

TRATAMENTO DE EFLUENTES COM CORANTES TÊXTEIS UTILIZANDO PROCESSO OXIDATIVO AVANÇADO DE OZONIZAÇÃO

Luiza Tessaro Vivan – luiza.vivan@profill.com.br, Profill Engenharia e Ambiente, Av. Iguaçu, 451, 6º Andar - Porto Alegre – Rio Grande do Sul

Éverton Hansen – everton-hansen@fepam.rs.gov.br, Universidade Feevale, Programa de Pós-graduação em Qualidade Ambiental, ERS-239, 2755 93525-075 – Novo Hamburgo – Rio Grande do Sul

Patrice Monteiro de Aquim – patrice@feevale.br, Universidade Feevale, Programa de Pós-graduação em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais, ERS-239, 2755 93525-075 – Novo Hamburgo – Rio Grande do Sul

Marco Antônio Siqueira Rodrigues – marcor@feevale.br, Universidade Feevale, Programa de Pós-graduação em Qualidade Ambiental, ERS-239, 2755 93525-075 – Novo Hamburgo – Rio Grande do Sul

Resumo: A indústria têxtil é uma atividade de grande relevância econômica no Brasil e no mundo. O beneficiamento têxtil envolve diversas etapas de processamento que utilizam grandes volumes de água e produtos químicos até a obtenção do produto final. Como consequência, são gerados efluentes complexos, nos quais os corantes representam um dos principais poluentes. Esses compostos conferem elevada coloração ao efluente, podem liberar metais tóxicos, apresentam toxicidade e baixa biodegradabilidade, o que dificulta seu tratamento. Convencionalmente, o tratamento de efluentes têxteis inclui etapas de tratamento primário, geralmente por coagulação-floculação, e tratamento secundário, voltado à remoção de matéria orgânica por processos biológicos. Entretanto, esses tratamentos nem sempre apresentam elevada eficiência na remoção de corantes. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar a aplicação da ozonização no tratamento de duas classes de corantes têxteis, ácido e direto, investigando as melhores condições operacionais e a eficiência do processo na remoção dos poluentes. Foram avaliados diferentes valores de pH (4, 7, 11 e pH original das soluções), tempos de ozonização (20, 40 e 60 min), temperaturas (15, 25 e 40 °C) e concentrações iniciais de corante (50, 100 e 200 mg L⁻¹). A eficiência do tratamento foi monitorada por espectroscopia UV-Vis, enquanto a biodegradabilidade foi avaliada por análises de demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO). Os resultados indicaram remoções máximas de 73,8% para o corante ácido e 67,7% para o corante direto. O pH não influenciou significativamente o processo, tempos superiores a 40 min não aumentaram a eficiência e temperaturas acima de 25 °C reduziram o desempenho devido à rápida decomposição do ozônio.

Palavras-chave: Ozonização; Processos oxidativos avançados; Corantes têxteis; Efluentes têxteis; Tratamento de efluentes.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

TREATMENT OF TEXTILE DYE EFFLUENTS USING THE ADVANCED OXIDATION PROCESS OF OZONATION

Abstract: The textile industry is an activity of great economic relevance in Brazil and worldwide. Textile processing involves several stages that require large volumes of water and chemical products until the final product is obtained. As a consequence, complex effluents are generated, in which dyes represent one of the main pollutants. These compounds impart high color to the effluent, may release heavy metals, and present toxicity and low biodegradability, which makes their treatment difficult. Conventionally, the treatment of textile effluents includes primary treatment, generally based on coagulation–flocculation, and secondary treatment aimed at the removal of organic matter through biological processes. However, these treatments do not always present high efficiency in dye removal. In this context, this study aimed to evaluate the application of ozonation in the treatment of two classes of textile dyes, acid and direct, investigating the best operational conditions and the efficiency of the process in pollutant removal. Different pHs (4, 7, 11, and the original pH of the dye solutions), ozonation times (20, 40, and 60 min), temperatures (15, 25, and 40 °C), and initial dye concentrations (50, 100, and 200 mg L⁻¹) were evaluated. Treatment efficiency was monitored by UV–Vis spectroscopy, while biodegradability was assessed through biochemical oxygen demand (BOD) and chemical oxygen demand (COD) analyses. The results indicated maximum removals of 73.8% for the acid dye and 67.7% for the direct dye. pH did not significantly influenced the ozonation process, treatment times longer than 40 min did not increase removal efficiency, and temperatures above 25 °C reduced the overall performance due to the rapid decomposition of ozone.

Keywords: Ozonation; Advanced Oxidation Processes; Textile Dyes; Textile Wastewater; Wastewater Treatment

1. INTRODUÇÃO

O acesso à água potável ainda representa um grande desafio em escala global. Estima-se que aproximadamente 2,2 bilhões de pessoas no mundo não possuem acesso à água segura para consumo (UNICEF; OMS, 2019). Além da escassez hídrica em determinadas regiões, observa-se também a degradação da qualidade dos recursos hídricos disponíveis, uma vez que grande parte dos corpos de água doce encontra-se poluída. Esse cenário exige o desenvolvimento e a aplicação de técnicas de tratamento e despoluição cada vez mais avançadas e onerosas para garantir a potabilidade da água (BRITO; SILVA, 2012).

