



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE QUÍMICA DE SÃO CARLOS



Remoção de microplásticos de água e de esgoto pelo processo (foto-)Fenton

Giovanna Maria Masiero

**São Carlos
2025**



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE QUÍMICA DE SÃO CARLOS



Remoção de micropolásticos de água e de esgoto pelo processo (foto-)Fenton

Trabalho de conclusão do curso
de Bacharelado em Química
com Habilitação Tecnológica
Ênfase: Ambiental

Prof. Dr. Eduardo Bessa Azevedo

Giovanna Maria Masiero

São Carlos

2025

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar à minha mãe, que sempre batalhou para me dar o melhor, me deu colo, me incentivou e acreditou em mim mais que eu mesma. Ao meu pai por acreditar sempre em meu potencial e me proporcionar as melhores condições para eu estar aqui. À minha avó por ser o meu grande amor e por me ensinar coisas preciosas sobre a vida. E à minha família como um todo por estarem presentes em minha trajetória, por me ensinarem valores muito importantes e que me tornaram a pessoa que sou hoje em dia. Sem vocês eu não seria absolutamente nada.

Agradeço à Carlota Joaquina, república que fiz, não apenas de morada, mas minha segunda família aqui em São Carlos. Com ela entendi o valor de uma amizade, que apesar de sermos seres tão únicos, existem pessoas que irão te amar e te aceitar do jeitinho que você é, além de ensinarem que a vida é cheia de percalços, mas acompanhada nunca será o suficiente para se deixar abalar.

Agradeço aos meus QuimicAmigos por me ensinarem absolutamente tudo do curso, por me ajudarem quando precisei, por passarem horas e horas ao meu lado e por serem diversão, crises de riso, viagens e muitas memórias incríveis que eu tenho comigo nesses longos anos de faculdade.

Agradeço ao meu orientador e professor, Eduardo Bessa Azevedo, por me proporcionar um aprendizado que me floresceu o gosto pela Química Ambiental, além de ceder a oportunidade de realizar esse trabalho que escrevo hoje. Agradeço aos colegas do Laboratório de Desenvolvimento de Tecnologias Ambientais (LDTAmb) pelos conhecimentos adquiridos e à Vânia por ser o braço direito do Lab e ser uma ótima companhia dos cafézinhos.

Agradeço também aos funcionários da Secretaria de Graduação, em especial à Silvia que sempre me direcionava em todas as minhas tomadas de decisões, e à todos os funcionários da USP, cujo apoio e dedicação permitiram que eu pudesse chegar até aqui.

Agradeço também a Ana, Beatriz e Leonardo, cada um com sua devida importância na minha vida e que me fizeram mais do que bem.

Por fim, agradeço à minha cachorrinha Brisa, por ser meu maior conforto todos os dias.

*“(...) É necessário sempre acreditar que o sonho é possível
Que o céu é o limite e você, truta, é imbatível
Que o tempo ruim vai passar, é só uma fase
Que o sofrimento alimenta mais a sua coragem
Que a sua família precisa de você
Lado a lado se ganhar pra te apoiar se perder
Falo do amor entre homem, filho e mulher
A única verdade universal que mantém a fé
Olho as crianças que é o futuro e esperança
Que ainda não conhecem, não sentem o que é ódio e ganância (...)”*

A Vida É Desafio (Racionais Mc's)

RESUMO

A crescente presença de microplásticos (MPs) em ambientes aquáticos representa um desafio significativo para a gestão ambiental e para a segurança dos sistemas de abastecimento de água. Essas partículas, provenientes tanto da produção direta quanto da fragmentação dos plásticos, são caracterizadas por sua elevada persistência e capacidade de transportar poluentes químicos e patógenos. No contexto da remoção de MPs de águas de abastecimento, os Processos Oxidativos Avançados (POAs), e em especial os processos Fenton e foto-Fenton, têm se destacado como alternativas promissoras devido à sua capacidade de gerar radicais altamente reativos que promovem a degradação de poluentes recalcitrantes. A presente monografia realizou uma revisão sistemática da literatura científica sobre a aplicação de POAs na degradação de MPs em matrizes aquosas. A análise revelou que processos como Fenton clássico, foto-Fenton heterogêneo e variantes inovadoras apresentam elevado potencial para promover alterações morfológicas e químicas nas partículas de MPs, com degradação significativa observada em diversos tipos de polímeros, como polietileno (PE), polipropileno (PP), polietileno tereftalato (PET) e policloreto de vinila (PVC). Estudos laboratoriais amplos evidenciam que a eficiência desses processos depende fortemente das condições experimentais (pH, concentração de reagentes, tipo de radiação), e que a geração de fragmentos menores de MPs e nanoplásticos é uma preocupação recorrente, exigindo um monitoramento rigoroso. A transposição dos POAs para aplicações em escala real ainda enfrenta desafios técnicos, como a otimização dos sistemas catalíticos, o controle da fragmentação das partículas e a avaliação completa dos impactos ecotoxicológicos dos subprodutos gerados. Estratégias como o uso de catalisadores heterogêneos reutilizáveis e a integração de luz solar com os processos oxidativos têm sido apontadas como caminhos promissores para viabilizar a aplicação prática. O trabalho reforça que a superação da crise dos plásticos e dos MPs exige uma abordagem integrada. Avanços tecnológicos precisam ser articulados com políticas públicas eficazes, promoção da economia circular e engajamento da sociedade. Sem essa integração, as soluções tecnológicas isoladas terão impacto limitado diante da complexidade do problema. Assim, esta monografia contribui para consolidar o conhecimento atual sobre a aplicação de POAs na degradação de MPs e para indicar direções futuras de pesquisa e de desenvolvimento tecnológico no campo do tratamento de águas.

Palavras-chave: Microplásticos; POA; Fenton; Degradação; Fragmentação; Microplásticos.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Tipos de polimerização: adição (polietileno) e condensação (náilon 6.6).....11
Figura 2. Tipos de plásticos produzidos mundialmente segundo Geyer et al. (2017).....12

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Síntese dos principais tipos de POAs segundo Trojanowicz et al. (2017).....	13
Tabela 2. Contribuições e lacunas dos POAs para a remoção de MPs (análise conjunta de Ricardo et al., 2021; Shen et al., 2022).....	23
Tabela 3. Comparativo entre parâmetros ideais do processo Fenton segundo Zhang et al. (2019) e aplicações recentes em MPs.....	25
Tabela 4. Comparaçao de estudos com abordagem laboratorial ampla.....	27

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Aspectos relacionados aos estudos de Bule Možar et al. (2024) sobre POAs para degradação de MPs.....	30
Quadro 2. Aspectos relacionados aos estudos de Thirunavukkarasu et al. (2025) sobre o poliestireno.....	31
Quadro 3. Aspectos relacionados aos estudos de Piazza et al. (2022) sobre a viabilidade de utilização do processo foto-Fenton heterogêneo para degradação de MPs.....	33
Quadro 4. Aspectos relacionados aos estudos de Marcelino-Pérez et al. (2021) sobre a viabilidade de utilização do processo foto-Fenton heterogêneo para degradação de MPs.....	34

LISTA DE ABREVIAÇÕES E SIGLAS

ATR-IR – Reflectância Total Atenuada em Espectroscopia de Infravermelho

EPS – Poliestireno expandido

ETA - Estação de Tratamento de Água

ETE - Estação de Tratamento de Esgoto

FTIR – Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier

HPLC-HRMS – Cromatografia Líquida de Alta Eficiência acoplada à Espectrometria de Massas de Alta Resolução

