



AVALIAÇÃO DO PROCESSO FENTON NO TRATAMENTO DE EFLUENTE INDUSTRIAL TÊXTIL

Davi S. Chevalier¹; Guilherme S. Fabrin¹; Eliane Coser¹; Patrícia B. Pereira¹; André Luis Catto¹

¹Centro de Formação Profissional SENAI Nilo Bettanin
davi.chevalier@aluno.senai.br

Palavras-Chave: Processos oxidativos avançados, degradação, contaminantes orgânicos.

Introdução

A importância da preservação dos recursos hídricos tem gerado esforços tanto da sociedade civil quanto das empresas e dos poderes constituídos para buscar alternativas viáveis que possam reduzir os impactos severos causados pela cadeia de produção industrial e pelo consumo em larga escala. De acordo com o Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o desenvolvimento dos Recursos Hídricos, estima-se que mais de 80% de todas as águas residuais do mundo — incluindo efluentes urbanos, domésticos e industriais — sejam despejados diretamente na natureza sem qualquer tipo de tratamento adequado. Esse imenso volume de descarte contínuo resulta na contaminação generalizada e profunda dos ecossistemas aquáticos, comprometendo seriamente o equilíbrio ecológico essencial de rios e oceanos, além de ameaçar de forma direta a sobrevivência e o bem estar de inúmeras espécies vivas (UNESCO, 2021; ONU-ÁGUA, 2023). Desse imenso volume global acumulado, estima-se que cerca de 1,7 a 1,8 trilhão de metros cúbicos tenham sido despejados diretamente na natureza sem qualquer tipo de tratamento adequado, o que resultou na contaminação generalizada e profunda dos ecossistemas aquáticos do planeta, comprometendo seriamente o equilíbrio ecológico essencial de rios e oceanos, além de ameaçar de forma direta a sobrevivência e o bem-estar de inúmeras espécies vivas (UNESCO, 2024).

Nesse cenário, novas alternativas têm sido estudadas e aplicadas em diferentes setores industriais, destacando-se os métodos avançados de tratamento de águas residuais. Os objetivos centrais desses métodos focam na máxima eficiência de remoção e degradação de poluentes prejudiciais, visando ao estrito cumprimento das normas legais e ambientais vigentes, além da redução dos custos operacionais e de instalação para atrair o investimento das indústrias. Com isso, nas últimas décadas, o uso e o aprimoramento dos Processos Oxidativos Avançados (POAs) têm se destacado expressivamente na pesquisa e no desenvolvimento de tecnologias para o tratamento de efluentes complexos, visto que consistem em alternativas altamente eficazes na mitigação de danos ecológicos mundiais (ARAUJO et al., 2016).

Baseados na geração dos radicais hidroxila ($\text{OH}\cdot$) os Processos Oxidativos Avançados (POAs) utilizam o alto potencial oxidante destas espécies para degradar diferentes classes de



poluentes orgânicos. Esse mecanismo resulta na mineralização completa dos compostos (convertidos em CO₂ e H₂O) ou na formação de intermediários com maior biodegradabilidade (MOTA et al., 2005). O radical hidroxila (OH•) destaca-se como um dos agentes oxidantes mais reativos da química, apresentando um alto potencial padrão de oxidação de 2,8 eV, que é superado unicamente pelo flúor, cujo potencial atinge 3,03 eV (SILVA 2010).

Entre os POAs químicos, o processo Fenton ganha evidência por envolver reações do composto peróxido de hidrogênio (H₂O₂) em solução com íons de ferro, cujo objetivo é produzir espécies altamente oxidantes capazes de degradar ou eliminar diversos poluentes orgânicos. Essa metodologia emprega íons ferrosos (Fe²⁺) ou férricos (Fe³⁺) atuando como catalisadores em condições ácidas, estimulando a quebra da molécula de H₂O₂ para originar radicais hidroxila (HO•), conforme representado na Equação 1 (ARAÚJO *et al.*, 2016).