Entre os principais setores consumidores de água doce no mundo, a agricultura é responsável por cerca de 70% da demanda global, enquanto o setor industrial responde por aproximadamente 20% desse consumo (UNESCO, 2024). Dentro do setor industrial, a indústria têxtil destaca-se como uma das atividades que mais consomem água. Estima-se que o processamento têxtil utilize entre 200 e 400 litros de água para cada quilograma de produto acabado, o que resulta na geração de grandes volumes de efluentes e pode contribuir significativamente para a poluição industrial (BUSCIO *et al.*, 2019), uma vez que seus efluentes possuem composição complexa e

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

elevado potencial poluidor, o que pode representar riscos ao meio ambiente e à saúde humana. Entre os principais contaminantes presentes nesses efluentes destacam-se os corantes utilizados nos processos de tingimento de tecidos. Existem diversas classes de corantes com características químicas distintas, entretanto, de forma geral, esses compostos apresentam elevada estabilidade química e baixa biodegradabilidade, o que dificulta sua remoção por processos convencionais de tratamento (SOLTANI *et al.*, 2016).

Mesmo em baixas concentrações, os corantes são capazes de conferir intensa coloração à água, alterando seu aspecto visual. Além disso, a presença desses compostos em corpos hídricos pode reduzir a penetração da luz solar devido à formação de uma barreira luminosa, afetando processos fotossintéticos e impactando negativamente os ecossistemas aquáticos. Diversos corantes utilizados na indústria têxtil também apresentam toxicidade e podem possuir efeitos bioacumulativos, carcinogênicos e, em alguns casos, mutagênicos (SANTOS *et al.*, 2018).

Estima-se que existam mais de 100.000 corantes disponíveis comercialmente em todo o mundo, com uma produção anual aproximada de 7×10^5 toneladas. Durante o processo de tingimento, cerca de 20 a 40% do corante aplicado não é fixado ao tecido e acaba sendo liberado no efluente (KHANDEGAR; SAROHA, 2013). Devido à complexidade do tratamento de efluentes contendo corantes, novas tecnologias vêm sendo estudadas com o objetivo de promover a degradação desses compostos de forma mais eficiente. Nesse contexto, os Processos Oxidativos Avançados (POAs) têm se destacado como alternativas promissoras. Esses processos caracterizam-se pela capacidade de promover a degradação de poluentes orgânicos por meio de reações de oxidação que podem convertê-los em dióxido de carbono, água e íons inorgânicos (MARTINS *et al.*, 2011).

O principal mecanismo de atuação dos POAs envolve a geração de radicais hidroxila ($\bullet\text{OH}$), espécies altamente reativas capazes de oxidar uma ampla variedade de compostos orgânicos de forma rápida e não seletiva. Esses radicais podem ser gerados por diferentes métodos, incluindo processos que utilizam peróxido de hidrogênio, ozônio ou reações induzidas por radiação luminosa (MARTINS *et al.*, 2011; AMORIM; LEÃO; MOREIRA, 2009). Entre os diferentes processos oxidativos avançados, a ozonização tem se destacado como uma alternativa potencial para a descoloração e melhoria da biodegradabilidade de efluentes têxteis. O ozônio é um agente oxidante altamente potente quando comparado a outros compostos, como o peróxido de hidrogênio (H_2O_2), sendo capaz de reagir com uma ampla variedade de corantes por meio de mecanismos de oxidação direta e indireta (SEVIMLI; SARIKAYA, 2002; PEIXOTO; MARINHO; RODRIGUES, 2013). Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a aplicação da técnica de ozonização no tratamento de duas diferentes classes de corantes têxteis, ácido e direto. Para isso, foram investigadas as influências de parâmetros operacionais, como pH, tempo de ozonização, temperatura e concentração inicial de corante, sobre a eficiência de remoção e degradação desses poluentes.

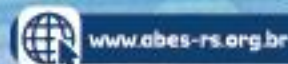
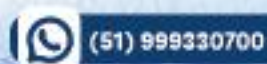
Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



2. METODOLOGIA

2.1 Preparo do efluente contendo corante

O efluente sintético utilizado neste estudo foi preparado com corantes ácido e direto na concentração de 100 mg/L. As duas classes escolhidas foram baseadas na sua ampla utilização a nível industrial, os corantes ácidos representam 18,5% do total, e 7,7% os corantes diretos (YAMANAKA, 2016). O corante ácido é da linha VivaCor do fabricante Guarany e o corante direto é da linha TingeCor do mesmo fabricante. A cor de ambos corantes é classificada pelo fabricante como “13 – Turquesa”.

2.2 Caracterização estrutural química do corante

A caracterização dos principais grupos funcionais que constituem cada um dos corantes foi realizada através de espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR). Os espectros de infravermelho foram obtidos pelo equipamento Spectrum 100 Perkin Elmer através de varreduras de 400 a 4000 cm^{-1} . A análise foi realizada utilizando o acessório ATR (Reflectância Total Atenuada) do equipamento, dispensando preparação prévia das amostras.

