua reciclagem. **Tecnologia Metalúrgica, Materiais e Mineração**, v. 7, n. 4, p. 287-294, 2010.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 430, de 13 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. Brasília, DF, 2011.
- CORDEIRO, A. L. A. **Espectrometria de Absorção Atômica.** [S.I.]: [s.n.], 2023.
- CRUZ, P. R. **Qualidade da água.** 2004.

- DA SILVA, T. F. **Estudo da coagulação/flocação no tratamento de efluentes industriais.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.
- DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. **Métodos e técnicas de tratamento de água.** 2. ed. São Carlos: Rima, 2006.
- DREW, R. J. **Aspects of heavy metal and inorganic pollution.** CEP Consultants Ltd, 1979.
- FELLENBERG, G. **Environmental chemistry.** Berlin: Springer-Verlag, 1980.
- FERRARI, J. A.; MOSCOSO, J. G. **Tratamento de efluentes industriais.** Rio de Janeiro: ABES, 2006.
- HASSEMER, D.; SENS, M. L. **Tratamento de água:** princípios, técnicas e aplicações. 2002.
- JÚNIOR, O. M.; ABREU, A. A. Floculantes orgânicos utilizados no tratamento de água: produção, caracterização e aplicações. **Revista Virtual de Química**, v. 10, n. 1, p. 182-196, 2018.
- KAMINATA, R. M. **Caracterização do lodo de Estação de Tratamento de Águas Residuárias (ETAR) visando o aproveitamento agrícola.** 2008. 142 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Ciência do Solo) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2008.

KNEVITZ, L. C. **Clarificação**. 2017.

KURNIAWAN, T. A. et al. Industrial wastewater treatment. **Journal of Hazardous Materials**, v. 142, n. 1-2, p. 108-119, 2007.

METCALF & EDDY. **Wastewater engineering**: treatment and reuse. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2003.

PAVANELLI, J. **Tratamento de água: princípios e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2001.

PEREIRA NETO, J. T. **Tratamento e disposição de resíduos industriais**. São Paulo: Cengage Learning, 2008.

PERIC, J. et al. Optimization of the coagulation process for wastewater treatment. **Journal of Hazardous Materials**, v. 154, n. 1-3, p. 85-93, 2008.

RUBILAR, C. S. et al. Clarificação química com coagulante PGa21Ca e fotocatálise heterogênea aplicada ao tratamento de efluente de curtume. 2017. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

SPINELLI, V. A.; SENS, M. L.; FÁVERE, V. T. Quitosana, polieletrólico natural para o tratamento de água potável. In: *21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Anais...* João Pessoa. PB. 2001.

THEODORO, S. H. **Gestão ambiental**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2010.