Diante deste contexto, o presente trabalho visa a investigação da eficácia do processo Fenton na degradação de contaminantes de efluentes sintéticos contendo o corante industrial azul de metileno e sais inorgânicos, visando avaliar sua aplicação na área têxtil. A eficiência dos tratamentos será avaliada por meio de medições de pH, turbidez e condutividade elétrica, realizadas antes e após a aplicação do processo.

Material e Métodos

A metodologia utilizada para o experimento foi realizada em pequena escala, e os ensaios foram realizados usando duas amostras iguais de efluente, alterando apenas a faixa de pH dos ensaios, trabalhando com um pH ácido (3,0) e outro alcalino (9,3). Para o preparo dos efluentes sintéticos utilizou-se dois beakers de 500 mL, onde para cada amostra seguiu-se a seguinte composição: 250 mL de água destilada, 4,0 g de areia sanitária (bentonita) com granulometria entre 1 e 3 mm, 4,0 g de sal marinho iodado - NaCl comercial – (MIRAMAR), e 1 gota de azul de metileno 2%. Em seguida, foi realizado o ajuste do pH dos experimentos, sendo empregadas soluções de H₂SO₄ 0,1 mol/L e NaOH 0,1 mol/L. Para o primeiro ensaio o pH foi mantido ácido, em 3,0 e no segundo foi mantido em meio alcalino (pH 9,3).

Antes de realizar o tratamento das amostras de efluentes sintéticos com o processo de Fenton (Fe²⁺/H₂O₂), foram realizadas análises de condutividade e turbidez dos efluentes, usando o turbidímetro modelo DM-TU da Digimed, e o condutivímetro modelo GC-2000 da GEHAKA; Esta etapa teve como objetivo estabelecer um parâmetro inicial para análises comparativas da eficácia do tratamento de Fenton.

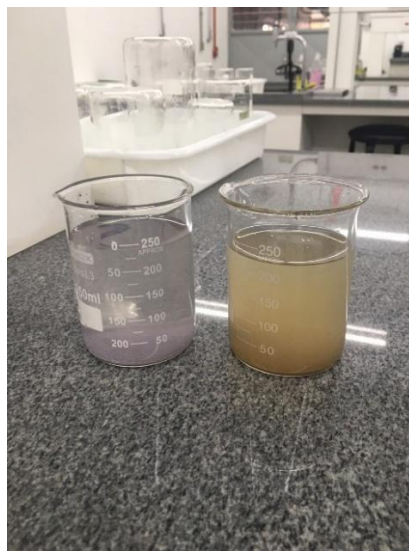
Para o tratamento de cada amostra foi utilizada 0,1 g de FeSO_4 (II) amoniacal hexahidratada P.A., (NEON, sob agitação magnética contínua. Na sequência, adicionou-se 1,0 mL de H_2O_2 35% P.A. (NEON), para a geração dos radicais hidroxila. A reação de degradação correu durante 10 min, e após foram medidas novamente a condutividade e turbidez. Posteriormente, mais análises turbidimétricas foram feitas em intervalos de 5 minutos e 1 hora após a medição inicial em ambas as amostras. Todos as análises foram realizadas em triplicata.

Resultados e Discussão

A amostra 1 com o pH 3, antes da aplicação do processo fenton apresentou na média entre os valores das medições de condutividade o valor de 2,68 mS/cm, e a média entre os valores das medições de turbidez foi de 501,3 NTU.

Já na amostra 2 com o pH 9,3, antes da aplicação do processo fenton apresentou na média entre os valores das medições de condutividade o valor de 4,38 mS/cm, e a média entre os valores das medições de turbidez foi de 587,3 NTU.

Figura 1: Efluente sintético com pH 3,0 (esquerda) e com pH 9,3 (direita) 10 min após a aplicação do processo Fenton.

