

A Diversidade de Debates na Pesquisa em Química 2

Jéssica Verger Nardeli
(Organizadora)

 **Atena**
Editora

Ano 2020

A Diversidade de Debates na Pesquisa em Química 2

Jéssica Verger Nardeli
(Organizadora)

 **Atena**
Editora

Ano 2020

2020 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2020 Os autores

Copyright da Edição © 2020 Atena Editora

Editora Chefe: Prof^a Dr^a Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação: Natália Sandrini de Azevedo

Edição de Arte: Lorena Prestes

Revisão: Os Autores



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores. Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Conselho Editorial

Ciências Humanas e Sociais Aplicadas

Prof^a Dr^a Adriana Demite Stephani – Universidade Federal do Tocantins

Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas

Prof. Dr. Alexandre Jose Schumacher – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso

Prof^a Dr^a Angeli Rose do Nascimento – Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Dr. Antonio Gasparetto Júnior – Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais

Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília

Prof. Dr. Carlos Antonio de Souza Moraes – Universidade Federal Fluminense

Prof^a Dr^a Cristina Gaio – Universidade de Lisboa

Prof^a Dr^a Denise Rocha – Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia

Prof. Dr. Edvaldo Antunes de Farias – Universidade Estácio de Sá

Prof. Dr. Eloi Martins Senhora – Universidade Federal de Roraima

Prof. Dr. Fabiano Tadeu Grazioli – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões

Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná

Prof. Dr. Gustavo Henrique Cepolini Ferreira – Universidade Estadual de Montes Claros

Prof^a Dr^a Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice

Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense

Prof^a Dr^a Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso

Prof^a Dr^a Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins

Prof. Dr. Luis Ricardo Fernando da Costa – Universidade Estadual de Montes Claros

Prof^a Dr^a Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Universidade Federal do Maranhão

Prof^a Dr^a Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará

Prof^a Dr^a Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Prof^a Dr^a Rita de Cássia da Silva Oliveira – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Prof^a Dr^a Sandra Regina Gardacho Pietrobon – Universidade Estadual do Centro-Oeste

Prof^a Dr^a Sheila Marta Carregosa Rocha – Universidade do Estado da Bahia

Prof. Dr. Rui Maia Diamantino – Universidade Salvador

Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará

Prof^a Dr^a Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

Prof. Dr. William Cleber Domingues Silva – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Ciências Agrárias e Multidisciplinar

Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano
Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos – Universidade Federal da Grande Dourados
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná
Profª Drª Diocléa Almeida Seabra Silva – Universidade Federal Rural da Amazônia
Prof. Dr. Écio Souza Diniz – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Fágner Cavalcante Patrocínio dos Santos – Universidade Federal do Ceará
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Júlio César Ribeiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Profª Drª Lina Raquel Santos Araújo – Universidade Estadual do Ceará
Prof. Dr. Pedro Manuel Villa – Universidade Federal de Viçosa
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Profª Drª Talita de Santos Matos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Tiago da Silva Teófilo – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

Ciências Biológicas e da Saúde

Prof. Dr. André Ribeiro da Silva – Universidade de Brasília
Profª Drª Anelise Levay Murari – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás
Prof. Dr. Edson da Silva – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
Profª Drª Eleuza Rodrigues Machado – Faculdade Anhanguera de Brasília
Profª Drª Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina
Profª Drª Eysler Gonçalves Maia Brasil – Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Prof. Dr. Ferlando Lima Santos – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Fernando José Guedes da Silva Júnior – Universidade Federal do Piauí
Profª Drª Gabriela Vieira do Amaral – Universidade de Vassouras
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Profª Drª Iara Lúcia Tescarollo – Universidade São Francisco
Prof. Dr. Igor Luiz Vieira de Lima Santos – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof. Dr. Luís Paulo Souza e Souza – Universidade Federal do Amazonas
Profª Drª Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Marcus Fernando da Silva Praxedes – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Mylena Andréa Oliveira Torres – Universidade Ceuma
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federaci do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Paulo Inada – Universidade Estadual de Maringá
Profª Drª Renata Mendes de Freitas – Universidade Federal de Juiz de Fora
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Prof. Dr. Alexandre Leite dos Santos Silva – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás
Prof^a Dr^a Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Prof^a Dr^a Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
Prof^a Dr^a Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Prof^a Dr^a Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Conselho Técnico Científico

Prof. Me. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo
Prof. Me. Adalberto Zorzo – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza
Prof. Me. Adalto Moreira Braz – Universidade Federal de Goiás
Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba
Prof. Me. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão
Prof^a Dr^a Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico
Prof^a Dr^a Andrezza Miguel da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
Prof. Dr. Antonio Hot Pereira de Faria – Polícia Militar de Minas Gerais
Prof^a Ma. Bianca Camargo Martins – UniCesumar
Prof^a Ma. Carolina Shimomura Nanya – Universidade Federal de São Carlos
Prof. Me. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Ma. Cláudia de Araújo Marques – Faculdade de Música do Espírito Santo
Prof^a Dr^a Cláudia Taís Siqueira Cagliari – Centro Universitário Dinâmica das Cataratas
Prof. Me. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará
Prof^a Ma. Daniela da Silva Rodrigues – Universidade de Brasília
Prof^a Ma. Dayane de Melo Barros – Universidade Federal de Pernambuco
Prof. Me. Douglas Santos Mezacas – Universidade Estadual de Goiás
Prof. Dr. Edwaldo Costa – Marinha do Brasil
Prof. Me. Eduardo Gomes de Oliveira – Faculdades Unificadas Doctum de Cataguases
Prof. Me. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita
Prof. Me. Euvaldo de Sousa Costa Junior – Prefeitura Municipal de São João do Piauí
Prof^a Ma. Fabiana Coelho Couto Rocha Corrêa – Centro Universitário Estácio Juiz de Fora
Prof. Dr. Fabiano Lemos Pereira – Prefeitura Municipal de Macaé
Prof. Me. Felipe da Costa Negrão – Universidade Federal do Amazonas
Prof^a Dr^a Germana Ponce de Leon Ramírez – Centro Universitário Adventista de São Paulo
Prof. Me. Gevair Campos – Instituto Mineiro de Agropecuária
Prof. Dr. Guilherme Renato Gomes – Universidade Norte do Paraná
Prof. Me. Gustavo Krahl – Universidade do Oeste de Santa Catarina
Prof. Me. Helton Rangel Coutinho Junior – Tribunal de Justiça do Estado do Rio de Janeiro
Prof^a Ma. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia
Prof. Me. Javier Antonio Albornoz – University of Miami and Miami Dade College
Prof^a Ma. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Prof. Me. Jhonatan da Silva Lima – Universidade Federal do Pará
Prof. Me. José Luiz Leonardo de Araujo Pimenta – Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria Uruguay
Prof. Me. José Messias Ribeiro Júnior – Instituto Federal de Educação Tecnológica de Pernambuco

Profª Ma. Juliana Thaisa Rodrigues Pacheco – Universidade Estadual de Ponta Grossa
 Profª Drª Kamilly Souza do Vale – Núcleo de Pesquisas Fenomenológicas/UFPA
 Profª Drª Karina de Araújo Dias – Prefeitura Municipal de Florianópolis
 Prof. Dr. Lázaro Castro Silva Nascimento – Laboratório de Fenomenologia & Subjetividade/UFPR
 Prof. Me. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa
 Profª Ma. Lilian Coelho de Freitas – Instituto Federal do Pará
 Profª Ma. Liliani Aparecida Sereno Fontes de Medeiros – Consórcio CEDERJ
 Profª Drª Lívia do Carmo Silva – Universidade Federal de Goiás
 Prof. Me. Lucio Marques Vieira Souza – Secretaria de Estado da Educação, do Esporte e da Cultura de Sergipe
 Prof. Me. Luis Henrique Almeida Castro – Universidade Federal da Grande Dourados
 Prof. Dr. Luan Vinicius Bernardelli – Universidade Estadual do Paraná
 Prof. Dr. Michel da Costa – Universidade Metropolitana de Santos
 Prof. Dr. Marcelo Máximo Purificação – Fundação Integrada Municipal de Ensino Superior
 Prof. Me. Marcos Aurelio Alves e Silva – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo
 Profª Ma. Marileila Marques Toledo – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
 Prof. Me. Ricardo Sérgio da Silva – Universidade Federal de Pernambuco
 Prof. Me. Rafael Henrique Silva – Hospital Universitário da Universidade Federal da Grande Dourados
 Profª Ma. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal
 Profª Ma. Solange Aparecida de Souza Monteiro – Instituto Federal de São Paulo
 Prof. Me. Tallys Newton Fernandes de Matos – Faculdade Regional Jaguaribana
 Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)	
D618	<p>A diversidade de debates na pesquisa em química 2 [recurso eletrônico] / Organizadora Jéssica Verger Nardeli. – Ponta Grossa, PR: Atena Editora, 2020.</p> <p>Formato: PDF Requisitos de sistemas: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-65-5706-036-0 DOI 10.22533/at.ed.360202105</p> <p>1. Química – Pesquisa – Brasil. 2. Pesquisa – Metodologia. I.Nardeli, Jéssica Verger.</p> <p style="text-align: right;">CDD 540.7</p>
Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422	

Atena Editora
 Ponta Grossa – Paraná - Brasil
www.atenaeditora.com.br
 contato@atenaeditora.com.br

APRESENTAÇÃO

A coleção “A Diversidade de Debates na Pesquisa em Química 2” é uma obra que tem um conjunto fundamental de conhecimentos direcionados a industriais, pesquisadores, engenheiros, técnicos, acadêmicos e, é claro, estudantes. A coleção abordará de forma categorizada pesquisas que transitam nos vários caminhos da química de forma aplicada, inovadora, contextualizada e didática objetivando a divulgação científica por meio de trabalhos com diferentes funcionalidades que compõem seus capítulos.

