

UFSCar – UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

CCET – CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA

DQ – DEPARTAMENTO DE QUÍMICA

Trabalho de Conclusão de Curso

Bárbara Moreira

**OXIDAÇÃO ELETROLÍTICA POR PLASMA COMO TÉCNICA DE ALTA
EFICIÊNCIA PARA A DEGRADAÇÃO DE FÁRMACOS**

2026

São Carlos - SP

BÁRBARA MOREIRA

OXIDAÇÃO ELETROLÍTICA POR PLASMA COMO TÉCNICA DE ALTA
EFICIÊNCIA PARA A DEGRADAÇÃO DE FÁRMACOS

Trabalho de conclusão de curso apresentada
ao Departamento de Química da Universidade
Federal de São Carlos, para obtenção do título
de Bacharel em Química

Orientador(a): Prof. Dr. Ernesto Chaves
Pereira

2026

São Carlos - SP

AGRADECIMENTO

Gostaria de agradecer ao grupo LIEC - Laboratório Interdisciplinar de Eletroquímica e Cerâmicas pelo suporte e apoio durante a dissertação deste trabalho, especialmente ao meu orientador Ernesto Chaves pelos ensinamentos e acolhimento durante meus 3 anos como sua aluna de Iniciação Científica.

Agradeço muito a minha família, em especial meus pais Renata e Varlei, e a minha irmã Eduarda, por sempre estarem do meu lado em todos os momentos e se fazerem presentes mesmo com a distância. Obrigada República Convento por serem minha segunda família durante todo meu período na graduação e por nunca me deixarem desistir e, ao meu melhor amigo Lucas Souza (Trancado) que sempre esteve comigo em todas as adversidades.

Agradeço principalmente ao Dr. Kelvin Costa, que não só foi essencial durante toda a escrita dessa dissertação como foi responsável por grande parte de todos os meus aprendizados durante minha graduação e acima de tudo, por ter se tornado um grande amigo e confidente.

A todos aqueles que tiveram envolvimento direto e indireto com desenvolvimento desse trabalho, muito obrigada.

RESUMO

A crescente detecção de contaminantes emergentes em corpos hídricos, especialmente fármacos de difícil degradação como a Fluoxetina (FLX), o Ofloxacino (OFX) e o Diclofenaco (DCF), representa um desafio ambiental crítico no Brasil. As estações de tratamento de efluentes convencionais apresentam baixa eficiência na remoção dessas moléculas, demandando o desenvolvimento de tecnologias avançadas de remediação. O objetivo foi investigar o potencial da técnica de Oxidação Eletrolítica por Plasma (PEO) como um Processo de Oxidação Avançada (POA) para a degradação desses compostos. A metodologia consistiu na aplicação do processo PEO em soluções contendo a mistura dos fármacos, aproveitando as microdescargas de plasma para promover a decomposição química simultaneamente à formação de filmes de óxidos. Os resultados bibliográficos demonstraram uma alta capacidade de degradação, com redução superior a 90% para a Fluoxetina e 60% para o Ofloxacino e Diclofenaco em um período de 60 minutos. Adicionalmente, observou-se uma redução de 57,3% no Carbono Orgânico Total (TOC), indicando a mineralização parcial dos poluentes em CO₂. Conclui-se que a técnica PEO é uma alternativa promissora, sustentável e de alta eficiência, capaz de tratar resíduos farmacêuticos complexos sem a necessidade de reagentes externos adicionais, contribuindo para a preservação dos recursos hídricos.

Palavras-chave: Oxidação Eletrolítica por Plasma. Contaminantes Emergentes. Degradação de Fármacos. Fluoxetina. Remediação Ambiental.

ABSTRACT

The increasing detection of emerging contaminants in bodies of waters, particularly persistent pharmaceuticals such as Fluoxetine (FLX), Ofloxacin (OFX), and Diclofenac (DCF), represents a critical environmental challenge in Brazil. Conventional wastewater treatment plants exhibit low efficiency in removing these molecules, necessitating the development of advanced remediation technologies. This study aimed to investigate the potential of Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) as an Advanced Oxidation Process (AOP) for the degradation of these compounds. The methodology involved applying the PEO process to solutions containing a mixture of these pharmaceuticals, utilizing plasma micro-discharges to promote chemical decomposition simultaneously with the formation of oxide films. The bibliographic results demonstrated high degradation capacity, with reduction rates exceeding 90% for Fluoxetine and 60% for Ofloxacin and Diclofenac within 60 minutes. Furthermore, a 57.3% reduction in Total Organic Carbon (TOC) was observed, indicating partial mineralization of the pollutants into CO₂. It is concluded that the PEO technique is a promising, sustainable, and highly efficient alternative, capable of treating complex pharmaceutical residues without the need for additional external reagents, thereby contributing to the preservation of water resources.

Keywords: Plasma Electrolytic Oxidation. Emerging Contaminants. Pharmaceutical Degradation. Fluoxetine. Environmental Remediation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: (a) Fórmula química estrutural da Fluoxetina; (b) Fórmula química estrutural da Diclofenaco; (c) Fórmula química estrutural da Ofloxacina	14
Figura 2: Curvas transientes de tensão para anodização de Al sob condição PEO em um eletrólito contendo silicato de sódio (0,01 mol/L e 0,1mol/L Na ₂ SiO ₃) - Inserção: fotografia das microdescargas dispersas aleatoriamente sobre o ânodo de Al; setas mostrando o momento de ignição da faísca e a configuração experimental simples para o experimento PEO.....	21
Figura 3: Degradação da mistura farmacêutica ao longo de 60 minutos. (a) FLX no tempo 0 minutos; (b) FLX após 60 minutos de degradação; (c) OFX no tempo inicial; (d) OFX após 60 minutos de degradação.....	24
Figura 4: Degradação da mistura ao longo de 60 minutos. (a) Monitorada por EEM-PARAFAC; (b) Monitorada por HPLC-RF.....	25
Figura 5: Micrografias SEM do ânodo de Al produzido após os experimentos PEO para ambas as concentrações de eletrólito.....	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Refere-se a quantidade e concentração de medicamentos excretados pelo corpo.

Tabela 2: Concentrações mínimas e máximas (ng/L) para cada classe de contaminantes nas diferentes matrizes aquáticas brasileiras e as técnicas analíticas utilizadas nas determinações.

Tabela 3: TOC das amostras antes e depois de 60 minutos de degradação.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

AOP/POA	Processo de Oxidação Avançada
DAD	Detector de Arranjo de Diodos
DCF	Diclofenaco
FLX	Fluoxetina
GC-ECD	Cromatografia Gasosa com Detector de Captura de Elétrons
GC-NPD	Cromatografia Gasosa com Detector de Nitrogênio-Fósforo
GC-MS	Cromatografia Gasosa Acoplada a Espectrometria de Massas
GC-MS/MS	Cromatografia Gasosa Acoplada a Espectrometria de Massas Sequencial
HRGC-ECD	Cromatografia Gasosa de Alta Resolução com Detector de Captura de Elétrons.
HPLC-UV	Cromatografia Líquida de Alta Eficiência com Detector de Ultravioleta
HPLC-FLD	Cromatografia Líquida de Alta Eficiência com Detector de Fluorescência
LC-MS/MS	Cromatografia Líquida Acoplada a Espectrometria de Massas Sequencial
OFX	Ofloxacina
PEO	Oxidação Eletrolítica por Plasma
TFMP	4-(trifluorometil)fenol

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
2. OBJETIVO.....	14
3. REVISÃO DA LITERATURA.....	14
3.1.Contaminantes Emergentes.....	14
3.2.Estações de tratamento de água e esgoto.....	16
3.3.Fármacos.....	17
3.3.1. Fluoxetina.....	18
3.3.2. Diclofenaco.....	18
3.3.3. Ofloxacina.....	18
3.4.Oxidação Eletrolítica por Plasma.....	19
3.5.Materiais Utilizados.....	21
3.5.1. Alumínio Metálico.....	22
3.5.2. Fonte.....	22
3.5.3. Banho Termostático.....	22
3.5.4. Metassilicato de Sódio.....	23
3.6.Caracterizações.....	23
3.6.1. Espectroscopia de Fluorescência.....	23
3.6.2. Cromatografia Líquida de Alta Eficiência.....	24
3.6.3. Microscopia Eletrônica de Varredura.....	25
3.6.4. Redução de Carbono Orgânico.....	26
3.7.Trabalhos Atuais.....	27
3.7.1. Processo para destruição ou inativação de contaminantes químicos e microorganismos, e, uso de oxidação eletrolítica de plasma. (Ernesto Pereira, 2026).....	27

3.7.2. Development of Titanium Surfaces Oxidized by Electrolytic Plasma, for Biomedical Application (Clodomiro Alves-Junior, 2023).....	28
3.7.3. Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) Process—Processing, Properties, and Applications (Soumya Sikdar, 2021).....	29
3.7.4. A review of recent work on discharge characteristics during plasma electrolytic oxidation of various metals (Trevor William Clyne, 2019).....	30
3.7.5. Plasma electrolytic oxidation of magnesium and its alloys: Mechanism, properties and applications (Ghasem Barati Darband, 2017).....	31
3.7.6. Comparação dos trabalhos que envolveram oxidação eletrolítica por Plasma.....	32
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	33
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA.....	35

1. INTRODUÇÃO

Atualmente o Brasil possui um crescimento populacional e expansão industrial bastante relevantes, os quais trazem muitos benefícios à nação como o aumento de empregos, melhoria salarial, avanços tecnológicos e científicos. No entanto, também são responsáveis por causarem malefícios que muitas vezes não são notados pelas pessoas ou até mesmo ignorados. O descarte indevido e o consumo exacerbado de medicamentos e agrotóxicos faz com que muitas moléculas orgânicas persistentes cheguem ao meio ambiente e afetando até mesmo organismos vivos. Essas moléculas são chamadas de contaminantes emergentes, que normalmente se encontram em baixas concentrações em águas residuais, superficiais e efluentes. Por outro lado, é importante frisar que podem ser acumuladas ao longo do tempo tanto na biota como em seres vivos.

