

# CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Estudos

Sobre

as

Propriedades, Processamento e  
Produção de Materiais

Sergio Bitencourt Araújo Barros  
(Organizador)

 EDITORA  
ARTEMIS  
2020

# CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Estudos

Sobre

as

Propriedades, Processamento e  
Produção de Materiais

Sergio Bitencourt Araújo Barros  
(Organizador)

 EDITORA  
ARTEMIS  
2020

2020 by Editora Artemis  
Copyright © Editora Artemis  
Copyright do Texto © 2020 Os autores  
Copyright da Edição © 2020 Editora Artemis  
**Edição de Arte:** Bruna Bejarano  
**Diagramação:** Helber Pagani de Souza  
**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, e sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

**Editora Chefe:**

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Antonella Carvalho de Oliveira

**Editora Executiva:**

Viviane Carvalho Mocellin

**Organizador:**

Sergio Bitencourt Araújo Barros

**Bibliotecário:**

Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422

**Conselho Editorial:**

Prof. Dr. Adalberto de Paula Paranhos, Universidade Federal de Uberlândia

Prof.<sup>ª</sup> Dr.<sup>ª</sup> Amanda Ramalho de Freitas Brito, Universidade Federal da Paraíba

Prof.<sup>ª</sup> Dr.<sup>ª</sup> Angela Ester Mallmann Centenaro, Universidade do Estado de Mato Grosso

Prof.<sup>ª</sup> Dr.<sup>ª</sup> Carmen Pimentel, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Prof.<sup>ª</sup> Dr.<sup>ª</sup> Catarina Castro, Universidade Nova de Lisboa, Portugal

Prof.<sup>ª</sup> Dr.<sup>ª</sup> Cláudia Neves, Universidade Aberta de Portugal

Prof. Dr. Cleberton Correia Santos, Universidade Federal da Grande Dourados

Prof. Dr. Eduardo Eugênio Spers, Universidade de São Paulo

Prof. Dr. Eloi Martins Senhoras, Universidade Federal de Roraima

Prof.<sup>ª</sup> Dr.<sup>ª</sup> Elvira Laura Hernández Carballido, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México

Prof.<sup>ª</sup> Dr.<sup>ª</sup> Emilas Darlene Carmen Lebus, Universidad Nacional del Nordeste/ Universidad Tecnológica Nacional, Argentina

Prof. Dr. Geoffroy Roger Pointer Malpass, Universidade Federal do Triângulo Mineiro

Prof.<sup>ª</sup> Dr.<sup>ª</sup> Iara Lúcia Tescarollo Dias, Universidade São Francisco

Prof. Dr. Ivan Amaro, Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Prof.<sup>ª</sup> Dr.<sup>ª</sup> Ivânia Maria Carneiro Vieira, Universidade Federal do Amazonas

Prof. Me. Javier Antonio Albornoz, University of Miami and Miami Dade College, USA

Prof. Dr. Joaquim Júlio Almeida Júnior, UniFIMES - Centro Universitário de Mineiros

Prof. Dr. Juan Diego Parra Valencia, Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín, Colômbia  
Prof. Dr. Júlio César Ribeiro, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Prof. Dr. Leinig Antonio Perazolli, Universidade Estadual Paulista  
Prof.ª Dr.ª Livia do Carmo, Universidade Federal de Goiás  
Prof.ª Dr.ª Luciane Spanhol Bordignon, Universidade de Passo Fundo  
Prof. Dr. Marcos Augusto de Lima Nobre, Universidade Estadual Paulista  
Prof.ª Dr.ª Maria Aparecida José de Oliveira, Universidade Federal da Bahia  
Prof.ª Dr.ª Maria do Céu Caetano, Universidade Nova de Lisboa, Portugal  
Prof.ª Dr.ª Maria do Socorro Saraiva Pinheiro, Universidade Federal do Maranhão  
Prof.ª Dr.ª Mauriceia Silva de Paula Vieira, Universidade Federal de Lavras  
Prof.ª Dr.ª Odara Horta Boscolo, Universidade Federal Fluminense  
Prof.ª Dr.ª Patrícia Vasconcelos Almeida, Universidade Federal de Lavras  
Prof. Dr. Rodrigo Marques de Almeida Guerra, Universidade Federal do Pará  
Prof. Dr. Sergio Bitencourt Araújo Barros, Universidade Federal do Piauí  
Prof. Dr. Sérgio Luiz do Amaral Moretti, Universidade Federal de Uberlândia  
Prof. Dr. Turpo Gebera Osbaldo Washington, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Peru  
Prof. Dr. Valter Machado da Fonseca, Universidade Federal de Viçosa  
Prof.ª Dr.ª Vanessa Bordin Viera, Universidade Federal de Campina Grande  
Prof. Dr. Wilson Noé Garcés Aguilar, Corporación Universitaria Autónoma del Cauca, Colômbia

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
(eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)**

C569 Ciência e tecnologia [recurso eletrônico] : estudos sobre as propriedades, processamento e produção de materiais / Organizador Sergio Bitencourt Araújo Barros. – Curitiba, PR: Artemis, 2020.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

Edição bilíngue

ISBN 978-65-87396-18-7

DOI 10.37572/EdArt\_187261020

1. Materiais – Ciência e tecnologia. 2. Química verde. 3. Sustentabilidade. I. Barros, Sergio Bitencourt Araújo.

CDD 577.14

**Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422**

## APRESENTAÇÃO

A coletânea intitulada **“Ciência e Tecnologia: Estudos sobre as Propriedades, Processamento e Produção de Materiais”** contempla resultados de pesquisas na área de química da matéria condensada, envolvendo conceitos de Química Verde, sustentabilidade e tecnologia.

A obra é iniciada com capítulos que versam sobre desenvolvimento de materiais sustentáveis e suas aplicações, como o uso de rejeitos de frutos aplicados como inibidores de corrosão de aço carbono, desenvolvimento de fotocatalizadores eficientes na purificação de sistemas aquosos contaminados por corante, assim como uma minuciosa revisão sobre a ampla gama de microorganismos existentes no meio ambiente capaz de biodegradar uma grande variedade de polímeros. Nos capítulos seguintes são tratadas a otimização de sistemas e materiais que são normalmente usados em impressão 3D de objetos e na fabricação de dispositivos eletrônicos; a preparação de material cerâmico com grande potencial em aplicações odontológicas; o aproveitamento de finos de resíduos de minério de manganês pelo processo de pelotização e, finalmente, a utilização de resíduos de minério de manganês para obtenção de compósitos com matriz metálica de alumínio.

O livro tem como foco apresentar aos leitores diferentes aspectos de pesquisas e aplicações da química da matéria condensada e de suas áreas correlatas no desenvolvimento de materiais e tecnologias que incentivem a sustentabilidade e tecnologias.

As pesquisas que integram a obra são de grande valia para o meio acadêmico, fornecendo subsídios teóricos para futuras investigações científicas, podendo ser usados desde o ensino dos temas abordados, para o desenvolvimento de projetos de trabalhos de conclusão de curso e pesquisas, para a atualização do estado da arte na área de degradação de polímeros, tratamento de efluentes, dentre outros.

Aos autores da obra, quero parabenizar pela qualidade dos artigos e agradecer por disponibilizá-los aos leitores por meio da Editora Artemis. Aos leitores, convido a apreciarem e examinarem a obra **“Ciência e Tecnologia: Estudos sobre as Propriedades, Processamento e Produção de Materiais”**.

Enfim, desejo-lhes uma excelente leitura!