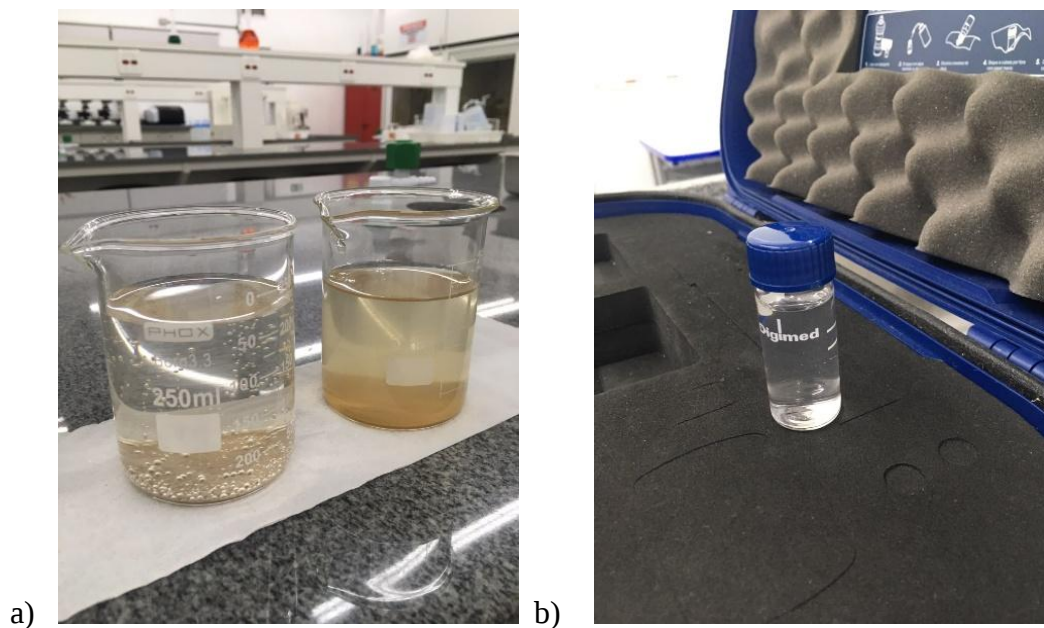


Fonte : Do autor

Observa-se que a Amostra 1, com pH 3,0, mostrou coloração levemente acinzentada após 10 min do tratamento Fenton, já a amostra com pH 9,3 apresentou coloração mais amarelada. Após um tempo de decantação de 5 minutos foram realizadas novas medições de turbidez das Amostras 1 e 2 dos efluentes sintéticos. Para a Amostra 1 (pH 3,0) o valor após 5 min foi de 23,57 NTU, e após 1 hora a turbidez reduziu para 9,71 NTU. Já para a Amostra 2 (pH 9,3) foi de 107,3 NTU, e após 1 hora foi de 18,96 NTU. A Figura 2 apresenta imagens das Amostras 1 (pH 3,0) e 2 (pH 9,3) após 1 hora de tratamento com Fenton.