Neste sentido, existe a presença de diversos tipos de contaminantes, incluindo fármacos, hormônios, pesticidas, entre outros. Eles são denominados dessa forma devido a falta de tratamentos de água e esgoto capazes de exterminá-los, sendo formas de tratamento usadas apenas para destruir a carga orgânica visível que é presente nas águas. A indústria farmacêutica segue se expandindo a cada dia e com ela os resíduos à acompanham. Além disso, a população brasileira consome uma quantidade exagerada de remédios que, consequentemente, acabam chegando nos cursos fluviais, através dos descartes inadequados desses medicamentos em excesso e até pelos subprodutos das indústrias farmacêuticas (Souza et al., 2023).

A literatura analisada busca a remediação dos contaminantes oriundos de medicamentos que são bastante consumidos no dia a dia do brasileiro. Desta forma, foram escolhidos para estudo três fármacos de classes farmacológicas diferentes: um antibiótico, um anti-inflamatório e um antidepressivo, sendo eles respectivamente, o ofloxacino (OFX), diclofenaco (DCF) e fluoxetina (FLX). Das

três classes analisadas, o mais problemático é a FLX, já que é um fármaco extremamente consumido na atualidade, além de ser um dos principais ingredientes de drogas psicotrópicas e já foi encontrado em diversos tipos de água, inclusive a potável (Souza et al., 2023). Esse medicamento pode chegar nos meios aquáticos até por excreção natural, pois o corpo não consegue absorvê-lo totalmente (Gomes & Gomes, 2024).

Esse fármaco e seus metabólitos apresentam na escala de 0 a 9 do índice de Persistência-Bioacumulação-Toxicidade (PBT), o valor 6 tornando-se muito preocupante para o meio ambiente. Há estudos que mostram alterações bioquímicas e comportamentais na vida marinha e humana, como efeitos nos sistema endócrino e neurológico (Souza et al., 2023). A FLX é um dos contaminantes emergentes que se encontram em maior concentração nas águas, como demonstrado na tabela 1.

Medicamento	Quantidade excretada por dia (mg/dia)			Concentração de excreção estimada (µg/L)		
	2019	2020	2021	2019	2020	2021
Azitromicina	64.324	146.808	95.151	0,1091	0,2490	0,1614
Dexclorfeniramina	2.330	1.996	2.863	0,040	0,0034	0,0049
Diazepam	10.720	14.289	15.085	0,0182	0,0242	0,0256
Fluoxetina	634.837	429.998	646.557	1,0770	0,7295	1,0968
Ivermectina	15	26	0	0,0000	0,0000	0,0000
Etinilestradiol	264	130	114	0,0004	0,0002	0,0002

Tabela 1: Refere-se a quantidade e concentração de medicamentos excretados pelo corpo

Fonte: Souza et al., 2023.

Diante desses fatores, torna-se necessário um método que seja capaz de degradar esses contaminantes e de forma eficiente, especialmente porque alguns desses fármacos podem gerar subprodutos ainda mais tóxico do que ele próprio, como é o caso da FLX que tem como subproduto o 4-(trifluorometil)fenol (TFMP). Portanto, pesquisadores resolveram utilizar de um método já conhecido pela indústria, tentando aplicá-lo de outra forma, a Oxidação Eletrolítica por Plasma (PEO) é um método utilizado desde a década de 60 que tinha como único objetivo preparar filmes óxidos. E só quando esses filmes eram finalizados que haveria uma aplicação, podendo ser até mesmo a degradação.

Partindo desse método já fundamentado que começaram a tentar realizar a degradação de forma simultânea, ou seja, a degradação seria realizada ao mesmo tempo que a formação dos filmes. E essa aplicação inovadora foi se destacando por baratear, não gerar resíduo e encurtar o processo. Tal método destacasse por ser capaz de decompor moléculas orgânicas complexas em CO_2 de baixa concentração que não irá afetar de forma relevante o efeito estufa. Isso se deve ao fato de que esse plasma possui temperatura superiores à 5000K, porém ele é presente de forma localizada como faíscas, também conhecidas como “sparks”. Quando a solução com o fármaco entra em contato com essas faíscas, as extensas cadeias orgânicas (figuras 1, 2 e 3) não resistem e nem sequer são capazes de formar subprodutos, sendo oxidadas diretamente a CO_2 na solução.

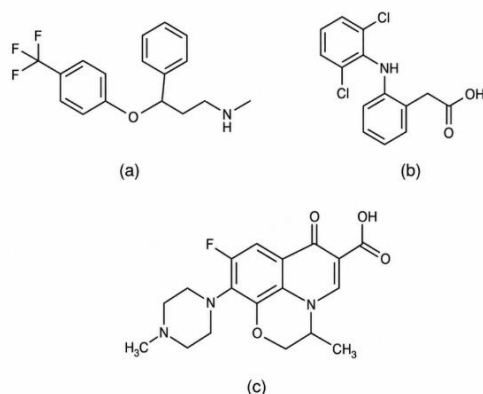


Figura 1: (a) Fluoxetina; (b) Diclofenaco; (c) Ofloxacina

2. OBJETIVO

Realizar uma análise bibliográfica sobre a utilização inovadora do método da PEO para remediação ambiental, degradando contaminantes emergentes encontrados nos ambientes fluviais, mais especificamente os fármacos.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1. Contaminantes Emergentes

Contaminantes emergentes são moléculas orgânicas presentes nos efluentes em baixas concentrações, na ordem de nanograma a picograma por litro que se encontram em matrizes aquáticas. Esses compostos podem ser resíduos farmacêuticos, pesticidas, hormônios, produtos de higiene pessoal, entre diversos outros. Estes compostos podem apresentar algum risco ao ecossistema e eles não possuem monitoramento, ou seja, não são legislados (Montagner, Vidal & Acayaba, 2017). Por volta de 1990 foram publicados os primeiros artigos sobre a presença de pesticidas em lagos e logo depois foi estudado a remoção de hormônios e fármacos através de Estações de Tratamento de Esgoto (ETE), desde então as pesquisas nesse ramo começaram a se aprofundar para diferentes meios aquáticos e diferentes contaminantes no Brasil (Farto, 2024).

Com o decorrer do tempo, o crescimento exagerado das indústrias e a falta de políticas de controle tem causado uma produção exacerbada de contaminantes emergentes. o Brasil está entre as onze maiores economias do mundo, de acordo com o Fundo Monetário Internacional, com elevado grau de consumo, o que reflete em problemas ambientais como a presença de inúmeras novas substâncias no ambiente. Mesmo esses resíduos estando em pequenas concentrações eles ainda podem causar danos à vida marinha e terrestre, já que não se tem ao certo o nível de concentração mínima necessária para afetar a saúde de um ser vivo (Costa et al., 2023). A Tabela 2 apresenta a presença de diversos contaminantes emergentes e suas concentrações em variados tipos de matrizes aquáticas.

Classes/ Compostos	Esgoto bruto		Esgoto tratado		Água superficial		Água subterrânea		Água de abastecimento público	
	Concentrações (ng/L)	Técnica Analítica	Concentrações (ng/L)	Técnica Analítica	Concentrações (ng/L)	Técnica Analítica	Concentrações (ng/L)	Técnica Analítica	Concentrações (ng/L)	Técnica Analítica
Fármacos	(13.9 - 3800)	LC-MS/MS GC-MS	(680 – 3800)	GC-MS	(0.50 - 30421)	LC-MS/MS HPLC-UV GC-MS			18.5	LC-MS/MS
Cafeína					(0.29 - 753500)	LC-MS/MS HPLC-UV			(1.8 - 5800)	GC-MS LC-MS/MS
Hormônios	(0.56 - 3180)	LC-MS/MS GC-MS/MS GC-MS	(0.09 - 2080)	LC-MS/MS GC-MS/MS	(0.31 - 11130)	LC-MS/MS HPLC-UV HPLC-FDL			(1.0 - 340)	GC-MS LC-MS/MS HPLC-FDL
Produtos de higiene pessoal					(2.2 - 323.5)	LC-MS/MS GC-MS/MS	137	GC-MS/MS	(18 – 135.5)	LC-MS/MS GC-MS/MS
Drogas ilícitas	(174 - 9717)	LC-MS/MS			(3.0 - 5896)	LC-MS/MS			(6.0 - 652)	LC-MS/MS
Subprodutos do processo de desinfecção de águas									(100 – 41000)	GC-ECD
Bisfenol A	(55.7 – 308.8)	LC-MS/MS	(220 - 5310)	LC-MS/MS	(2.8 - 39860)	LC-MS/MS HPLC-FLD			160 - 3610	GC-MS LC-MS/MS HPLC-FLD GC-MS/MS
Ftalatos					(5.0 - 33100)	LC-MS/MS HPLC-UV			(24 - 247)	GC-MS/MS
Alquilfenóis			(3030 - 78250)	LC-MS/MS	(1.2 - 1435)	LC-MS/MS HPLC-UV			(0.04 – 4)	LC-MS/MS
Compostos perfluorados									(0.2 – 8.8)	LC-MS/MS
Bifenilas policloradas (PCB)					(5.0 – 330)	GC-MS/MS				
Pesticidas					(0.5 - 23000)	LC-MS/MS HPLC-UV HPLC-FLD HRGC-ECD GC-MS/MS GC-MS GC-NPD	(10 - 68790)	HPLC-UV HPLC-FLD GC-MS/MS GC-MS GC-NPD	(0.2 - 2600)	LC-MS/MS HPLC-UV HRGC-ECD GC-ECD

Tabela 2: Concentrações mínimas e máximas (ng/L) para cada classe de

contaminantes nas diferentes matrizes aquáticas brasileiras e as técnicas analíticas utilizadas nas determinações

Fonte: Montagner, Vidal & Acayaba, 2017

3.2. Estações de tratamento de água e esgoto

A necessidade de soluções ambientais para tratamentos de água e descartes industriais fez surgir as ETE (Estações de Tratamento de Esgoto) e ETA (Estação de Tratamento de Água), uma vez que a escassez e a contaminação da água atinge grande parte da população, a média para tratamento de esgotos gerados foi de 50,8%. No entanto, ainda existe um sério problema de saneamento básico em diversas regiões do país, em que 44,8% dos brasileiros não possuem coleta de esgoto. Municípios do Sul e Sudeste apresentam bons desempenhos, enquanto Norte e Nordeste estão nas últimas posições no Ranking do Saneamento (Trata Brasil, 2024).