Prof. Dr. Sergio Bitencourt Araújo Barros

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
ESTUDO DO SINERGISMO DO PÓ DA CASCA DE CACAU E MAMONA COMO INIBIDORES DE CORROSÃO PARA O AÇO CARBONO EM MEIO ÁCIDO	
Lhaira Souza Barreto Thássia Félix de Almeida André de Mendonça Santos Fernando Cotting Franco Dani Rico Amado Vera Rosa Capelossi	
<b>DOI 10.37572/EdArt_1872610201</b>	
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>13</b>
AUMENTO DA ATIVIDADE FOTOCATALÍTICA INDUZIDA POR FILMES HETEROESTRUTURADOS DE TiO <sub>2</sub> /Pt/SnO <sub>2</sub>	
Elias de Souza Monteiro Filho Glaucio de Oliveira Testoni Rafael Aparecido Ciola Amoresi Glaucio Meireles Mascarenhas Morandi Lustosa João Paulo de Campos da Costa Marcelo Vianna Nogueira Miguel Ruiz Maria Aparecida Zaghete Bertochi Elson Longo da Silva Leinig Antonio Perazolli	
<b>DOI 10.37572/EdArt_1872610202</b>	
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>31</b>
MICROORGANISMOS NA BIODEGRADAÇÃO DE POLÍMEROS EM MEIO AQUOSO	
Lhaira Souza Barreto Erika Emanuele Gomes da Silva Josiane Dantas Viana Barbosa Sara Horácio de Oliveira Maciel Yêda Medeiros Bastos de Almeida Glória Maria Vinhas	
<b>DOI 10.37572/EdArt_1872610203</b>	
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>49</b>
ESTUDO DA CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E TÉRMICA DO PLA PROCESSADO POR MANUFATURA ADITIVA	
Felipe Lopes Fonseca da Silva Nirlei Santos de Lima Luciana Sgarbi Rossino Marcos Dorigão Manfrinato	
<b>DOI 10.37572/EdArt_1872610204</b>	

<b>CAPÍTULO 5 .....</b>	<b>62</b>
ESTUDO DE SUPERFÍCIE E MORFOLÓGICO DE FILMES FINOS BASEADOS NO POLÍMERO SEMICONDUTOR CONJUGADO PBTTT-C14	
José Enrique Eirez Izquierdo	
Marco Roberto Cavallari	
Marcelo Goncalves Honnicke	
Fernando Josepetti Fonseca	
<b>DOI 10.37572/EdArt_1872610205</b>	
<b>CAPÍTULO 6 .....</b>	<b>75</b>
ESTUDO COMPARATIVO DAS PROPRIEDADES ESTRUTURAIS E MORFOLÓGICAS DE DOIS SISTEMAS CERÂMICOS SINTERIZADOS DE 3Y-TZP	
Fabiola Stahlke Prado	
Cláudio Machado Junior	
Renato Panegaci dos Santos	
Alejandra Hortencia Miranda González	
<b>DOI 10.37572/EdArt_1872610206</b>	
<b>CAPÍTULO 7 .....</b>	<b>84</b>
APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE MINÉRIO DE MANGANÊS PARA OBTENÇÃO DE PELOTAS	
Milton Teles Neto	
Margarida Márcia Fernandes Lima	
Rhelman Rossano Urzedo Queiroz	
Rosa Malena Fernandes Lima	
<b>DOI 10.37572/EdArt_1872610207</b>	
<b>CAPÍTULO 8 .....</b>	<b>98</b>
SINTERIZAÇÃO AO NATURAL DE COMPOSTOS COM MATRIZ DE ALUMÍNIO REFORÇADOS COM 5%p, 10%p e 15%p DE RESÍDUOS DE MINÉRIO DE MANGANÊS	
Margarida Márcia Fernandes Lima	
Vítor Martins Incalado	
Rhelman Rossano Urzedo Queiroz	
Rosa Malena Fernandes Lima	
<b>DOI 10.37572/EdArt_1872610208</b>	
<b>SOBRE O ORGANIZADOR .....</b>	<b>118</b>
<b>ÍNDICE REMISSIVO .....</b>	<b>119</b>

## MICRORGANISMOS NA BIODEGRADAÇÃO DE POLÍMEROS EM MEIO AQUOSO

Data de submissão: 17/09/2020

Data de aceite: 15/10/2020

### **Lhaira Souza Barreto**

Universidade Federal de Pernambuco  
Recife - PE  
<http://lattes.cnpq.br/6181792853510077>

### **Erika Emanuele Gomes da Silva**

Universidade Federal de Pernambuco  
Recife – PE  
<http://lattes.cnpq.br/2528588285343845>

### **Josiane Dantas Viana Barbosa**

SENAI CIMATEC  
Salvador – BA  
<http://lattes.cnpq.br/2990931894696551>

### **Sara Horácio de Oliveira Maciel**

Universidade Federal de Pernambuco  
Recife – PE  
<http://lattes.cnpq.br/1639271932432686>

### **Yêda Medeiros Bastos de Almeida**

Universidade Federal de Pernambuco  
Recife – PE  
<http://lattes.cnpq.br/3865509948244113>

### **Glória Maria Vinhas**

Universidade Federal de Pernambuco  
Recife – PE  
<http://lattes.cnpq.br/6404643744960977>

**RESUMO:** Os polímeros convencionais são produzidos a partir de derivados de petróleo e sua aplicação foi crescente nos últimos anos devido às suas características de alta durabilidade, versatilidade à moldagem e estabilidade. Com isso apresentam grandes vantagens a vários setores da indústria, porém ocasionam sérios problemas ambientais, tanto nos ecossistemas terrestres como aquáticos. O meio ambiente reage com a ação dos microrganismos na busca da autopreservação e alguns são responsáveis em produzir uma ampla variedade de enzimas capazes de degradar diferentes materiais para serem usados como fonte de nutriente. Nesse contexto, esse trabalho, pretende descrever as condições para a biodegradação de alguns polímeros, industrialmente relevantes em meio ambiente, em especial em meio aquoso. Essa revisão apresentou informações relevantes sobre os microrganismos envolvidos na biodegradação de uma ampla gama de ambientes e foi observado que na maioria dos casos os mecanismos ainda não são claros na literatura.

**PALAVRAS-CHAVE:** Biodegradação, polímeros, ambiente aquático.



# MICROORGANISMS IN THE BIODEGRADATION OF POLYMERS IN AQUEOUS MEDIA

**ABSTRACT:** Conventional polymers are produced from petroleum derivatives and their application has increased in recent years due to their characteristics of high durability, versatility in molding and stability. With this they present great advantages to several sectors of the industry, but they cause serious environmental problems, both in terrestrial and aquatic ecosystems. The environment reacts with the action of microorganisms in the search for self-preservation and some are responsible for producing a wide variety of enzymes capable of degrading different materials to be used as a nutrient source. In this context, this work intends to describe the conditions for the biodegradation of some polymers, industrially relevant in the environment, especially in aqueous media. This review presented relevant information about the microorganisms involved in the biodegradation of a wide range of environments and it was observed that in most cases the mechanisms are still unclear in the literature.

**KEYWORDS:** Biodegradation, polymers, aquatic environment.

## 1. INTRODUÇÃO

Os polímeros sintéticos possuem propriedades atraentes, como boas propriedades mecânicas e térmicas, tais como a durabilidade e estabilidade, propriedades desejadas quando em substituição de materiais como os metais, madeira e vidro. Porém quando se trata do seu descarte eles apresentam desvantagens devido ao grande acúmulo e graves problemas ambientais, devido à estabilidade da estrutura química de suas macromoléculas, essas organizações químicas são provenientes da alta massa molecular e da hidrofobicidade intrínseca, dificultando a ação dos microrganismos e de suas enzimas na superfície de diversos produtos plásticos (FRANCHETTI & MARCONATO, 2006). Além disso, quando ocorre o processo de degradação dos polímeros convencionais, podem muitas vezes liberar substâncias nocivas ao meio ambiente.

Em decorrência da atividade industrial, hábitos de consumo e principalmente da má gestão de resíduos, nas últimas décadas, o lixo polimérico tem sido encontrado em todos os oceanos e em aterros sanitários (JAMBECK et al., 2015). Em resposta ao acúmulo desse lixo na biosfera, segundo Dvořák et al. (2017), os microrganismos estão se adaptando e desenvolvendo enzimas e vias catabólicas para degradação do polímero, usando-o como fonte de carbono e energia. Portanto, há um interesse crescente, tanto no desenvolvimento de novos materiais biodegradáveis, quanto na degradação de polímeros convencionais, como também elucidar o mecanismo da degradação/biodegradação de polímeros de origem fósseis (o polietileno (PE), o

poli(tereftalato de etileno) (PET) e poli(butileno adipato co-tereftalato) PBAT, como os de fonte renovável (polihidroxicanoatos (PHAs)).

Dessa forma, a proposta deste trabalho é discutir os processos de biodegradação de polímeros em meio aquoso, através de descrições de trabalhos reportados na literatura.

## 2. DEGRADAÇÃO DOS POLÍMEROS

Várias definições têm sido utilizadas para degradação dos polímeros, mas de maneira geral, pode ser definida como qualquer reação química que altera a qualidade de interesse do material, causada por agentes físicos e/ou por agentes químicos, acarretando uma modificação irreversível nas propriedades (PAOLI, 2008). Em geral, o processo de degradação inicia com mudanças que são geralmente indesejáveis, como a formação de fissuras, amarelamento, perdas das propriedades mecânicas e migração dos aditivos (FECHINE et al. 1998; AZWA et al. 2013).