2.3 Calibração do ozonizador

A quantificação de produção de ozônio no gerador foi realizada através do método iodométrico 4500 do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (SMEWW, 2005). O procedimento consistiu em borbulhar ozônio em solução de 2% de iodeto de potássio (KI) por 20, 40 e 60 minutos. A absorção do ozônio na solução de iodeto de potássio oferece uma coloração âmbar à solução. A reação entre KI e o ozônio é apresentada na Equação 1. Ao final de cada teste foi realizada a coleta de amostra de solução de KI ozonizada que foi titulada com tiosulfato de sódio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) usando solução de amido como indicador. A produção de ozônio no equipamento foi calculada através da Equação 2.



$$P = \frac{Nt \times \Delta Vt \times VKI \times 2400 \times 60}{V_{am} \times t \times 1000} \quad (2)$$

Onde:

P: produção de ozônio no gerador (gO_3/h);

Nt: normalidade do tiosulfato de sódio;

ΔVt : $V_f - V_b$

V_f : volume de tiosulfato de sódio consumido na titulação (mL);

V_b : volume de tiosulfato de sódio consumido na titulação do branco (mL);

VKI: volume da solução de KI ozonizada (L);

V_{am} : volume de amostra coletada para a titulação (mL);

t: tempo de ozonização (min);

2400, 60, 1000: fatores de conversão para obtenção da produção em g/h.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



PUCRS



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



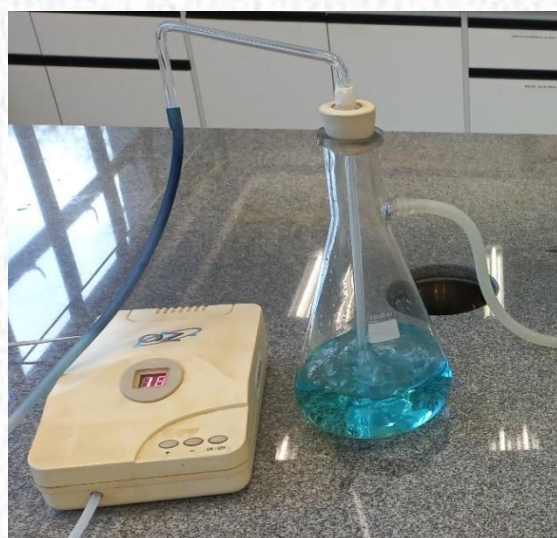
www.abes-rs.org.br

Foram encontrados nos períodos de ozonização de 20, 40 e 60 minutos, gerações de ozônio de 6,97, 5,64 e 4,82 mgO₃/min, respectivamente. Dessa forma, é possível observar uma queda nos valores de vazão entre os intervalos de tempo. No intervalo de 20 para 40 minutos, há uma queda de aproximadamente 19%, enquanto no intervalo de 20 para 60 minutos, a queda foi de aproximadamente 31%. A ocorrência da queda no valor de vazão pode se dar ao fato da saturação na capacidade de reação do ozônio com a amostra, visto que com o aumento do tempo, a capacidade de reação diminui, diminuindo os valores de vazão calculados. De acordo com o fornecedor do equipamento, a produção nominal do ozonizador é de 50 mgO₃/min.

2.4 Ozonização das soluções contendo os corantes

O método de tratamento dos corantes consistiu em um sistema composto por um frasco Kitasato com capacidade de 2 litros e um ozonizador da marca OZ Engenharia. O ozônio produzido pelo gerador é alimentado continuamente, sendo borbuhlado no efluente, conforme Figura 1. Os experimentos foram realizados em diferentes faixas de pH, tempo, temperatura e concentração inicial de corante, em um sistema de semi batelada, com alimentação contínua de ozônio no frasco, preenchido com 980 mL de solução de corante, com concentração inicial de 100 mg/L. Os experimentos foram realizados em duplicata.

Figura 1 – Sistema de ozonização



O primeiro experimento consistiu em analisar a melhor condição de pH para a ozonização de cada um dos tipos de corante. Foram realizados experimentos de ozonização por um período de 20 minutos nos pHs 4, 7, 11 e no pH original da amostra (4,0 para o corante ácido e 5,46 para o corante direto). O pH foi ajustado utilizando soluções de HCl 0,1M e NaOH 0,1M. A concentração final de

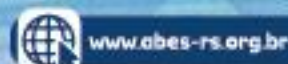
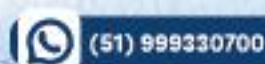
Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



corante foi avaliada para os experimentos realizados em cada valor de pH, através de análise em espectrofotômetro.

Após avaliar o melhor valor de pH para a ozonização, foram testados os tempos de ozonização de 20, 40 e 60 minutos sob a condição de pH que proporcionou maior remoção de corante e, também, testadas as temperaturas de 15, 25 e 40 °C para o melhor pH e melhor tempo. A temperatura foi controlada em banho termostático. Além disso, para a melhor combinação de pH, tempo e temperatura, foi variada a concentração inicial de corante, utilizando-se, além da concentração inicial de 100 mg/L, as concentrações de 50 mg/L e 200 mg/L.