A ETA, tem como função tratar a água bruta, tornando-a potável e segura para consumo humano, garantindo padrões de potabilidade. Enquanto a ETE é responsável por tratar o esgoto doméstico antes de lançá-lo em corpos hídricos, reduzindo impactos ambientais sem causar poluição (BRASIL, Ministério da Saúde, 2021).

A tabela 2 demonstra que os tratamentos convencionais não são capazes de exterminar esses resíduos. O tratamento convencional de efluentes hospitalares e industriais, baseado em processos físicos, químicos e biológicos, muitas vezes se mostra insuficiente para eliminar agentes patogênicos altamente resistentes ou degradar completamente contaminantes emergentes. Em alguns casos, tais tratamentos ainda podem gerar subprodutos secundários indesejáveis, agravando o problema ambiental e sanitário (Laranjeira, 2019). Especialmente os fármacos, já que as indústrias farmacêuticas crescem a cada

ano e, os medicamentos entram em contato com os variados tipos de água devido ao consumo excessivo e ao descarte inadequado (Laranjeira, 2019).

3.3. Fármacos

Os fármacos pertencem a uma das classes de contaminantes emergentes mais estudados em todo o mundo, sendo a segunda mais pesquisada no Brasil. São compostos persistentes, lipofílicos e capazes de se bioacumular, alguns medicamentos são parcialmente metabolizados pelo organismo e, dessa forma, o excedente ou subprodutos metabólitos são excretados pela urina, indo para o meio ambiente (Costa et al., 2023). Os estudos confirmaram a presença dos contaminantes nas matrizes aquáticas, inclusive na água tratada, evidenciando a falha do saneamento básico (Montagner et al., 2017). Neste estudo, foram avaliados 3 tipos de fármacos, cada um de uma classe farmacológica diferente, um antidepressivo, um antibiótico e um anti-inflamatório. Inicialmente, o potencial do PEO para a degradação desses compostos foi investigado adicionando altas concentrações de FLX (50 mg/L), OFX (9,83 mg/L) e DCF (30,7 mg/L) em uma solução de silicato de sódio 0,01M.

3.3.1. Fluoxetina

A fluoxetina (FLX) é um antidepressivo muito utilizado no Brasil, com tempo de meia vida de até 7 dias a depender do ambiente que se encontra, em mamíferos é de 2 a 4 dias, e no ambiente aquático, por conta da adsorção ao sedimento, é de até 7 dias (Laranjeira, 2019). Quando relacionado a vida aquática, há dados que mostram efeitos negativos sobre o crescimento, reprodução e comportamento de invertebrados e vertebrados. Portanto, além da possibilidade de afetar o sistema imunológico e endócrino, há também efeitos tóxicos nessas condições (Costa et al., 2023). A concentração da FLX no sistema hídrico pode ser estimada a partir do consumo populacional, pelo 16º

de metabolização e pela excreção do medicamento, além da possibilidade de remoção ou degradação nas ETEs. (Souza et al., 2023).

3.3.2. Diclofenaco

O diclofenaco (DCF) é um anti-inflamatório não esteroide com propriedades analgésicas, possui um tempo de meia vida de aproximadamente 2 horas no corpo humano, mas em águas não se sabe exatamente o tempo de sobrevivência, em águas claras seu tempo é mais curto sendo menos de 1 hora devido a fotodegradação causada pelo sol, enquanto em águas escuras ele pode persistir por muito mais tempo. O DCF é um poluente orgânico emergente persistente em águas residuais, com concentrações detectadas de 0,45 a 17µg/L em esgoto e até 200µg/L em efluentes industriais (Souza et al., 2011).

3.3.3. Ofloxacino

O ofloxacino (OFX) é um antibiótico da classe quinolonas, e pode persistir meses dependendo do ambiente em que se encontra. No corpo humano ele dura em torno de 7 horas, em águas superficiais em dura entre 3 a 12 dias, mas em efluentes profundos ele pode persistir por mais de 100 dias. Ele é uma preocupação ambiental crescente, é classificado como um poluente emergente, frequentemente detectado em concentrações significativas tanto em águas residuárias brutas quanto em efluentes tratados em torno de 96 a 7.870ng/L (M.S. de Ilurdoz et al., 2022). A contaminação de OFX em corpos d'água pode causar o desenvolvimento de superbactérias, distúrbios metabólicos no ser humano e na vida marinha causando alterações nas funções endócrinas e reprodutivas.

3.4. Oxidação Eletrolítica por Plasma

A tecnologia da PEO, originalmente estudada a partir da década de 1950 e consolidada comercialmente a partir das décadas de 1980 e 1990, é hoje empregada em setores biomédico, automotivo, aeroespacial e eletrônico

(Ghasem et al., 2017). Trata-se de um processo eletroquímico que, sob potenciais elevados, promove reações eletroquímicas, químicas de plasma e difusão térmica de oxigênio. Diferente da anodização convencional, a PEO gera estruturas multicamadas — tipicamente compostas por uma camada externa porosa, uma intermediária densa e uma interna contínua — que conferem propriedades únicas de resistência ao desgaste, à corrosão, à temperatura, além de características catalíticas e bioativas (Soumya et al., 2021).

Empresas especializadas, como Keronite, Meotec e Nobel Biocare, já exploram o processo para conferir propriedades osteoindutivas a implantes médicos e resistência extrema a ligas leves (Clyne, 2019). Essas evidências demonstram a robustez do processo, que pode ser direcionado para novas aplicações. No entanto, a grande maioria da literatura usa a PEO apenas para a formação de filmes óxidos para que depois ele seja aplicado para diferentes demandas, como no caso do documento de *Gh. Barati Darban et al., Plasma electrolytic oxidation of magnesium and its alloys: Mechanism, properties and applications, Journal of Magnesium and Alloys, Volume 5, Issue 1, March 2017, Pages 74-132*; que propõe o uso da técnica para melhorar a resistência superficial e a biocompatibilidade, com aplicações voltadas a biomateriais.

Diferentemente das aplicações convencionais da PEO, voltadas à obtenção de revestimentos cerâmicos em substratos metálicos, recentemente uma patente foi depositada utilizando a PEO de forma completamente inovadora, ela usa o ambiente reacional gerado no eletrólito, das condições de plasma e da energia liberada, como agente ativo de degradação de moléculas orgânicas e inativação de microrganismos multirresistentes (patente BR10202600333). Embora as descargas de plasma durem apenas microssegundos, elas podem atingir temperaturas de 4×10^3 K a 10^4 K, o que é suficiente para fundir e recristalizar o filme de óxido e incorporar espécies do

eletrólito dentro da estrutura do óxido. Devido ao intenso campo elétrico e às altas temperaturas nesta fase, as espécies dissolvidas do eletrólito entre o ânodo e o cátodo são atraídas para os canais de descarga de plasma no eletrodo de alumínio, onde são oxidadas e degradadas (patente BR10202600333).

Aplicado em remediação ambiental, após a ignição do plasma a inclinação da curva tensão-tempo diminui e passa a oscilar em torno de uma amplitude de tensão que varia de 50 V a 150 V até o final do tratamento PEO. Essas oscilações são atribuídas a um processo rápido e simultâneo de dissolução e crescimento do óxido (Araújo et al., 2025). O sistema usando um eletrólito de 0,01 mol/L apresentou uma voltagem mais alta (460 V) antes da ruptura dielétrica do que o sistema com um eletrólito de 0,1 mol/L (350 V), como mostrado na Figura 4, tendo a solução medida em diferentes intervalos de tempo até os 60 minutos, em que se observa a sua degradação direta a CO_2 em solução, sem a formação de intermediários.

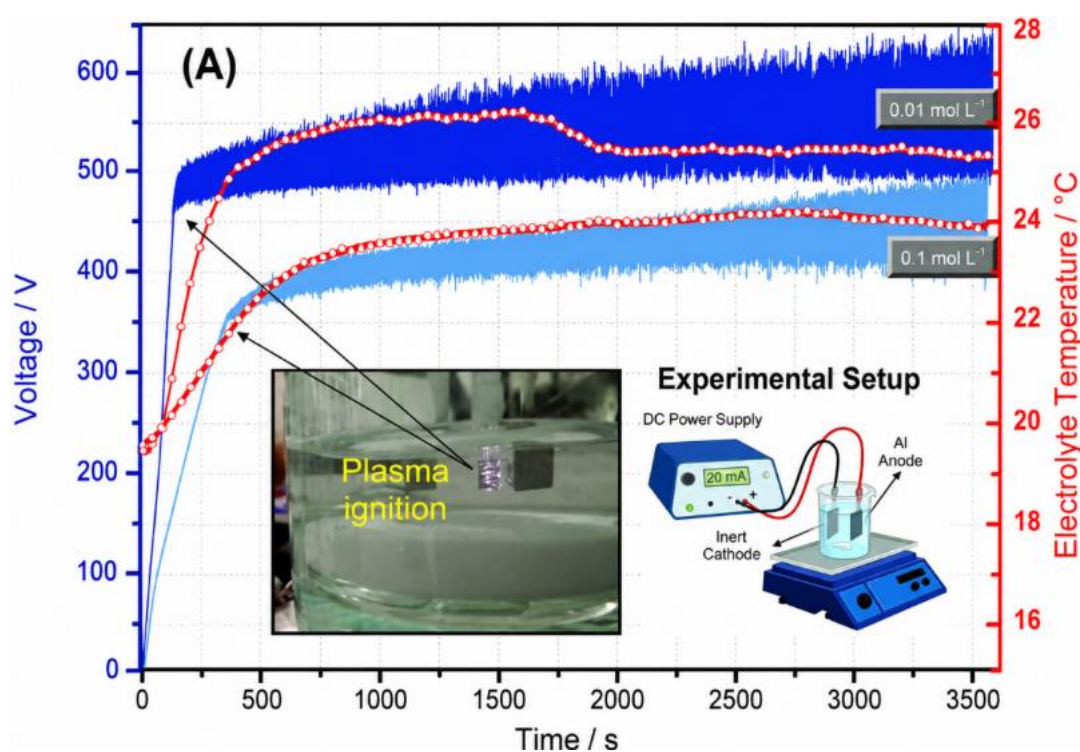


Figura 2: Curvas transientes de tensão para anodização de Al sob condição PEO em um eletrólito contendo silicato de sódio (0,01 mol/L e 0,1mol/L Na_2SiO_3) - Inserção: fotografia

das microdescargas dispersas aleatoriamente sobre o ânodo de Al; setas mostrando o momento de ignição da faísca e a configuração experimental simples para o experimento

PEO

Fonte: Araújo, 2025

Dessa forma, supera-se a limitação dos métodos tradicionais de tratamento de águas residuais, que frequentemente não eliminam contaminantes emergentes nem microrganismos resistentes, além de poderem gerar subprodutos indesejáveis.

