

Processos Oxidativos Avançados Integrados para Tratamento de Efluentes Têxteis

Formato de apresentação:
Oral

Tema:
II - Efluentes Sanitários e Industriais: caracterização, coleta, tratamento, disposição, reuso, lodo e bioassólidos

SubTema:
11 - Tratamento-Efluentes de industria textil

Palavras-chave:
Processo Oxidativo Avançado, Indústria têxtil, Compostos recalcitrantes, Descontaminação

Introdução e objetivo

A indústria têxtil, reconhecida como um setor econômico de grande relevância global, destaca-se como uma das principais geradoras de efluentes altamente tóxicos e resistentes aos tratamentos convencionais. Esses efluentes contêm uma variedade de poluentes orgânicos e inorgânicos, incluindo corantes recalcitrantes, conhecidos por sua alta solubilidade e estabilidade química e fotoquímica, tornando o tratamento um desafio significativo (Castillo-Suárez et al., 2023; Donkadokula et al., 2020). Além disso, os altos valores de demanda química de oxigênio (DQO), sólidos dissolvidos totais e coloração intensificada pelos processos de tingimento enfatizam a necessidade de tecnologias avançadas para sua remoção eficaz (Ahangarnokolaei et al., 2021).

O processo de coagulação-flocação é amplamente aplicado no tratamento de águas e efluentes por sua eficiência em desestabilizar sistemas coloidais e promover a remoção de partículas através da formação de flocos pesados, que podem ser separados por decantação ou filtração (Bahrodin et al., 2021). Contudo, limitações como a remoção incompleta de corantes estáveis e a formação de lodo em grandes quantidades demandam a integração com outras tecnologias, como processos oxidativos avançados (Abilaji et al., 2023). Nesse contexto, a cavitação hidrodinâmica associada à ozonação surge como uma solução promissora, capaz de melhorar a eficiência da remoção de poluentes ao combinar efeitos mecânicos e químicos para gerar radicais livres altamente reativos (Gogate e Patil, 2015).

O presente estudo visa avaliar a eficácia da combinação dos processos de coagulação-flocação e cavitação hidrodinâmica associada à ozonação no tratamento de efluentes têxteis, utilizando os coagulantes PACL e PGa21Ca. Essa abordagem tem o potencial de superar limitações associadas aos tratamentos convencionais, como a remoção insuficiente de DQO e cor aparente, enquanto minimiza a formação de resíduos sólidos, atendendo às exigências ambientais e econômicas (Campos et al., 2020). Resultados preliminares indicam que a associação sinérgica dos processos é capaz de atingir altas taxas de remoção de poluentes, oferecendo uma alternativa sustentável e eficiente para o tratamento de efluentes industriais.

Metodologia utilizada

O presente estudo foi conduzido utilizando efluentes provenientes de uma indústria têxtil localizada na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), caracterizados quanto à turbidez, cor aparente, pH e demanda química de oxigênio (DQO). Inicialmente, os efluentes foram submetidos a testes de jarro para determinar as concentrações ótimas de dois coagulantes: cloreto de polialumínio (PACl) e o coagulante híbrido PGa21Ca, composto por biopolímeros e compostos inorgânicos. Os testes seguiram os procedimentos descritos pela APHA (2012), com agitação rápida (150 rpm) e lenta (50 rpm), seguida de decantação.

Após a etapa de coagulação-flocação, os efluentes foram submetidos a um reator de cavitação hidrodinâmica (HC) acoplado a um sistema de ozonização. O reator foi configurado com um tubo Venturi para promover a formação de cavitação, com velocidade de 20,65 m/s. Um gerador de ozônio com capacidade de produção de 3 g/h foi integrado ao sistema, permitindo a dispersão uniforme do gás na solução. As condições do reator foram ajustadas para uma temperatura de $24 \pm 1^{\circ}\text{C}$.

Os tratamentos foram realizados em duas etapas principais: (i) aplicação isolada da coagulação-flocação e do sistema HC + O₃, e (ii) combinação dos processos. A duração do tratamento no reator HC + O₃ foi inicialmente de 120 minutos, posteriormente ajustada para 40 minutos com coletas a cada 10 minutos. Foram avaliados parâmetros como remoção de cor aparente, turbidez e DQO. O volume de lodo gerado foi medido com cones de Imhoff para cada tipo de coagulante utilizado.

A abordagem experimental adotada permite avaliar não apenas a eficiência técnica dos processos, mas também seus impactos ambientais e econômicos, com foco na minimização da formação de resíduos e no atendimento às normas de descarte.

Resultados e discussão

O tratamento de efluentes têxteis com a combinação de coagulação-flocação e cavitação hidrodinâmica associada à ozonização apresentou resultados significativos na remoção de poluentes, destacando-se como uma abordagem promissora para atender aos padrões de descarte ambiental.

A etapa de coagulação-flocação, utilizando os coagulantes PACl e PGa21Ca, foi eficiente na remoção inicial de turbidez e cor aparente. O coagulante híbrido PGa21Ca destacou-se por formar menos lodo (86% menos que o PACl), o que reduz os custos de manejo de resíduos e impactos ambientais associados. Apesar disso, a remoção de cor e DQO foi mais efetiva quando o PACl foi utilizado.

Quando os efluentes pré-tratados foram submetidos ao reator HC + O₃, a eficiência do sistema foi potencializada, alcançando altas taxas de remoção de cor aparente (94%) e DQO (84%), independentemente do coagulante utilizado na etapa inicial. A cavitação hidrodinâmica associada à ozonização demonstrou uma sinergia notável, promovendo a degradação de compostos recalcitrantes presentes nos efluentes, como corantes sintéticos.