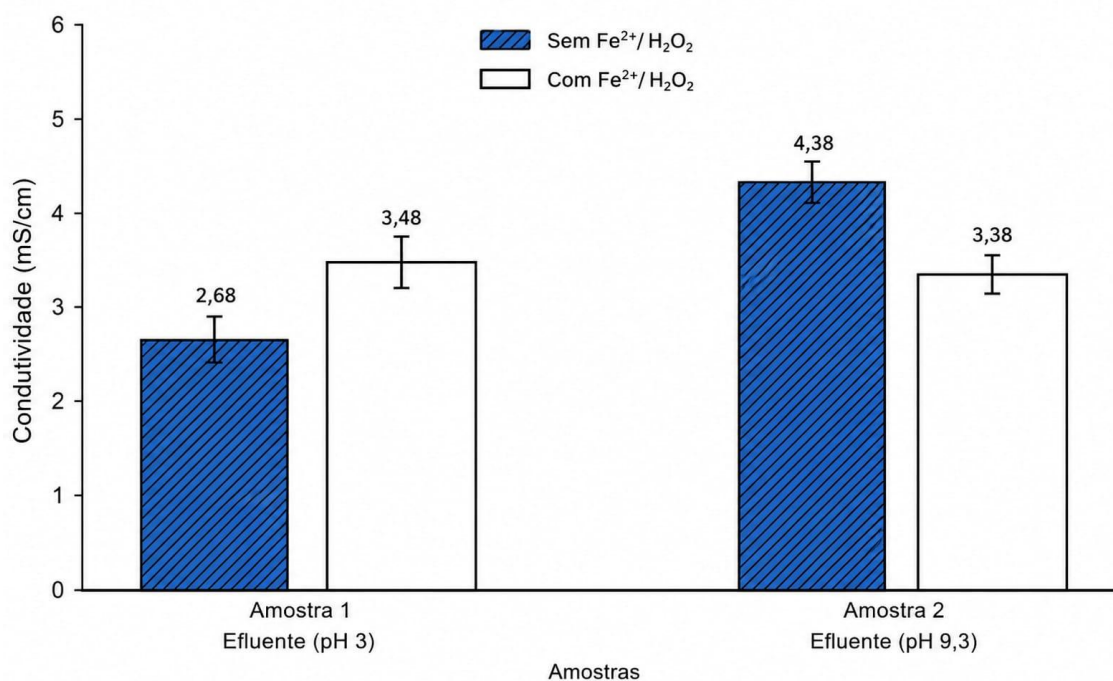


Figura 2: a) Amostras 1 e 2 após 1 hora de aplicação do processo Fenton; b) Amostra 1 após 1 hora de aplicação do processo Fenton.



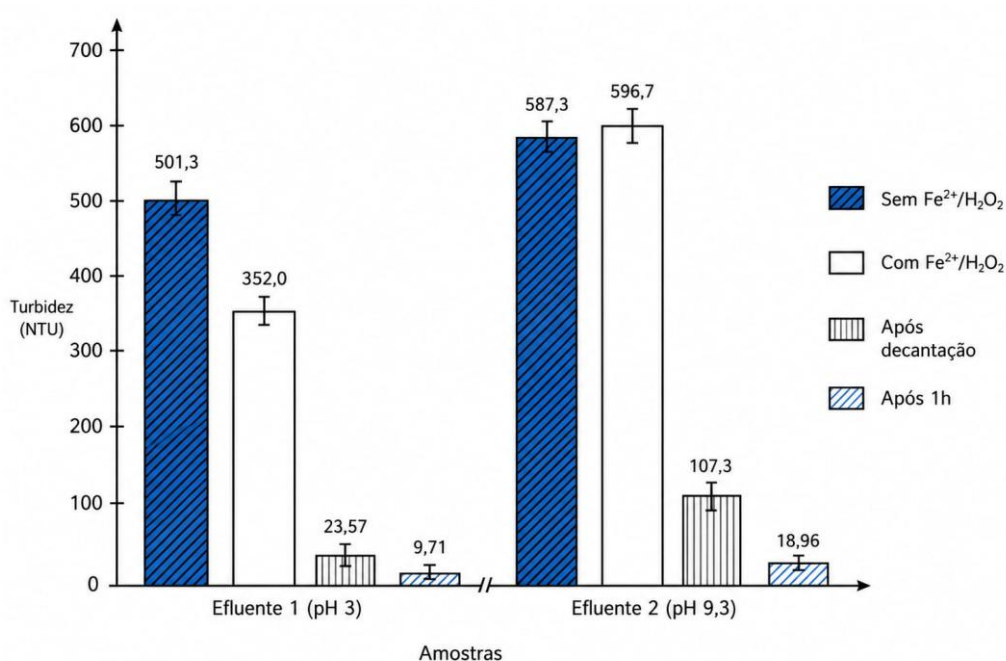
Fonte: Do autor

Figura 3: Resultados de condutividade elétrica dos efluentes em diferentes condições de tratamento.



A Figura 4 mostra os resultados da turbidez das amostras antes e após o tratamento.

Figura 4: Resultados da turbidez dos efluentes em diferentes etapas do tratamento.