O objetivo central foi apresentar de forma categorizada e clara estudos relacionados a revestimentos inteligentes – *smart coatings*; técnicas eletroquímicas; modificação de superfície; processo foto-Fenton; dessulfurização adsortiva de diesel; otimização de sensores; contaminantes orgânicos; degradação de compostos; nanotubos de carbono hidrofílicos; oxidação parcial do metano; produção de etanol; tratamento de efluente aquoso; produção de biogás; processo oxidativo avançado; partição de íons metálicos; ensino de polímeros; reutilização de óleo industrial; análise complexométrica de alumínio e modelagem molecular. Em todos esses trabalhos a linha condutora foi o aspecto relacionado à caracterização, aplicação, otimização de procedimentos e metodologias, entre outras abordagens importantes na área de química, ensino e engenharia química. A diversidade de Debates na pesquisa em Química tem sido um fator importante para a contribuição em diferentes áreas.

Temas diversos e interessantes são, deste modo, discutidos aqui com a proposta de fundamentar o conhecimento de acadêmicos, mestres e todos aqueles que de alguma forma se interessam pela área de química tecnológica, bacharel e licenciatura. Possuir um material que demonstre evolução de diferentes metodologias, abordagens, aplicações de processos, caracterização com diferentes técnicas (eletroquímica, microscopia, espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier e raios-X) substanciais é muito relevante, assim como abordar temas atuais e de interesse tanto no meio acadêmico como social.

Portanto, esta obra é oportuna e visa fornecer uma infinidade de estudos fundamentados nos resultados experimentais obtidos pelos diversos pesquisadores, professores e acadêmicos que desenvolveram seus trabalhos que aqui serão apresentados de maneira concisa e didática.

Jéssica Verger Nardeli

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
SMART COATING FOR CORROSION PROTECTION OF ALUMINIUM ALLOYS: GLOBAL AND LOCALIZED STUDY OF ANTI- CORROSION PERFORMANCE	
Jéssica Verger Nardeli Cecílio Sadao Fugivara Fátima Montemor Assis Vicente Benedetti	
DOI 10.22533/at.ed.3602021051	
CAPÍTULO 2	13
FACTORIAL EXPERIMENTAL DESIGN APPLIED FOR OPTIMIZATION OF TARTRAZINE REMOVAL BY PHOTO-FENTON PROCESS USING Cu_2FeSn_4 CATALYST	
Julia da Silveira Salla Vitória Segabinazzi Foletto Jivago Schumacher de Oliveira Gabriela Carvalho Collazzo Evandro Stoffels Mallmann Edson Luiz Foletto	
DOI 10.22533/at.ed.3602021052	
CAPÍTULO 3	23
TRANSFORMACIÓN DE ÁCIDO FERÚLICO CON HONGOS AISLADOS DE BAGAZO DE CAÑA	
Miguel Ávila Jiménez Myriam Gisela Gutiérrez Rueda Julia Aguilar Pliego María del Rocío Cruz Colín María Teresa Castañeda Briones	
DOI 10.22533/at.ed.3602021053	
CAPÍTULO 4	32
APLICAÇÃO DE MATERIAIS MCM-41 E SBA-15 COMO SINTETIZADOS E MODIFICADOS COM ÍONS NÍQUEL E PRATA NA DESSULFURIZAÇÃO ADSORTIVA DE DIESEL	
Clenildo de Longe Rafael Viana Sales Anne Beatriz Figueira Câmara Adriano Santos de Sousa Leila Maria Aguilera Campos Maritza Montoya Urbina Tatiana de Campos Bicudo Luciene Santos de Carvalho	
DOI 10.22533/at.ed.3602021054	
CAPÍTULO 5	43
AVALIAÇÃO DO SENSOR BASEADO GRAFENO E COBRE PARA DETECÇÃO DE GLIFOSATO E AMPA	
Sarah Setznagl Ivana Cesarino	
DOI 10.22533/at.ed.3602021055	

CAPÍTULO 6	57
COMPORTAMENTO DE CONTAMINANTES ORGÂNICOS EM SUBSUPERFÍCIE	
Vivian Maria de Arruda Magalhães	
Oswaldo Chiavone Filho	
Marilda Mendonça Guazzelli Ramos Vianna	
DOI 10.22533/at.ed.3602021056	
CAPÍTULO 7	76
INVESTIGAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DO FENOL EM MEIO AQUOSO UTILIZANDO PERÓXIDO DE HIDROGÊNIO E IRRADIAÇÃO SOLAR	
Julia da Silveira Salla	
Humberto Neves Maia de Oliveira	
André Luís Novais Mota	
Cláudio Augusto Oller do Nascimento	
Edson Luiz Foletto	
Oswaldo Chiavone-Filho	
DOI 10.22533/at.ed.3602021057	
CAPÍTULO 8	89
PRODUÇÃO DE NANOTUBOS DE CARBONO HIDROFÍLICOS	
Leila Cottet	
Luís Otávio de Brito Benetoli	
Nito Angelo Debacher	
DOI 10.22533/at.ed.3602021058	
CAPÍTULO 9	98
ÓXIDOS DO TIPO PEROVSKITA $Nd_{0,95}FeO_3$ E $Nd_{0,95}CrO_3$ PARA PRODUÇÃO DE GÁS DE SÍNTESE ATRAVÉS DA OXIDAÇÃO PARCIAL DO METANO	
Karina Tamião de Campos Roseno	
Rodrigo Brackmann	
Rita Maria de Brito Alves	
Reinaldo Giudici	
Martin Schmal	
DOI 10.22533/at.ed.3602021059	
CAPÍTULO 10	107
PRODUÇÃO DE ETANOL UTILIZANDO BAGAÇO DE SORGO BIOMASSA	
Cristian Jacques Bolner de Lima	
Charles Nunes de Lima	
Fernanda Maria da Silva Costa	
Érik Ramos da Silva de Oliveira	
Monique Virões Barbosa dos Santos	
DOI 10.22533/at.ed.36020210510	
CAPÍTULO 11	118
UTILIZAÇÃO DAS CINZAS PESADAS DE TERMOELÉTRICA COMO CATALISADOR EM REAÇÃO FOTO-FENTON PARA REMOÇÃO DE CORANTE TÊXTIL EM EFLUENTE AQUOSO	
Fernanda Caroline Drumm	
Patrícia Grassi	
Jivago Schumacher de Oliveira	
Julia da Silveira Salla	
Sérgio Luiz Jahn	
Edson Luiz Foletto	
DOI 10.22533/at.ed.36020210511	

CAPÍTULO 12 128

AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO DE ETANOL A PARTIR DA SELEÇÃO DE UM CULTIVAR DE SORGO SACARINO NO ESTADO DE MATO GROSSO

Cristian Jacques Bolner de Lima
Fernanda Maria da Silva Costa
Érik Ramos da Silva de Oliveira
Francieli Fernandes
Charles Souza da Silva
Juniele Gonçalves Amador
Monique Virões Barbosa dos Santos

DOI 10.22533/at.ed.36020210512

CAPÍTULO 13 141

PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA BIODIGESTÃO ANAERÓBICA DO LODO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS (ETE) DA UFRN

Oscar Eduardo Reyes Cavalcanti
Ana Beatriz de Gois Lima
Thalita Gomes Ferreira
Nathalia Souza Teixeira
Rosangela Dala Possa
Leila Maria Aguilera Campos
Maritza Montoya Urbina
Adriano Santos de Sousa
Luciene Santos de Carvalho