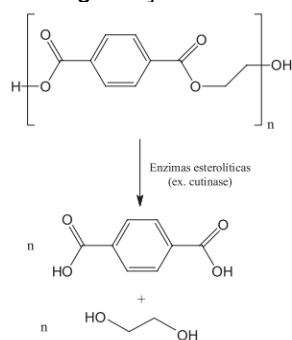
O polietileno (PE) e o tereftalato de polietileno (PET) são polímeros sintéticos produzidos em grande escala e cada um destes polímeros têm a sua própria característica de degradação. O polietileno é sensível à radiação UV e à oxidação enquanto o PET é sensível à hidrólise e ataque por ácidos fortes (LAPSHIN et al. 2010).

### 2.1 DEGRADAÇÃO DO POLI (TEREFTALATO DE ETILENO) (PET)

Poli (tereftalato de etileno) (PET) é composto de ácido tereftálico (TPA) ligado a éster e etileno glicol (EC) (WEBB et al. 2013). São amplamente utilizados por causa de sua transparência, resistência e maleabilidade. No entanto, à sua alta cristalinidade o torna recalcitrante à despolimerização catalítica ou biológica devido à acessibilidade limitada das ligações éster. Em um contexto industrial, o PET pode sofrer a despolimerização por meio da quebra das ligações poliméricas por clivagem, gerando seus constituintes (FUKUSHIMA et al. 2011). Entretanto, as reciclagens químicas e mecânicas do PET não são consideradas vantajosas, por apresentarem altos custos de processamento e perda de propriedades. Por outro lado, a hidrólise enzimática pode apresentar algumas vantagens. Segundo Donelli (2010), a hidrólise enzimática de PET aconteceu usando a enzima cutinase, em sinergismo com a hidrólise alcalina, e como resultado foi observado modificações estruturais na superfície do PET que aumentaram sua hidrofobicidade. Nos últimos anos, foram relatadas algumas enzimas (lipases, esterases, carboxilesterases e cutinases) produzidas por microrganismos capazes de degradar o PET pelo processo de clivagem de ligações éster (WEI et al. 2017).

Figura 1 ilustra a reação geral de degradação enzimática completa de PET, em que são formados seus monômeros, ácido tereftálico e etileno glicol.

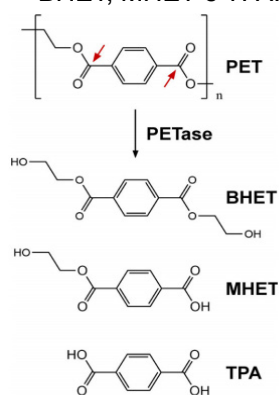
Figura 1- Reação geral da degradação enzimática de PET em meio aquoso.



Fonte: Costa et al. (2014).

Yoshida et al. (2016) descobriu a bactéria *Ideonella sakaiensis* 201 F6 e por meio de análises genéticas e bioquímicas, os autores identificaram enzimas envolvidas na hidrólise extracelular do PET e na subsequente via intracelular do catabolismo do PET-hidrolítico. Foi identificado que essa bactéria secreta uma enzima única conhecida como PETase, pela sua preferência pelo PET, semelhante a cutinase provocando a hidrólise do PET em bis(2-hidroxietil) tereftalato (BHET), Monoetil-2-hidroxietiltereftalato (MHET) e Ácido tereftálico (TPA) (Fig. 2).

Figura 2 - Degradação de PET. A PETase catalisa a clivagem hidrolítica do PET para produzir BHET, MHET e TPA.



Fonte: Yoshida et al. (2016)

A PETase apresenta excelente desempenho na hidrólise de PET e possui um grande potencial em outras aplicações. Antes da descoberta dessa enzima, alguns trabalhos reportaram processos de degradação biológica de PET e a maioria utilizava as enzimas do gênero bacteriano *Thermobifida* (ROTH et. al., 2014; WEI, 2017), porém há estudos que empregaram outros microrganismos, como fungo filamentosos *Fusarium solani* (GOMES et. al., 2013) e a bactéria termofílica *Saccharomonospora viridis* (KAWAI et. al., 2014).

Recentemente, Costa (2018) analisou o comportamento da levedura *Yarrowia lipolytica* frente às moléculas da cadeia de produção do PET, visando o desenvolvimento de um processo para valorização do PET pós consumo. Neste estudo foi realizada

uma investigação do crescimento celular de *Yarrowia lipolytica* frente às moléculas como o ácido tereftálico (TPA), bis (2-hidroxietil) tereftalato (BHET), monoetileno glicol (MEG), oligômeros de PET, pré-polímero de PET, PET amorfo e um plástico de recicladora. Os resultados foram obtidos através de análises de crescimento celular, medidas de pH, avaliação de consumo de glicose e das moléculas do PET por cromatografia líquida de alta eficiência, atividade de lipase, protease e outras esterases e análises microscópicas. As concentrações dos monômeros TPA e MEG, em solução, foram menores nos ensaios com o extrato de lêvedo 1% m/v e peptona 2% m/v. As células presentes nesses experimentos assimilaram estes substratos de forma mais eficiente do que os ensaios com extrato de lêvedo 1% m/v, peptona 2% m/v e glicose 2% m/v. Os experimentos com BHET apresentaram maior atividade enzimática, em 160 (118,09 U.L<sup>-1</sup>) e 250 rpm (384,9 U.L<sup>-1</sup>), demonstrando que este composto pode agir como um possível indutor no processo de produção de lipases por *Yarrowia lipolytica*. Nos processos de hidrólise enzimática, o tereftalato de Monoetil-2-hidroxietiltereftalato (MHET) foi o principal intermediário liberado no processo, seguido do TPA e BHET. Além da produção de lipases, *Y. lipolytica* possui grande potencial para expressão de outras esterases, que também podem agir na hidrólise enzimática de PET. Este fato foi constatado pela detecção de atividade sobre o substrato butirato de p-nitrofenila.

## 2.2 DEGRADAÇÃO DO POLIETILENO (PE)

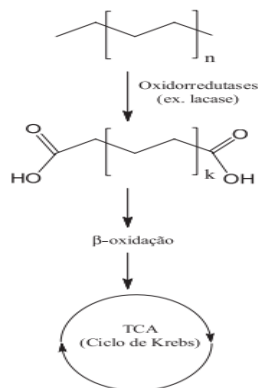
O polietileno (PE) é um dos polímeros comerciais mais versáteis, sua natureza semicristalina permite seu processamento em uma longa faixa de temperatura, onde a fase amorfa promove à flexibilidade e a fase cristalina a resistência (CHENG, 2008). Em decorrência da sua baixa biodegradabilidade, eles persistem no meio ambiente por muitas décadas porque a cinética de degradação biológica do PE é limitada por sua insolubilidade em água, ausência de grupos funcionais e alta massa molar. Para sua degradação são necessárias pré-tratamentos que promovam uma deterioração parcial do polímero, gerando grupos hidrolisáveis e moléculas com menor massa molecular, o que facilita e propicia o ataque microbiano (RESTREPO-FLÓREZ, 2014).

A literatura vem reportando espécies de microrganismos com atividade de degradação do PE, entre estes estão às espécies: *P. simplicissimum* YK, *Acinetobacter baumannii*, *Aspergillus fumigatus*, *Aspergillus terreus*, *Bacillus brevis*, *Bacillus circulans*, *Bacillus sphaericus*, *Brevibacillus parabrevis*, *Fusarium solani*, *Pseudomonas citronellolis*, *Rhodococcus ruber* e *Staphylococcus epidermis* (YAMADA-ONODERA et al. 2001; XIAO et al. 2008; PRAMILA et al. 2012). Volke-Sepúlveda et al. (2001) observou o processo da estirpe *P. pinophilum* e das *A. niger*, na biodegradação do polietileno de baixa densidade (PEBD). Inicialmente o material polimérico foi oxidado termicamente, e depois incubado com tais fungos em meio com etanol e na ausência de etanol. Como resultado foi observado que o fungo *P.*

pinophilum foi mais eficiente no processo de biodegradação do PEBD em relação ao fungo *A. niger*, provavelmente porque o primeiro possui maior grau de inespecificidade em seu sistema enzimático, capaz de despolimerizar materiais ligninolíticos.

A figura 3 representa um mecanismo hipotético da degradação enzimática do PE já que esse mecanismo ainda não é bem elucidado.