LDPE – Polietileno de Baixa Densidade

MFs - Microfibras

MPs - Microplásticos

PE - Polietileno

PET - Polietileno Tereftalato

PP – Polipropileno

PP&A - Polifタルамida

POAs - Processos Oxidativos Avançados

PS – Poliestireno

PUR – Poliuretano expandido

PVC - Policloreto de Vinila

RMN - Ressonância Magnética Nuclear

UV – Ultravioleta

UVA – Ultravioleta A

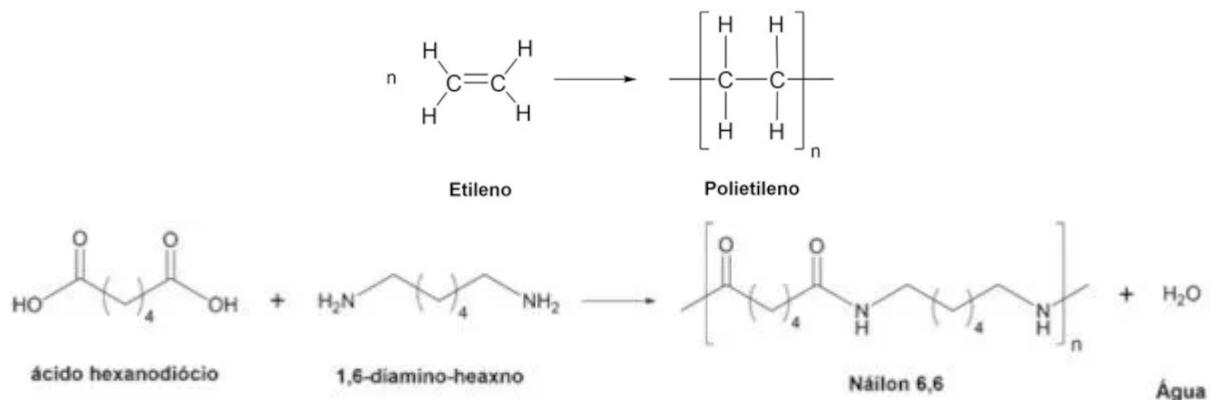
SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
2. OBJETIVO.....	19
2.1 Objetivo geral	19
2.2 Objetivo específico	19
3. METODOLOGIA	20
3.1 Estratégia de busca	20
3.2 Critérios de inclusão e exclusão	20
3.3 Análise dos dados	21
3.4 Limitações do estudo	21
4. DISCUSSÃO.....	22
4.1 Revisão geral sobre POAs e MPs.....	22
4.2 Estudos com abordagem experimental laboratorial ampla	25
4.3 Estudos com abordagem Fenton/Foto-Fenton com aplicação realista.....	28
4.4 Estudos com abordagem Foto-Fenton heterogênea ou inovadora	30
5. CONCLUSÃO.....	36
6. REFERÊNCIAS.....	38

1. INTRODUÇÃO

O plástico, material presente em praticamente todos os aspectos da vida moderna, é composto por macromoléculas chamadas polímeros, formadas a partir da repetição de unidades estruturais denominadas monômeros (Figura 1). Esses monômeros são geralmente derivados do petróleo, como o etileno e o propeno, e, ao serem submetidos a processos químicos como a polimerização, formam cadeias longas e estáveis que resultam em materiais com diversas propriedades físico-químicas desejáveis. Essa estrutura química, altamente resistente à degradação, é justamente o que torna o plástico um material tão versátil e ao mesmo tempo problemático do ponto de vista ambiental (Geyer et al., 2017).

Figura 1 – Tipos de polimerização: adição (polietileno) e condensação (náilon 6.6)



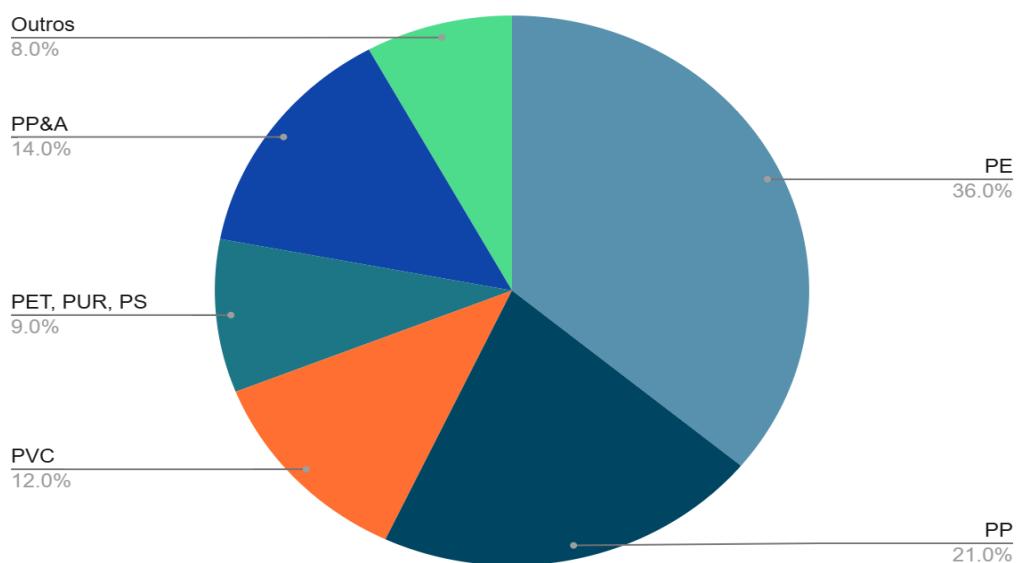
Fonte: Adaptado de Brasil Escola¹.

O desenvolvimento desse material versátil data do século XIX, quando os primeiros polímeros semissintéticos, como a nitrocelulose e a celulose começaram a substituir recursos naturais como a goma-laca e o marfim. Mais precisamente em 1862, foi desenvolvido pelo químico inglês Alexander Parkes um plástico semissintético, a partir da celulose, um material patenteado como Parkesina. Porém, foi apenas em 1907 que a Baquelita foi sintetizada por Leo Baekeland, considerado o primeiro plástico completamente sintético, abrindo caminho para uma revolução em diversos setores industriais (Conceição et al., 2019; Geyer et al., 2017; National Geographic Brasil, 2024).

¹ Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/o-que-e/quimica/o-que-e-polimerizacao.htm>. Acessado em: 21 jun. 2025.

Comercial e estruturalmente, os plásticos se destacam pela leveza, resistência, durabilidade, flexibilidade e baixo custo. Essas características os tornam ideais para aplicações em setores diversos, como: embalagens, construção civil, eletrônicos, vestuário e setor automotivo. Os polímeros mais utilizados são: polietileno (PE), polipropileno (PP), policloreto de vinila (PVC), polietileno tereftalato (PET), poliestireno (PS), poliuretano expandido (PUR) e poliftalamida (PP&A). Eles compõem cerca de 90% da produção plástica mundial. A combinação com aditivos, tais como plastificantes, retardantes de chama e corantes, permite a personalização dos materiais para finalidades específicas, ampliando ainda mais sua aplicabilidade (Geyer et al., 2017).

Figura 2 – Tipos de plásticos produzidos mundialmente segundo Geyer et al. (2017)



Fonte: Autoria própria.

No setor industrial, o plástico é insubstituível em muitos processos e produtos. Sua presença é indispensável em tecnologias médicas, sistemas de armazenamento e transporte de alimentos, componentes automotivos e eletrônicos, entre outros. A produção em larga escala tornou-se exponencial desde a década de 1950, impulsionada pelo modelo de consumo acelerado e pelo conceito de obsolescência programada. Esse contexto levou à produção acumulada de mais de 9 bilhões de toneladas de plástico até 2015, com projeções que indicam o dobro desse volume até 2050 caso não haja mudanças significativas na cadeia produtiva e de descarte.

Entretanto, os mesmos atributos que tornam o plástico vantajoso, como sua durabilidade e resistência à degradação, também são os responsáveis por sua persistência no meio ambiente. Estima-se que apenas cerca de 10% do plástico produzido tenha sido reciclado, enquanto o restante foi incinerado ou descartado, acumulando-se em aterros sanitários, oceanos e outros ecossistemas (Conceição et al., 2019; Geyer et al., 2017).

O descarte inadequado gera sérios impactos ambientais, como a contaminação da fauna marinha por microplásticos (MPs), a poluição do solo e da água, além de possíveis riscos à saúde humana, dado o acúmulo dessas partículas na cadeia alimentar. O Brasil está entre os maiores produtores de resíduos plásticos do mundo, porém recicla uma fração muito pequena desse volume (Geyer et al., 2017).

Nos últimos anos, os microplásticos, fragmentos plásticos com menos de 5 milímetros, têm ganhado destaque nas pesquisas ambientais e na mídia internacional devido à sua presença disseminada em diferentes ambientes e organismos. Essas partículas são oriundas da degradação de resíduos plásticos maiores ou são intencionalmente produzidas em tamanhos reduzidos para uso em produtos como cosméticos e abrasivos industriais. Estima-se que entre 4,8 e 12,7 milhões de toneladas de plástico sejam lançadas anualmente nos oceanos, sendo que mais de 80% desse volume provém de fontes terrestres. Devido à sua leveza, resistência química e facilidade de dispersão, os microplásticos estão presentes em diversos ecossistemas, incluindo águas subterrâneas, solos agrícolas e até mesmo em organismos vivos, como peixes, aves e seres humanos (Geyer et al., 2017).