A avaliação das melhores condições encontradas é definida sempre com base na concentração final de corante da amostra, analisada a partir de espectroscopia UV-visível. Por fim, foram feitos ensaios sob a combinação dos melhores parâmetros encontrados de pH, tempo, temperatura e concentração, e realizou-se as análises de demanda química e bioquímica de oxigênio, inicial e final, para cada amostra, a fim de verificar se houve alteração da sua biodegradabilidade nas melhores condições de tratamento.

2.5 Análises físico-químicas

A caracterização das amostras das soluções de corante engloba as seguintes análises físico-químicas: DQO (método 5220 D; SMEWW, 2005), DBO (método 5210; SMEWW, 2005), e concentração de corante, utilizando o espectrofotômetro UV-1 600 (Pro-tools) no comprimento de onda de 300 nm.

2.6 Análise estatística

Os dados obtidos foram analisados por Análise de Variância (ANOVA) de uma via seguida de post hoc de Tukey, e foram considerados significativos quando $p < 0,05$. Todas as análises estatísticas foram realizadas com o software GraphPad Prism 5.0 (2015).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização dos grupos funcionais dos corantes por FTIR

Os resultados das análise de FTIR para o corante ácido pode ser observado na Figura 2 e para o corante direto na Figura 3.

Realização



Correalizadores



Apoio Institucional

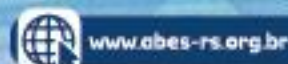
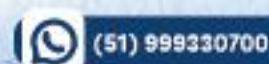


Figura 2 – FTIR do corante ácido

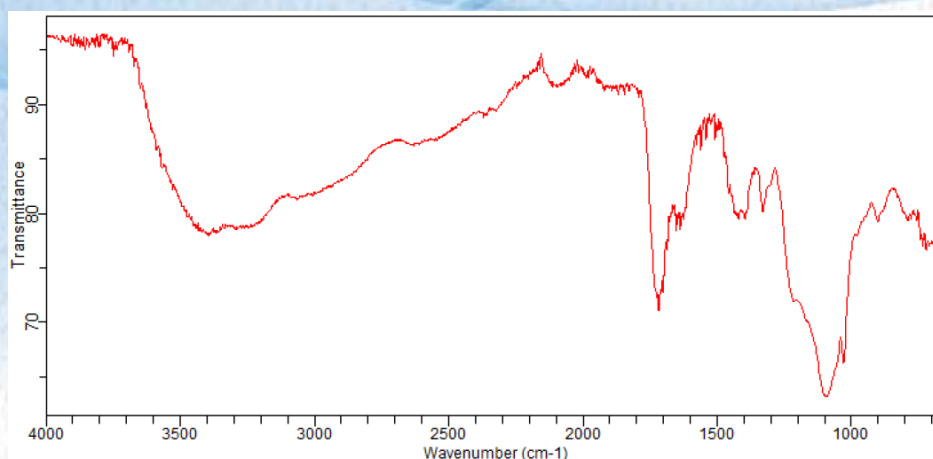
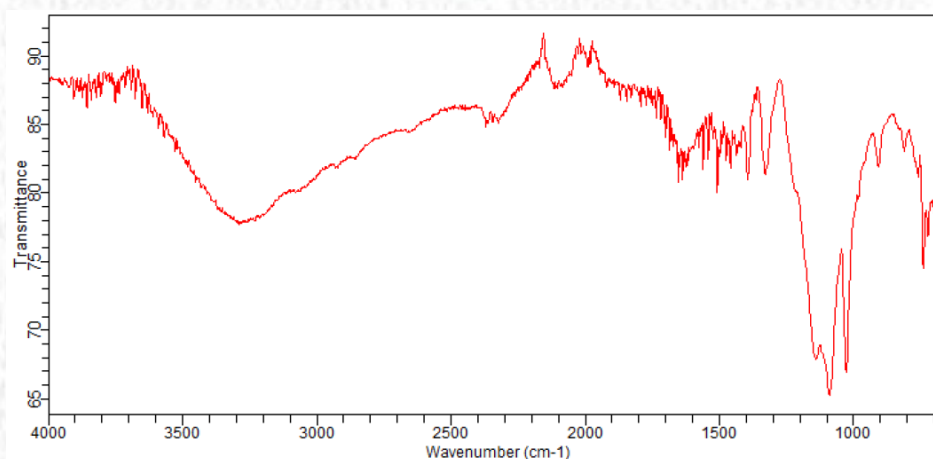


Figura 3 –FTIR do corante direto



Os principais picos para o corante ácido (Figura 2) ocorreram nas bandas de 3400, 1700 e 1100 cm^{-1} . Conforme descrito por Almeida (2013), estas bandas são características da presença de naftol, estiramento da ligação O-H, amins primárias, secundárias e estiramento da ligação N-H para faixa de 3400 cm^{-1} , região característica de agrupamentos azo (-N=N-) para faixa de 1700 cm^{-1} e região característica de compostos sulfônicos para a faixa 1100 cm^{-1} . A descrição destes picos corrobora com as características dos corantes ácidos descritas por Guaratini e Zanoni (2000), onde o termo corante ácido corresponde a um grande grupo de corantes aniônicos que possuem de um a três grupos sulfônicos (-S=O). Estes grupos substituintes ionizáveis tornam o corante solúvel em água, e possuem grande importância no método de aplicação do corante em fibras proteicas (lã, seda) e em fibras de poliamida sintética.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