A Figura 3 mostra os resultados de condutividade das amostras analisadas. Para a Amostra 1 houve um aumento significativo da condutividade elétrica após o tratamento Fenton. Isso ocorre porque a quebra das moléculas orgânicas grandes gera íons menores e ácidos orgânicos, além da adição de sais de ferro e ajuste de pH. Já para a Amostra 2, com pH alcalino, houve um aumento da condutividade elétrica em relação à Amostra 1 sem o tratamento Fenton, e valores semelhantes de condutividade após o tratamento. Esta diferença está intrinsecamente ligada a variação de pH's, com meios alcalinos apresentando mais atividade iônica devido ao acúmulo de hidroxilas (Lulesa et al., 2022), pois o aumento de pH's para faixas alcalinas tende a tornar mais eficazes processos de eletrocoagulação do que pH's em meios ácidos, assim correlacionando o pH alto com o aumento no valor de condutividade.

Na Figura 4 verificou-se que a amostra com pH 3 teve mais eficácia na redução da turbidez do que a com o pH 9,3 quase o dobro de diferença o que já era esperado já que a literatura indica o pH 3 para o processo fenton (ARAÚJO et al 2016).

Vale ressaltar que a presença de amônia na composição do Sulfato de Ferro (II) Amonical Hexahidratado pode ter alterado o comportamento cinético ou o rendimento da reação em relação ao esperado para o sistema Fenton convencional embora o Sulfato de Ferro (II) Amonical Hexahidratado seja o reagente padrão em titulações por ser altamente estável contra a oxidação pelo ar, no processo Fenton essa estabilidade extra e a presença do NH_4^+ atuam como fatores de interferência (WANG et al. 2023).

Como persistiu-se a condutividade percebe-se que os sais não foram de um todo eliminados isso já era esperado pois o fenton é um processo utilizado para degradar matéria orgânica (INTEGRATED..., 2025). Conforme apontado por **Ioannou et al. (2011)**, embora o processo Fenton apresente alto desempenho na degradação da carga orgânica recalcitrante, a destinação e o reúso seguro do efluente tratado na indústria dependem da associação com etapas adicionais de polimento tecnológico para o controle dos constituintes inorgânicos remanescentes.

Conclusões

Na segunda amostra, posterior à aplicação do processo Fenton, observa-se uma diminuição significativa da condutividade, já a primeira amostra, apresentou um aumento expressivo (Figura 4). Esta diferença está intrinsecamente ligada à variação do pH, uma vez que meios alcalinos apresentam redução na atividade iônica.

A turbidez das amostras está completamente correlacionada as faixas de pH apresentadas, ocorrendo a emulsificação ou desmemulsificação dos efluentes, uma faixa ácida



de pH, como o que temos na primeira amostra (pH 3,0), tende a reduzir as forças elétricas entre as partículas devido ao acúmulo de íons de hidrogênio (H^+), assim comprometendo as duplas camadas elétricas e desmulsificando o efluente, reduzindo notavelmente a turbidez anteriormente observada na figura (figura 4). Em contrapartida, quando observamos efluentes com faixas de pH mais altas (alcalinas), como na segunda amostra (pH 9,3), o processo é inverso, devido ao acúmulo de hidroxilas, acaba por reforçar as ligações negativas do composto desta forma mantendo a turbidez um pouco mais alta (figura 4).

Podemos concluir que o processo fenton é valido para a degradação de materia orgânica e tem melhor desempenho em pH acido, além disso que o processo não é valido para a degradação total dos sais presentes no efluente das industrias têxteis, portanto o fenton não é de um todo valido para a degradar totalmente o efluente da industria têxtil.

Agradecimentos

Ao SENAI Nilo Bettanin pela disponibilidade do laboratório e infra-estrutura para realização do trabalho.

Referências

WWAP (Programa Mundial de Avaliação dos Recursos Hídricos da UNESCO). Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2017: Águas Residuais: O Recurso Inexplorado. Paris: UNESCO, 2017.

WWAP (Programa Mundial de Avaliação dos Recursos Hídricos da UNESCO). Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2021 : O Valor da Água. Paris: UNESCO, 2021.

UNESCO. Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2024: água para a paz e prosperidade. Paris: UNESCO, 2024. Disponível em: Biblioteca Digital da UNESCO.

ONU-ÁGUA. *Blueprint for Acceleration: Sustainable Development Goal 6 Synthesis Report on Water and Sanitation*. Nova York: Nações Unidas, 2023.

UNESCO. *Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2021: O Valor da Água*. Paris: UNESCO, 2021.