DOI 10.22533/at.ed.36020210513

CAPÍTULO 14 154

REMEDIAÇÃO DE SOLO CONTAMINADO COM NAFTALENO: ESTUDO COMPARATIVO DA APLICAÇÃO DE PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS HOMOGÊNEO E HETEROGÊNEO

Vivian Maria de Arruda Magalhães
Gabriela Paupitz Mendes
Rayanne Macêdo Aranha
Oswaldo Chiavone Filho
Marilda Mendonça Guazzelli Ramos Vianna

DOI 10.22533/at.ed.36020210514

CAPÍTULO 15 170

SISTEMA AQUOSO BIFÁSICO: CONCEITOS, PROPRIEDADES E APLICAÇÕES NA PARTIÇÃO DE ÍONS METÁLICOS

Ednilton Moreira Gama
Roberta Pereira Matos
Guilherme Dias Rodrigues

DOI 10.22533/at.ed.36020210515

CAPÍTULO 16 179

UTILIZAÇÃO DE ANALOGIAS E ATIVIDADES CONTEXTUALIZADAS: UMA PERSPECTIVA DE APRIMORAMENTO DE COMPETÊNCIAS PARA O ENSINO DE POLÍMEROS

Amanda Rebelo de Azevedo
Vinicius Fernandes Moreira

DOI 10.22533/at.ed.36020210516

CAPÍTULO 17 201

PRODUÇÃO DE SABÃO UTILIZANDO ÓLEO RESIDUAL ORIUNDO DE PROCESSAMENTO DE MÁQUINAS DE FRANGO

Gisele Carvalho Conceição
Thayssa Sales Cardoso
Diego Ribeiro Nunes
Ronald Almeida dos Santos
Sérgio Vinicius Machado dos Santos
Emanoel Oliveira de Aviz
Arlesson Pereira da Silva
Ronald Vieira Garcia
Josiney Farias de Araújo
Simonny do Carmo Simões Rolo de Deus
Ricardo Jorge Amorim de Deus
Manolo Cleiton Costa de Freitas
Leandro Marques Correia

DOI 10.22533/at.ed.36020210517

CAPÍTULO 18 221

ANÁLISE COMPLEXOMÉTRICA DE ALUMÍNIO EM ARROZ COZIDO EM PANEAS DE ALUMÍNIO E/OU INOX, EM RESTAURANTES DE SÃO LUÍS – MA

Elis Cristina de Sousa Ferreira
Ricardo Santos Silva
Anna Karolyne Lages Leal
Raissa Soares Penha Ferreira
Maria do Socorro Nahuz Lourenço

DOI 10.22533/at.ed.36020210518

CAPÍTULO 19 231

A PRIMEIRA MODELAGEM MOLECULAR POR HOMOLOGIA DA PROTEÍNA VP4 DO VÍRUS CHANGUINOLA

Bruno Rafael Costa Guimarães
Raul Alexandre Maciel Campos
Jânio di Paula Cavalleiro de Macêdo dos Santos
Adriano Santos da Rocha
Alan Sena Pinheiro
Jorddy Neves Cruz
Sandro Patroca da Silva
Davi Henrique Trindade Amador
Miguel Braga
Renato Araújo da Costa
Elaine Cristina Medeiros da Rocha
João Augusto Pereira da Rocha

DOI 10.22533/at.ed.36020210519

CAPÍTULO 20 249

POESIA COMO SIGNO ARTÍSTICO EM AULAS DE QUÍMICA

Elaine da Silva Ramos
Carlos Eduardo Laburú

DOI 10.22533/at.ed.36020210520

CAPÍTULO 21 261

ALBERTO MAGNO IN CHEMICAL TEACHING: THE COMICS AS A LEARNING METHOD

Ednalva Dantas Rodrigues da Silva Duarte
Ismael Montero Fernández

Cecilia Araujo

DOI 10.22533/at.ed.36020210521

CAPÍTULO 22 269

ESTUDO QUÍMICO DE PINTURAS RUPESTRES DO SÍTIO ARQUEOLÓGICO TOCA DA BAIXA DO CAJUEIRO POR FRX PORTÁTIL E SUAS IMPLICAÇÕES PARA A CONSERVAÇÃO

Maria Conceição Soares Meneses Lage

Wilkins Oliveira de Barros

Iasmin Maria Rodrigues de Sales Vieira

Anibal Gustavo Sousa Oliveira

Andressa Carvalho Lima

Benedito Batista Farias Filho

DOI 10.22533/at.ed.36020210522

SOBRE A ORGANIZADORA..... 281

ÍNDICE REMISSIVO 282

REMEDIAÇÃO DE SOLO CONTAMINADO COM NAFTALENO: ESTUDO COMPARATIVO DA APLICAÇÃO DE PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS HOMOGÊNEO E HETEROGÊNEO

Data de aceite: 04/05/2020

Data para submissão: 12/02/2020

Vivian Maria de Arruda Magalhães

Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Natal – RN
<http://lattes.cnpq.br/2110588393272063>

Gabriela Paupitz Mendes

Universidade de São Paulo
São Paulo – SP
<http://lattes.cnpq.br/3447644774274472>

Rayanne Macêdo Aranha

Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Natal – RN
<http://lattes.cnpq.br/8095792689248890>

Oswaldo Chivone Filho

Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Natal – RN
<http://lattes.cnpq.br/2621516646153655>

Marilda Mendonça Guazzelli Ramos Vianna

Universidade de São Paulo
São Paulo – SP
<http://lattes.cnpq.br/0798435300280612>

RESUMO: A contaminação de solos e água subterrânea por hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) tem sido frequentemente discutida no meio científico. A remediação

de solos contaminados por HPAs, poluentes orgânicos persistentes e de toxicidade variada, torna-se um grande desafio em virtude da complexidade do solo e dos compostos envolvidos. O naftaleno (NAP) é um HPA e encontra-se entre os 16 poluentes prioritários listados pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (US EPA). Processos oxidativos avançados podem ser aplicados para remediação das áreas contaminadas com HPAs através do uso de agentes oxidantes, como o persulfato (PS). Nesse trabalho, ensaios de tratabilidade foram realizados a fim de avaliar a remoção de NAP de solo contaminado artificialmente, através da aplicação de processos oxidativos avançados. O PS, agente oxidante, foi ativado nas reações homogêneas com íons ferrosos em solução; nas reações heterogêneas, a ativação ocorreu através de catalisador de ferro à base de argila (CAT). Ao final das reações, a porcentagem de remoção máxima alcançada foi em torno de 90% e 94%, respectivamente. As concentrações residuais de NAP no solo cumpriram os regulamentos ambientais da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo e da US EPA para solo industrial em ambos os casos. Contudo, as reações heterogêneas apresentaram, de maneira geral, menores concentrações residuais de NAP no

solo, quando comparado com as reações homogêneas, atingindo o ponto ótimo de remoção com 14,67 g/L de PS e 0,34 g de catalisador. Esse resultado ressalta a eficácia da técnica de oxidação química. Ainda, o sistema heterogêneo apresenta vantagens quando comparado ao homogêneo visando aplicação *in situ* em áreas contaminadas, pois não há necessidade de ajuste de pH e o catalisador também pode ser utilizado como barreira reativa, restringindo a pluma de contaminação nos aquíferos.

PALAVRAS-CHAVE: Processo oxidativo avançado, persulfato, remediação de solo, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, naftaleno.

REMEDICATION OF CONTAMINATED SOIL WITH NAPHTHALENE: A COMPARATIVE STUDY OF THE APPLICATION OF HOMOGENEOUS AND HETEROGENEOUS ADVANCED OXIDATIVE PROCESSES

ABSTRACT: The contamination of soils and groundwater by polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) has been frequently discussed in the scientific community. The remediation of contaminated soils by PAHs, which are persistent organic pollutants with varied toxicity, becomes a great challenge due to the complexity of the soil and the compounds involved. Naphthalene (NAP) is a PAH and is among the 16 Priority Pollutants listed by the United States Environmental Protection Agency (US EPA). Advanced oxidation processes (AOPs) can be applied for remediation of contaminated areas with PAHs using oxidant agents, such as persulfate (PS). In this work, treatability assays were carried out in order to evaluate the NAP removal from artificially contaminated soil, through the application of AOP. The PS was activated by ferrous ions in solution during homogeneous reactions; for the heterogeneous reactions, PS activation occurred through a clay-based iron catalyst (CAT). By the end, the maximum removal percentage achieved in the homogeneous and the heterogeneous reactions was around 90% and 94%, respectively. NAP residual concentrations in soil complied with the environmental regulations of the Environmental Company of the State of São Paulo and US EPA for industrial soil in both cases. However, heterogeneous reactions showed, in general, lower NAP residual concentrations in soil when compared to homogeneous reactions, reaching the removal optimum point with 14.67 g/L of PS and 0.34 g of CAT. This result highlights the effectiveness of the chemical oxidation technique. Moreover, the heterogeneous system has advantages when compared to the homogeneous one aiming at *in situ* application in contaminated areas, since there is no need for pH adjustment and the catalyst can also be used in a reactive barrier, restricting the plume of contamination in the aquifers.