PUCRS



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



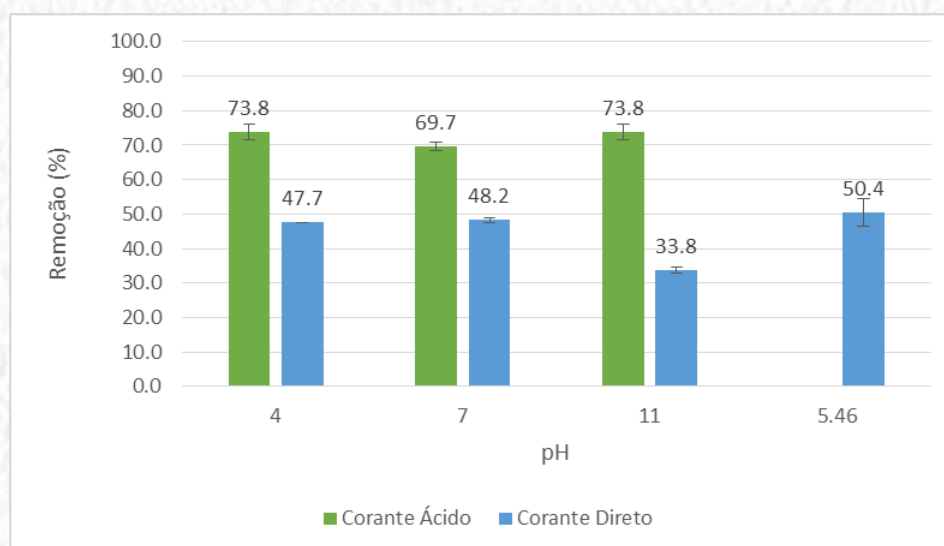
www.abes-rs.org.br

O corante direto (Figura 3) apresenta seus principais picos nas bandas de faixas de 3300 e entre 1000 e 1200 cm^{-1} . Conforme descrito por Almeida (2013), as estruturas correspondentes para estes valores são naftol, estiramento da ligação O-H, amins primárias, secundárias e estiramento da ligação N-H para faixa de 3300 cm^{-1} e deformação angular de CH, grupos fenólicos e grupos sulfônicos para faixa entre 100 e 1200 cm^{-1} . Segundo Mahapatra (2016) os corantes baseados em estruturas azo constituem a maior proporção de corantes diretos. Eles são sintetizados com grupos de ácido sulfônico para dar-lhes solubilidade em água e podem ser aplicados em algodão e outras fibras celulósicas como viscose, linho, juta, cânhamo e rami.

3.2 Ozonização das soluções contendo os corantes

Os resultados de eficiência de remoção obtidos nos diferentes pHs são apresentados na Figura 4.

Figura 4 – Percentual de remoção x pH



O percentual de remoção do corante ácido manteve-se em um mesmo patamar, variando de 69,7 a 73,8%. A análise estatística apontou que não houve diferença significativa na remoção de corante ácido quando o pH foi variado. Dessa forma, optou-se por seguir os demais testes com o pH 4, por ser seu pH original, dispensando a sua correção. Já o percentual de remoção para o corante direto apresentou diferença significativa apenas para o pH 11, onde há uma queda de eficiência. Os demais pHs (4, 7 e 5,46), não apresentaram diferença significativa, o que também justifica a escolha do pH original (5,46) para os testes seguintes. Ainda, pode-se observar que a eficiência de remoção do corante ácido (69,7 a 73,8%) foi superior à do corante direto (33,8 a 50,4%), para todos os valores de pH, além de não sofrer queda de eficiência em meio mais básico (pH 11).