Figura 3 - Mecanismo hipotético da Degradação enzimática de PE.



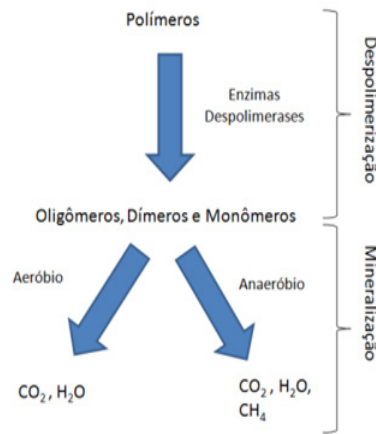
Fonte: Restrepo-Florez et al. (2014).

Os fatores abióticos podem atuar de forma sinérgica com o mecanismo biótico e dessa forma podem iniciar a oxidação das cadeias do PE. As enzimas oxidoredutase desempenham uma função importante, ocasionando o aumento da hidrofobicidade das cadeias alifáticas por meio de reações radiculares, formando agrupamentos carboxila que podem ser metabolizados pelas vias de -oxidação e pelo ciclo de Krebs (RESTREPO-FLOREZ et al. 2014).

### 3. BIODEGRADAÇÃO DOS POLÍMEROS

Na biodegradação, o polímero e o microrganismo coabitam em um mesmo sistema em equilíbrio. Quando o mecanismo de sinalização do microrganismo identifica que a macromolécula encontra-se no entorno, e que precisa de enzimas específicas para a sua degradação, elas são produzidas e excretadas para o meio, com a finalidade de disponibilizar os monômeros, que podem atuar como fonte de carbono para o crescimento do microrganismo, sendo essa etapa a despolimerização (MULLER, 2003). Por outro lado ocorre à segunda etapa do processo chamada de mineralização, quando os fragmentos oligoméricos são suficientemente pequenos para serem transportados pelo interior dos organismos onde eles são transformados em biomassa microbiana, água e dióxido de carbono na presença de microrganismos aeróbicos e metano, gás carbônico e água em condições anaeróbicas. (FIG. 4) (PREMRAJ et al. 2004; INNOCENTINI-MEI, 2005; GHAFARI, 2014).

Figura 4- Vias de degradação de polímeros por microrganismos.



Fonte: PREMRAJ et al. 2004

O processo é considerado lento, onde a fase de adaptação, conhecida também como fase lag, tem duração de aproximadamente 5 dias e a diminuição da massa molar numérica média da macromolécula, pode levar mais de 120 dias para apresentar mudanças expressivas (ZHAO, 2005).

Várias metodologias são usadas para caracterização da biodegradação, nesses métodos, diferentes parâmetros de medição são utilizados, como: medição do consumo de oxigênio, método de análise de superfície, avaliação das propriedades (por exemplo, mecânicas, químicas, termodinâmicas), teste enzimático, extensão de crescimento dos microrganismos sobre o polímero (CONATO & SUMERA 2012), perda de massa e medição de dióxido de carbono produzido (ROSA et al. 2003; ZHAO, 2005; GHAFARI, 2014).

### 3.1 POLÍMEROS BIODEGRADÁVEIS

Os polímeros biodegradáveis podem oferecer soluções ideais em muitas aplicações, são encontrados em diversos segmentos de mercado: embalagem, horticultura, agricultura, automotivo, bens de consumo, entre outros, diminuindo os impactos ambientais. Segundo os dados apresentados pela European Bioplastics, o maior segmento dentro da indústria de biopolímeros é destinado ao mercado de embalagens. Além de promover a preservação do meio ambiente, os polímeros biodegradáveis podem diminuir a dependência do petróleo que a indústria dos polímeros sintéticos apresenta, uma vez que os polímeros biodegradáveis podem ser obtidos a partir de biopolímeros. A Tabela 1 apresenta alguns resultados encontrados na literatura sobre a biodegradação de polímeros.

Tabela 1 - Exemplos de literatura sobre biodegradação de polímeros.

Polímero	Microrganismo	Resultados observados	Meio	Referência
Policaprolactona (PCL)	Penicillium oxalicum (OGM)	100% de perda de massa do filme polimérico inicial.	Solo	LI et al. 2012

Polímero	Microrganismo	Resultados observados	Meio	Referência
Poliuretano (PU)	Cladosporium cladosporioides, C. pseudocladosporioides, C. tenuissimum, C. asperulatum, C. montecillanume, Aspergillus fumigatus e Penicillium chrysogenum	Perda de peso de um poliuretano de mais de 60% após a incubação com isolados fúngicos	Mineral	ÁLVAREZ-BARRAGÁN et al. 2016
Poliuretano (PU)	Aspergillus tubingensis	Resultados indicaram que esta cepa de A. tubingensis foi capaz de degradar o PU após dois meses em meio líquido, o filme foi totalmente degradado em pedaços menores.	Solo	KHAN et al. 2017.
Poliácido láctico (PLA)/ poli (etileno tereftalato) (PET)	Arthrobacter sulfonivorans, Serratia plymuthica, Clitocybe sp., Laccaria laccata	A biodegradação foi mais rápida no PLA na presença das linhagens de S. plymuthica e L. laccata.	Solo	JANCZAK et al. 2018
Policaprolactona (PCL)/ polihidroxicanoatos (PHA)	Pseudomonas e Streptomyces	Ambos os materiais apresentaram erosão superficial após 4 semanas de exposição a preparações proteicas totais de ambas as linhagens.	Óleo de cozinha usado	MANDIC et al. 2019.

Estudos sobre a biodegradação dos polímeros têm sido intensamente conduzidos e estão bem documentados por vários pesquisadores há alguns anos, principalmente o processo de biodegradação dos polímeros em solo. Li et. al., (2012), isolaram fungos do solo selecionados quanto à capacidade de formar zonas claras em placas de ágar com poli(caprolactona) emulsionada (PCL). A cepa mais ativa, designada como DSYD05, foi identificada como *Penicillium oxalicum* com base em características morfológicas e análise filogenética. O mutante DSYD05-1, obtido por mutagênese na luz ultravioleta da cepa DSYD05, foi mais efetivo na degradação do PCL. Os produtos de degradação de PCL foram analisados por espectrometria de massa; os resultados indicaram que o ácido 6-hidroxihexanóico foi produzido e assimilado durante o cultivo. A degradação do filme PCL pelo DSYD05-1 foi observada por microscopia eletrônica de varredura e foi indicativa de um processo de degradação em três estágios. A degradação de partes amorfas do filme precedeu a do centro cristalino e depois as regiões cristalinas periféricas.

Álvarez-Barragán et al. (2016) isolaram linhagens fúngicas capazes de crescer em meio mineral com um poliéster (PU) como única fonte de carbono. As seis melhores degradadores pertencem ao *Cladosporium cladosporioides* complexo, incluindo a espécie *C. pseudocladosporioides*, *C. tenuissimum*, *C. asperulatum*, e *C. montecillanume* os outros dois foram identificados como *Aspergillus fumigatus* e *Penicillium chrysogenum*. O melhor degradador de Impranil, *C. pseudocladosporioides* cepa T1.PL.1, degradou até 87% após 14 dias de incubação.

Já Khan et al. (2017) avaliaram a capacidade de degradação de PU do fungo na presença de 2% de glicose após enterramento no solo. Os resultados indicaram que esta cepa de *A. tubingensis* foi capaz de degradar o PU. Notavelmente, após dois meses em meio líquido, o filme de PU foi totalmente degradado em pedaços menores. Com base em uma pesquisa bibliográfica, pode-se afirmar que este é o primeiro relato mostrando *A. tubingensis* capaz de degradar o PU. Este trabalho fornece uma visão sobre o papel de *A. tubingensis* na solução do dilema dos resíduos de PU através da biodegradação.

Janczak et al. (2018), tiveram como objetivo selecionar bactérias rizosféricas e fungos para acelerar a biodegradação de PLA e PET no solo onde espécies vegetais selecionadas eram cultivadas. A biodegradação das folhas analisadas foi mais rápida na presença das linhagens de *S. plymuthica* e *L. laccata*. A presença de PLA no solo inoculado reduziu o pH do solo e aumentou seu potencial redox, bem como aumentou a abundância de fungos e bactérias no solo. A experiência confirmou o efeito estimulante do *S. plymuthica* e Cepas de *L. laccata* na biomassa vegetal.