KEYWORDS: Advanced oxidation process, persulfate, soil remediation, polycyclic aromatic hydrocarbons, naphthalene.

1 | INTRODUÇÃO

A contaminação do solo e águas subterrâneas por hidrocarbonetos tem sido um assunto cada vez mais discutido, tanto por conta da elevada toxicidade desses contaminantes quanto devido à quantidade significativa que tem sido introduzida no meio ambiente, seja de forma acidental ou negligente. Vazamentos em tanques de armazenamento ou tubulações subterrâneas, derramamentos acidentais durante transporte, descarte de águas residuais aplicadas no processo de produção de petróleo, entre outras situações, são algumas causas de contaminação relatadas. As principais atividades poluidoras incluem atividades de mineração, industriais, disposição de resíduos urbanos e perigosos, processamento de madeira, antigas manufaturas de carvão e petróleo etc. Dentre os poluentes advindos dessas atividades, destacam-se os compostos orgânicos voláteis (VOCs, do inglês *volatile organic compounds*), com predominância dos produtos de petróleo (benzeno, tolueno, etil-benzeno e xilenos, ou BTEX), compostos orgânicos semi-voláteis (SVOCs, do inglês *semi-volatile organic compounds*) e metais (IPT, 2016; CHENG et al., 2015; SONG et al., 2017; VIDONISH; ALVAREZ; ZYGOURAKIS, 2018).

Os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs), presentes em derivados do petróleo, são compostos orgânicos que possuem anéis de benzeno arranjados de forma linear e angular ou, ainda, agrupados. Eles são caracterizados por possuírem alta hidrofobicidade e, conseqüentemente, tendem a ficar adsorvidos no solo (KUEPER et al., 2003; SUN et al., 2018). O naftaleno (NAP) é o menor dos HPAs, formado a partir da fusão de dois anéis benzênicos. Dentre os HPAs, é o que possui a maior solubilidade em água (31,7 mg/L a 25°C) e maior volatilidade (pressão de vapor de 0,087 mmHg a 25°C), sendo classificado como um composto orgânico semi-volátil (SVOC). Por apresentar essas características físico-químicas, além de se encontrar adsorvido às partículas do solo constituindo a fase sorvida, o NAP é comumente encontrado na fase aquosa e na fase vapor (GARCÍASEGURA et al., 2017). Em relação à sua densidade, é classificado como um DNAPL (do inglês, *dense non-aqueous phase liquid*), ou seja, é mais denso do que a água e tende a se infiltrar na subsuperfície, contaminando regiões inclusive abaixo dos lençóis freáticos e parando apenas quando atinge camadas impermeáveis de rocha. Tal comportamento dificulta a localização e investigação das regiões contaminadas (KUEPER et al., 2003; JAWITZ et al., 2000).

O NAP é classificado como poluente prioritário pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (US EPA, 2014) e está no grupo 2B da Agência Internacional de Pesquisa do Câncer, sendo considerado um composto possivelmente cancerígeno ao homem (IARC, 2002). Altas concentrações de NAP podem destruir células vermelhas do sangue, causando anemia hemolítica. A exposição ao NAP

ocorre principalmente através de inalação de ar contaminado, seguido por outros mecanismos como a cadeia alimentar, resultado da exposição de animais a resíduos contendo NAP (DAVIE-MARTIN et al., 2017).

Diante dessa problemática atual, estudos relacionados com a remediação de áreas contaminadas com poluentes orgânicos têm sido frequentemente publicados. A oxidação química *in situ* (ISCO, do inglês *in situ chemical oxidation*) revela-se como uma tecnologia de remediação potencialmente viável para eliminar uma extensa gama de contaminantes. Dentre as formas de aplicação, destaca-se a utilização de Processos Oxidativos Avançados (POAs), métodos químicos que usam várias combinações de reagentes para propiciar a formação de radicais altamente reativos. Assim, a ISCO consiste na injeção de oxidantes químicos diretamente no solo, sem necessidade de retirá-lo. Essa técnica tem o propósito de tratar os poluentes orgânicos no próprio local, sendo capaz de transformá-los em espécies menos nocivas ou até mesmo levá-los à mineralização completa (BACIOCCHI, 2013; WU et al., 2016). Estudos de tratabilidade em escala de laboratório são utilizados para prever a eficácia dessa técnica de remediação. Os principais oxidantes utilizados são o peróxido de hidrogênio, permanganatos, persulfatos e ozônio (PELUFFO et al., 2016).

A oxidação química com o persulfato ($S_2O_8^{2-}$) tem sido amplamente utilizada em processos para a degradação de contaminantes orgânicos, tais como HPAs, tricloetileno, benzeno, tolueno, etilbenzeno, xileno, 1,2,4- trimetilbenzeno, entre outros (LEMAIRE et al., 2013; LIANG et al., 2006). Ele apresenta maior persistência em subsuperfície, quando comparado a outros oxidantes, podendo ser transportado por maiores distâncias e permanecer mais tempo no meio reacional. Além disso, apresenta menor afinidade aos compostos orgânicos naturais do solo em relação ao permanganato, característica importante visto que a oxidação é não específica, ou seja, o oxidante é consumido não apenas pelos poluentes-alvo, mas também pela matéria orgânica presente no meio (USMAN et al., 2012; RANC et al., 2016).

O íon persulfato pode ser ativado para gerar radicais livres de sulfato (que apresentam elevado potencial redox ($E^\circ = 2,60 \text{ V}$) e reagem com os produtos químicos orgânicos causando mineralização parcial ou completa. Dentre as formas de ativação desse oxidante, estão o uso de metais de transição, por exemplo, íons ferrosos (Fe^{2+}), aplicação de calor e ativação alcalina (MATZEK, 2016). A ativação por Fe^{2+} é muito utilizada, principalmente para aplicações *in situ*, devido à sua abundância natural em meios porosos e natureza benigna. Esse processo de ativação pode ocorrer via catálise homogênea, onde os íons ferrosos são introduzidos em solução, ou via catálise heterogênea, onde os íons metálicos podem ser estabilizados na estrutura porosa de materiais, como por exemplo argilas, que funcionam como suporte sólido para a deposição das espécies ativas em sua superfície (BASTIDAS;

SIERRA; RAMIREZ, 2018).

Contudo, no processo homogêneo convencional é necessário utilizar baixos valores de pH a fim de que os íons ferrosos sejam mantidos em solução, o que torna o processo desvantajoso devido ao forte impacto ambiental (TSITONAKI et al., 2010; PELUFFO et al., 2016). Para contornar algumas desvantagens encontradas nos POAs homogêneos, como a acidificação do meio e custos de operação, a catálise heterogênea é uma alternativa promissora e vem sendo bastante estudada (MAGALHÃES, V. M. A. et al. (in press); SILVA-RACKOV, C. K. O. et al., 2017; VIANNA et al., 2010). O uso de catalisadores heterogêneos permite a operação de reações de oxidação química em pH quase neutro e temperatura ambiente, além de facilitar a recuperação do catalisador após a reação (GAO et al., 2016).

Devido à elevada heterogeneidade dos solos, estudos relacionados à eliminação de contaminantes nessa matriz ganham notoriedade. Segundo estabelecido pela Agência Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), os valores de intervenção para o NAP em solos industriais e residenciais são 5,9 e 1,8 mg.kg⁻¹ de solo seco, respectivamente (CETESB, 2016). Para água subterrânea, o limite é de 60 ug.L⁻¹ (CETESB, 2016). Vale salientar que, em relação ao ar, a CETESB propôs recentemente dois objetivos principais para projetos de remediação: (1) se compostos orgânicos voláteis são identificados na área contaminada, sua distribuição no ar precisa ser mapeada antes do tratamento; e (2) a remoção de massa é prioridade para ações de remediação, e não apenas a redução da concentração. Assim, sendo o NAP um SVOC, a fase vapor deve ser avaliada durante a aplicação de oxidação química para garantir que o contaminante em estudo está sendo degradado, e não está apenas mudando das fases sorvida e aquosa para a fase vapor (MENDES et al., 2020).