3.5. Materiais Utilizados

Foram usados os parâmetros do artigo Araújo et al. (2025), já que é o único trabalho publicado que usou esse método com essa aplicação.

3.5.1. Placa de Alumínio

O Alumínio é um metal leve com alta resistência, é um bom condutor e facilmente maleável e possui baixa toxicidade, tendo diversas aplicações, desde embalagem de alimentos até com placas personalizáveis. No caso da aplicação apresentada neste trabalho, a placa de alumínio atua como um eletrodo em um processo galvanostático tendo um total 2cm^2 , sendo 1cm^2 de cada lado da placa, ela age como o eletrodo do processo e possui 2 contra eletrodos de Platina.

3.5.2. Fonte

A fonte é um equipamento que fornece corrente elétrica e permite controlar a tensão e a corrente, permitindo modular a quantidade de corrente a ser aplicada e acompanhar a variação tensão. Em processos galvanostáticos a corrente aplicada deve ser mantida constante durante todo processo, enquanto a tensão é medida e pode variar justamente para manter a corrente com seu valor fixo, a corrente contínua, faz com que o fluxo de elétrons percorra em uma única direção, do polo negativo para o polo positivo. Foi

aplicada uma corrente que fosse capaz de criar o estado de PEO, sendo de 20 mA/cm² dando um total de 40mA/cm² para a placa de alumínio utilizada.

3.5.3. Banho termostático

O controle de temperatura é necessário para garantir não só uma padronização como para evitar a perda de qualquer molécula orgânica por volatilização, mesmo as faíscas não sendo capazes de alterar a temperatura da solução, manter a temperatura permite confirmar que toda a redução de carbono orgânica que as caracterizações demonstram foi realmente degradada, que nada saiu da solução para o ambiente. De acordo com o ponto de ebulição do eletrólito utilizado (metassilicato de sódio) que é aproximadamente 72°C, manteve-se a temperatura em 20°C durante todo processo.

3.5.4. Metassilicato de Sódio (Na₂SiO₃)

O metassilicato de sódio em solução é um bom eletrólito, já que seu descarte é feito de forma simples e não causa prejuízo ambiental. Além disso, este composto permite que o Alumínio chegue em estado de plasma de forma rápida e eficiente em diferentes concentrações, sendo testado tanto a 0,1M como em 0,01M.

3.6. Caracterizações

3.6.1. Espectroscopia de Fluorescência

A espectroscopia de fluorescência, é um método analítico sensível que luz para excitar elétrons de moléculas, que emitem luz ao retornar ao estado fundamental, pode analisar baixas concentrações de compostos que formam quelatos fluorescentes. É aplicado de diversas formas, podendo analisar estruturas de proteína, determinar elementos de traço, medir intensidade de contaminantes e até detecção de componentes, oferecendo uma imagem 3D da

intensidade em função do comprimento de onda de emissão e do comprimento de onda de excitação .

Segundo o artigo de Araújo et. al. 2025, a figura 5 mostra a matriz de excitação-emissão de amostras contendo a mistura farmacêutica antes e depois de 60 minutos de degradação por PEO. Os picos de emissão centrados em 290 nm para FLX e 450 nm para OFX apresentaram uma diminuição significativa na intensidade após o processo, indicando 85% de degradação de FLX e 45% de OFX em 60 minutos, o diclofenaco não foi observado por fluorescência, devido o limite de detecção que os pesquisadores precisavam.

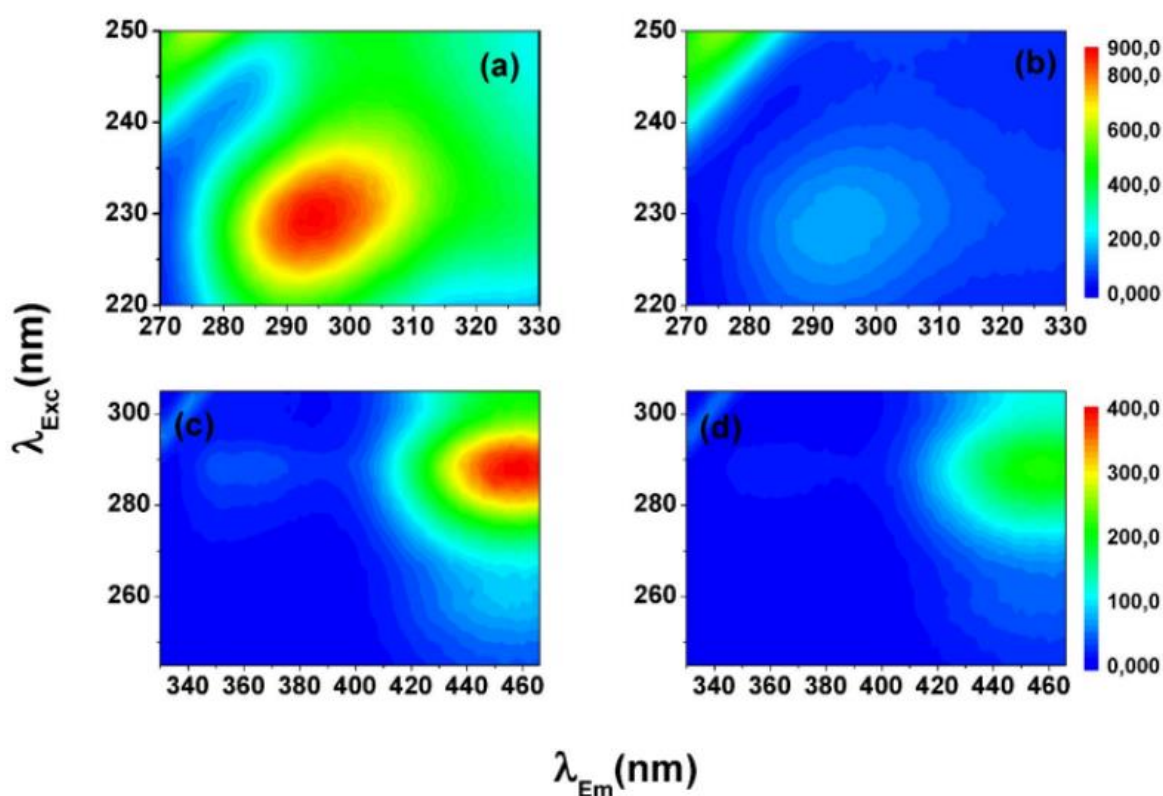


Figura 3: Degradação da mistura farmacêutica ao longo de 60 minutos. (a) FLX no tempo 0 minutos; (b) FLX após 60 minutos de degradação; (c) OFX no tempo inicial; (d) OFX após 60 minutos de degradação

Fonte: Araújo, 2025

3.6.2. Cromatografia Líquida de Alta Eficiência

A Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (HPLC) é uma técnica analítica avançada usada para separar, identificar e quantificar componentes de misturas complexas com base em sua polaridade. Utiliza alta pressão para forçar uma fase móvel líquida e a amostra através de uma coluna com fase estacionária, garantindo alta separação.

As amostras do autor Araújo et al. (2025) também foram analisadas por HPLC, e a degradação ao longo do tempo foi monitorada, conforme mostrado na Figura 4. O perfil de degradação do OFX monitorado por Fluorescência e HPLC foi comparado e apresentou resultados comparáveis. Contudo, a FLX em alta concentração não pôde ser detectada por HPLC devido à saturação do detector de fluorescência, mesmo após diluições sucessivas. A figura 4 exibe a degradação ao longo do tempo com a comparação de ambos os equipamentos (HPLC e fluorímetro). A figura 4(a) mostra o monitoramento da degradação de FLX (azul) e OFX (preto) e a figura 4(b) mostra o DFC (vermelho) e OFX (preto), ambos ao longo de 60 minutos. Aqui tem-se os perfis da mistura separados e se observa a redução de mais de 90% da fluoxetina e de mais de 60% para ofloxacina e para o diclofenaco.