Os poliésteres oriundos dos ácidos hidrocarbônicos têm sido alvo de atenção dos pesquisadores pelas suas propriedades mecânicas e potencial de biodegradabilidade. Dentre estes se destacam: PHB (poliéster alifático de origem microbiana) e o PBAT (poliéster aromático de origem petroquímica), cujos grupos ésteres sofrem ação microbiana, ou seja, hidrólise enzimática e degradação oxidativa (TSUJI et. al., 2002).

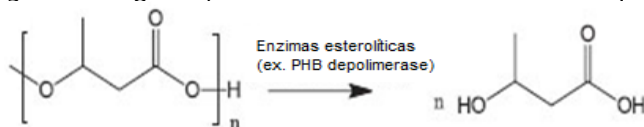
### 3.1.1 Biodegradação do poli-hidroxibutirato (PHB)

Os polímeros a base de PHAs têm como uma das propriedades originais a sua biodegradabilidade em vários ambientes, por esse motivo tem recebido interesse industrial devido à sua utilização como plásticos biodegradáveis e também biocompatíveis. O PHB é o principal representante da família de PHAs e vem sendo estudado por apresentar características interessantes, que se assemelham às do polipropileno (PP), polímero derivado do petróleo e de grande consumo (CHANDRA, 1998; FRANCHETTI & MARCONATO, 2006). O PHB pode ser degradado por ação de enzimas esterolíticas, como esterases, lipases e proteases. Na literatura é encontrado o uso de enzimas específicas, chamadas de PHB depolimerase (EC 3.1.1.75), e sua origem pode ser extracelular ou intracelular (LI et. al., 2012). Além disso, os resultados indicam que a taxa de degradação depende de fatores relacionados ao ambiente, como temperatura, umidade, pH e nutrientes disponíveis (MERGAERT et. al., 1995).

Os microrganismos capazes de degradar o PHB possuem a enzima PHB depolimerase, que é capaz de transformar a cadeia polimérica novamente em monômero de ácido 4-hidroxibutírico, que podem ser utilizados novamente como fonte de carbono. A Figura 5 ilustra a reação da degradação enzimática do PHB gerando o monômero (ácidos 4-hidroxibutírico).



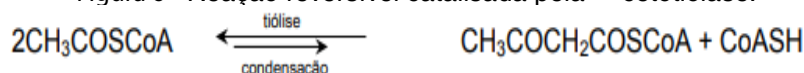
Figura 5 - Degradação enzimática de PHB em meio aquoso.



Fonte: Costa et al. 2014.

As tiolases, proteínas envolvidas na degradação do PHB, são conhecidas por acetil-CoA aciltransferase ou tiolase -cetoacil-Coa (E.C. 2.3.1.9), possuem características que atuam em substratos de cadeias longas, e fazem parte do processo de oxidação dos ácidos graxos. Em geral, as tiolases catalisam a quebra reversível de 3-cetoacilCoA em acil-CoA e acetil-CoA (FIG. 6).

Figura 6 - Reação reversível catalisada pela -cetotiolase.



Volova et. al., (2011) estudaram a biodegradação de poli-hidroxialcanoatos (PHAs) em águas costeiras tropicais e a identificação de bactérias degradadoras de PHA. As amostras de polímeros incubadas em água do mar por 160 dias ficaram cobertas com biofilmes microbianos. Um total de 58 bactérias heterotróficas foram isoladas em culturas puras. Os microrganismos formadores de biofilme foram representados por diversos tipos morfológicos. As bactérias isoladas foram representadas pelos gêneros *Pseudomonas*, *Pseudoalteromonas*, *Corynebacterium*, *Staphylococcus*, *Planococcus*, *Micrococcus*, *Arthrobacter*, *Cellulomonas*, *Enterobacter*, *Bacillus* e *Gracilibacillus*. Já os fungos foram representados por *Aspergillus*, *Penicillium*, *Trichoderma*, *Verticillium*, *Mucor* e *Malbranchea*. As taxas de biodegradação dos filmes de PHAs na água do mar foram maiores do que as dos aglomerados compactados.

Estudos têm demonstrado que a degradação, tanto extra como intracelular do PHB é um mecanismo complexo, onde várias depolimerase e outras enzimas, ainda não foram caracterizadas.

### 3.1.2 Biodegradação do poli(butileno adipato co-tereftalato) (PBAT)

O poli(butileno adipato co-tereftalato) (PBAT) é um copoliéster alifático-aromático, termoplástico, sintético e apresenta um processo de degradação acelerado, podendo se degradar em algumas semanas em contato com o meio ambiente através da ação de enzimas naturais. Isso porque sua estrutura química é composta por uma fração alifática (butadieno adipato), responsável pela sua biodegradabilidade, e uma parte aromática (tereftalato), que fornece boas propriedades mecânicas, podendo ter um alongamento máximo de 700 % (SHAHLARI et al. 2012).

A sua principal característica, degradabilidade, deve-se à presença de enzimas que fazem com que o PBAT se degrade completamente em poucas semanas. Esse processo vem sendo estudado há alguns anos, e os estudos são focados na

degradação em condições ambientais variáveis. Kijchavengkul et al. (2010) relataram as atividades microbianas no PBAT em ambiente de compostagem a altas temperaturas e pH. Já Witt et al. (2001) observaram que uma bactéria termofílica, *Thermomonospora fusca*, poderia monomerizar o PBAT a alta temperatura dentro de 3-4 semanas.

Alguns microrganismos já foram identificados como degradadores do PBAT, Kasuya et al. (2009) testou a ação de microrganismos do solo de três diferentes regiões do Japão. Corpos de provas de PBAT na forma de tiras do filme foram colocados em meio líquido e adicionadas amostras de microrganismos do solo. A cultura foi avaliada por 150 dias, com intervalos de 5 em 5 dias. Os produtos da degradação do PBAT foram avaliados no sobrenadante das culturas por cromatografia líquida, seguida de espectrometria de massa por ionização eletrospray. Os resultados mostraram que após 124 dias 95% do conteúdo de PBAT havia sido mineralizado em dióxido de carbono e que durante os períodos iniciais as tiras de PBAT que estavam em contato com os microrganismos do solo ficaram cobertas com biofilmes microbianos.

### 3.2 MICRORGANISMOS ENVOLVIDOS NA BIODEGRADAÇÃO

A presença de uma população contendo muitos tipos de microrganismos aumenta a biodegradação, onde as propriedades mecânicas, químicas e físicas são modificadas (LUCAS et al. 2008). Os principais tipos de microrganismos associados ao processo biodegradativo em habitats aquáticos ou terrestres correspondem às bactérias, fungos, protozoários e algas. Sendo responsáveis pela excreção de enzimas capazes de degradar até complexas moléculas poliméricas (VIDELA, 2003). Na literatura foram encontrados estudos de espécies de bactérias e fungos responsáveis pela biodegradação dos polímeros (VINHAS et al. 2007; GONÇALVES, 2009).

Segundo Paoli (2008), tipicamente o teste de biodegradabilidade é feito observando-se o crescimento da colônia de microrganismos em um meio de agar-agar. O meio contém todos os nutrientes necessários para a reprodução do microrganismo, exceto uma fonte de carbono (que deverá ser o polímero). A mistura típica de microrganismos usada nos testes é mostrada na Tabela 2.

Tabela 2- Microrganismos tipicamente usados em testes de biodegradabilidade de polímeros.

Microrganismos	
Fungos	<i>Aspergillus niger</i> , <i>Aspergillus flavus</i> , <i>Chaetomicum globosum</i> , <i>Penicillium funiculosum</i> , <i>Pullularia pullulana</i>
Bactérias	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Bacillus Cereus</i> , <i>Coryneformes bacterium</i> , <i>Bacillus sp.</i>
Actinomicetas	Streptomicetaceae

Fonte: Paoli (2008)

Recentemente na literatura alguns autores já identificaram e estudaram espécies de bactérias e fungos que realizam a biodegradação de polímeros como apresentado nas tabelas 3 e 4.

Tabela 3 - Espécies de bactérias degradadores de polímeros.

Bactérias	Autor
Bacillus subtilis	Vimala et al. 2016
Bacillus sp. Rhodococcus sp.	Auta et al. 2018
Pseudomonas	Mandic, et al. 2019
Bacillus megaterium	Song et al. 2019

Tabela 4 - Espécies de fungos degradadoras de polímeros.