O sistema HC + O₃ apresentou vantagens importantes, como a ausência de formação de lodo adicional e a degradação eficiente de compostos aromáticos, evidenciada pela

ausência de picos de absorção UV a 230 nm após o tratamento. A ozonização, amplificada pela cavitação, proporcionou uma maior dispersão do gás na solução, aumentando a formação de radicais livres altamente reativos, como o radical hidroxila, responsáveis pela oxidação dos poluentes.

A combinação dos processos mostrou-se superior ao uso isolado de coagulação-flocação ou do sistema HC + O₃. Além disso, os parâmetros finais dos efluentes tratados atenderam aos limites estabelecidos pela legislação brasileira, como pH e turbidez, reforçando a viabilidade técnica e ambiental do método.

O estudo destaca o potencial de processos integrados para otimizar a eficiência do tratamento de efluentes industriais, ao mesmo tempo que minimiza impactos ambientais e custos associados. A utilização de PGa21Ca como coagulante, apesar de apresentar menor eficiência isolada, mostrou-se vantajosa em termos de sustentabilidade devido à sua menor geração de resíduos e composição baseada em biopolímeros.

A aplicação dessa metodologia em larga escala requer estudos adicionais sobre custos operacionais, impacto ambiental e escalabilidade, mas os resultados obtidos reforçam sua relevância como alternativa tecnológica para o setor têxtil.

Conclusões / recomendações

O estudo demonstrou que a integração de coagulação-flocação com cavitação hidrodinâmica associada à ozonização é uma alternativa eficaz para o tratamento de efluentes têxteis. A combinação dos processos alcançou altas taxas de remoção de cor aparente (94%), turbidez (97%) e DQO (84%), atendendo aos padrões de descarte da legislação brasileira. Além disso, a redução na formação de lodo ao utilizar o coagulante PGa21Ca, em comparação ao PACI, destacou-se como um fator relevante para minimizar impactos ambientais e custos operacionais.

O uso de cavitação hidrodinâmica associada à ozonização mostrou uma sinergia importante na degradação de compostos recalcitrantes, como os corantes sintéticos, sendo eficaz na remoção de poluentes sem a geração adicional de resíduos sólidos. Essa abordagem também é atrativa por evitar a necessidade de tratamentos adicionais de resíduos, contribuindo para a sustentabilidade do processo.

No entanto, a escolha do coagulante deve considerar os objetivos do tratamento. Enquanto o PACI oferece maior eficiência na remoção de poluentes, sua alta geração de lodo pode representar um entrave técnico e econômico. Por outro lado, o PGa21Ca, com menor impacto ambiental, é uma opção promissora para aplicações onde a sustentabilidade seja uma prioridade.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), por meio do processo 88887.102818/2025-00. Agradecemos à CAPES pela importante contribuição para o desenvolvimento desta pesquisa, que possibilitou a realização deste estudo.

Referências bibliográficas

Abilaji, S., Sathishkumar, K., Narenkumar, J., Alsalhi, M.S., Devanesan, S., Parthipan, P., Muthuraj, B., Rajesekar, A. (2023). Sequential photo electro oxidation and biodegradation of textile effluent: Elucidation of degradation mechanism and bacterial diversity. *Chemosphere*, 331, 138816. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138816>

Ahangarnokolaei, M.A., Attarian, P., Ayati, B., Ganjidoust, H., Rizzo, L. (2021). Life cycle assessment of sequential and simultaneous combination of electrocoagulation and ozonation for textile wastewater treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9, 106251. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106251>

Bahrodin, M.B., Zaidi, N.S., Hussein, N., et al. (2021). Recent Advances on Coagulation-Based Treatment of Wastewater: Transition from Chemical to Natural Coagulant. *Current Pollution Reports*, 7, 379–391. <https://doi.org/10.1007/s40726-021-00191-7>

Campos, V., Pimentel Filho, N.J., Medeiros, T.A.M. (2020). Study of *Bacillus* spp. strains used in the production of γ -polyglutamic acid in submerged culture. *International Food Research Journal*, 27, 427–434. <https://doi.org/10.5555/20203331589>

Castillo-Suárez, J.A., Soto-Cruz, N.O., García-Flores, B.E. (2023). Advances in textile wastewater treatment: Removal of dyes by electrocoagulation. *Chemical Engineering Journal Advances*, 16, 100380. <https://doi.org/10.1016/j.ceja.2023.100380>

Donkadokula, N.Y., Kola, A.K., Kalva, S.K., Uppaluri, R., Banerjee, S. (2020). Textile wastewater treatments: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 18, 1291–1306. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01044-0>

Gogate, P.R., Patil, P.N. (2015). Combined treatment technologies based on cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 25, 60–69. <https://doi.org/10.1016/j.ulsonch.2014.08.010>

Autor principal:

Janaina de Melo Franco Domingos

Coautor(es):

Diego Marques Gouveia - CPF: 049.160.589-76 - diego.marques@unesp.br - UNESP

Valquíria de Campos - CPF: 093.015.978-02 - v.campos@unesp.br - UNESP

Marcelo Antunes Nolasco - CPF: 065.525.058-17 - mnolasco@usp.br - USP

Autor apresentador:

Janaina de Melo Franco Domingos

Confirmo que as informações contidas nesse trabalho são de total responsabilidade de seus autores não cabendo à promotora do evento nenhuma responsabilidade.