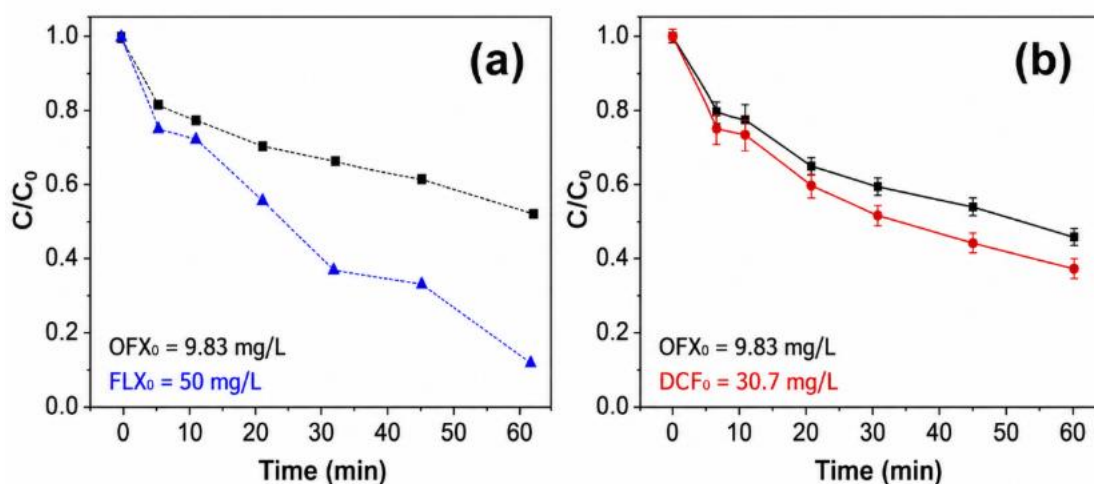


Figura 4: Degradação da mistura ao longo de 60 minutos. (a) Monitorada por EEM-PARAFAC; (b) Monitorada por HPLC

3.6.3. Microscopia Eletrônica de Varredura

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), é uma técnica de alta tecnologia que utiliza um feixe de elétrons para gerar imagens de alta resolução da superfície de amostras sólidas, permitindo analisar a morfologia (estrutura) e a topografia do componente.

Micrografias de MEV do Alumínio após a PEO revelaram uma morfologia de superfície de óxido irregular e compacta (Figura 5) para ambos os ânodos, essa morfologia pode ser atribuída à natureza e intensidade das descargas que ocorrem nas condições estudadas. A diferença observada nas tensões médias finais deve-se à espessura final da película de óxido; um valor de tensão maior resulta de uma menor concentração de silicato de sódio, que produz uma camada de óxido mais espessa, como demonstrado na Figura 5.

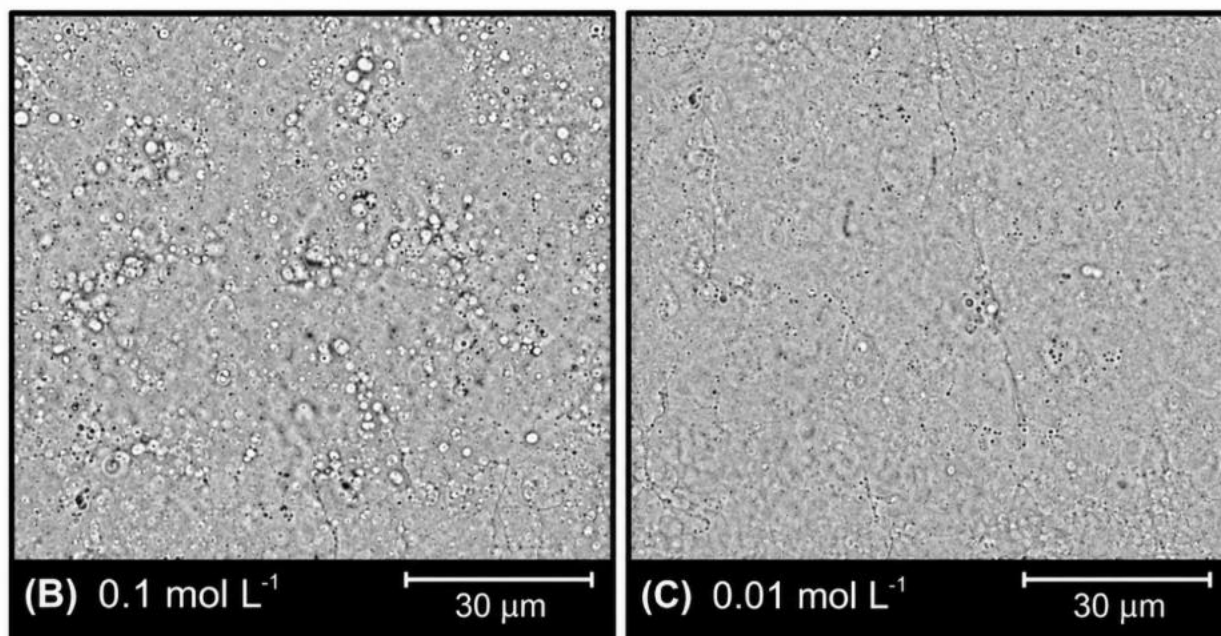


Figura 5: Micrografias SEM do ânodo de Al produzido após os experimentos PEO para ambas as concentrações de eletrólito

3.6.4. Redução de Carbono Orgânico Total

A análise de Carbono Orgânico Total (TOC) é uma técnica físico-química sensível e rápida, identifica e quantifica impurezas orgânicas em diferentes amostras. Ele tem como sua principal aplicabilidade a medição de contaminantes orgânicos em amostras de águas residuais. Determinar a carga total de TOC antes de iniciar o tratamento permite otimizar a operação e medir a descarga de TOC no final do processo, o que demonstra a eficácia do tratamento utilizado.

Na Tabela 3, observa-se os dados obtidos nos estudos de Araújo et al. (2025) de TOC para as amostras antes e depois de 60 minutos de degradação. Partiu-se de um TOC de 100% e no final da mistura após 60 minutos havia um TOC de 42,7%, ou seja, a redução de carbono foi de 57,3% da mistura dos 3 fármacos, essas cadeias são reduzidas a CO₂ não havendo formação de subproduto.

Time	TC* (mg L ⁻¹)	IC** (mg L ⁻¹)	TOC (mg L ⁻¹)
Water	0.245 ± 0.035	0.043 ± 0.002	0.202
Before degradations	73.278 ± 0.702	28.372 ± 0.540	44.92
After 60 minutes	48.325 ± 0.648	29.144 ± 0.027	19.18

Tabela 3: TOC das amostras antes e depois de 60 minutos de degradação.

Fonte: Araújo, 2025

3.7. Trabalhos Atuais

Para compreender melhor a eficiência da técnica e o potencial inovador dessa nova aplicação, é necessário comparar com outros trabalhos sobre a PEO que foram publicados nos últimos 10 anos.

3.7.1. Processo para destruição ou inativação de contaminantes químicos e microorganismos, e, uso de oxidação eletrolítica de plasma. (Ernesto Pereira, 2026).

O trabalho referente à patente BR10202600333 depositada no INPI (Instituto Nacional da Propriedade Industrial) teve como objetivo o desenvolvimento de um processo para destruição ou inativação de contaminantes químicos e microrganismos, utilizando a oxidação eletrolítica por plasma (PEO) como ferramenta principal no tratamento de efluentes. Diferentemente das aplicações convencionais da PEO, voltadas à formação de revestimentos cerâmicos em superfícies metálicas, o método proposto explora as descargas elétricas (sparks ou faíscas) e as condições extremas de temperatura e energia no meio eletrolítico como agentes ativos de degradação de poluentes e inativação microbiológica. O sistema consiste em uma célula eletrolítica com eletrodos imersos em solução, submetidos a altas tensões, promovendo a geração de plasma local com temperaturas elevadas, capazes de induzir reações químicas intensas.

Os resultados foram altamente eficientes, evidenciando a completa inativação de microrganismos como *Escherichia coli*, *Klebsiella pneumoniae* e *Staphylococcus aureus*, sem crescimento celular após o tratamento. Além disso, o processo demonstrou elevada capacidade de degradação de contaminantes químicos, como fármacos (fluoxetina, ofloxacino e diclofenaco), com redução significativa do carbono orgânico total. Além disso, a eficiência é mantida mesmo em diferentes concentrações de contaminantes, indicando robustez do sistema e independência significativa em relação à concentração inicial dos poluentes.

Com isso, os autores concluíram que a utilização da PEO como meio de tratamento de efluentes representa uma tecnologia inovadora, eficiente e sustentável, capaz de promover a degradação de compostos químicos e a eliminação de microrganismos. O processo apresenta vantagens importantes, como a ausência de necessidade de oxidantes externos, rápida atuação e potencial de aplicação em diferentes escalas, sendo promissor para uso em efluentes industriais, hospitalares e ambientais .

3.7.2. Development of Titanium Surfaces Oxidized by Electrolytic Plasma, for Biomedical Application (Clodomiro Alves-Junior, 2023)

Esse artigo sobre o desenvolvimento de superfícies de titânio por PEO teve como objetivo a modificação superficial do titânio visando aplicações biomédicas, especialmente na melhoria da biocompatibilidade e da osseointegração. O método utilizado foi a oxidação eletrolítica por plasma, na qual o titânio é submetido a altas tensões em meio eletrolítico, promovendo a formação de uma camada de óxidos, predominantemente TiO_2 , com estrutura porosa e elevada rugosidade. As propriedades do material foram avaliadas por meio de técnicas de caracterização morfológica, estrutural e composicional, evidenciando a formação de uma superfície homogênea, aderente e com porosidade controlada.

Eles indicaram que o tratamento promoveu aumento significativo da rugosidade superficial e da molhabilidade, fatores diretamente relacionados à melhor interação com células biológicas. Além disso, a incorporação de espécies presentes no eletrólito, como cálcio e fósforo, contribuiu para o aumento da bioatividade do material. Observou-se também que os parâmetros do processo, como tensão aplicada e tempo de tratamento, influenciam diretamente a espessura da camada formada, o tamanho dos poros e a composição química do revestimento.

Dessa forma, ficou claro que a PEO foi uma técnica eficiente, versátil e promissora para a modificação de superfícies de titânio, permitindo a obtenção de revestimentos com propriedades adequadas para aplicações biomédicas. O controle dos parâmetros de processamento é fundamental para ajustar as características do material final, influenciando diretamente seu desempenho biológico e sua aplicabilidade em implantes.

3.7.3. Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) Process—Processing, Properties, and Applications (Soumya Sikdar, 2021)

O trabalho de Sikdar (2021) teve como objetivo apresentar uma revisão abrangente sobre a PEO, abordando seus princípios de funcionamento, parâmetros de processamento, propriedades dos revestimentos obtidos e suas principais aplicações. O método consiste na aplicação de altas tensões em um sistema eletroquímico, promovendo descargas plasmáticas na superfície de metais como titânio, alumínio e magnésio, resultando na formação de camadas cerâmicas porosas, espessas e fortemente aderentes.