Nesse contexto, o objetivo principal desse trabalho é quantificar a massa de NAP nas fases sorvida e aquosa, a fim de avaliar a remoção do contaminante no meio após aplicação de POA com persulfato ativado com dois catalisadores diferentes: solução de íons ferrosos e catalisador sólido de ferro à base de argila (CAT). Os estudos foram realizados a partir de planejamentos experimentais do tipo delineamento composto central rotacionado, e as reações homogêneas e heterogêneas foram comparadas através da metodologia de superfície de resposta.

2 | METODOLOGIA

A seguir, serão descritas as etapas para realização dos experimentos apresentados neste capítulo. Envolvem desde a coleta e caracterização do solo até sua contaminação artificial em laboratório, seguido dos ensaios de oxidação e

métodos analíticos.

2.1 Reagentes

Para a contaminação artificial do solo, os reagentes naftaleno (NAP, $C_{10}H_8$, 99+%) e diclorometano (DCM, CH_2Cl_2 , P.A.) foram utilizados. Durante as etapas de extração sólido-líquido e líquido-líquido, o solvente utilizado foi DCM e sulfato de sódio (Na_2SO_4 , P.A.) foi usado como agente secante. Para as reações de oxidação, soluções de persulfato de sódio (PS, $Na_2S_2O_8$, P.A.) e sulfato ferroso heptahidratado ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$, P.A.) foram preparadas nas concentrações desejadas, a última somente no caso de reações homogêneas. Hidróxido de sódio (NaOH, 97%) e ácido sulfúrico (H_2SO_4 , 95%) foram escolhidos para controle de pH. Não houve purificação adicional dos reagentes e as soluções foram preparadas com água deionizada.

2.2 Contaminação do solo

O solo limpo utilizado para os ensaios de oxidação foi coletado em Natal, RN, Brasil, a 30 cm de profundidade da superfície, em quantidade suficiente para todos os testes. A amostra foi homogeneizada com uma peneira (8 Mesh) e armazenada em recipiente com tampa. A caracterização do solo limpo coletado foi realizada de acordo com o Manual da Embrapa (1997), para análises de pH em água, teor de umidade e teor de ferro. Além disso, foi realizada a Análise Granulométrica de Sedimentos, para identificar o tipo de solo, e a análise de carbonos orgânicos totais (TOC), para determinar o teor de matéria orgânica.

A fim de atingir a concentração de 80 mg de naftaleno por kg de solo seco, uma solução de NAP em DCM foi preparada e a respectiva massa de solo foi pesada. Esse valor de concentração é aproximadamente 13 vezes superior ao valor de intervenção estabelecido pela CETESB (2016) para o NAP em áreas industriais. Após a contaminação, o recipiente foi colocado em um agitador mecânico rotacional, a 15 rpm, por 2h. Em seguida, foi aberto e mantido na capela por 40 minutos, para completa evaporação do solvente. Por fim, o solo foi armazenado em ambiente refrigerado para uso posterior. A concentração inicial de NAP no solo foi determinada antes de cada ensaio.

2.3 Ensaios de oxidação

Os ensaios de oxidação do NAP foram realizados com base na técnica de Planejamento Experimental (DOE, do inglês *Design of Experiments*), que permite utilizar a metodologia de superfície de resposta (RSM, do inglês *Response Surface Methodology*) para avaliar a influência simultânea de múltiplas variáveis em relação a uma (ou mais) resposta de interesse. Tanto para a reação homogênea quanto para a reação heterogênea, o agente oxidante utilizado foi o persulfato (PS). Os

respectivos catalisadores foram aplicados em proporções semelhantes, de acordo com a concentração de ferro desejada.

Para o preparo das amostras, 3,75 g de solo contaminado eram adicionados a um *vial* de 20 mL, juntamente com a solução de oxidante (PS) e o respectivo catalisador. Para os ensaios com reação homogênea, eram utilizados 6,5 mL de PS, cuja ativação ocorreu por íons ferrosos em solução. Então, 1 mL de solução de sulfato ferroso era adicionado, seguido de ajuste do pH da mistura com solução de hidróxido de sódio (NaOH) ou ácido sulfúrico (H₂SO₄), conforme necessário. As respectivas concentrações das soluções para cada ensaio estão apresentadas na Tabela 1. Os ensaios foram realizados de acordo com um planejamento experimental tipo delineamento composto central rotacionado com três variáveis (x_1 , concentração de persulfato [PS]; x_2 , concentração de ferro [FeSO₄]; e x_3 , pH_{inicial}), mais 3 pontos centrais (PC), totalizando 17 ensaios (2³+6+3PC).

Variáveis independentes	Valores codificados e reais				
	1,69	1	0	-1	-1,69
x_1 – [PS] (g.L ⁻¹)	19,79	16,40	11,48	6,56	3,17
x_2 – [FeSO ₄] (g.L ⁻¹)	5,48	4,54	3,18	1,82	0,88
x_3 – pH _{inicial}	9,38	8,00	6,00	4,00	2,62

Tabela 1 – Planejamento experimental dos ensaios de oxidação da reação homogênea.

No caso das reações heterogêneas, 7,5 mL de solução de PS era adicionado, e sua ativação ocorreu através de catalisador de ferro à base de argila (CAT) (MAGALHÃES, V. M. A. et al. (*in press*)). A massa de CAT utilizada em cada ensaio e a respectiva concentração da solução de PS estão apresentadas na Tabela 2. Os ensaios foram realizados de acordo com um planejamento experimental tipo delineamento composto central rotacionado (DCCR) com duas variáveis (x_1 , concentração de persulfato [PS]; x_2 , massa de catalisador), mais 3 pontos centrais (PC), totalizando 11 ensaios (2²+4+3PC).

Em ambos os casos, manteve-se a proporção de sólido e líquido igual a 1:2 no interior do *vial* e o volume do *headspace* era de, aproximadamente, 12 mL. O *headspace* é deixado no *vial* para casos onde a fase vapor precisa ser amostrada e analisada no GC-MS. Nesse trabalho, apenas as fases sorvida e aquosa estão sendo analisadas e consideradas nos resultados dos planejamentos. Em seguida, o *vial* era selado manualmente utilizando septo e tampa de alumínio apropriados, para evitar perdas de NAP.

Variáveis independentes	Valores codificados e reais				
	1,41	1	0	-1	-1,41
$x_1 - [\text{PS}] \text{ (g.L}^{-1}\text{)}$	18,42	16,40	11,48	6,56	4,54
$x_2 - m_{\text{CAT}} \text{ (g)}$	0,42	0,38	0,26	0,15	0,10

Tabela 2 – Planejamento experimental dos ensaios de oxidação da reação heterogênea.

Os *vials* foram deixados em repouso dentro de uma incubadora à temperatura controlada de 25°C durante 4 h, a fim de simular condições reais do meio ambiente, no caso de uma remediação *in situ*.

2.4 Métodos de extração e análise

Ao final das reações, a matriz sólida foi separada da fase líquida no *vial* por decantação, para que fosse possível quantificar a concentração residual de NAP em cada uma das fases (sorvida e aquosa). Os procedimentos de extração sólido-líquido e líquido-líquido foram realizados com base nos Métodos 3550C (US EPA, 2007) e 3510C (US EPA, 1996), respectivamente. Após as extrações, as amostras coletadas foram analisadas por cromatografia gasosa acoplado à espectrometria de massa (GC-MS), a fim de quantificar a concentração residual de NAP em cada *vial*. Para as análises, foi utilizada uma coluna capilar HP-5MS 30 m x 0,25 mm e a rampa de aquecimento foi configurada conforme segue: temperatura inicial de 60°C e aquecimento até 300°C a uma taxa de 5°C min⁻¹, com temperatura final mantida por 20 min. O gás de arraste utilizado foi hélio, com pressão de entrada de 0,03 MPa.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico são apresentados e discutidos os resultados obtidos durante esse trabalho, no qual avaliou-se a aplicação de processo oxidativo homogêneo e heterogêneo na degradação de naftaleno (NAP) presente em solo contaminado artificialmente. Os ensaios foram realizados de acordo com planejamentos experimentais do tipo DCCR para avaliar a remoção de NAP das fases sorvida e aquosa, comparando os dois processos. Mendes et al. (2020) apresentou os resultados do estudo da distribuição de NAP nas três fases (sorvida, aquosa e vapor), via processo homogêneo, onde foi possível demonstrar a real degradação do NAP.