Essas micropartículas representam uma ameaça significativa à saúde ambiental e pública. Estudos têm demonstrado a presença de microplásticos em tecidos humanos e animais, sugerindo que essas partículas podem atravessar barreiras biológicas e provocar efeitos tóxicos. Além disso, os MPs participam dos processos de bioacumulação e biomagnificação, através de substâncias tóxicas que podem ser transferidas para o organismo humano, desempenhando o papel de transportadores desses poluentes (Piazza et al., 2022). De maneira semelhante, os microplásticos também podem servir como veículos para a disseminação de patógenos, favorecendo a introdução de bactérias e vírus em novos ambientes e cadeias tróficas. Isso se deve, em grande parte, às suas propriedades físico-químicas únicas, que favorecem a adsorção de poluentes orgânicos e metais potencialmente tóxicos, além da possível liberação de aditivos tóxicos originalmente incorporados durante sua fabricação (Ricardo et al., 2021).

Os microplásticos podem ser classificados como primários ou secundários, de acordo com sua origem. Os primários são partículas plásticas produzidas intencionalmente em pequenas dimensões, como pellets de resina, microesferas cosméticas e abrasivos industriais. Já os secundários resultam da fragmentação de plásticos maiores, durante o uso de produtos como tecidos sintéticos, tintas e pneus, ou após sua liberação no ambiente. A taxa de formação dessas partículas depende de fatores ambientais e mecânicos. Essa distinção é importante para identificar fontes e definir estratégias de mitigação (GESAMP, 2015).

Em resposta a essa crescente preocupação, diversos métodos têm sido propostos para a remoção de MPs do ambiente, envolvendo processos físicos, químicos e biológicos. No entanto, tais abordagens ainda enfrentam desafios, especialmente na eliminação de partículas muito pequenas (inferiores a 10 µm) que escapam dos sistemas convencionais de tratamento. Além disso, grande parte desses métodos apenas separam os microplásticos do meio sem, de fato, promover a sua degradação (Ricardo et al., 2021).

Nesse contexto, os Processos Oxidativos Avançados (POAs) surgem como uma alternativa promissora para o tratamento de MPs. Definidos como um conjunto de tecnologias capazes de gerar espécies altamente reativas, principalmente radicais hidroxila ($\bullet\text{OH}$), em quantidades suficientes para promover a purificação da água (Glaze et al., 1987), esses processos se caracterizam por elevada reatividade, ampla aplicabilidade e baixa seletividade. Desenvolvidos a partir da década de 1980, os POAs empregam agentes oxidantes como radicais hidroxila, sulfato ou cloro, que atuam na quebra de ligações químicas resistentes presentes em diversos poluentes, incluindo polímeros. Por meio da combinação de luz, calor, catalisadores ou plasma, esses processos não apenas removem os contaminantes, mas também os transformam em subprodutos menos tóxicos ou em compostos inofensivos, como água e dióxido de carbono. Além disso, destacam-se pela sua eficácia na degradação de poluentes orgânicos refratários e pelo seu potencial de complementar outras etapas de tratamento ambiental, como a biodegradação (Glaze et al., 1987).

Diversas configurações de POAs têm sido desenvolvidas e aplicadas em sistemas de tratamento ambiental, cada uma com mecanismos específicos de geração de espécies oxidantes e vantagens operacionais distintas. A Tabela 1 apresenta uma síntese dos principais tipos de

POAs, seus mecanismos de atuação e características operacionais, com base na concepção estabelecida por Trojanowicz et al. (2017). Este panorama fornece uma base conceitual importante para compreender as estratégias adotadas em estudos voltados à degradação de microplásticos.

Tabela 1 – Síntese dos principais tipos de POAs segundo Trojanowicz et al. (2017)

Tipo de POA	Mecanismo principal	Agentes ou condições envolvidas
UV/Peróxido de Hidrogênio (UV/H ₂ O ₂)	Geração de radicais hidroxila (•OH) por fotólise	Radiação UV (254 nm), peróxido de hidrogênio (H ₂ O ₂)
Fenton e Foto-Fenton	Reação de Fe ²⁺ com H ₂ O ₂ formando •OH	Fe ²⁺ /Fe ³⁺ , H ₂ O ₂ , pH ≈ 3; radiação UV no caso da Foto-Fenton
UV/Persulfato (UV/S ₂ O ₈ ²⁻)	Geração de radicais sulfato (SO ₄ • ⁻) por fotólise	Radiação UV, persulfato de potássio ou amônio
Fotocatálise (TiO ₂ /UV)	Formação de pares elétron/buraco e geração de •OH	TiO ₂ , radiação UV (254 ou 365 nm)
UV/Iodeto (UV/I ⁻)	Formação de elétrons hidratados (e _a q ⁻) por excitação	Iodeto, radiação UV (254 nm), ambiente anaeróbico
Sonólise (Ultrassom)	Formação de radicais por cavitação acústica	Ondas ultrassônicas (>20 kHz)
Radiação ionizante	Geração de e _a q ⁻ , •OH e outros radicais por radiação	Raios gama, feixe de elétrons acelerados
Ozônio (O ₃) e O ₃ /UV	Oxidação direta e formação de •OH	Gás ozônio, UV, pH alcalino
Fotocatálise com semicondutores alternativos	Geração de h ⁺ e •OH com maior seletividade	In ₂ O ₃ , Ga ₂ O ₃ , SiC/Grafeno + radiação UV

Fonte: Autoria Própria.

Complementando esta visão panorâmica, Oturan e Aaron (2014) apresentam uma classificação abrangente dos POAs, agrupando-os em diferentes categorias conforme o tipo de mecanismo empregado para a geração de espécies oxidantes. A seguir, são descritos os principais grupos de POAs, destacando suas características e potencial de aplicação em diferentes cenários de tratamento de água e efluentes.

Os autores classificam os POAs em quatro grandes categorias: processos químicos, fotoquímicos, sonoquímicos e eletroquímicos. Entre os processos químicos, destacam-se o Fenton clássico (Fe²⁺/H₂O₂), reações Fenton-like e a combinação de ozônio com peróxido de hidrogênio, que potencializa a produção de •OH. No grupo dos processos fotoquímicos, incluem-se a combinação de peróxido de hidrogênio com radiação UV (H₂O₂/UV), ozônio com

UV (O_3/UV), o processo foto-Fenton ($H_2O_2/Fe^{2+}/UV$), com especial destaque para a variante solar, e a fotocatálise heterogênea mediada por catalisadores como TiO_2 ativados por luz UV. Os processos sonoquímicos utilizam cavitação acústica para gerar microbolhas que colapsam, propiciando a formação de radicais oxidantes, com combinações possíveis com Fenton ou fotocatálise. Por fim, os processos eletroquímicos, que vêm ganhando grande destaque, incluem o processo Eletro-Fenton, no qual H_2O_2 e Fe^{2+} são gerados eletroquimicamente e, na superfície do anodo, ocorre diretamente a degradação de poluentes. Essa diversidade de abordagens permite que os POAs sejam adaptados a diferentes tipos de contaminantes e matrizes de tratamento, sendo considerados altamente versáteis e eficazes no enfrentamento de poluentes emergentes (Oturan; Aaron, 2014).

Entre as diversas abordagens que compõem os POAs, os processos da família Fenton possuem um papel de destaque, tanto pela simplicidade operacional quanto pela elevada eficiência na geração de radicais hidroxila. Dentre os processos químicos listados por Oturan e Aaron (2014), o Fenton clássico e o foto-Fenton têm sido amplamente aplicados e estudados no contexto do tratamento de águas e efluentes, consolidando-se como tecnologias de referência no campo da oxidação avançada. A seguir, são detalhados os princípios reacionais e as principais características dessas duas abordagens, com ênfase nos mecanismos responsáveis pela formação das espécies oxidantes e no seu potencial para a degradação de MPs.

Os Processos Fenton e foto-Fenton, descritos por Babuponnusami e Muthukumar (2013), constituem abordagens importantes no campo dos POAs, destacando-se pela elevada capacidade de gerar radicais hidroxila ($\bullet OH$) que são espécies reativas altamente oxidantes. No processo Fenton clássico, a geração de radicais se baseia na decomposição catalítica do peróxido de hidrogênio (H_2O_2) em meio ácido pelos íons ferrosos (Fe^{2+}) (Equação 1).



O Fe^{3+} formado pode ser reduzido de volta a Fe^{2+} por espécies redutoras presentes no sistema, mas em sistemas homogêneos essa regeneração é limitada, o que pode restringir a eficiência do processo. O controle rigoroso do pH (~3) é essencial para maximizar a geração de $\bullet OH$ e minimizar a formação de espécies menos reativas, como complexos de Fe^{3+} (Oturan; Aaron, 2014).

Já o processo foto-Fenton, segundo Pignatello, Oliveros e MacKay (2006), introduz a radiação (UV ou visível) no sistema, promovendo a fotoredução de Fe^{3+} a Fe^{2+} , o que aumenta o ciclo catalítico e sustenta a produção contínua de $\cdot\text{OH}$ (Equação 2). Caso seja usada luz UV-C, a fotólise direta do próprio H_2O_2 também contribui para a geração adicional de radicais $\cdot\text{OH}$ (Equação 3).