O estudo descreve detalhadamente a influência de variáveis como composição do eletrólito, densidade de corrente, tempo de tratamento e modo de operação nas características finais dos revestimentos. A discussão da revisão indica que os revestimentos obtidos por PEO apresentam elevada dureza, resistência ao desgaste e à corrosão, além de propriedades funcionais que podem ser ajustadas conforme a aplicação desejada. A incorporação de espécies do eletrólito permite modificar a composição química da camada, tornando possível, por exemplo, a obtenção de superfícies bioativas para aplicações biomédicas ou revestimentos com propriedades dielétricas e térmicas específicas. O trabalho também destaca que a morfologia porosa e a presença de diferentes fases cristalinas influenciam diretamente o desempenho do material, sendo possível controlar essas características por meio dos parâmetros do processo.

3.7.4. A review of recent work on discharge characteristics during plasma electrolytic oxidation of various metals (Trevor William Clyne, 2019)

Esse projeto de Clyne teve como objetivo revisar os avanços recentes no entendimento das características das descargas elétricas durante o processo de oxidação eletrolítica por plasma (PEO) em diferentes metais. O estudo foca principalmente na natureza das microdescargas que ocorrem na superfície do

material durante o tratamento, discutindo sua formação, evolução e influência na estrutura e nas propriedades dos revestimentos obtidos.

A revisão aborda como parâmetros operacionais, como voltagem, densidade de corrente, composição do eletrólito e tipo de metal (como alumínio, titânio e magnésio), afetam o comportamento das descargas e, conseqüentemente, o crescimento do filme oxidado. Essas descargas não são uniformes, apresentando diferentes regimes ao longo do processo, variando de descargas mais suaves e distribuídas a eventos mais intensos e localizados. E as variações influenciam diretamente a morfologia do revestimento, incluindo o tamanho e a distribuição de poros, a espessura da camada e a formação de fases cristalinas.

As microdescargas estão associadas a altas temperaturas e pressões locais, promovendo fusão, solidificação rápida e incorporação de espécies do eletrólito, o que contribui para a complexidade estrutural dos revestimentos formados. A análise dos diferentes regimes de descarga permite ajustar as condições operacionais de forma mais precisa, possibilitando a produção de camadas com características específicas para diversas aplicações tecnológicas, como proteção contra corrosão, resistência ao desgaste e aplicações biomédicas (Clyne, 2019).

3.7.5. Plasma electrolytic oxidation of magnesium and its alloys: Mechanism, properties and applications (Ghasem Barati Darband, 2017)

Nessa revisão foi mostrado a PEO aplicado ao magnésio e suas ligas, abordando os mecanismos envolvidos, as propriedades dos revestimentos formados e suas principais aplicações. É descrito o funcionamento do processo, destacando a formação de descargas microplasmáticas na superfície do magnésio, que levam à formação de camadas cerâmicas compostas principalmente por óxidos, com estrutura porosa e forte aderência ao substrato. Também são discutidos os efeitos dos parâmetros de processamento, como voltagem,

densidade de corrente, composição do eletrólito e tempo de tratamento, na morfologia e composição dos revestimentos.

Além disso, indicam que os revestimentos obtidos por PEO em magnésio apresentam melhora significativa na resistência à corrosão e ao desgaste, propriedades essenciais devido à alta reatividade desse metal. A incorporação de elementos do eletrólito, como silício, fósforo e cálcio, permite modificar a composição química e funcionalizar a superfície, ampliando suas aplicações, especialmente na área biomédica. Ele destaca que a estrutura dos revestimentos é tipicamente composta por camadas distintas, incluindo uma camada externa mais porosa e uma camada interna mais densa, o que influencia diretamente o desempenho do material. Além disso, são discutidos desafios como a presença de poros e trincas, que podem comprometer a proteção contra corrosão.

Dessa forma, o autor conclui que o processo PEO é uma técnica promissora para a modificação superficial de magnésio e suas ligas, possibilitando a ampliação de suas aplicações em setores como biomateriais, indústria automotiva e aeroespacial. No entanto, também apontam os desafios como a presença de poros e trincas, que podem comprometer a proteção contra corrosão.

3.7.6. Comparação dos trabalhos que envolveram oxidação eletrolítica por Plasma

Os trabalhos analisados abordam a PEO sob diferentes perspectivas, mas todos convergem para a versatilidade e eficiência da técnica na modificação de materiais e no tratamento de sistemas complexos. De forma geral, os artigos de Sikdar (2021), Clyne (2019) e Darband (2017) apresentam uma abordagem mais fundamental e consolidada do processo, enquanto o trabalho sobre superfícies de titânio e a patente BR10202600333 exploram aplicações mais direcionadas e inovadoras.

O trabalho de Sikdar (2021) fornece uma visão ampla do processo PEO, destacando os parâmetros operacionais e suas influências nas propriedades dos revestimentos formados, como resistência à corrosão, desgaste e propriedades funcionais. De forma complementar, Darband (2017) foca especificamente no magnésio e suas ligas, enfatizando os mecanismos de formação das camadas e os desafios associados, como porosidade e trincas. Já Clyne (2019) aprofunda o entendimento físico do processo ao analisar as características das descargas elétricas, evidenciando que essas microdescargas são determinantes na formação estrutural dos revestimentos. Em conjunto, esses três trabalhos estabelecem a base teórica do PEO, relacionando parâmetros de processo, fenômenos físicos e propriedades finais dos materiais.

Por outro lado, o trabalho sobre superfícies de titânio aplica esses princípios para a área biomédica, utilizando o PEO para gerar superfícies porosas e bioativas que favorecem a osseointegração. Nesse caso, o foco está na funcionalização da superfície metálica, aproveitando a morfologia e composição do óxido formado para melhorar a interação com tecidos biológicos. Essa aplicação representa uma transição entre o entendimento fundamental e a aplicação tecnológica do processo. Em contraste, a patente BR10202600333 propõe uma abordagem inovadora ao utilizar o PEO não para a formação de revestimentos, mas sim para explorar diretamente as condições extremas geradas pelas descargas de plasma no meio eletrolítico. Diferentemente dos demais trabalhos, o foco não está no filme de óxido formado, mas na utilização da energia do plasma para promover a degradação de contaminantes químicos e a inativação de microrganismos. Os resultados demonstram alta eficiência na eliminação de bactérias e degradação de fármacos, evidenciando uma nova aplicação da técnica no tratamento de efluentes e no combate à resistência antimicrobiana.

Dessa maneira, a comparação feita entre artigos desde 2017 até o presente ano, evidenciam o potencial da PEO como uma tecnologia multifuncional, com aplicações que vão desde engenharia de superfícies até soluções avançadas para problemas ambientais e de saúde pública.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como demonstrado, os contaminantes emergentes estão ganhando cada vez mais relevância nas pesquisas devido à preocupação crescente, já que o ambiente industrial não para de crescer. Dessa forma, fica claro a necessidade de formas alternativas de degradar os contaminantes emergentes, especialmente nas matrizes aquáticas, já que os fármacos (FLX, OFX e DFC) demonstram grande resistência aos métodos convencionais de degradação.

E esse método que vem sendo estudado se destaca como ser uma opção eficaz e promissora. A PEO, como visto anteriormente, tem uma redução de carbono orgânico de 57,3% o que significa que a alta temperatura das faíscas localizadas são capazes de deteriorar grande parte dos fármacos, alcançando um nível de degradação altíssimo quando se compara com os tratamentos que temos hoje.

Além disso, essas elevadas temperaturas permitem evitar a formação de subprodutos que chegam a ser ainda mais tóxicos do que os próprios fármacos em si, como é o caso do TFMP, o subproduto da fluoxetina. Os subprodutos não chegam a ser formados pois quando o fármaco entra em contato com as faíscas de plasma, nem mesmo o composto orgânico mais complexo resiste e, dessa maneira, as moléculas orgânicas se reduzem em CO₂ na solução e em baixa concentração, não se tornando um problema para o efeito estufa.

No entanto, apesar de ser eficaz, ainda é um método que precisa ser mais estudado e otimizado, considerando que é a primeira vez que pesquisadores à usam com essa aplicação. Em escala laboral ele tem se provado cada vez mais

eficiente e pesquisadores acreditam que ele pode ser aplicado para diversos outros tipos de contaminantes e até bactérias.

Há diversas possibilidades a serem observadas e desenvolvidas diante desse método, especialmente em escala industrial, já que isso ainda não foi estudado de acordo com a literatura, mas deve ser só questão de tempo devido aos seus bons resultados e baixo custo.

Portanto, até a finalização desse trabalho não havia estudos que demonstrassem a transição para a escala industrial, mas há muitas possibilidades para futuras pesquisas, principalmente devido à visibilidade que ele tem ganhado desde divulgação científica online até reportagens televisivas. O que também promove uma conscientização populacional que é extremamente necessária para as pessoas se atentarem com o descarte e o consumo exacerbado de medicamentos.

1. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. A. Inobeme, A. I. Ajai, C. O. Adetunji, M. Munirat, M. J. Tsado, A. Mann, J. E. Osarenre, J. Inobeme, A. Mathew, E. Chinenye, Oxidation and advanced oxidation processes in pharmaceutical wastewater treatment, in: Development in Wastewater Treatment Research and Processes, Elsevier, Waltham, MA, USA, 2024, pp. 157–69. doi:10.1016/B978-0-323-99278-7.00008-0.
2. Alves-Junior, C., Frutuoso, F. G. S. de O., Vitoriano, J. de O., Santos, J. P. V., Leitão, M. E. da C., & Cavalcante, R. D. M.. (2023). Development of Titanium Surfaces Oxidized by Electrolytic Plasma, for Biomedical Application. Materials Research, 26, e20230028. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2023-0028>.
3. A. L. Yerokhin, X. Nie, A. Leyland, A. Matthews, S. J. Dowey, Plasma electrolysis for surface engineering, Surf. Coat. Technol. 122 (1999) 73–93. doi:10.1016/S0257-8972(99)00441-7.
4. A. Pereira, L. Silva, C. Laranjeiro, A. Pena, Assessment of Human Pharmaceuticals in Drinking Water Catchments, Tap and Drinking Fountain Waters, Appl. Sci. 11 (2021) 7062. doi:10.3390/app11157062.