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



PUCRS



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br

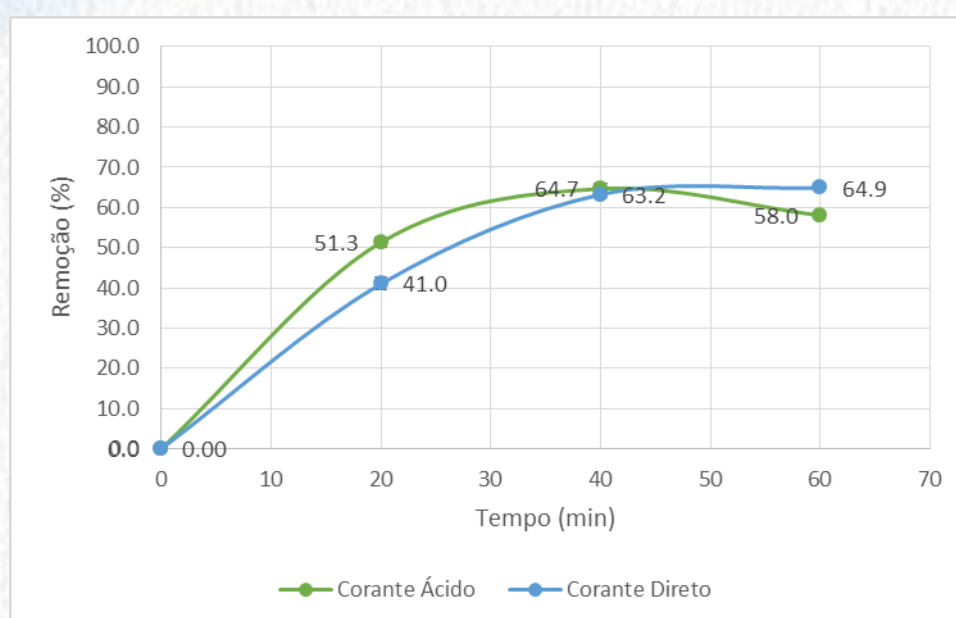


www.abes-rs.org.br

Sevimli e Kinaci (2002) relataram um aumento na remoção de cor em soluções alcalinas quando comparadas às ácidas, variando de 68 para 75%. A justificativa seria o fato do favorecimento da reação através da formação de radicais hidroxila que possuem um maior potencial de oxidação. No entanto, segundo Soares *et al.* (2006) pode haver uma eficiência maior na remoção de cor em pHs mais ácidos, devido ao processo ser majoritariamente por ozônio molecular, o qual é mais seletivo junto aos grupos cromóforos, os responsáveis pela cor. A observação de Soares *et al.* (2006) corrobora com os resultados encontrados no presente estudo, indicando que a faixa de pH ácida foi capaz de provocar maior degradação dos grupos cromóforos azo ($-N=N-$) identificados na análise de FTIR para ambos os corantes.

Os resultados dos testes variando o tempo de ozonização são apresentados na Figura 5.

Figura 5 – Percentual de remoção x tempo de tratamento



O corante ácido, no tempo de 40 minutos obteve uma melhor eficiência de remoção do que 20 minutos, com aumento da remoção de 51,3 para 64,7%. A análise estatística apontou que o tempo de 40 minutos apresenta eficiência significativamente superior ao tempo de 20 minutos. Já a comparação entre os tempos de 40 minutos e 60 minutos não apresentou diferença significativa. A estabilização da remoção de corante após 40 minutos pode estar relacionada à redução da capacidade do gerador de ozônio com o tempo, conforme observado no resultado de calibração. O corante direto também apresentou uma eficiência superior em 40 minutos quando comparada à de 20 minutos, subindo de 41 para 63,2% de remoção. No tempo de 60 minutos não houve diferença significativa em relação ao tempo de 40. Desta forma, o tempo optado para os demais testes com ambos os corantes foi de 40 minutos.

Os resultados dos ensaios com diferentes temperaturas são apresentados na Figura 6.

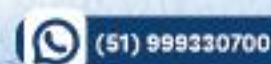
Realização



Correalizadores



Apoio Institucional



(51) 999330700

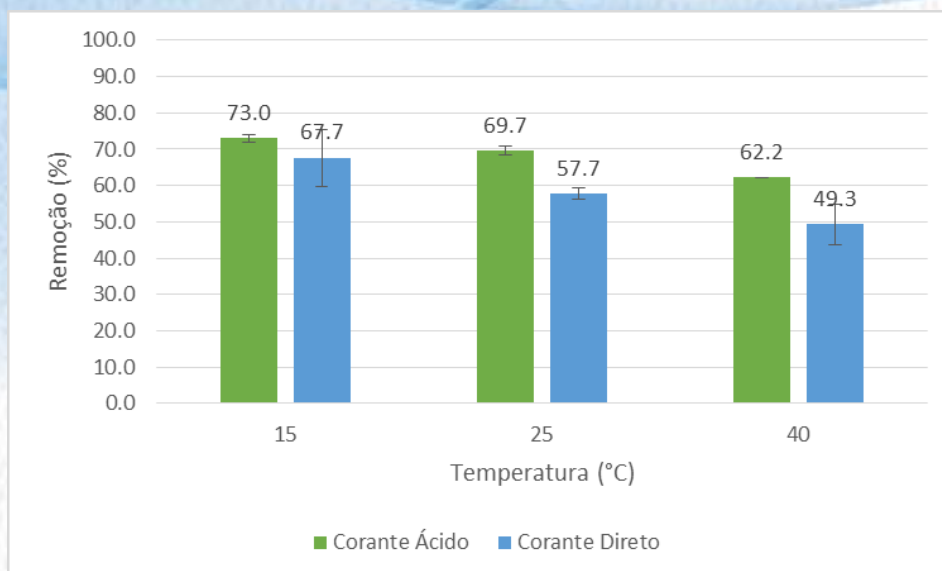


abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

Figura 6 – Percentual de remoção x temperatura



O corante ácido apresentou uma remoção significativamente superior nas temperaturas de 15 e 25 °C, em comparação com a temperatura de 40°C. Entre as temperaturas de 15 e 25°C, os percentuais de remoção ficaram próximos e não apresentaram diferença significativa na análise estatística. Dessa forma, a temperatura escolhida para dar seguimento aos testes foi de 25°C, uma vez que é a mais próxima da temperatura ambiente, não fazendo-se necessário o uso de energia para a refrigeração do efluente. O corante direto não apresentou diferenças significativas para nenhuma das temperaturas, mostrando uma eficiência média entre 49,3 e 67,7%. É possível observar uma leve redução na remoção com o aumento da temperatura, assim como para o corante ácido. Conforme Treviziani (2015), a temperatura tem efeito direto sobre a solubilidade do ozônio, diminuindo a solubilidade do oxidante na água em temperaturas elevadas. Por outro lado, a decomposição do ozônio torna-se mais rápida e a taxa de reação do ozônio com o substrato também tende a aumentar, uma vez que sua habilidade de oxidação aumenta. No entanto, temperaturas muito altas tendem a reduzir a eficiência global do processo, devido à redução da quantidade de ozônio disponível para ocorrência da reação.