Assim, no processo foto-Fenton, há uma atuação simultânea de reações químicas e fotoquímicas, o que resulta em uma taxa muito superior de produção de radicais e, portanto, em uma eficiência de degradação aumentada em relação ao Fenton clássico. Além disso, o uso de radiação solar tem sido explorado como uma estratégia sustentável e economicamente viável, especialmente para aplicações em países de clima tropical e subtropical (Oturan; Aaron, 2014). O processo foto-Fenton também apresenta a vantagem de reduzir o acúmulo de Fe^{3+} , que pode precipitar como óxidos-hidróxidos férricos em processos homogêneos.

Considerando-se essas características operacionais e vantagens reacionais, os processos Fenton e foto-Fenton vêm se consolidando como ferramentas promissoras não apenas para o tratamento de efluentes industriais convencionais, mas também para o enfrentamento de desafios ambientais emergentes. Em particular, sua aplicação na degradação de MPs tem atraído crescente interesse da comunidade científica, dada a capacidade desses processos de promoverem modificações estruturais e oxidativas nas partículas poliméricas. A seguir, discute-se o potencial dos POAs na mitigação da poluição por MPs, bem como a necessidade de integrar essas tecnologias a estratégias mais amplas de gestão e políticas públicas voltadas para o enfrentamento da crise global dos plásticos (Matavos-Aramyan, 2024).

Nesse contexto mais amplo, torna-se evidente que, apesar dos avanços tecnológicos alcançados no campo dos POAs, a superação da crise dos plásticos exige uma abordagem integrada. Essa abordagem deve combinar soluções técnicas com políticas públicas eficazes e ações coordenadas em diferentes âmbitos da sociedade, pois diante do crescente acúmulo de plásticos e microplásticos nos ecossistemas e das limitações dos métodos tradicionais de gestão de resíduos, torna-se necessário o investimento em tecnologias avançadas e na formulação de políticas públicas que promovam a redução na produção de plásticos descartáveis, incentivem a reciclagem e ampliem o tratamento eficaz desses micropoluentes (Matavos-Aramyan, 2024).

A ausência de políticas públicas eficazes, aliada à infraestrutura precária de coleta seletiva e ao desinteresse econômico na reciclagem, agrava ainda mais a situação. Embora iniciativas como a economia circular e pesquisas em polímeros recicláveis estejam em andamento, os avanços ainda são tímidos frente à escala do problema. Soluções sustentáveis exigem articulação entre governos, setor produtivo e sociedade civil, promovendo a redução do consumo de plásticos descartáveis, o desenvolvimento de alternativas biodegradáveis e a implementação de uma logística reversa obrigatória relacionada à coleta desse material nocivo ao meio ambiente. Diante disso, é urgente reavaliar o papel do plástico na sociedade. Seu valor enquanto material é inegável, mas sua persistência ambiental demanda uma gestão responsável e inovadora. A transição para uma economia mais sustentável depende do propósito político, investimentos em tecnologia e da conscientização coletiva sobre os impactos do consumo desenfreado (Matavos-Aramyan, 2024).

2. OBJETIVO

2.1 Objetivo geral

Realizar uma revisão sistemática da literatura científica sobre a remoção de microplásticos em água/esgoto pelo processo (foto-)Fenton.

2.2 Objetivos Específicos

- (i) Identificar e compilar estudos da literatura sobre a presença e os impactos ambientais de microplásticos em água/esgoto;
- (ii) Avaliar e correlacionar os métodos Fenton e foto-Fenton de degradação dos MPs em água/esgoto; e
- (iii) Realizar uma análise crítica sobre os artigos coletados para aprimorar informações da literatura científica sobre a degradação de MPs presentes em água/esgoto.

3. METODOLOGIA

A presente pesquisa caracteriza-se como um estudo de revisão bibliográfica sistemática, de natureza qualitativa, com enfoque descritivo e exploratório. Seu objetivo foi levantar, analisar e sintetizar o conhecimento científico disponível sobre a aplicação de Processos Oxidativos Avançados (POAs) na degradação de microplásticos (MPs) presentes em matrizes aquosas, com destaque para a eficiência dos processos, variáveis operacionais, produtos de transformação e implicações toxicológicas.

3.1 Estratégia de busca

A coleta de dados foi realizada por meio de pesquisas em bases de dados científicas reconhecidas, como Web of Science, ScienceDirect, Google Scholar e PubMed entre os meses de março e junho de 2025. A seleção inicial considerou artigos publicados no período de 2017 a 2025, nos idiomas português, inglês e espanhol. Os descritores utilizados para a busca foram combinados por idiomas em inglês e português:

- "Plástico" e "Plastic"
- "Microplásticos" e "Microplastics"
- "Advanced Oxidation Processes"
- "POAs" e "AOPs"
- "Process Fenton"
- "Process Photo-Fenton"
- "Degradation of Microplastics by process (Photo-)Fenton"

3.2 Critérios de inclusão e exclusão

Foram incluídos na revisão os estudos que:

- (i) Abordaram experimentação ou revisão teórica sobre a degradação de MPs por POAs;
- (ii) Informaram características dos MPs (tipo de polímero, tamanho, forma, origem);

- (iii) Detalharam o processo oxidativo utilizado (Fenton, foto-Fenton, ozonização, fotocatálise heterogênea); e
- (iv) Apresentaram dados como: tempo de reação, pH, tipo de radiação, rendimento de remoção ou degradação, identificação de subprodutos, análises toxicológicas.

Foram excluídos estudos duplicados, de acesso restrito, sem revisão por pares ou que tratassesem de MPs em contextos não relacionados à remediação ambiental em sistemas aquáticos.

3.3 Análise dos dados

Os artigos selecionados foram lidos na íntegra e seus dados extraídos conforme um roteiro sistemático, abrangendo: tipo e características do MP analisado; processo oxidativo empregado e suas condições operacionais; eficiência de remoção, degradação ou mineralização; formação e identificação de produtos de transformação; efeitos toxicológicos antes e após o tratamento; viabilidade e limitações da aplicação prática do processo. As informações foram organizadas em tabelas comparativas e quadros de síntese, a fim de facilitar a análise crítica e a visualização das principais tendências, lacunas e perspectivas futuras relacionadas ao tema.

3.4 Limitações do estudo

Esta revisão está limitada ao acesso às bases de dados mencionadas e à disponibilidade de publicações nos idiomas especificados. Além disso, a diversidade metodológica entre os estudos (diferentes polímeros, métodos analíticos e condições experimentais) impediu a realização de uma análise quantitativa, restringindo a comparação direta entre os resultados.

4. DISCUSSÃO

4.1 Revisão geral sobre POAs e MPs

A presença de MPs em ambientes aquáticos representa um desafio crescente para o setor de saneamento e para a proteção dos ecossistemas. Além de sua persistência física, os MPs atuam como vetores de poluentes químicos, incluindo metais potencialmente tóxicos, pesticidas, fármacos e compostos orgânicos diversos, aumentando seu potencial de toxicidade e dificultando sua remoção em processos convencionais de tratamento. Nesse contexto, os POAs vêm sendo propostos como alternativas promissoras, tanto para a degradação das partículas plásticas quanto para a remoção de poluentes adsorvidos em suas superfícies.

A revisão crítica conduzida por Ricardo et al. (2021) destaca que os POAs apresentam elevada eficiência na degradação de MPs em condições controladas, com taxas de remoção que podem alcançar até 95%. No entanto, o artigo evidencia que a maioria dos estudos foi realizada em sistemas simplificados de laboratório, com poucas aplicações em condições realistas ou em escala piloto. Além disso, reforça-se a necessidade de se considerar fatores como o envelhecimento dos MPs, que altera sua interação com poluentes, e a realização de testes sistemáticos de toxicidade para os subprodutos gerados durante os processos oxidativos.

Complementarmente, Shen et al. (2022) analisaram as POAs aplicados à remoção de MPs, apontando tanto os avanços obtidos quanto as limitações que ainda impedem sua aplicação plena. O artigo enfatiza que, embora os POAs sejam capazes de degradar parcialmente ou totalmente os MPs, a eficiência do processo depende fortemente das condições operacionais (tipo de POA, pH, temperatura, concentração de reagentes) e das características dos MPs (polímero, tamanho, grau de envelhecimento). Além disso, alertam para o risco de formação de nanoplasticos durante os tratamentos, uma preocupação que reforça a importância de desenvolver métodos que evitem a fragmentação excessiva das partículas.