5. A. Richard, F. A. Camara, H. Ram'ezani, N. Mathieu, S. Delpoux, S. K. Bhatia, Structure of diclofenac in an aqueous medium and its adsorption onto carbons: Molecular insights through simulation, *Colloids Surf., A* 686 (2024) 133373. doi:10.1016/j.colsurfa.2024.133373.
6. A. Singh, S. G. Pratap, A. Raj, Occurrence and dissemination of antibiotics and antibiotic resistance in aquatic environment and its ecological implications: a review, *Environ. Sci. Pollut. Res.* 31 (2024) 47505–29. doi:10.1007/s11356-024-34355-x.
7. A. Tufail, W. E. Price, M. Mohseni, B. K. Pramanik, F. I. Hai, A critical review of advanced oxidation processes for emerging trace organic contaminant degradation: Mechanisms, factors, degradation products, and effluent toxicity, *J. Water Process Eng.* 40 (2021) 101778. doi:10.1016/j.jwpe.2020.101778.
8. B. Maryam S. Fakhri, N. G. Barghi, M. M. Mehdikhanmahaleh, S. M. M. R. Zadeh, T. Mousavi, R. Rezaee, M. Daghighi, M. Abdollahi, Pharmaceutical wastewater toxicity: An ignored threat to the public health, *Sustainable Environment* (2024). doi:10.1080/27658511.2024.2322821.
9. C. Biswas, S. Maity, M. Adhikari, A. Chatterjee, R. Guchhait, K. Pramanick, Pharmaceuticals in the Aquatic Environment and Their Endocrine Disruptive Effects in Fish, *Proc. Zool. Soc.* 74 (2021) 507–22. doi:10.1007/s12595-021-00402-5.
10. Clyne TW, Troughton SC. Uma revisão de trabalhos recentes sobre as características de descarga durante a oxidação eletrolítica por plasma de vários metais. *International Materials Reviews* . 2019;64(3):127-162. doi: 10.1080/09506608.2018.1466492
11. C. Prasse, D. Stalter, U. Schulte-Oehlmann, J. Oehlmann, T. A. Ternes, Spoilt for choice: A critical review on the chemical and biological assessment of current wastewater treatment technologies, *Water Res.* 87 (2015) 237–70. doi:10.1016/j.watres.2015.09.023.
12. De Araújo, Kelvin C.; Moreira, Ailton J.; Da Silva, Jeyse; Staciaki, Felipe; Oliveira, Regiane C.; Kordiak, Wesley; Batista, Jonata R.D.; Trivinho-Strinxino, Francisco; Pereira, Ernesto. An innovative method for environmental remediation using sparks formed during plasma electrolytic oxidation on aluminum foils. *J. Environ. Chem. Eng.*, v. 526, p. 171016, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.171016>.

13. E. A. Giustinianovich, J.-L. Campos, M. D. Roeckel, A. J.7 Estrada, A. Mosquera-Corral, A'. Val del Río, Influence of biomass acclimation on the performance of a partial nitrification-anammox reactor treating industrial saline effluents, *Chemosphere* 194 (2018) 131–8. doi:10.1016/j.chemosphere.2017.11.146.
14. E. E. Rodriguez, W. A. Tarpeh, K. R. Wigginton, N. G. Love, Application of plasma for the removal of pharmaceuticals in synthetic urine, *Environ. Sci. Water Res. Technol.* 8 (2022) 523–33. doi:10.1039/D1EW00863C.
15. FARTO, C. D. Contaminantes emergentes em coleções hídricas na região da grande João Pessoa -PB: Avaliação da presença e eficiência de remoção nas estações de tratamento de água e esgotos. 2024. 125f, Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Civil E Ambiental, Universidade Federal Da Paraíba, Joao Pessoa, 2024. Disponível em: https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/32676/1/CindyDeinaFarto_Tese.pdf. Acesso em: 25 set. 2025
16. F. Hou, R. Gorthy, I. Mardon, D. Tang, C. Goode, Protecting Light Metal Alloys Using a Sustainable Plasma Electrolytic Oxidation Process, *ACS Omega* 7 (2022) 8570–80. doi:10.1021/acsomega.1c06442.
17. F. Mansouri, K. Chouchene, N. Roche, M. Ksibi, Removal of Pharmaceuticals from Water by Adsorption and Advanced Oxidation Processes: State of the Art and Trends, *Appl. Sci.* 11 (2021) 6659. doi:10.3390/app11146659.
18. Gh. Barati Darband, M. Aliofkhazraei, P. Hamghalam, N. Valizade, Plasma electrolytic oxidation of magnesium and its alloys: Mechanism, properties and applications, *J. Magnesium and Alloys* 5 (2017) p. 74-132. doi.org/10.1016/j.jma.2017.02.004
19. GOMES, M. P., & GOMES, L. P. (2024). Tracking the surge of psychiatric pharmaceuticals in urban rivers of Curitiba amidst and beyond the SARS-CoV-2 pandemic. *The Science of the Total Environment*, 954(176685), 176685. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176685>
20. H. Ghazal, E. Koumaki, J. Hoslett, S. Malamis, E. Katsou, D. Barcelo, H. Jouhara, Insights into current physical, chemical and hybrid technologies used for the treatment of wastewater contaminated with pharmaceuticals, *J. Cleaner Prod.* 361 (2022) 132079. doi:10.1016/j.jclepro.2022.132079.

21. H. Lin, Y. Du, M. Yu, W. Zhang, W. Cai, Unveiling the impacts of salts on halotolerant bacteria during filtration: A new perspective on membrane biofouling formation in MBR treating high-saline organic wastewater, *Chemosphere* 364 (2024) 143258. doi:10.1016/j.chemosphere.2024.143258.
22. H. Yang, Q. Ping, Y. Zhang, Highly efficient degradation of ofloxacin and diclofenac by composite photocatalyst aloemodin/PMMA, *Environ. Sci. Pollut. Res.* 30 (2023) 72721–40. doi:10.1007/s11356-023-27530-z.
23. H. Zhang, N. Shen, Y. Li, C. Hu, P. Yuan, Source, transport, and toxicity of emerging contaminants in aquatic environments: A review on recent studies, *Environ. Sci. Pollut. Res.* 30 (2023) 121420–3. doi:10.1007/s11356-023-30869-y
24. J. B. Adeoye, Y. H. Tan, S. Y. Lau, Y. Y. Tan, T. Chiong, N. M. Mubarak, M. Khalid, Advanced oxidation and biological integrated processes for pharmaceutical wastewater treatment: A review, *J. Environ. Manage.* 353 (2024) 120170. doi:10.1016/j.jenvman.2024.120170.
25. J. O. Osuoha, B. O. Anyanwu, C. Ejileugha, Pharmaceuticals and personal care products as emerging contaminants: Need for combined treatment strategy, *Journal of Hazardous Materials Advances* 9 (2023) 100206. doi:10.1016/j.hazadv.2022.100206.
26. J. P. Bavumiragira, J. Ge, H. Yin, Fate and transport of pharmaceuticals in water systems: A processes review, *Sci. Total Environ.* 823 (2022) 153635. doi:10.1016/j.scitotenv.2022.153635.
27. J. S. Santos, M. S. Sikora, F. Trivinho-Strixino, S. Praserthdam, P. Praserthdam, A comprehensive review of anodic TiO₂ films as heterogeneous catalysts for photocatalytic and photoelectro- catalytic water disinfection, *J. Water Process Eng.* 69 (2025) 106589. doi:10.1016/j.jwpe.2024.106589.
28. J. Wang, C. Xing, J. Xia, H. Chen, J. Zhang, W. Yan, Degradation of carbendazim in aqueous solution by dielectric barrier discharge cold plasma: Identification and toxicity of degradation products, *Food Chem.* 403 (2023) 134329. doi:10.1016/j.foodchem.2022.134329.
29. K. Samal, S. Mahapatra, M. Hibzur Ali, Pharmaceutical wastewater as Emerging Contaminants (EC): Treatment technologies, impact on environment and human health, *Energy Nexus* 6 (2022) 100076. doi:10.1016/j.nexus.2022.100076.

30. LARANJEIRA, D. R. A. S. Avaliação do risco ambiental da fluoxetina em sedimentos marinhos para invertebrados aquáticos. 2019. 115f Tese (Doutorado em Ciências, área de Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares –IPEN-CNEN/SP. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-11042019-144512/publico/2019LaranjeiraAvaliacao.pdf>. Acesso em: 9 out. 2025.
31. M. Bilal, K. Rizwan, M. Adeel, H. M. N. Iqbal, Hydrogen-based catalyst-assisted advanced oxidation processes to mitigate emerging pharmaceutical contaminants, *Int. J. Hydrogen Energy* 47 (2022) 19555–69. doi:10.1016/j.ijhydene.2021.11.018.
32. M. Hatzisymeon, M. K. Daletou, G. Rassias, C. A. Aggelopoulos, Degradation of organic pollutants combining plasma discharges generated within soil with TiO₂ and ZnO catalysts: Comparative analysis, optimization and mechanisms, *Sep. Purif. Technol.* 320 (2023) 124119. doi:10.1016/j.seppur.2023.124119.
33. M. Karbasi, E. Nikoomanzari, R. Hosseini, H. Bahramian, R. Chaharmahali, S. Giannakis, M. Kaseem, A. Fattah-alhosseini, A review on plasma electrolytic oxidation coatings for organic pollutant degradation: How to prepare them and what to expect of them?, *J. Environ. Chem. Eng.* 11 (2023) 110027. doi:10.1016/j.jece.2023.110027.
34. Montagner, C. C., Vidal, C., & Acayaba, R. D.. (2017). CONTAMINANTES EMERGENTES EM MATRIZES AQUÁTICAS DO BRASIL: CENÁRIO ATUAL E ASPECTOS ANALÍTICOS, ECOTOXICOLÓGICOS E REGULATÓRIOS. *Química Nova*, 40(9), 1094–1110. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170091>.
35. M. Patel, R. Kumar, K. Kishor, T. Mlsna, C. U. Pittman, Jr., D. Mohan, Pharmaceuticals of Emerging Concern in Aquatic Systems: Chemistry, Occurrence, Effects, and Removal Methods, *Chem. Rev.* 119 (2019) 3510–673. doi:10.1021/acs.chemrev.8b00299.
36. M. Sagaseta de Ilurdoz, J. Jaime Sadhwani, J. Vaswani Reboso, Antibiotic removal processes from water & wastewater for the protection of the aquatic environment - a review, *J. of Water Process Eng.* 45 (2022) 102474. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102474>
37. M. Samy, K. Mensah, M. Gar Alalm, A review on photodegradation mechanism of bio-resistant pollutants: Analytical methods, transformation

products, and toxicity assessment, *J. of Water Process Eng.* 49 (2022) 103151. doi:10.1016/j.jwpe.2022.103151.