Fungos	Autor
Penicillium funiculosum	Vergara-Porras et al. 2016.
Zalerion maritimum	Paço et al. 2017
Aspergillus tubingensis	Khan et al. 2017
aspergillus niger	Mustapha et al. 2019

### 3.2.1 Microrganismos envolvidos na biodegradação dos polímeros em meio aquoso

A utilização dos microrganismos para o processo de biodegradação dos polímeros em meio aquoso será exemplificada, a partir de pesquisas que relataram esse processo em diversas ambientes.

Ohura et al. (1999) avaliaram a biodegradação das fibras de poli(ácido 3-hidroxicanóico) por microrganismos degradadores em ambientes aquáticos, observaram, através dos ensaios de perda de massa, que em 28 dias o polímero foi 100% biodegradado, tanto nas águas doces como nas águas do mar. O número de microrganismos nas águas do mar da baía de Tóquio, das águas doces do lago e do rio foi de  $1,5 \times 10^3$  / ml  $3,0 \times 10^3$  / ml e  $5,9 \times 10^5$  / ml, respectivamente. Assim, as biodegradabilidades do polímero em águas naturais diminuíram na seguinte ordem: água doce do rio > água doce do lago > água do mar e os autores concluíram que taxa de biodegradação pode ser dependente do número total de microrganismos em uma água natural.

Carashi et al. (2002) testaram a biodegradabilidade do poli (3-hidroxiacetato) (PHB) puro e misturado com farinha de madeira nas porcentagens de 10 a 40% em água de córrego, que recebia o esgoto municipal por 300 dias. Em 180 dias as amostras de PHB/Madeira 40% foram totalmente consumidas. Concluiu que a biodegradação do material, está totalmente ligada ao tipo de enzima e microrganismo.

Os estudos sob condições controladas usando técnicas de caracterização padrão são necessários para entender o comportamento de degradação e fornecer uma base comparativa. Tsuji et al. (2002) realizou degradação comparativa de PCL, PLA (amorfo e cristalino) e PHB a 25 ° C por períodos predeterminados em água do mar do Oceano Pacífico. O PCL foi 25% degradado em 10 semanas enquanto PHB apenas em 9%.

Sudhakar et al. (2008) comprovaram a eficiência de microrganismos marinhos, especificamente *Bacillus* sp. e *Bacillus cereus*, na degradação do polietileno (PE), o experimento teve duração de 1 ano, pH 7,5 e temperatura 30 °C com o polímero como a única fonte de carbono. As perdas de massa das amostras termicamente tratadas foram de 19% para o polietileno de baixa densidade (PEBD) e 9% para o polietileno de alta densidade (PEAD).

Faria (2010) observou, em seu experimento de biodegradação de benda de PHB/PP, utilizando água do Rio Atibaia, que o PHB sofreu maior perda de massa (aproximadamente 100%) em relação à blenda de PHB/PP, enquanto que o PP não sofreu perda de massa significativa. Foi observada também uma diminuição nos índices de carbonila da fase cristalina do PHB. Como esse experimento foi realizado antes e após o descarte do efluente bruto de refinaria de petróleo, foi possível observar a presença de grande quantidade de actinobactéria *Gordonia polyisoprenivorans* após o descarte.

Neste trabalho, foi investigado o comportamento de degradação de cinco polímeros a partir da classe de polímeros biodegradáveis (poli(ácido lático-co-ácido glicólico) (PLGA), PCL, PLA, PHB, e PBAT, e o PET comercialmente útil para fins de comparação) sob condições controladas no laboratório. Curiosamente, observou-se 100% de degradação apenas para o PLGA, enquanto o PCL, o PLA e o PET não se degradaram totalmente (BAGHERI et al. 2017).

Recentemente, Dilkes-Hoffman et al. (2019) estudaram a taxa de biodegradação do PHA no ambiente marinho com o intuito de calcular o ciclo de vida do polímero. Foi determinado que a taxa média de biodegradação de PHA no ambiente marinho é de 0,04-0,09 mg·dia e que, por exemplo, uma garrafa de água de PHA demoraria entre 1,5 e 3,5 anos para ser completamente biodegradado.

#### 4. CONCLUSÕES

Diante dos estudos expostos, obtidos por diversos autores, é possível concluir que existe uma variedade de microrganismo no ambiente aquoso capazes de realizar a biodegradação de diversos polímeros, e muitos vem sendo isolados e estudados a fim de descobrir espécies que produzem enzimas específicas capazes de degradar determinados materiais. Uma característica importante dos microrganismos

é a capacidade de se adaptarem a condições extremas e de produzirem grande quantidade de enzimas que podem degradar moléculas complexas de diferentes materiais. Tais características aliadas a diversos outros fatores tornam alguns microrganismos potenciais agentes de preservação do ambiente, especialmente no que diz respeito à biodegradação.

Apesar de vários autores avaliarem o processo de biodegradação nos materiais poliméricos, pesquisas sobre os mecanismos das reações ainda são escassas, fazendo-se necessário que haja um incremento de estudos relacionados aos efeitos abióticos na biodegradação e as rotas metabólicas envolvidas no processo.

## REFERÊNCIAS

ÁLVAREZ-BARRAGÁN J, DOMÍNGUEZ-MALFAVÓN L, VARGAS-SUÁREZ M, GONZÁLEZ-HERNÁNDEZ R, AGUILAR-OSORIO G, LOZA-TAVERA H. Biodegradative activities of selected environmental fungi on a polyester polyurethane varnish and polyether polyurethane foams. *Appl Environ Microbiol.* v.82, p.5225–5235, 2016.

AUTA, H. S.; EMENIKE, C. U.; JAYANTHI, B.; FAUZIAH, S. H. Growth kinetics and biodeterioration of polypropylene microplastics by *Bacillus* sp. And *Rhodococcus* sp. isolated from mangrove sediment. *Marine Pollution Bulletin*, 127, p. 15-21, 2018.

AZWA, Z. N.; Yousif, B. F.; Manalo, A. C.; Karunasena, W. A Review on the Degradability of Polymeric Composites Based on Natural Fibres. *Materials & Design*, v. 47, n. 5, p. 424-442, 2013.

BAGHERI, A. R.; LAFORSCH, C.; GREINER, A.; AGARWAL, S. Fate of So-Called Biodegradable Polymers in Seawater and Freshwater. *Global Challenges*. 1700048, 2017. DOI: 10.1002/gch2.201700048.

CAPELLETTI, R. I. V. Avaliação da atividade de biocidas em biofilmes formados a partir de fluido de corte utilizado na usinagem de metais. 81f. Dissertação (Mestrado 62 em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

CARASCHI, J. C.; RAMOS, U. M.; LEÃO, A. L. Compósitos biodegradáveis de polihidroxibutirato (PHB) reforçado com farinha de madeira: propriedades e degradação. *Maringá*, v. 24, n. 6, p. 1609-1614, 2002.

CHANDRA, R.; RUSTGI, R. Biodegradable Polymers. *Progress polym. sci.*, Elmsford, v. 23, n.7, 1998.

CHENG, J. J. Mechanical and Chemical Properties of High Density Polyethylene: Effects of Microstructure on Creep Characteristics, University of Waterloo, Canada, 2008.

CONATO, M.; SUMERA, F. J. Biodegradable polyesters and polyamides from difunctionalized lauric and coconut fatty acids. *Journal of Polymers and the Environment*. v.20, p.217, 2012.

COSTA, A. M. Investigação do consumo de moléculas da cadeia de produção do poli(tereftalato de etileno) (PET) por *Yarrowia lipolytica*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

DILKES-HOFFMAN, L., S. LANT, P. A., LAYCOCK, B., PRATT, S. The rate of biodegradation of PHA bioplastics in the marine environment: A meta-study. *Marine Pollution Bulletin*. v. 142, p.15-24, 2019.

DONELLI, I.; FREDDI, G.; NIERSTRASZ, V. A.; TADDEI, P. Surface structure and properties of poly-(ethylene terephthalate) hydrolyzed by alkali and cutinase. *Polym. Deg. Stab.* v.95, p.1542, 2010.

DVO ÁK, P. NIKEL, P. I., DAMBORSKÝ, J, DE LORENZO, V. Bioremediation 3.0: Engineering pollutant-removing bacteria in the times of systemic biology. *Biotechnol Adv* 35:845–866, 2017.

FARIA, A. U. MARTINS-FRANCHETTI, S. M. Biodegradação de filmes de polipropileno (PP), poli(3-hidroxibutirato) (PHB) e blenda de PP/PHB por microrganismos das águas do rio Atibaia. *Polímeros*, São Carlos, v. 20, n. 2, p. 141-147, 2010.