3.1 Caracterização do solo

O solo coletado apresenta características ácidas, com pH igual a 5,7 e possui baixo teor de umidade (0,64%) e de matéria orgânica (0,13%). A análise de FRX

mostra quantidade ínfima de metais na composição do solo. Por exemplo, os óxidos de ferro (Fe_2O_3) correspondem a 0,53% da amostra, quantidade insuficiente para ativação do oxidante durante as reações de oxidação, o que comprova a necessidade de adição de um catalisador para esse fim.

De acordo com o resultado da distribuição granulométrica e com base no Sistema de Classificação de Solos do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA, 1993), o solo é caracterizado como arenoso, com proporção de aproximadamente 98% de areia, 1,16% de silte e 0,44% de argila.

3.2 Ensaio de oxidação

Os resultados relativos aos ensaios com reação homogênea e heterogênea serão apresentados a seguir.

3.3 Reação homogênea

A Tabela 3 apresenta as respectivas condições de reação em cada ensaio e os resultados do DCCR_{HM} (reação de oxidação homogênea). A concentração média de NAP no solo foi de $53,90 \pm 8,53 \text{ mg.kg}^{-1}$. Pode-se perceber que o experimento 4 atingiu o melhor resultado de remoção, com concentrações residuais no solo e água equivalentes a 5 mg.kg^{-1} e 0.46 mg.L^{-1} .

Ensaio	x_1	[PS] (g.L^{-1})	x_2	FeSO_4 (g.L^{-1})	x_3	$\text{pH}_{\text{inicial}}$	% remoção
1	-	6,56	-	1,82	-	4,00	79,57
2	+	16,40	-	1,82	-	4,00	79,69
3	-	6,56	+	4,54	-	4,00	86,80
4	+	16,40	+	4,54	-	4,00	90,30
5	-	6,56	-	1,82	+	8,00	79,40
6	+	16,40	-	1,82	+	8,00	78,53
7	-	6,56	+	4,54	+	8,00	79,93
8	+	16,40	+	4,54	+	8,00	82,70
9	-1,69	3,17	0	3,18	0	6,00	75,28
10	1,69	19,79	0	3,18	0	6,00	82,79
11	0	11,48	-1,69	0,88	0	6,00	63,80
12	0	11,48	1,69	5,48	0	6,00	70,15
13	0	11,48	0	3,18	-1,69	2,62	85,57
14	0	11,48	0	3,18	1,69	9,38	72,06
15	0	11,48	0	3,18	0	6,00	78,45
16	0	11,48	0	3,18	0	6,00	79,25
17	0	11,48	0	3,18	0	6,00	79,92

Tabela 3 – Resultados do DCCR_{HM} para a reação de oxidação homogênea e percentual de remoção obtido.

A Equação 1 mostra a relação empírica entre a resposta de interesse y_{HM}

(percentual de remoção de NAP para a reação homogênea) e as variáveis codificadas em estudo x_1 , x_2 e x_3 ([PS], [FeSO₄] e pH_{inicial}, respectivamente). Os termos estatisticamente significativos foram mantidos no modelo, com intervalo de confiança de 90%. O coeficiente de correlação (R^2) foi igual a 0,68.

$$y_{HM} = 78,61 + 1,34x_1 + 1,60x_1^2 + 2,45x_2 - 2,69x_2^2 - 2,84x_3 + 1,52x_3^2 - 1,65x_1x_2 \quad (1)$$

A Tabela 4 apresenta a análise de variância (ANOVA) para o DCCR_{HM}. O baixo coeficiente de correlação obtido é justificado pela falta de ajuste do modelo, indicado na ANOVA. Analisando os valores de $F_{\text{calculado}}$ e F_{tabelado} , onde $F_{\text{calculado}}$ é obtido pela razão entre as médias quadráticas (MQ) da regressão e do resíduo, pode-se deduzir que o modelo não é significativo, pois $F_{\text{calculado}} < F_{\text{tabelado}}$.

Fator de variação	SQ ^a	GL ^a	MQ ^a	$F_{\text{calculado}}$	F_{tabelado}^c
Regressão ^b	436,875	8	54,609	2,139	$F_{8,8}$ 2,589
Resíduo	204,278	8	25,535		
Falta de Ajuste	203,174	6	33,862		
Erro puro	1,104	2	0,552		
Total	641,153	16			

Tabela 4 – Análise de variância (ANOVA) para a resposta y_{HM} .

^a SQ = Soma quadrática; GL = Graus de liberdade; MQ = Média quadrática

^b $R^2 = 0,68$

^c 90% de confiança

Apesar do modelo não ter sido significativo, ainda foi possível avaliar as superfícies de resposta e a curva de nível em relação às variáveis [FeSO₄] e pH_{inicial} (ou x_2 e x_3 , respectivamente), com PS (x_1) no ponto 0, pois essa interação se mostrou significativa durante a análise estatística dos modelos. A superfície de resposta gerada a partir do modelo da Equação 1 e mostrada na Figura 1 (a) apresentou um ponto de sela.

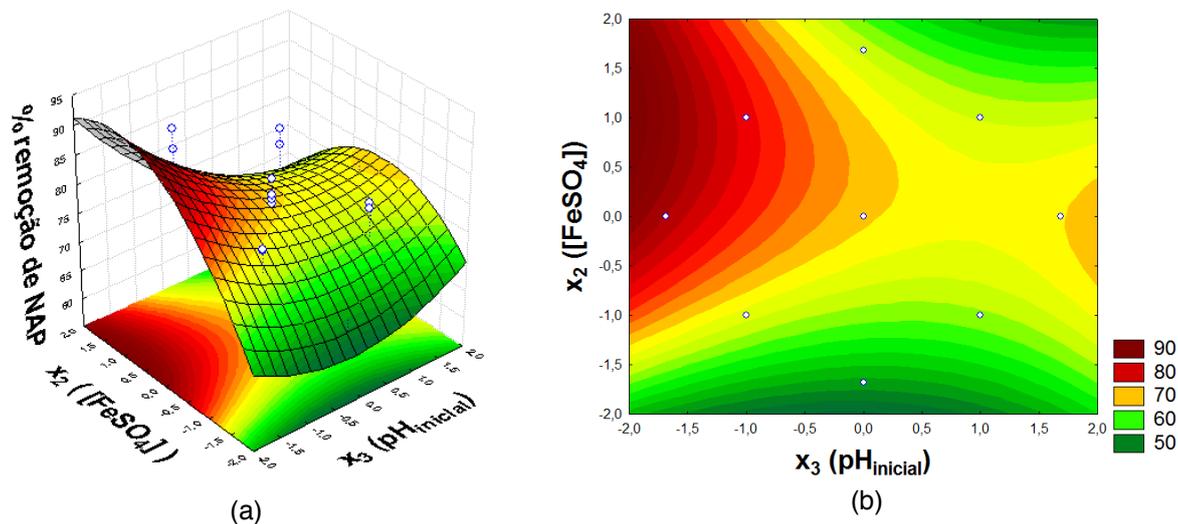


Figura 1 – (a) Curva de nível e (b) superfície de resposta para o $DCCR_{HT}$

Ao analisar as regiões com cor avermelhada (Figura 1), percebe-se que correspondem a percentuais de remoção iguais ou maiores que 80%. Para melhores resultados de degradação, duas opções seriam possíveis: reação em meio ácido ou reação em meio alcalino. Esses resultados estão de acordo com o observado na literatura, pois o persulfato pode ser ativado tanto por metais de transição, em meio ácido, quanto por reação em meio alcalino (HUANG et al., 2005; FURMAN; TEEL; WATTS, 2010; GHAUCH; AYOUB; NAIM, 2013; LOMINCHAR et al., 2018). Além disso, analisando o modelo apresentado na Equação 1, é possível afirmar que maiores níveis de concentração de oxidante melhorariam o percentual de remoção do NAP, dado o sinal positivo para a variável x_1 .

3.3.1 Reação heterogênea

A matriz do planejamento do $DCCR_{HT}$ (reação de oxidação heterogênea) com os respectivos resultados de remoção de NAP está apresentada na Tabela 5, juntamente com as respectivas condições de reação para cada ensaio. A concentração média de NAP no solo foi de $57,70 \pm 3,6$ mg.kg⁻¹. No início da reação, os valores de pH ficaram em torno de 3,5 a 4,0 e estão relacionados ao pH da solução de persulfato de sódio. A variação no pH foi insignificante ao longo das reações.