Ambas as revisões ressaltam que a transposição dos resultados laboratoriais para aplicações em estações de tratamento de água e esgoto (ETA e ETE) exige estudos mais robustos de viabilidade técnica, econômica e ambiental. Também apontam a escassez de protocolos

padronizados para avaliação da eficiência e da segurança dos processos, o que dificulta a comparação entre diferentes estudos e tecnologias.

Os avanços observados em estudos recentes, como os de Piazza et al. (2022), Ortiz et al. (2022), Santos et al. (2023) e Možar et al. (2024), comprovam as perspectivas delimitadas por Ricardo et al. (2021) e Shen et al. (2022). A aplicação de sistemas com o processo foto-Fenton heterogêneo, com variantes combinadas com ozonização e com o processo Fenton tradicional otimizado têm demonstrado resultados promissores na degradação de MPs e na redução da toxicidade dos efluentes tratados. Contudo, a possibilidade de geração de nanoplasticos e a necessidade de monitoramento de subprodutos tóxicos permanecem como desafios a serem enfrentados.

A Tabela 2 sintetiza as principais contribuições e lacunas identificadas por Ricardo et al. (2021) e Shen et al. (2022), que orientam o desenvolvimento futuro de tecnologias de POAs para o tratamento de MPs.

Tabela 2 – Contribuições e lacunas dos POAs para a remoção de MPs (Ricardo et al., 2021; Shen et al., 2022)

Aspecto	Contribuições consolidadas	Lacunas e desafios
Remoção de MPs	POAs demonstram capacidade de degradar partículas plásticas e reduzir sua massa e tamanho	Escassez de estudos em condições ambientais reais e em escala piloto
Remoção de poluentes adsorvidos	Potencial para degradação conjunta de MPs e contaminantes associados	Necessidade de aprofundar a compreensão dos mecanismos e da cinética de remoção
Segurança ambiental	Indicações de redução da toxicidade após POAs, em alguns estudos	Falta de testes sistemáticos de toxicidade dos subprodutos e risco de formação de nanoplasticos
Influência do envelhecimento dos MPs	MPs envelhecidos interagem de forma diferenciada nos processos oxidativos	Poucos estudos exploram o comportamento de MPs envelhecidos ou realisticamente representativos do ambiente
Padronização metodológica	Avanços em protocolos analíticos	Necessidade urgente de padronização para viabilizar a comparação e replicação de estudos

Fonte: Autoria própria

Em adição, a revisão conduzida por Zhang et al. (2019) oferece um panorama abrangente sobre as potencialidades e limitações dos processos Fenton e foto-Fenton, que são amplamente utilizados no tratamento de efluentes contendo poluentes orgânicos e vêm sendo cada vez mais explorados como alternativas para a degradação de MPs em sistemas aquosos.

De acordo com Zhang et al. (2019), o processo Fenton convencional apresenta alta eficiência na mineralização de poluentes refratários, porém requer condições de operação bastante restritas, como pH ácido (entre 2 e 4) e controle rigoroso da dosagem de peróxido de hidrogênio e íons ferrosos. Ademais, a formação de lodo férrico constitui um subproduto indesejável, dificultando a aplicação em larga escala. Como alternativas, o uso de sistemas foto-Fenton, eletro-Fenton e catalisadores heterogêneos tem sido proposto para melhorar a eficiência e reduzir a geração de resíduos.

Tais limitações e estratégias de otimização são claramente refletidas nos estudos recentes sobre degradação de MPs. Em diversos trabalhos analisados, observa-se que a operação em pH ácido continua sendo uma condição necessária para garantir a geração eficiente de radicais hidroxila ($\bullet\text{OH}$), como relatado por Ortiz et al. (2022), Santos et al. (2023) e Piazza et al. (2022). A concentração de peróxido de hidrogênio, frequentemente aplicada em múltiplas dosagens ou em concentrações elevadas ($> 500 \text{ mg/L}$), visa compensar a resistência intrínseca dos polímeros plásticos, conforme Možar et al. (2024) e Shen et al. (2022).

Além disso, o uso de catalisadores heterogêneos tem sido uma abordagem recorrente para mitigar a geração de lodo, com bons resultados relatados, como no estudo de Piazza et al. (2022), que também avaliou positivamente a ausência de toxicidade dos subprodutos gerados. Por outro lado, a literatura destaca que mesmo processos otimizados enfrentam limitações adicionais no caso dos MPs, como o risco de formação de nanoplásticos, aspecto pouco abordado em trabalhos anteriores focados em efluentes orgânicos.

A Tabela 3 resume um comparativo entre as recomendações de parâmetros ideais segundo Zhang et al. (2019) e as condições frequentemente adotadas nos estudos recentes com MPs.

Tabela 3 – Comparativo entre parâmetros ideais do processo Fenton segundo Zhang et al. (2019) e aplicações recentes em MPs

Parâmetro	Valores/ recomendações	Observações em estudos recentes com MPs
pH ótimo	2 – 4	pH \leq 3 utilizado na maioria dos estudos (Ortiz et al., 2022; Santos et al., 2023; Piazza et al., 2022)
[H ₂ O ₂]	Ajustada conforme o poluente; o excesso sequestra •OH	Concentrações elevadas e/ou múltiplas dosagens (> 500 mg/L) frequentemente aplicadas (Možar et al., 2024)
[Fe ²⁺]	5 – 10 mg/L; catalisadores heterogêneos recomendados	Uso variado: Fe homogêneo (Ortiz et al., 2022) e heterogêneo (Piazza et al., 2022)
Tipo de processo recomendado	Preferência por foto-Fenton e eletro-Fenton	A maioria dos estudos com MPs adota foto-Fenton heterogêneo como abordagem principal
Principais limitações	Acidificação necessária; geração de lodo; custo	Persistência das mesmas limitações + risco de nanoplasticos (Shen et al., 2022; Kim et al., 2022)

Fonte: Autoria Própria

4.2 Estudos com abordagem experimental laboratorial ampla

Entre os avanços recentes na aplicação de Processos Oxidativos Avançados para a degradação de microplásticos, destacam-se estudos com abordagem experimental laboratorial ampla, que exploram diferentes combinações de processos, condições operacionais e tipos de MPs. Tais trabalhos são essenciais para compreender os mecanismos de degradação e as limitações práticas dos POAs, além de fornecer subsídios para a transição dos resultados laboratoriais para aplicações em maior escala.

O estudo conduzido por Ortiz et al. (2022) exemplifica bem essa abordagem, ao investigar a degradação de diferentes tipos de MPs (PET, PE, PVC, PP e EPS) utilizando o processo

Fenton clássico. Os autores avaliaram parâmetros como perda de massa das partículas, modificações na superfície e potencial mineralização dos MPs. Observou-se que os polímeros apresentaram comportamentos distintos frente ao processo oxidativo: PET e EPS foram os mais reativos, com degradação significativa, enquanto PE e PP mostraram maior resistência. Além disso, os resultados indicaram que, embora o processo Fenton promova degradação superficial e geração de fragmentos menores, a mineralização completa dos MPs não foi alcançada, destacando a necessidade de processos complementares para uma remoção mais eficaz.

De forma semelhante, Santos et al. (2023) realizaram uma investigação abrangente envolvendo múltiplos POAs (Fenton, foto-Fenton, eletro-Fenton, ozonização e fotocatálise heterogênea) aplicados à degradação de microplásticos e microfibras (MFs). O estudo testou diferentes condições operacionais — como temperatura elevada ($>100^{\circ}\text{C}$), pH ácido e concentrações variadas de reagentes — em MPs de poliamidas e outros polímeros. Os resultados demonstraram que a combinação de POAs com condições severas promoveu degradação expressiva, com redução de até 96% da massa inicial dos MPs em alguns casos. No entanto, também foi evidenciado que tais condições podem induzir a formação de fragmentos menores e até nanoplásticos, o que levanta preocupações quanto à segurança ambiental dos tratamentos propostos. O trabalho reforça, assim, a importância de otimizar os parâmetros operacionais para maximizar a eficiência de degradação e minimizar a geração de subprodutos indesejados.

Por sua vez, o estudo de Kim et al. (2022) complementa esse panorama experimental ao avaliar a eficácia de diversos POAs (UV, UV/H₂O₂, ozonização, foto-Fenton e plasma) na degradação de diferentes MPs (PE, PS, PET e PVC). O trabalho evidenciou que a degradação promovida pelos POAs é altamente dependente do tipo de polímero e das condições de operação. Embora tenha sido observada degradação superficial considerável em vários casos, um dos principais desafios identificados foi a formação de fragmentos menores e a alteração da capacidade dos MPs tratados de adsorver poluentes. O estudo também destacou a necessidade de avaliar cuidadosamente os impactos ecotoxicológicos dos MPs e subprodutos gerados após a aplicação dos POAs.