FECHINE, G. J. M. Fotodegradação de termoplásticos semicristalinos. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1998.

FRANCHETTI, S. M. M.; MARCONATO, J. C. Polímeros Biodegradáveis - Uma solução parcial para diminuir a quantidade de resíduos plásticos. *Química Nova*, v. 29, n. 4, p. 811–816, 2006.

FUKUSHIMA, K.; COULEMBIER, O.; LECUYER, J. M.; ALMEGREN, H. A.; ALABDULRAHMAN, A. M.; ALSEWAILEM, F. D.; MCNEIL, M. A.; DUBOIS, F.; WAYMOUTH, R.M.; HORN, H. W.; RICE, J. E.; HEDRICK, J. L. Organocatalytic depolymerization of poly(ethylene terephthalate). *J Polym Sci A*. v.49, p.1273–1281, 2011.

GHAFFARI MOSANENZADEH, S.; NAGUIB, H. E.; PARK, C. B.; ATALLA, N.; J. Effect of Biopolymer Blends on Physical and Acoustical Properties of Biocomposite Foams. *Polym. Sci. Part B: Polym. Sci.*, v.52, p.1002, 2014.

GOMES, D. S.; MATAMÁ, T.; CAVACO-PAULO, A.; CAMPOS-TAKAKI, G. M.; SALGUEIRO, A. A. Production of heterologous cutinases by *E. coli* and improved enzyme formulation for application on plastic degradation. *Electron. J. Biotechnol.* 2013. DOI: 10.2225/ vol16issue5-fulltext-12.

GONÇALVES, S. P. C. Biodegradação de filmes de PHBV, PCL, PP e blendas pela ação de micro-organismos de solo. Tese de doutorado, Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2009.

INNOCENTINI-MEI, L. H.; MARIANI, P. D. S. C. Visão Geral sobre Polímeros ou Plásticos Ambientalmente Degradáveis. Campinas-SP, p.41, 2005.

JAMBECK, J. R.; GEYER, R.; WILCOX, C.; SIEGLER, T. R.; PERRYMAN, M.; ANDRADY, A.; NARAYAN, R.; LAW, K. L. Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, v.347, p.768–771, 2015.

JANCZAK, K.; HRYNKIEWICZ, K.; ZNAJEWASKA, Z.; DABROWSKA, G. Use of rhizosphere microorganisms in the biodegradation of PLA and PET polymers in compost soil. *International Biodeterioration e Biodegradation*. V.130, p. 65-75, 2018.

KASUYA, K.; ISHII, N.; INOUE, Y. YASAWA, K.; TAGAYA, Y.; YOUTSUMOTO, Y.; KAZAHAYA, J.; NAGAI, D. Characterization of a mesophilic aliphatic-aromatic copolyester-degrading fungus. *Polymer Degradation and Stability*, v. 94, p. 1190-1196. 2009.

KAWAI, F.; ODA, M.; TAMASHIRO, T.; WAKU, T.; TANAKA, N.; YAMAMOTO, M.; MIZUSHIMA, H.; MIYAKAWA, T.; TANOKURA, M. A novel Ca<sup>2+</sup>-activated, thermostabilized polyesterase capable of hydrolyzing polyethylene terephthalate from *Saccharomonospora viridis* AHK190. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* v.98(24), p.10053-64, 2014. doi: 10.1007/s00253-014-5860-y.

KHAN, S.; NADIR, S.; SHAN, Z. U.; SHAH, A. A. KARUNARATHNA, S. C.; XU, J. KHAN, A. MUNIR, S.; HASAN, F. Biodegradation OF POLYESTER POLYURETHANE BY *ASPERGILLUS TUBINGENSIS*. *ENVIRONMENTAL POLLUTION* V. 225, P. 469-480, 2017.

KIJCHAVENGKUL, T.; AURAS, R.; RUBINO, M.; SELKE, S.; NGOUAJIO, M.; FERNANDEZ, T. Biodegradation and hydrolysis rate of aliphatic aromatic polyester. *Polymer Degradation and Stability*, v. 95, p. 2641-2647, 2010.

LAPSHIN, R. V.; ALEKHIN A. P.; A. KIRILENKO, G.; ODINTSOV, S. L.; KROTKOV, V. A. Vacuum ultraviolet smoothing of nanometer-scale asperities of poly(methyl methacrylate) surface. *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. v.4 (1): p. 1–11, 2010. doi:[10.1134/S1027451010010015](https://doi.org/10.1134/S1027451010010015). ISSN 1027-4510.

LI, F.; YU, D.; LIN, X.; LIU, D.; XIA, H.; CHEN, S.; WORLD J. Biodegradation of poly(ε-caprolactone) (PCL) by a new penicillium oxalicum strain DSYD05-1. *Microbiol. Biotechnol.* v.28, p.2929, 2012.

LUCAS, N.; BIENAIME, C.; BELLOY, C.; QUENEUDEC, M.; SILVESTRE, F.; NAVASAUCEDO, J-E. Polymer biodegradation: Mechanisms and estimation techniques – A review. *Chemosphere*, v. 73, p. 429-442, 2008.

MANDIC, M.; SPASIC, J.; PONJAVIC, M.; NIKOLIC, M. S.; COSOVIC, V. R.; O'CONNOR K. E.; NIKODINOVIC-RUNIC, J, DJOKIC, L.; JEREMIC, S. Biodegradation of poly(ε-caprolactone) (PCL) and medium chain length polyhydroxyalkanoate (mcl-PHA) using whole cells and cell free protein preparations of *Pseudomonas* and *Streptomyces* strains grown on waste cooking oil. *Polymer Degradation and Stability*. v.62, p.160-168, 2019.

MENEZES, F. P., BEVILACQUA, C. B., SULZBACHER, M. A., ANTONIOLLI, Z. I., JACQUES, R. J.R S. Capacidade dos fungos lignocelulolíticos em degradar polímeros de lodo de esgoto. *Revista de Ciências Agrárias*, 40(3), 515-524, 2017. <https://dx.doi.org/10.19084/RCA16165>.

MERGAERT, J.; WOUTERS, A.; ANDERSON, C.; SWINGS, J. In-situ degradation of poly(3-hydroxybutyrate) and poly(3-hydroxybutyrate-Co-3-hydroxyvalerate) in natural waters. *Can. J. Microbiol.* V.41, p.154-159, 1995.

MONROE, D. Looking for Chinks in the Armor of Bacterial Biofilms. *PLoS Biol.* v.5 p.307, 2007 <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0050307>.

MÜLLER, R. J. Biodegradability of Polymers: Regulations and Methods for Testing. In: Steinbüchel A. *Biopolymers*, v. 10. p.516, 2003.

MUSTAPHA, F.A.; JAI J.; NIK RAIKHAN, N. H.; SHARIF, Z.I. M.; YUSOF, N.M. Response surface methodology analysis towards biodegradability and antimicrobial activity of biopolymer film containing turmeric oil against *aspergillus niger*. *Food Control*. v. 99, p. 106-113, 2019.

OHURA, T. AOYAGI, Y. TAKAGI, K. YOSHIDA, Y. KASUYA, DOI, Y. Biodegradation of poly(3-hydroxyalkanoic acids) fibers and isolation of poly(3-hydroxybutyric acid)-degrading microorganisms under aquatic environments. *Polymer Degradation and Stability*. v.63, p. 23-29, 1999.

PAÇO, A; DUARTE, K.; DA COSTA, J .P.; SANTOS, P. S. M.; PEREIRA, R.; PEREIRA, M. E. Biodegradation of polyethylene microplastics by the marine fungus *Zalerion maritimum*. *Science of the Total Environment*, 586, 10-17, 2017.

PAOLI, M. A. *Degradação e Estabilização de Polímeros*. São Paulo: Editora Artliber, 2008.

PRAMILA, R.; PADMAVATHY, K.; RAMESH, K. V.; MAHALAKSHMI, K.; J. *Bacteriol. Res.* v4, p.9,2012.

PREMRAJ, R.; DOBLE, M. Biodegradation of Polymers. *Indian Journal of Biotechnology*, v. 4, p 186-193, abr. 2004.

RESTREPO-FLÓREZ, J.-M.; BASSI, A.; THOMPSON, M. R.; *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 88, 83, 2014.

ROSA, D. S.; PANTANO FILHO, R. *Biodegradação: um ensaio com polímeros*. Itatiba: Moara; Bragança Paulista: São Francisco, p.112, 2003.