Ensaio	x_1	[PS] (g.L ⁻¹)	x_2	m_{CAT} (g)	% remoção
1	-	6,56	-	0,15	85,76
2	+	16,40	-	0,15	89,69
3	-	6,56	+	0,38	91,50
4	+	16,40	+	0,38	93,33
5	-1,41	4,54	0	0,26	88,81
6	1,41	18,42	0	0,26	93,92

7	0	11,48	-1,41	0,10	87,53
8	0	11,48	1,41	0,42	93,92
9	0	11,48	0	0,26	92,63
10	0	11,48	0	0,26	93,86
11	0	11,48	0	0,26	93,86

Tabela 5 – Resultados do $DCCR_{HT}$ para a reação de oxidação heterogênea e percentual de remoção obtido.

A partir da Tabela 5, observa-se que é possível atingir cerca de 94% de remoção do NAP das fases sorvida e aquosa, resultando em concentrações residuais de 3 mg.kg⁻¹ e 0,5 mg.L⁻¹. A concentração no solo permaneceu abaixo do valor orientador para solos industriais, e a concentração na água ficou bem acima do valor orientador para águas subterrâneas (CETESB, 2016). O modelo obtido está apresentado na Equação 2 e foi bem ajustado aos dados com R² de 0,95 e R² ajustado de 0,92.

$$y_{HT} = 93,45 + 1,62x_1 - 1,29x_1^2 + 2,30x_2 - 1,61x_2^2 \quad (2)$$

Avaliando os efeitos dos parâmetros, pode-se inferir que um aumento na concentração de persulfato (x_1) e aumento na massa de CAT (x_2) ocasionará um aumento no percentual de remoção de NAP (resposta, y_{HT}). O parâmetro linear x_2 com maior efeito indica que a massa de catalisador é a variável com maior influência na resposta.

A Tabela 6 apresenta a análise de variância do modelo quadrático da Equação 2 e teste F para o $DCCR_{HT}$. Avaliando a significância da regressão pelo teste F, observa-se que o valor de F calculado para regressão por resíduo é cerca de 6 vezes superior ao valor tabelado de $F_{4,6}$ e o F calculado para falta de ajuste por erro puro é 11 vezes menor que o $F_{4,2}$ tabelado, ambos considerando 95% de confiança. Assim, conclui-se que o modelo gerado é significativo e preditivo, com bom ajuste da regressão aos dados experimentais e boa reprodutibilidade do processo.

Fator de variação	SQ ^a	GL ^a	MQ ^a	F _{calculado}	F _{tabelado} ^c
Regressão ^b	82,211	4	20,553	28,58	F_{4,6}
Resíduo	4,314	6	0,719		4,53
Falta de Ajuste	3,303	4	0,826	1,63	F_{4,2}
Erro puro	1,012	2	0,506		19,25
Total	86,525	10			

Tabela 6 – Análise de variância (ANOVA) para a resposta y_{HT}

^a SQ - Soma quadrática; GL - Graus de liberdade; MQ - Média quadrática

^b R² = 0,95

^c 95% de confiança

A superfície de resposta e a curva de nível representando o modelo de regressão estão apresentadas na Figura 2. Avaliando a curva de nível e superfície de resposta, calcula-se que o percentual de remoção do NAP apresenta um ponto de máximo em torno de 94% para as variáveis codificadas no ponto de máximo $x_1=0,63$ e $x_2=0,72$, que representam o uso da concentração de PS em 14,67 g/L e 0,34 g de catalisador. Dessa forma, aumentando a massa de catalisador utilizada, é possível atingir o valor máximo de remoção de NAP para o domínio estudado.

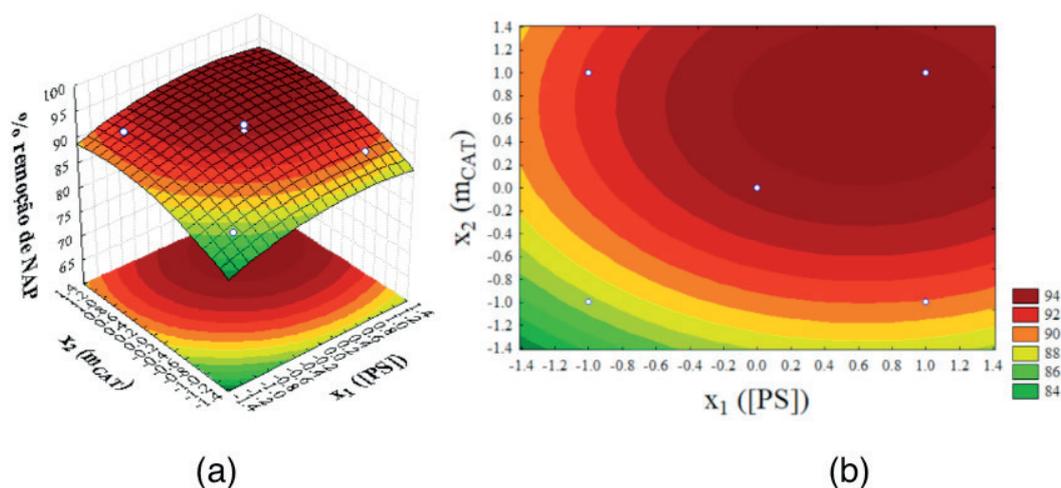


Figura 2 – (a) Superfície de resposta e (b) curva de nível para o $DCCR_{HTT}$.

Embora a diferença entre os maiores percentuais de remoção observados para as reações homogênea e heterogênea não tenha sido tão significativa (aproximadamente 90% e 94%, respectivamente), o catalisador de ferro à base de argila apresenta vantagens expressivas se aplicado em locais contaminados reais. Por exemplo, não há necessidade de ajuste de pH e poderia ser aplicado em locais contaminados reais como uma barreira reativa, restringindo a pluma de contaminação. Além disso, a argila é um material naturalmente presente no meio ambiente, o que contribui para seu caráter ecológico.

4 | CONCLUSÃO

A partir dos ensaios realizados de acordo com os planejamentos experimentais do tipo delineamento composto central rotacionado, foram obtidos percentuais máximos de remoção de NAP iguais a aproximadamente 90% e 94% para as reações de oxidação homogênea e heterogênea, respectivamente. Os dois catalisadores utilizados se mostraram eficientes na degradação do naftaleno (NAP) presente no meio, mas o uso do catalisador de ferro à base de argila possui vantagens significativas. Dentre elas, destacam-se o fato de poder ser utilizada sem ajuste

de pH no meio e possibilidade de aplicação em barreiras reativas, contribuindo para restrição da pluma de contaminação durante o tratamento. Ainda, por ser um material encontrado no ambiente, o seu uso não implica em alterações prejudiciais do meio natural.

Em relação à reação homogênea, o modelo obtido não foi significativo e não pode ser utilizado para fazer previsões. Entretanto, a partir da análise dos coeficientes do modelo, é possível afirmar que maiores níveis de concentração de oxidante melhorariam o percentual de remoção. O valor de concentração residual de NAP no solo para o melhor ensaio ($[PS]=16,40 \text{ g.L}^{-1}$, $[FeSO_4] = 4,54 \text{ g.L}^{-1}$ e $pH_{\text{inicial}} = 4,00$) foi igual a 5 mg.kg^{-1} , abaixo do limite estabelecido pela CETESB.

Para a reação heterogênea, o modelo foi significativo e preditivo, dentro do domínio de estudo. Para esse caso, a concentração residual de NAP no solo foi igual a 3 mg.kg^{-1} , também de acordo com o limite da CETESB. Para ambas as reações, entretanto, a concentração residual de NAP na fase livre ficou acima do limite permitido. Para o domínio em estudo, é possível estimar que o ponto de máximo do modelo ocorra para concentrações de PS iguais a $14,67 \text{ g/L}$ e massa de catalisador igual $0,34 \text{ g}$.

REFERÊNCIAS

BACIOCCHI, R. Principles, Developments and Design Criteria of In Situ Chemical Oxidation. *Water, Air & Soil Pollution*, v. 224, p. 1717, 2013.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Decisão de Diretoria nº 256/2016: Valores Orientadores para Solo e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo. São Paulo, 2016. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2014/12/DD-256-2016-E-Valores-Orientadores-Dioxinas-e-Furanos-2016-Intranet.pdf>>. Acesso em 11 fev. 2020.

CHENG, M.; ZENG, G.; HUANG, D.; LAI, C.; XU, P.; ZHANG, C.; LIU, Y. Hydroxyl radicals based advanced oxidation processes (AOPs) for remediation of soils contaminated with organic compounds: A review. *Chemical Engineering Journal*, v. 284, p. 582-598, 2015.

DAVIE-MARTIN, C. L. STRATTON, K. G.; TEEGUARDEN, J. G.; WATERS, K. M.; SIMONICH, S. L. M. Implications of Bioremediation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon- Contaminated Soils for Human Health and Cancer Risk. *Environmental Science & Technology*, v. 51, n. 17, p. 9458–9468, 2017.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de Métodos de Análise de Solo. 2 Ed. Rio de Janeiro, 1997.