De maneira geral, esses estudos experimentais laboratoriais amplos contribuem significativamente para o avanço do conhecimento sobre a aplicação de POAs na degradação de MPs. Eles demonstram que, embora esses processos possam promover degradação eficaz sob condições controladas, desafios importantes permanecem, tais como: a prevenção da formação

de nanoplasticos, o controle da toxicidade dos subprodutos e a adaptação dos sistemas para condições operacionais mais sustentáveis e viáveis em larga escala.

Tabela 4 – Comparaçao de estudos com abordagem laboratorial ampla

Artigo	MPs	POAs	Principais resultados	Efeitos Toxicológicos antes/depois	Viabilidade e limitações práticas
Ortiz et al. (2022)	PET, PE, PVC, PP, EPS	Fenton	Degradação superficial; PET e EPS mais reativos; perda de massa de até ~20%; geração de fragmentos menores; mineralização parcial	Lixiviados mais biodegradáveis após tratamento; não relataram toxicidade residual significativa	Necessidade de pH ácido (pH 3); mineralização incompleta; risco de formação de nanoplasticos
Santos et al. (2023)	Poliamidas (MFs), diversos MPs	Fenton, foto-Fenton, eletro-Fenton, ozonização, fotocatálise	Redução de até 96% da massa dos MPs/MFs sob condições severas; formação de fragmentos menores e possível geração de nanoplasticos; degradação mais eficiente com combinação de POAs	Formação de fragmentos traz preocupações quanto à segurança ambiental; necessidade de testes mais detalhados	Alta eficiência em laboratório, mas demanda condições operacionais severas; necessidade de otimização para aplicação prática
Kim et al. (2022)	PE, PS, PET, PVC	UV, UV/H ₂ O ₂ , ozonização, Foto-Fenton, plasma	Degradação superficial considerável; alteração na capacidade de adsorção de poluentes após o tratamento; risco de fragmentação	Não avaliaram a toxicidade de forma completa; indicaram a necessidade de estudos ecotoxicológicos adicionais	Eficiência altamente variável conforme o MP; risco de formação de nanoplasticos; necessidade de otimização dos processos

Fonte: Autoria própria

Os resultados sintetizados na Tabela 4 evidenciam que os POAs, quando aplicados a diferentes tipos de MPs em condições laboratoriais, apresentam potencial significativo de degradação, mas também importantes limitações. Observa-se que a eficiência dos processos depende fortemente das características dos MPs, das condições operacionais adotadas e da combinação de tecnologias utilizadas.

Em geral, a degradação superficial é prevalente, com fragmentação dos MPs sendo uma consequência comum, o que reforça a necessidade de monitoramento rigoroso da formação de nanoplásticos. Além disso, a avaliação dos efeitos toxicológicos dos subprodutos gerados permanece insuficiente, sendo apontada como uma lacuna crítica em todos os estudos analisados. Embora as abordagens testadas demonstrem resultados promissores em laboratório, a transposição desses processos para aplicações em escala real ainda exige avanços em termos de viabilidade operacional, sustentabilidade ambiental e segurança dos efluentes tratados.

4.3 Estudos com abordagem Fenton/Foto-Fenton com aplicação realista

O estudo conduzido por Možar et al. (2024) representa um avanço importante na linha de pesquisa que busca aproximar os processos Fenton e foto-Fenton de condições operacionais mais realistas para a degradação de MPs. Diferentemente de abordagens puramente laboratoriais com condições altamente controladas, este trabalho foi projetado para simular cenários mais próximos dos encontrados em sistemas reais de tratamento de água e efluentes.

Os autores investigaram a degradação de MPs de LDPE, PP e PVC, utilizando os processos Fenton e foto-Fenton em condições variadas de pH, concentração de reagentes e tipo de catalisador, com especial atenção para o uso de luz solar simulada como fonte de ativação do processo foto-Fenton. Este é um aspecto relevante do estudo, pois o uso de radiação solar é uma estratégia de interesse crescente para viabilizar o processo em larga escala de forma sustentável e com menor custo energético.

Os resultados demonstraram que, mesmo operando em condições menos severas que as tradicionalmente adotadas em experimentos laboratoriais, por exemplo, com pH sub-ótimo e concentrações moderadas de H_2O_2 , foi possível alcançar degradação significativa dos MPs.

Essa degradação foi evidenciada pela perda de massa das partículas, alterações na morfologia (detectadas por análise de microscopia) e aumento da oxidação superficial (observado por FTIR), indicando não apenas a fragmentação das partículas, mas também uma oxidação relevante das cadeias poliméricas.

Outra questão abordada no estudo é a avaliação crítica da formação de subprodutos, com atenção especial ao risco de geração de nanoplásticos, um problema recorrente nos processos de degradação oxidativa de MPs. Embora a degradação dos MPs tenha sido efetiva, a possibilidade de fragmentação residual reforça a necessidade de controle rigoroso das condições de operação e do balanceamento entre eficiência de degradação e segurança ambiental. Além disso, destaca a importância da otimização do sistema catalítico.

O uso de catalisadores heterogêneos e a integração de luz solar com os POAs são apontados como estratégias promissoras para viabilizar a aplicação prática dos processos Fenton e foto-Fenton em contextos de tratamento de água e efluentes. Nesse sentido, o trabalho contribui de maneira relevante para a discussão atual sobre a transposição dos POAs para a escala real, complementando as análises teóricas e laboratoriais existentes na literatura.

Em síntese, Možar et al. (2024) reforçam que os processos Fenton e foto-Fenton, quando adequadamente adaptados, podem ser ferramentas eficazes para o tratamento de MPs em condições operacionais mais compatíveis com sistemas reais. Contudo, também evidencia que desafios importantes persistem, como o controle da fragmentação, a necessidade de operação em pH não tão ácido, a durabilidade dos catalisadores e a avaliação completa dos impactos ambientais dos subprodutos gerados. O Quadro 1 resume os aspectos relacionados ao estudo em questão.

Quadro 1 – Aspectos relacionados ao estudo de Možar et al. (2024) sobre POAs para degradação de MPs

MPs	POAs	Parâmetros operacionais	Principais resultados	Efeitos toxicológicos antes/depois	Viabilidade e limitações práticas
LDPE, PP, PVC	Fenton e foto-Fenton (com luz solar simulada)	<ul style="list-style-type: none"> - pH sub-ótimo (acima de 3) - Luz solar simulada (300–800 nm) - H_2O_2 em concentrações moderadas - Catalisador: Fe (heterogêneo/homogêneo, condições variáveis) 	<ul style="list-style-type: none"> - Degradação significativa (perda de massa) - Alterações morfológicas detectadas por microscopia - Oxidação superficial (FTIR: aumento de carbonilas) - Formação potencial de fragmentos menores e nanoplásticos 	<ul style="list-style-type: none"> - Não foram realizados testes ecotoxicológicos completos; destacou-se a necessidade de estudos adicionais para avaliação da toxicidade dos subprodutos 	<ul style="list-style-type: none"> - Abordagem com forte potencial para aplicação realista - Uso de luz solar é vantajoso em termos de sustentabilidade - Persistem desafios relacionados ao controle da fragmentação e na avaliação ecotoxicológica dos subprodutos

Fonte: Autoria própria

4.4 Estudos com abordagem foto-Fenton heterogênea ou inovadora

Entre as estratégias mais recentes para aprimorar a eficiência dos POAs aplicados à degradação de MPs, destaca-se o uso de sistemas híbridos que combinam propriedades fotocatalíticas e reações Fenton/foto-Fenton. Nesse contexto, o estudo experimental conduzido por Thirunavukkarasu et al. (2025) investigou a degradação de MPs de poliestireno (PS) utilizando aerogéis de dióxido de titânio (TiO_2) modificados com ferro (Fe) como catalisadores.

O trabalho demonstrou que a modificação do TiO_2 com Fe promove a geração sinérgica de radicais reativos ($\cdot\text{OH}$) por meio de mecanismos fotocatalíticos e do processo foto-Fenton, potencializando a degradação dos MPs sob radiação UVA e presença de H_2O_2 . Os resultados evidenciaram alterações significativas nas propriedades químicas e estruturais das partículas

plásticas, com redução da massa, aumento dos índices de carbonilas e peroxilas (CI/PI) e formação de subprodutos de oxidação, confirmada por análises de RMN e HPLC-HRMS.

O estudo também reforça a importância da otimização de parâmetros como pH, concentração de H₂O₂ e de catalisador, os quais influenciam diretamente a eficiência do processo e o perfil dos subprodutos formados. Embora os resultados tenham sido obtidos em escala laboratorial, a abordagem proposta por Thirunavukkarasu et al. (2025) representa um avanço na concepção de sistemas catalíticos inovadores para a degradação de MPs, destacando o potencial de POAs híbridos e heterogêneos como ferramentas promissoras para aplicação futura em sistemas de tratamento de água (Quadro 2).