ROTH, C.; WEI, R.; OESER, T.; THEN, J.; FÖLLNER, C.; ZIMMERMANN, W.; STRÄTER, N.; *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2014. doi 10.1007/s00253-0145672-0.

SHAHLARI, M., LEE, S. Mechanical and morphological properties of poly(butylene adipate-co-terephthalate) and poly(lactic acid) blended with organically modified silicate layers. *Polymer Engineer Science*, v. 52, n. 7, p. 1420-1428, 2012.

SONG, T., LI, S., LU, Y., YAN, D., SUN, P., BAO, M., LI, Y., Biodegradation of hydrolyzed polyacrylamide by a *Bacillus megaterium* strain SZK-5: Functional enzymes and antioxidant defense mechanism, *Chemosphere* (2019), doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.05.143>.

SUDHAKAR, M.; DOBLE, M.; MURTHY, PS.; VENKATESAN, R. Marine microbe-mediated biodegradation of low- and high-density polyethylenes. *Int Biodeterior Biodegradation* 2008;61:203–13.

TSUJI, H.; SUZURYOSHI, K. Environmental degradation of biodegradable polyesters Poly(-caprolactone), poly[(R)-3-hydroxybutyrate], and poly(L-lactide) films in controlled static seawater. *Polymer Degradation and Stability, Inglaterra*, v. 75, p. 347-355, 2002.

VERGARA-PORRAS, B.; PÉREZ-GUEVARA, F.; RODRÍGUEZ, J. N. Using morphological structure of *Penicillium funiculo-sumas* a bioavailability index during the biodegradation of PHB, PCL and their blends. *New Biotechnology*. v. 33, p.3, 2016.

VIMALA P. P.; LEA, M. Biodegradation of Polyethylene using *Bacillus subtilis*. *Procedia Technology* v.24 , p.232 – 239, 2016.

VINHAS, G. M.; ALMEIDA, Y. M. B.; LIMA, M. A. G. A. Estudo das propriedades e biodegradabilidade de blendas de poliéster/amido submetidas ao ataque microbiano. *Quimica Nova*, v. 30, p. 7, 1584-1588, 2007.

VOLKE-SEPÚLVEDA, T.; SAUCEDO-CASTAÑEDA, G.; GUTIÉRREZ-ROJAS, M.; MANZUR, A.; FAVELA-TORRES, E. Thermally Treated Low Density Polyethylene Biodegradation by *Penicillium pinophilum* and *Aspergillus niger*. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 83, p. 305-314, 2001.

VOLOVA, T. G.; BOYANDIN, A. N.; VASILEV, A. D.; KARPOV, V. A.; KOZHEVNIKOV, S. V.; PRUDNIKOVA, V. P.; RUDNEV, B.; XUAN, V. DUNG, I. I. Biodegradation of polyhydroxyalkanoates (PHAs) in the South China Sea and identification of PHAdegrading bacteria. *Microbiology*, v. 80, p.252, 2011.

WEBB H, ARNOTT J, CRAWFORD R & IVANOVA E. Plastic degradation and its environmental implications with special reference to poly(ethylene terephthalate). *Polymers* v.5, p.1–18, 2013.

WEI, R.; ZIMMERMANN, W. Microbial enzymes for the recycling of recalcitrant petroleum-based plastics: how far are we? *Microb Biotechnol.* v.10, p.1308–1322, 2017.

WITT, U.; EINING, T.; YAMAMOTE, M.; KLEEBERG, I.; DECWER, W.-D.; MÜLLER, R.-J. Biodegradation of aliphatic-aromatic copolyesters: evaluation of the final biodegradability and ecotoxicological impact of degradation intermediates. *Chemosphere*, v. 44, p. 289-299, 2001.

XIAO, Y.; CUMMINS, D.; PALMANS, A. R. A.; KONING, C. E.; HEISE, A. Synthesis of biodegradable chiral polyesters by asymmetric enzymatic polymerization and their formulation into microspheres. *Soft Matter*. v.4, p.593, 2008.



YAMADA-ONODERA, K.; MUKUMOTO, H.; KATSUYAYA, Y.; SAIGANJI, A.; TANI, Y. Degradation of Polyethylene by a fungus, *Penicillium simplicissimum* Yk. *Polymer Degradation and Stability*. v.72, p. 323-327, 2001.

YOSHIDA, S.; HIRAGA, K.; TAKEHANA, T.; TANIGUCHI, I.; YAMAJI, H.; MAEDA, Y.; TOYOHARA, K.; MIYAMOTO, K.; KIMURA, K.; ODA, K. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). *Science*, v.351 p. 1196- 1199, 2016.

ZAIKOV, G.; GUMARGALIEVA, K. Biodegradation of Polymeric Materials. Generalized Kinetic Data. *Chemistry and Chemical Technology*, v. 4, n. 3, 2010.

Zhao, J-H.; Wang, X-Q.; Zeng, J.; Yang, G.; Shi, F-H.; Yan, Q.; J. Influencing Factors and Process on in Situ Degradation of Poly(Butylene Succinate) Film by Strain *Bionectria ochroleuca* BFM-X1 in Soil. *Appl. Polym. Sci*, 97, 2273, 2005.

ZHENG Y, YANFUL EK, BASSI A. S. A review of plastic waste biodegradation. *Crit Rev Biotechnol*. v.25, p.243–250, 2005.

## **SOBRE O ORGANIZADOR**

**SERGIO BITENCOURT ARAÚJO BARROS** - Doutor em Química pela Universidade Estadual de Campinas. Mestre e Licenciado em Química pela Universidade Federal do Piauí. Foi professor do quadro efetivo do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão, no período de 2009 a 2011, onde atuou no ensino técnico e superior. Atualmente é professor Adjunto da Universidade Federal do Piauí, Campus Senador Helvídio Nunes de Barros. Possui experiência em ensino e pesquisa na área de Química e Ciências, com ênfase em Físico Química Inorgânica, atuando principalmente nos seguintes temas: Ensino de Química e Ciências, Síntese de polímeros e preparação de nanofilmes, Polímeros naturais, Síntese de nanopartículas e metalofalocianinas, Método Sol-Gel para elaboração/preparação de materiais carbono cerâmicos e compósitos cerâmicos microporosos, Síntese e Caracterização de novos materiais e Desenvolvimento de sensores eletroquímicos. <http://lattes.cnpq.br/4639320486261004>

## ÍNDICE REMISSIVO

### A

Aço carbono 1, 2, 3, 4, 6, 8, 9, 10

Análise Fractográfica 54

Aproveitamento de resíduos de minérios 84, 85, 99

Azul de metileno 13, 14, 17, 19, 27

### B

Barreira de Schottky 24

Biodegradação 31, 32, 33, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 47

### C

Caracterização 1, 6, 37, 43, 53, 59, 75, 80, 83, 85, 88, 89

Caracterização mecânica 49, 53, 54

Caracterização térmica 54, 59

Casca da mamona 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10

Casca do cacau 4, 5, 6, 7, 8, 10

Cerâmicas 76, 77, 79, 80, 81, 82

Compósitos de matriz metálica de alumínio 99

Curvas de polarização 4, 9

### D

Degradação enzimática 34, 36, 39, 40

### E

Elétron-buraco 25

Eletrônica orgânica 62, 63, 65

### F

Filme fino 66, 67, 71

### G

Gestão de resíduos 32

### I

Impedância 1, 4, 6, 7, 8, 10

Impressão 3D 50, 61

Inibidores de corrosão 1, 2, 3, 6, 10

## M

Método dos precursores poliméricos 75, 77, 82

Modelagem por Fusão e Deposição 49, 50

## O

Odontológico 78

## P

Pelotização 84, 85, 86, 96

Poli (Ácido Lático) 49, 51, 52, 53, 61

Polímeros biodegradáveis 37, 43, 45

Polímeros semicondutores 62, 64

Poly(2,5-bis(3-tetradecyl-thiophen-2-yl)thieno[3,2-b]thiophene) (PBTTT-C14) 62

Propriedades mecânicas 2, 32, 33, 39, 40, 41, 49, 56, 58, 77, 82

## S

Semicondutor 15, 16, 24, 62, 64, 66, 69, 71, 72

Sinterização 21, 23, 50, 75, 77, 79, 81, 82, 83, 85, 98, 99, 100, 101, 105, 106, 107, 113, 114, 115, 116

## T

Transistores 62, 65



**EDITORIA  
ARTEMIS  
2020**