38. M. Valdez-Carrillo, L. Abrell, J. Ramírez-Hernández, J. A. Reyes-López, C. Carreón-Díazconti, Pharmaceuticals as emerging contaminants in the aquatic environment of Latin America: a review, *Environ. Sci. Pollut. Res.* 27 (2020) 44863–91. doi:10.1007/s11356-020-10842-9.

39. M. Veseli, M. Rožman, M. Vilenica, M. Petrović, A. Previšić, Bioaccumulation and bioamplification of pharmaceuticals and endocrine disruptors in aquatic insects, *Sci. Total Environ.* 838 (2022) 156208. doi:10.1016/j.scitotenv.2022.156208.

40. N. Khairunniza, M. K. Aliyu, Public practice on the unused pharmaceutical waste and the effect on surface water, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 1205 (2023) 012003. doi:10.1088/1755-1315/1205/1/012003.

41. N. Rameshbabu, B. Ravisankar, A. Saikiran, E. V. Parfenov, R. Z. Valiev, Surface modification of CP-Ti metallic implant material by plasma electrolytic oxidation, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 672 (2019) 012012. doi:10.1088/1757-899X/672/1/012012.

42. O. C. Olatunde, D. C. Onwudiwe, Graphene-Based Composites as Catalysts for the Degradation of Pharmaceuticals, *Int. J. Environ. Res. Public Health* 18 (2021) 1529. doi:10.3390/ijerph18041529.

43. P. M. K. Reddy, Ch. Subrahmanyam, Catalytic Plasma Reactor for Degradation and Mineralization of Pharmaceuticals and Personal Care Products, *Journal of Advanced Oxidation Technologies* 18 (2015) 161–6. doi:10.1515/jaots-2015-0120.

44. R. C. Sanito, S.-J. You, Y.-F. Wang, Degradation of contaminants in plasma technology: An overview, *J. Hazard. Mater.* 424 (2022) 127390. doi:10.1016/j.jhazmat.2021.127390.

45. R. F. Waris, I. H. Farooqi, Different advanced oxidation processes for the abatement of pharmaceutical compounds, *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 21 (2024) 2325–38. doi:10.1007/s13762-023-05127-w.

46. SIGMA-ALDRICH. 4-(Trifluoromethyl)phenol 97%. Disponível em: <https://www.sigmaaldrich.com/BR/pt/product/aldrich/178470>. Acesso em: 03 nov. 2025.

47. S. M. Benny, S. D. Gupta, S. P. Ismail, D. Francis, Pharmaceutical Pollution of Water Bodies, in: Handbook of Water Pollution, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, England, UK, 2024, pp. 371–416. doi:10.1002/9781119904991.ch12.
48. SOUZA, C. P. F. A. DE, KLIGERMAN, D. C., BEZERRA, G. M., & OLIVEIRA, J. L. DA M. (2023). Environmental risk caused by drug waste in the city of Rio de Janeiro, Brazil, during the SARS-Cov19 pandemic. *Ciencia & saude coletiva*, 28(3), 711. <https://doi.org/10.1590/1413-81232023283.05722022>
49. SOUZA, N. C. de. Avaliação de micropoluentes emergentes em esgotos e águas superficiais. 2011. 166 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil - Saneamento Ambiental)-Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.
50. S. Sikdar, P. V. Menezes, R. Maccione, T. Jacob, P. L. Menezes, Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) Process-Processing, Properties, and Applications, *Nanomaterials* (Basel). 11 (2021) 1375. doi:10.3390/nano11061375. arXiv:34067483.
51. TRATA BRASIL. Resumo Executivo – Ranking do Saneamento de 2024. Disponível em: <https://tratabrasil.org.br/wp-content/uploads/2024/04/Resumo-Executivo-Ranking-doSaneamento-de-2024-TRATA-BRASIL-GO-ASSOCIADOS.pdf>. Acesso em: 8 out. 2025.
52. T. Milovac, Pharmaceuticals in the Water: The Need for Environmental Bioethics, *J. Med. Humanit.* 44 (2023) 245–50. doi:10.1007/s10912-022-09774-x.
53. T. W. Clyne, S. C. Troughton, A review of recent work on discharge characteristics during plasma electrolytic oxidation of various metals, *Int. Mater. Rev.* 64 (2019) 127–62. doi:10.1080/09506608.2018.1466492.
54. U. Malayoğlu, K. C. Tekin, Wear behaviour of plasma electrolytic oxide coatings on E21 and WE43 Mg alloys, *Surf. Eng.* (2015). URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/>
55. W.-L. Wang, Q.-Y. Wu, N. Huang, Z.-B. Xu, M.-Y. Lee, H.-Y. Hu, Potential risks from UV/H₂O₂ oxidation and UV photocatalysis: A review of toxic, assimilable, and sensory-unpleasant transformation products, *Water Res.* 141:109-125 (2018). doi:10.1016/j.watres.2018.05.005. arXiv:29783164.
56. X. Huang, G. Lu, X. Zhu, C. Pu, J. Guo, X. Liang, In-sight into the generation of toxic by-products during UV/H₂O₂ degradation of carbamazepine: Mechanisms,

N-transformation and toxicity, *Chemosphere* 358 (2024) 142175. doi:10.1016/j.chemosphere.2024.142175.

57. X. Lu, M. Mohedano, C. Blawert, E. Matykina, R. Arrabal, K. U. Kainer, M. L. Zheludkevich, Plasma electrolytic oxidation coatings with particle additions – A review, *Surf. Coat. Technol.* 307 (2016) 1165–82. doi:10.1016/j.surfcoat.2016.08.055.

58. Y. He, W. Sang, W. Lu, W. Zhang, C. Zhan, D. Jia, Recent Advances of Emerging Organic Pollutants Degradation in Environment by Non-Thermal Plasma Technology: A Review, *Water* 14 (2022) 1351. doi:10.3390/w14091351.

59. Y. Pan, Q. Zhou, F. Meng, Q. Cao, J. Bai, Z. Zhang, Q. Liu, H. Zhang, (1 1 1) Facet-dominant peracetic acid activation by octahedral CoO anchored hollow carbon microspheres for tetracycline degradation, *Chem. Eng. J.* 493 (2024) 152446. doi:10.1016/j.cej.2024.152446.

60. Y.-y. Ren, C. Liu, Z. Cao, C.-c. Li, Performance and degradation mechanism of phycocyanin by Cu-TiO₂ photocatalytic treatment, *Environ. Sci. Pollut. Res.* 30 (2023) 58304–14. doi:10.1007/s11356-023-26080-8.

61. Z. Liu, D. Wang, M. Zhang, H. Ma, G. Wang, Highly active and selective H₂O₂ electrosynthesis in O-rich ZIF-67 derived Co-N/O-C cathode for ofloxacin oxidation, *Appl. Catal., B* 324 (2023) 122252. doi:10.1016/j.apcatb.2022.122252.

62. Z. Zhang, H. Dong, Q. Cao, S. Chu, H. Zhang, Photo-catalytic activation of peroxymonosulfate by Ti-oxo clusters grafted carbon nitride: Enhanced charge transfer and bisphenol A degradation efficiency, *Chem. Eng. J.* 497 (2024) 154921. doi:10.1016/j.cej.2024.154921.



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA (DQ)

Rod. Washington Luís km 235 - SP-310, s/n - Bairro Monjolinho, São Carlos/SP, CEP 13565-905
Telefone: (16) 33518206 - <http://www.ufscar.br>

DP-TCC-FA nº 20/2026/DQ/CCET

Graduação: Defesa Pública de Trabalho de Conclusão de Curso

Folha Aprovação

FOLHA DE APROVAÇÃO

BÁRBARA MOREIRA

OXIDAÇÃO ELETROLÍTICA POR PLASMA COMO TÉCNICA DE ALTA EFICIÊNCIA PARA A DEGRADAÇÃO DE FÁRMACOS

Trabalho de Conclusão de Curso

Universidade Federal de São Carlos – Campus São Carlos

São Carlos, 19 de junho de 2026

ASSINATURAS E CIÊNCIAS

Cargo/Função	Nome Completo
Orientador	Prof. Dr. Ernesto Chaves Pereira de Souza
Membro da Banca 1	Dra. Roberta Yonara Nascimento Reis
Membro da Banca 2	Dr. Doutor Henrique Piccoli Moreno



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Samuel Schwab, Professor(a)**, em 02/07/2026, às 14:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufscar.br/autenticacao>, informando o código verificador **2339473** e o código CRC **DA14310D**.

Referência: Caso responda a este documento, indicar expressamente o Processo nº 23112.001933/2024-38

SEI nº 2339473

Modelo de Documento: Grad: Defesa TCC: Folha Aprovação, versão de 02/Agosto/2019