Quadro 2 – Aspectos relacionados ao estudo de Thirunavukkarasu et al. (2025) sobre o poliestireno (PS)

MP	POAs	Parâmetros operacionais	Principais resultados	Efeitos toxicológicos antes/depois	Viabilidade e limitações práticas
PS	Foto-Fenton heterogêneo e fotocatálise (aerogel de TiO ₂ modificado com Fe) + H ₂ O ₂ + UVA)	- pH ótimo; - H ₂ O ₂ em concentrações ótimas; - Radiação UVA; - Catalisadores de aerogéis de dióxido de titânio (TiO ₂) modificados com ferro (Fe)	Perda significativa de massa; aumento dos índices de carbonilas/peroxilas; fragmentação e formação de subprodutos de oxidação; análise detalhada por ATR-IR, RMN e HPLC-HRMS; geração de radicais •OH e O ₂ • ⁻ comprovada	Avaliação química dos subprodutos mostrou a formação de compostos menos tóxicos, porém sem testes ecotoxicológicos completos	Promissor para aplicação em sistemas híbridos; ainda em escala laboratorial; necessidade de mais estudos ecotoxicológicos e avaliação em matriz real

Fonte: Autoria própria

Outra pesquisa relevante foi a de Piazza et al. (2022) que representa uma contribuição importante no campo dos POAs aplicados à degradação de MPs, especialmente no contexto do desenvolvimento e aplicação de sistemas foto-Fenton heterogêneos. Em resposta às limitações associadas ao uso do processo Fenton homogêneo, como a necessidade de pH fortemente ácido e a geração de lodo, este trabalho explora soluções catalíticas que visam tornar o processo foto-Fenton mais eficiente, sustentável e compatível com aplicações em larga escala.

O estudo avaliou a degradação de MPs de PP e PVC utilizando um sistema foto-Fenton heterogêneo no qual catalisadores sólidos foram empregados para viabilizar a regeneração contínua dos íons ferrosos sob radiação UVA. A abordagem adotada permitiu não apenas a redução da necessidade de ajuste extremo de pH, mas também minimizou a geração de resíduos sólidos secundários, um dos principais entraves para a aplicação prática dos POAs em sistemas reais de tratamento.

Os resultados foram bastante expressivos, demonstrando degradação significativa dos MPs, com redução de massa, alterações morfológicas e aumento de grupos oxigenados na superfície das partículas, como indicado pelas análises de espectroscopia FTIR. Além disso, o estudo incluiu uma avaliação detalhada da toxicidade dos efluentes tratados, um aspecto fundamental na aplicação de POAs para MPs. Os autores relataram a ausência de toxicidade residual significativa nos subprodutos gerados, o que reforça o potencial ambientalmente seguro do sistema proposto.

Outro aspecto relevante do trabalho de Piazza et al. (2022) é a versatilidade do sistema heterogêneo, que demonstrou boa eficiência mesmo em condições menos controladas, o que aproxima a tecnologia das exigências de operação em estações de tratamento de água e efluentes. Tal abordagem dialoga com as diretrizes apontadas por revisões recentes, como as de Ricardo et al. (2021) e Shen et al. (2022), que enfatizam a necessidade de sistemas catalíticos robustos, reutilizáveis e compatíveis com operação contínua em ambiente real.

Em síntese, este estudo exemplifica o avanço em direção a soluções mais sustentáveis e tecnicamente viáveis, com o foto-Fenton heterogêneo emergindo como uma abordagem promissora para a degradação de MPs. Contudo, os autores reconhecem que, para consolidar a aplicação em escala real, ainda são necessários estudos adicionais de longa duração, avaliação em matrizes ambientais complexas e testes de reuso dos catalisadores (Quadro 3).

Quadro 3 – Aspectos relacionados ao estudo de Piazza et al. (2022) sobre a viabilidade de utilização do processo foto-Fenton heterogêneo para degradação de MPs

MPs	POA	Parâmetros operacionais	Principais resultados	Efeitos toxicológicos antes/depois	Viabilidade e limitações práticas
PP e PVC	Foto-Fenton heterogêneo (catalisador Sólido Reutilizável + H ₂ O ₂ + Radiação UVA)	- pH controlado (menos ácido que Fenton homogêneo) - Radiação UVA - Catalisador heterogêneo reutilizável - Concentração otimizada de H ₂ O ₂	- Degradação significativa dos MPs (redução de massa e tamanho) - Alterações morfológicas observadas (microscopia) - Aumento de grupos oxigenados (FTIR) - Estabilidade e reuso do catalisador confirmados	Ausência de toxicidade residual relevante nos efluentes tratados	Sistema heterogêneo com grande potencial para aplicação prática

Fonte: Autoria própria

Marcelino-Pérez et al. (2021) contribuíram de forma relevante para a linha de pesquisa que busca aprimorar a aplicação do processo foto-Fenton heterogêneo na degradação de MPs, com vistas a superar as limitações associadas ao processo Fenton homogêneo clássico, tais como: a necessidade de condições altamente ácidas e a formação indesejada de lodo férrico.

Os autores investigaram a degradação de MPs utilizando um sistema foto-Fenton baseado em catalisadores heterogêneos, com a intenção de tornar o processo mais sustentável e aplicável em contextos reais. O estudo destacou o uso de catalisadores sólidos reutilizáveis, capazes de operar de forma eficiente sob radiação UVA, favorecendo a regeneração contínua de espécies ativas e a manutenção da atividade catalítica ao longo de múltiplos ciclos de tratamento.

Os resultados obtidos foram bastante expressivos. O sistema proposto promoveu degradação significativa das partículas plásticas, com evidências de redução de massa, alterações morfológicas perceptíveis e oxidação das superfícies poliméricas, confirmadas por análises de

espectroscopia FTIR e microscopia eletrônica. Além disso, o estudo incluiu uma importante avaliação da estabilidade do catalisador e do seu potencial para reuso, aspecto essencial para garantir a viabilidade econômica e ambiental do processo em escala ampliada.

Outro ponto de destaque é a preocupação com a formação de subprodutos e a potencial geração de nanoplasticos, um desafio para a aplicação prática dos POAs. Embora a degradação tenha sido eficaz, o estudo reforça a necessidade de monitoramento contínuo dos subprodutos e de desenvolvimento de estratégias para minimizar a formação de partículas secundárias indesejadas.

O enfoque na viabilidade operacional aproxima o estudo de Marcelino-Pérez et al. (2021) das diretrizes mais atuais, conforme discutido em revisões como as de Shen et al. (2022) e Ricardo et al. (2021), que enfatizam a importância de desenvolver processos que visam alta eficiência de degradação com segurança ambiental e viabilidade econômica. Este trabalho dialoga com os avanços recentes demonstrados por Piazza et al. (2022) e Thirunavukkarasu et al. (2025), que também exploram sistemas catalíticos inovadores no âmbito do processo foto-Fenton heterogêneo (Quadro 4).

Quadro 4 – Aspectos relacionados ao estudo de Marcelino-Pérez et al. (2021) sobre a viabilidade de utilização do processo foto-Fenton heterogêneo para degradação de MPs

MPs	POA	Parâmetros operacionais	Principais resultados	Efeitos toxicológicos antes/depois	Viabilidade e limitações práticas
PE, PP, PS	Foto-Fenton Heterogêneo (catalisador Sólido Reutilizável + H ₂ O ₂ + Radiação UVA)	- pH moderado - Radiação UVA - Catalisador heterogêneo sólido reutilizável - Concentração otimizada de H ₂ O ₂ - Múltiplos ciclos de operação	- Degradação significativa dos MPs (redução de massa e tamanho das partículas) - Alterações morfológicas detectadas por microscopia - Oxidação superficial (FTIR) - Estabilidade e reúso do catalisador demonstrados	Não foram reportados efeitos toxicológicos adversos nos efluentes tratados; recomendação de monitoramento adicional	Sistema heterogêneo com potencial elevado para aplicações práticas; uso de luz solar/artificial viável; desafios relacionados à formação de nanoplasticos e avaliação em águas reais

Fonte: Autoria própria

Assim, o estudo de Marcelino-Pérez et al. (2021) reforça o papel estratégico do processo foto-Fenton heterogêneo como uma abordagem promissora para a degradação de MPs, destacando o potencial de sistemas catalíticos sólidos e reutilizáveis como solução para tornar o processo mais aplicável em condições reais. No entanto, os autores reconhecem que a consolidação dessa tecnologia em escala operacional exige avanços adicionais, especialmente em relação à gestão de subprodutos e à otimização de parâmetros para diferentes matrizes ambientais.