GAO, Y. et al. Insights into the mechanism of heterogeneous activation of persulfate with a clay/iron-based catalyst under visible LED light irradiation. *Applied Catalysis B: Environmental*, v. 185, p. 22–30, 15 maio 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926337315302848>>. Acesso em: 26 ago. 2019.

GARCÍA-SEGURA, D.; CASTILLO-MURRIETA, I. M.; MARTÍNEZ-RABELO, F.; GOMEZ-ANAYA, A.; RODRÍGUEZ-CAMPOS, J.; HERNÁNDEZ-CASTELLANOS, B. CONTRERAS-RAMOS, S. M.; BAROIS, I. Macrofauna and mesofauna from soil contaminated by oil extraction, *Geoderma*, 2017.

Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.06.013>>. Acesso em: 12 mai. 2018.

IARC. International Agency for Research on Cancer. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans: some traditional herbal medicines, some mycotoxins, naphthalene and styrene, v. 82, 843 p., Lyon, 2002.

IPT. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Panorama GAC - mapeamento da cadeia de gerenciamento de áreas contaminadas, 2016. Disponível em: <http://www.ipt.br/centros_tecnologicos/CTGeo/livros/60-panorama_do_setor_de gerenciamento_de_areas_contaminadas_no_brasil.htm>. Acesso em: 18 jun. 2018.

JAWITZ, J. W.; SILLAN, R. K.; ANNABLE, M. D.; RAO, P. S. C.; WARNER, K.. In-Situ Alcohol Flushing of a DNAPL Source Zone at a Dry Cleaner Site, *Environmental Science & Technology*, v. 34, p. 3722-3729, 2000.

KUEPER, Bernard H et al. An illustrated handbook of DNAPL transport and fate in the subsurface, v. 133, 2003. Disponível em: <www.environment-agency.gov.uk>.

LEMAIRE, Julien et al. Oxidant selection to treat an aged PAH contaminated soil by in situ chemical oxidation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 1, n. 4, p. 1261- 1268, 2013.

LIANG, Chenju; WANG, Zih-Sin; MOHANTY, Nihar. Influences of carbonate and chloride ions on persulfate oxidation of trichloroethylene at 20 C. *Science of the total environment*, v. 370, n. 2-3, p. 271-277, 2006.

MAGALHÃES, V. M. A. et al. (in press). Clay-based catalyst synthesized for chemical oxidation of phenanthrene contaminated soil using hydrogen peroxide and persulfate. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103568>.

MATZEK, Laura W.; CARTER, Kimberly E. Activated persulfate for organic chemical degradation: a review. *Chemosphere*, v. 151, p. 178-188, 2016.

MENDES, G. P. et al. Treatability studies of naphthalene in soil, water and air with persulfate activated by iron(II). *Journal of Environmental Sciences*, v. 90, p. 67-77, 2020.

PELUFFO, M.; PARDO, F.; SANTOS, A.; ROMERO, A. Use of different kinds of persulfate activation with iron for the remediation of a PAH-contaminated soil. *Science of the Total Environment*, v. 563-564, p. 649-656, 2016.

RANC, B. et al. Selection of oxidant doses for in situ chemical oxidation of soils contaminated by polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): A review. *Journal of hazardous materials*, v. 312, p. 280-297, 2016.

SILVA-RACKOV, C. K. O. et al. Remediation of Phenanthrene-Contaminated Soil by Persulfate Activated with Fe-Modified Diatomite: Kinetic and Statistical Approaches. *Water, Air, and Soil Pollution*, v. 228, n. 8, 2017.

SONG, Y.; BIAN, Y.; WANG, F.; XU, M.; NI, N.; YANG, X.; GU, C.; JIANG, X. Dynamic Effects of Biochar on the Bacterial Community Structure in Soil Contaminated with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 65, n. 32, p. 6789- 6796, 2017.

SUN, J. et al. Organic contamination and remediation in the agricultural soils of China: A critical review. *Science of the Total Environment*, v. 615, p. 724-740, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.271>>.

TSITONAKI, Aikaterini et al. In situ chemical oxidation of contaminated soil and groundwater using persulfate: a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, v. 40, n. 1, p. 55-91,

2010.

USDA. United States Department of Agriculture. Clarification of Soil Texture Class Boundaries, 1993. Disponível em: <https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_031477.pdf>. Acesso em: 11 fev. 2020.

US EPA. United States Environmental Protection Agency. Method 3510C - Separatory Funnel Liquid-Liquid Extraction, 1996.

US EPA. United States Environmental Protection Agency. Method 3550C – Ultrasonic Extraction, 2007.

US EPA. United States Environmental Protection Agency. Priority Pollutant List, 2014. Disponível em: <<https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/prioritypollutant-list-epa.pdf>>. Acesso em: 12 abr. 2018.

USMAN, M. et al. Effect of thermal pre-treatment on the availability of PAHs for successive chemical oxidation in contaminated soils. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 23, n. 2, p. 1371-1380, 2016.

VIANNA, M. M. G. R. et al. Toluene and naphthalene sorption by iron oxide/clay composites: Part II. Sorption experiments. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 101, n. 3, p. 887–892, 2010.

VIDONISH, J. E.; ALVAREZ, P. J. J.; ZYGOURAKIS, K. Pyrolytic Remediation of Oil- Contaminated Soils: Reaction Mechanisms, Soil Changes, and Implications for Treated Soil Fertility. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 57, n. 10, p. 3489–3500, 2018.

WU, H.; SUN, L.; WANG, H.; WANG, X. Persulfate Oxidation for the Remediation of Petroleum Hydrocarbon-Contaminated Soils. *Polish Journal of Environmental Studies*, v. 25, p. 851-857, 2016.

ÍNDICE REMISSIVO

A

AA2024 alloy 1, 6, 7
Adsorção de compostos 32, 36
Advanced Oxidation Processes 14, 87, 155
Aluminum alloy 4, 8, 12
Amplitude de pulso 50, 51, 52, 53, 54
Anti-corrosion performance 4, 7

B

Biocombustível 129
Biodigestor 142, 143, 144
Bioetanol 107, 115, 129, 139
Biogás 141, 142, 143, 144, 145, 146, 150, 151, 152
Biotransformation 24, 30

C

Chemistry Teaching 250, 261, 262
Cinza volante 118
Combustíveis fósseis 33, 99, 143
Complexometria 221, 222, 224
Compostos sulfurados 32, 33, 36, 39
Contaminantes orgânicos 57, 63, 69, 125, 157
Corrosion protection 1, 2, 12

D

Decolorization 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 87
Diagrama de fase 172, 173, 174

E

Electrochemical Impedance Spectroscopy 1, 5, 7, 8, 281
Energias renováveis 129, 143
Espectroscopia fotoeletrônica de raios X 32, 36, 41

F

Ferulic acid 24, 30, 31

G

Geoquímica de Contaminantes 69

Glifosato 43, 44, 45, 46, 47, 50, 51, 53, 54, 55, 56

Grafeno 43, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54

H

Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos 57, 60, 63, 154, 155, 156

I

Isotermas de adsorção-dessorção 32, 36, 38

L

Localized impedance 1, 2

M

Materiais mesoestruturados 37

Mecanismos de partição 57, 69

N

Nanotubos de carbono hidrofílicos 89, 96

Negro de carbono 89, 90

O

Óleo Residual 201, 202, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 212, 213, 214, 215, 216, 219, 220

Open circuit potential 1, 5, 7

Oxidação parcial do metano 98

P

Perfil cinético 113, 114, 135, 136, 137

Perovskita 98, 99, 100, 102, 103, 104, 105

Persulfato 154, 155, 157, 158, 159, 160, 164, 165

Photocatalytic efficacy 14

Photo-fenton process 13, 22

Polymer coating 3

Processo oxidativo avançado 155

Processos enzimáticos 107

R

Reaction 3, 9, 14, 16, 19, 77, 99, 106, 119, 126, 169, 202

Reator solar 76, 77

Reforma do metano 99

S

Saponificação 202, 203, 204, 207, 209, 215, 216, 217, 219

Scanning Electron Microscopy 4, 281

Self-healing mechanism 3

Semiologia 249, 251, 259

Sensor eletroquímico 43

Sistema Aquoso Bifásico 170, 172, 177

Smart coating 1, 2, 9, 281

T

Teaching strategies 261

Toxicidade 46, 57, 65, 154, 156, 176, 222

V

Voltametria 43, 46, 47, 49

 **Atena**
Editora

2 0 2 0