UNEP. *The State of the World's Water: Challenges and Opportunities for Sustainable Management*.

Nairobi: United Nations Environment Programme, 2023. Disponível em: PNUMA.

ANA. *Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2023: Relatório Pleno*. Brasília, DF: Agência Nacional de Águas e saneamento Básico, 2023. Disponível em: Portal ANA.

WORLD ECONOMIC FORUM. *The Global Risks Report 2024*. Geneva: **World Economic Forum**, 2024. Disponível em: Fórum Econômico Mundial.



Journal of Applied Science, Taubaté, v. 11, n. 2, p. 387-401, 2016. Disponível em: doi.org. Acesso em: 21 ago. 2026.

ARAÚJO, K. S.; ANTONELLI, R.; GAYDECZKA, B.; GRANATO, A. C.; MALPASS, G. R. P. Processos oxidativos avançados: uma revisão de fundamentos e aplicações no tratamento de águas residuais urbanas e efluentes industriais. **Revista Ambiente & Água**. 2016.

MOTA, A. L. N.; ALBUQUERQUE, L. F.; CHIAVONE FILHO, O.; NASCIMENTO, C. A. O. Aplicação do processo foto-fenton com Luz Negra na Degradação de Fenol. São Paulo: USP, 2005.

QUEIROZ, Marluce Teixeira Andrade; FERNANDES, Claudinei de Melo; ALVIM, Lucas Barbosa; COSTA, Tamires Cristina; AMORIM, Camila Costa de. Produção Mais Limpa: Fenton Homogêneo no Tratamento de Efluentes Têxteis. In: **VIII Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia (SEGeT)**, 2011, Resende. Anais... Resende: AEDB, 2011.

ADÁRIO, Mariana Lima. **Utilização do processo Fenton homogêneo no tratamento de efluentes gerados em cabines de pintura da indústria moveleira**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2014.

G SILVA, E. Uso do Sistema Fenton para Redução de Carga Orgânica do Efluente Hídrico de Indústria de Celulose. In: **43º Congresso e Exposição Internacional de Celulose e Papel**. São Paulo: ABTCP, 2010.

DENG, Y.; ZHAO, R. Advanced Oxidation Processes (AOPs) in Wastewater Treatment. **Current Pollution Reports**, v. 1, n. 3, p. 167–176, 2015.

JUNG, Y. S.; LIM, W. T.; PARK, J.-Y.; KIM, Y.-H. Effect of pH on Fenton and Fenton-like oxidation. **Environmental Technology**, v. 30, n. 2, p. 183-190, 2009.

LULESA, Tofik Gali Aba; BEYENE, Dejene; EBBA, Million; KENEA, Goshu. Water Treatment Using Natural Coagulant and Electrocoagulation Process: A Comparison Study. **International Journal of Analytical Chemistry**, Hindawi, v. 2022, ID 4640927, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/4640927>.

GONÇALVES, B. R.; BORGES NETO, W.; MACHADO, A. E. H.; TROVÓ, A. G. Biodiesel Wastewater Treatment by Coagulation-Flocculation: Evaluation and Optimization of Operational Parameters. **J. Braz. Chem. Soc.**, v. 28, n. 5, p. 800-807, 2017.

FIRAK, Daniele S. *et al.* Ionic Strength Effect in Fenton Reactions in the Presence of Sulfate and Its Influence on the Aqueous Particle Phase. **ACS Earth and Space Chemistry**, [s. l.], v. 9, n. 3, p. 662-670, 2025. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsearthspacechem.4c00362>. Acesso em: 23 ago. 2026.

INTEGRATED electro-Fenton and membrane filtration technologies for effective organic pollutant removal and salt recovery. **Sustainable Environment Research**, [s. l.], v. 35, n. 1, p. 1-12, 2025. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1186/s40068-025-00410-w>. Acesso em: 23 ago. 2026.

IOANNOU, L. A. *et al.* Fenton and biological-Fenton coupled processes for textile wastewater reclamation and reuse. **Desalination**, [s. l.], v. 273, n. 2-3, p. 311-322, 2011..