Os resultados obtidos para diferentes concentrações iniciais de corante são apresentados na Figura 7.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700

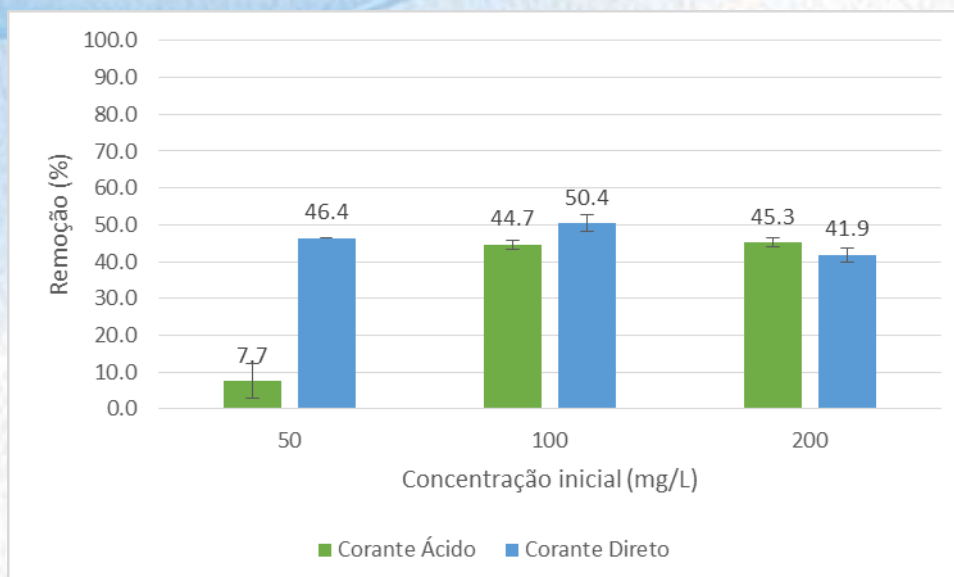


abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

Figura 7 - Percentual de remoção x concentração inicial de corante



O corante ácido apresenta uma diferença significativa para a concentração inicial de 50 mg/L em relação às demais, resultando em uma remoção inferior a 10%. Já para as concentrações iniciais de 100 e 200 mg/L, não há diferenças significativas, ambas ficando na casa dos 40% de remoção. Já, a remoção do corante direto apresenta uma diferença significativa quando compara-se as concentrações de 100 e 200 mg/L, com um incremento de aproximadamente 20% de remoção para 100 mg/L. Trevizani (2015) relata um aumento do tempo de ozonização necessário para atingir mesmo grau de remoção de corante conforme houve aumento da concentração inicial do corante, as concentrações testadas foram de 50, 100 e 150 mg/L.

3.3 Biodegradabilidade

Com base nas análises de DBO e DQO, calculou-se a biodegradabilidade das amostras brutas e tratadas (Tabela 1). O corante ácido apresentou um aumento de 26,7% na sua biodegradabilidade após o tratamento com ozônio. Já para o corante direto observa-se uma diminuição de 63,4% na biodegradabilidade ao final do tratamento.

Realização



Correalizadores



Apoio Institucional

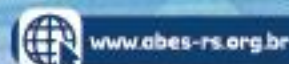
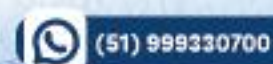


Tabela 1 – Biodegradabilidade inicial x final

Corante	DBO/DQO Inicial	DBO/DQO Final
Ácido	0,075	0,095
Direto	0,093	0,059

Segundo Hansen *et al.* (2020), quando o valor da biodegradabilidade é inferior a 0,20, o efluente é considerado pouco biodegradável, como é o caso de ambas as amostras dos dois corantes, mesmo após o tratamento. Trevizani (2015) também observou diminuição da biodegradabilidade de um corante azo após tratamento com ozônio e atribuiu esta diminuição pelo fato do ozônio primeiramente degradar alguns compostos tóxicos e de elevadas massas moleculares, que podem inibir a biodegradabilidade. Dessa forma, um possível fator na diminuição da biodegradabilidade seja a formação de compostos intermediários ainda pouco biodegradáveis. Os resultados de biodegradabilidade também corroboram com os obtidos nas análises anteriores, de eficiência de remoção, onde em todos os cenários há uma maior remoção de corante ácido, quando comparado ao corante direto.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A ozonização mostrou-se eficaz na remoção dos corantes analisados. O pH não teve influência significativa na eficiência do tratamento, exceto leve queda para pH 11 no corante direto. O tempo de 40 minutos foi suficiente e significativamente melhor que 20 minutos para o tratamento e não houve ganho relevante ao estender o tratamento para 60 minutos. Temperaturas mais altas (40°C) reduziram a remoção do corante ácido em comparação a 15 e 25°C; no corante direto não houve diferença significativa. Aumentos na concentração inicial do corante direto reduziram a eficiência de remoção. A biodegradabilidade do corante ácido aumentou 26,7%, enquanto a do corante direto diminuiu 63,4%, indicando formação de intermediários pouco biodegradáveis. Recomenda-se, para estudos futuros, investigar os compostos intermediários formados, avaliar a biodegradabilidade por parâmetro operacional e testar o tratamento em efluentes reais da indústria têxtil.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da Capes, CNPq e FAPERGS para a realização do presente trabalho.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