5. CONCLUSÃO

A crescente presença de microplásticos nos ecossistemas aquáticos representa um dos mais complexos desafios ambientais contemporâneos, com implicações que ultrapassam a esfera ambiental e atingem a saúde pública e os sistemas de gestão de resíduos. Sua persistência e capacidade de atuar como vetores de poluentes e patógenos elevam a necessidade de desenvolver tecnologias de remoção que sejam não apenas eficazes, mas também ambientalmente seguras e economicamente viáveis.

Neste contexto, os Processos Oxidativos Avançados, em especial os processos Fenton e foto-Fenton e suas variantes heterogêneas e inovadoras, têm emergido como alternativas promissoras. A literatura analisada demonstra que esses processos, ao promoverem a geração de espécies altamente reativas como os radicais hidroxila, são capazes de atuar de forma eficiente na fragmentação, oxidação e, em certos casos, mineralização parcial de microplásticos em matrizes aquosas. Os avanços alcançados nos últimos anos, conforme evidenciado por estudos laboratoriais e aplicações mais realistas, refletem um amadurecimento crescente das tecnologias e um aprofundamento do conhecimento sobre os parâmetros que controlam a eficiência e a segurança dos tratamentos.

Estudos com abordagem experimental laboratorial ampla têm contribuído de forma considerável para o entendimento dos mecanismos de degradação de diferentes tipos de MPs, ressaltando a influência crítica de variáveis operacionais como pH, concentração de reagentes, tipo de polímero e condições de radiação. Estes trabalhos também evidenciam limitações importantes, como a formação de nanoplásticos e a necessidade de avaliar cuidadosamente os impactos ecotoxicológicos dos subprodutos gerados.

Por outro lado, estudos com abordagens mais realistas demonstram que, mesmo em condições operacionais menos severas e mais próximas da realidade de sistemas de tratamento de água e efluentes, é possível obter degradação significativa de MPs. No entanto, persistem desafios relacionados ao controle da fragmentação residual e à otimização do sistema catalítico para maximizar a eficiência e minimizar riscos ambientais.

Avanços importantes também têm sido obtidos com o desenvolvimento de processos foto-Fenton heterogêneos e inovadores. O uso de catalisadores sólidos reutilizáveis, integrados a sistemas de radiação UVA ou solar, tem mostrado grande potencial para superar limitações associadas ao processo Fenton homogêneo, como a necessidade de pH ácido extremo e a geração de lodo. Tais sistemas demonstraram não apenas elevada eficiência de degradação de MPs, mas também um perfil ambiental mais favorável, com redução significativa da toxicidade residual em diversos casos.

Apesar desses avanços, a adequação dos POAs a aplicações em escala real ainda requer a superação de obstáculos significativos. A ausência de metodologias padronizadas para detecção e quantificação de MPs e nanoplásticos dificulta a comparação entre estudos e o monitoramento efetivo dos resultados. Além disso, há necessidade urgente de otimização dos processos para condições de operação compatíveis com as realidades técnicas e econômicas das estações de tratamento, bem como de uma avaliação ecotoxicológica sistemática dos subprodutos gerados.

Finalmente, a revisão evidencia que a aplicação dos POAs deve ser entendida como parte de uma estratégia integrada para enfrentar a crise global dos plásticos. A superação desse desafio exige uma combinação de inovação tecnológica, políticas públicas robustas, promoção da economia circular e mudanças nos padrões de produção e consumo. Sem essa abordagem sistêmica, os avanços tecnológicos isolados possuirão um impacto limitado frente à magnitude e complexidade da poluição por MPs.

Diante desse panorama, é fundamental que futuras pesquisas avancem não apenas no aprimoramento técnico dos POAs, mas também na integração desses processos com políticas ambientais e sociais eficazes. O fortalecimento da regulação, o estímulo à redução do consumo de plásticos descartáveis, o desenvolvimento de materiais alternativos biodegradáveis são elementos essenciais para viabilizar um enfrentamento efetivo e sustentável da poluição plástica. Somente por meio dessa articulação entre os diversos âmbitos (sociais, econômicos e, principalmente, científico) será possível transformar o conhecimento científico em soluções práticas e duradouras para a proteção dos ecossistemas e da saúde humana.

REFERÊNCIAS

BABUPONNUSAMI, A.; MUTHUKUMAR, K. **A review on Fenton and improvements to the Fenton process for wastewater treatment.** Journal of Environmental Chemical Engineering 2, 557–572, 2013

CONCEIÇÃO, M.; CONCEIÇÃO, J.; DALMAS, F.; ROSINI, A. **O plástico como vilão do meio ambiente.** Revista Geociências UNG-Ser, Guarulhos-SP, v. 18, n. 1, 2019

DOS SANTOS, N.; BUSQUETS, R.; CAMPOS, L. **Insights into the removal of microplastics and microfibres by Advanced Oxidation Processes.** Science of the Total Environment 861, 160665, 2023

GESAMP. **Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment.** Kershaw, P. J., ed. IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP/UNDP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection. No. 90, 96 p, 2015

GEYER, R.; JAMBECK., J.; LAW, K. **Production, use, and fate of all plastics ever made.** Science Advances, Reserch Article, 2017

GLAZE, W.; KANG, J.; CHAPIN, D. **The Chemistry of Water Treatment Processes Involving Ozone, Hydrogen Peroxide and Ultraviolet Radiation.** Ozone: Science & Engineering: The Journal of the International Ozone Association, 9:4, 335-352, 1987

KIM, S.; SIN, A.; NAM, H.; PARK, Y.; LEE, H.; HAN, C. **Advanced oxidation processes for microplastics degradation: A recent trend.** Chemical Engineering Journal Advances 9 100213, 2022

MARCELINO-PÉREZ, E.; BONET-ARACIL, M. A.; BOU-BELDA, E.; VICENTE, R. **Nylon 66 degradation as microplastic pollutant by photo-Fenton process.** 25th International Congress on Project Management and Engineering Alcoi, 2021

MATAVOS-ARAMYAN, S. **Addressing the microplastic crisis: A multifaceted approach to removal and regulation.** Environmental Advances 17 100579, 2024

MOŽAR, K. et al. **Evaluation of Fenton, Photo-Fenton and Fenton-like Processes in Degradation of PE, PP, and PVC Microplastics.** Water 2024, 16, 673, 2024

ORTIZ, D.; MUÑOZ, M.; NIETO-SANDOVAL, J.; ROMERA-CASTILLO, C.; DE PEDRO, Z.; CASAS, J. **Insights into the degradation of microplastics by Fenton oxidation: From surface modification to mineralization.** Chemosphere 309 136809, 2022

OTURAN, M. A. & AARON, J. **Advanced Oxidation Processes in Water/Wastewater Treatment: Principles and Applications. A Review.** Critical Reviews In Environmental Science and Technology. 2014

PIAZZA, V.; UHEIDA, A.; GAMBARDELLA, C.; GARAVENTA, F.; FAIMALI, M.; DUTTA, J. **Ecosafety Screening of Photo-Fenton Process for the Degradation of Microplastics in Water.** Original Research, 2022

PIGNATELLO, J.; OLIVEROS, E.; MACKAY, A. **Advanced Oxidation Processes for Organic Contaminant Destruction Based on the Fenton Reaction and Related Chemistry.** Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 36:1, 1-84, 2006

RICARDO, I. et al. **A critical review on microplastics, interaction with organic and inorganic pollutants, impacts and effectiveness of advanced oxidation processes applied for their removal from aqueous matrices.** Chemical Engineering Journal 424 130282, 2021

SHEN, M.; SONG, B.; ZHOU, C.; HU, T.; ZENG, G.; ZHANG, Y. **Advanced oxidation processes for the elimination of microplastics from aqueous systems: Assessment of efficiency, perspectives and limitations.** Science of the Total Environment 842 156723, 2022

THIRUNAVUKKARASU, G. K. et al. **Insights in photocatalytic/Fenton-based degradation of microplastics using iron-modified titanium dioxide aerogel powders.** Environmental Science: Nano, 12, 1515, 2025

TROJANOWICZ, M. et al. **Advanced Oxidation/Reduction Processes treatment for aqueous perfluorooctanoate (PFOA) and perfluorooctanesulfonate (PFOS) – A review of recent advances.** Chemical Engineering Journal 336 170–199, 2018

YANG, Z.; LI, Y.; ZHANG, G. **Degradation of microplastic in water by advanced oxidation processes.** Chemosphere 357 141939, 2024

ZHANG, M.; DONG, H.; ZHAO, L.; MENG, D. **A review on Fenton process for organic wastewater treatment based on optimization perspective.** Science of the Total Environment 670 110–121, 2019