PUCRS



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Edna *et al.* Tratamento de efluentes industriais por processos oxidativos na presença de ozônio. **Química Nova**, São Paulo, v. 27, n. 5, p. 818-824, 2004.

AMORIM, Camila Costa de; LEÃO, Mônica Maria Diniz; MOREIRA, Regina de Fátima Peralta Muniz. Comparação entre diferentes processos oxidativos avançados para degradação de corante azo. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 4, p. 543-550, 2009.

BRITO, Núbia Natália; SILVA, Victor Borges Marinho. Processo oxidativo avançado e sua aplicação ambiental. **REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, [s. l.], v. 1, n. 3, p. 36-47, 2012.

BUSCIO, V. *et al.* Reducing the environmental impact of textile industry by reusing residual salts and water: ECUVal system. **Chemical Engineering Journal**, [s. l.], v. 373, p. 161-170, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.04.146>.

GUARATINI, Cláudia CI; ZANONI, Maria Valnice B. Corantes têxteis. **Química nova**, São Paulo, v. 23, n. 1, p. 71-78, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422000000100013>.

HANSEN, É. *et al.* Impact of post-tanning chemicals on the pollution load of tannery wastewater. **Journal of Environmental Management**, v. 269, p. 110787, set. 2020.

KHANDEGAR, Vinita; SAROHA, Anil K. Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent—a review. **Journal of environmental management**, [s. l.], v. 128, p. 949-963, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.06.043>.

MAHAPATRA, N. N. **Textile dyes**. CRC press, 2016. E-book.

MARTINS, Leonardo Madeira *et al.* Aplicação de Fenton, foto-Fenton e UV/H₂O₂ no tratamento de efluente têxtil sintético contendo o corante Preto Biozol UC. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 16, n. 3, p. 261-270, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522011000300009>.

PEIXOTO, Fabia Pinho; MARINHO, Gloria; RODRIGUES, Kelly. Corantes têxteis: uma revisão. **Holos**, [s. l.], v. 5, p. 98-106, 2013. DOI: 10.15628/holos.2013.1239.

SANTOS, Renan Felinto dos *et al.* Influence of different textile fibers on characterization of dyeing wastewater and final effluent. **Environmental monitoring and assessment**, [s. l.], v. 190, n. 11, p. 1-12, 2018.

SEVIMLI, M. F.; KINACI, C. Decolorization of textile wastewater by ozonation and Fenton's process. **Water Science and Technology**, [s. l.], v. 45, n. 12, p. 279-286, 2002. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2002.0436>.

SEVIMLI, Mehmet F.; SARIKAYA, Hasan Z. Ozone treatment of textile effluents and dyes: effect of applied ozone dose, pH and dye concentration. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology: International Research in Process, Environmental & Clean Technology**, [s. l.], v. 77, n. 7, p. 842-850, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1002/jctb.644>.

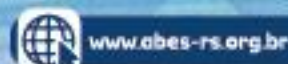
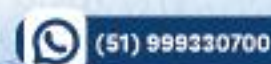
Realização



Correalizadores



Apoio Institucional



SOARES, Olívia Salomé GP *et al.* Ozonation of textile effluents and dye solutions under continuous operation: Influence of operating parameters. **Journal of Hazardous Materials**, [s. l.], v. 137, n. 3, p. 1664-1673, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.05.006>.

SOLTANI, Reza Darvishi Cheshmeh *et al.* Ultrasonically induced ZnO–biosilica nanocomposite for degradation of a textile dye in aqueous phase. **Ultrasonics sonochemistry**, [s. l.], v. 28, p. 69-78, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.07.002>.

TREVIZANI, Jéssica Luiza Bueno. **Descoloração e degradação do azo corante vermelho BR por ozonização**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

UMBUZEIRO, Gisela de Aragão *et al.* The contribution of azo dyes to the mutagenic activity of the Cristais River. **Chemosphere**, [s. l.], v. 60, n. 1, p. 55-64, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.11.100>.

UNESCO. **The United Nations World Water Development Report 2024: water for prosperity and peace**, 2024.

UNITED NATIONS CHILDREN'S FUND (UNICEF); WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2017: special focus on inequalities**. [s. l.]: United Nations Children's Fund (UNICEF) and World Health Organization, 2019.

YAMANAKA, Hideko; BOLDRIN, M. V. **Corantes**: Caracterização química, toxicológica, métodos de detecção e tratamento. 1. ed. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2016.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br