

# **IMPACTOS DAS TECNOLOGIAS NA ENGENHARIA DE MATERIAIS E METALÚRGICA**

**Henrique Ajuz Holzmann  
Ricardo Vinicius Bubna Biscaia  
(Organizadores)**

**Atena**  
Editora

**Ano 2019**

**Henrique Ajuz Holzmann**  
**Ricardo Vinicius Bubna Biscaia**  
(Organizadores)

# **Impactos das Tecnologias na Engenharia de Materiais e Metalúrgica**

Atena Editora  
2019



2019 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação e Edição de Arte: Lorena Prestes e Geraldo Alves

Revisão: Os autores

#### Conselho Editorial

- Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília  
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa  
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná  
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista  
Profª Drª Deusilene Souza Vieira Dall’Acqua – Universidade Federal de Rondônia  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice  
Profª Drª Juliane Sant’Ana Bento – Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense  
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista  
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas  
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

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

134	Impactos das tecnologias na engenharia de materiais e metalúrgica [recurso eletrônico] / Organizadores Henrique Ajuz Holzmann, Ricardo Vinicius Bubna Biscaia. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2019.  Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader. Modo de acesso: World Wide Web. Inclui bibliografia ISBN 978-85-7247-235-7 DOI 10.22533/at.ed.234190204  1. Engenharia – Tecnologia. 2. Metalurgia. I. Holzmann, Ajuz. II. Biscaia, Ricardo Vinicius Bubna.  CDD 620.002854
-----	--

Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores.

2019

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.

[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)

## APRESENTAÇÃO

A engenharia de materiais e metalúrgica, vem cada vez mais ganhando espaço nos estudos das grandes empresas e de pesquisadores. Esse aumento no interesse se dá principalmente pela escassez de matérias primas, a necessidade de novos materiais que possuam melhores características físicas e químicas e a necessidade de reaproveitamento dos resíduos em geral.

Neste livro são apresentados trabalho teóricos e práticos, relacionados a área de materiais e metalurgia, dando um panorama dos assuntos em pesquisa atualmente.

A caracterização dos materiais é de extrema importância, visto que afeta diretamente aos projetos e sua execução dentro de premissas de desempenho técnico e econômico. Ainda são base da formação do engenheiro projetista cujo ofício se fundamenta na correta escolha de materiais e no processo de obtenção do mesmo, estando diretamente relacionados a área de metalurgia.

De abordagem objetiva, a obra se mostra de grande relevância para graduandos, alunos de pós-graduação, docentes e profissionais, apresentando temáticas e metodologias diversificadas, em situações reais.

Aos autores, agradecemos pela confiança e espírito de parceria.

Boa leitura

Henrique Ajuz Holzmann  
Ricardo Vinicius Bubna Biscaia

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
ENGENHARIA METALÚRGICA NA UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MINAS GERAIS: ANÁLISE DA EVOLUÇÃO DO CURSO	
<i>Kelly Cristina Ferreira</i>	
<i>Júnia Soares Alexandrino</i>	
<i>Telma Ellen Drumond Ferreira</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.2341902041</b>	
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>8</b>
EVOLUÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA DE MINAS NA UEMG/JOÃO MONLEVADE EM SEUS 10 ANOS DE EXISTÊNCIA	
<i>Kelly Cristina Ferreira</i>	
<i>Júnia Soares Alexandrino</i>	
<i>Telma Ellen Drumond Ferreira</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.2341902042</b>	
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>15</b>
ACUMULADORES PB-ÁCIDO: CONCEITOS, HISTÓRICO E APLICAÇÃO	
<i>Abdias Gomes dos Santos</i>	
<i>Flávio José da Silva</i>	
<i>Magda Rosângela Santos Vieira</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.2341902043</b>	
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>21</b>
ANÁLISE PRELIMINAR DA APLICABILIDADE DA SEPARAÇÃO BASEADA EM SENSORES EM MINA DE CALCÁRIO DE CAÇAPAVA DO SUL (RS)	
<i>Evandro Gomes dos Santos</i>	
<i>Régis Sebben Paranhos</i>	
<i>Carlos Otávio Petter</i>	
<i>Aaron Samuel Young</i>	
<i>Moacir Medeiros Veras</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.2341902044</b>	
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>30</b>
DESEMPENHO DE REAGENTES NA FLOTAÇÃO COLETIVA DE SULFETOS DE UM REJEITO AURÍFERO PARAIBANO	
<i>Marcelo Rodrigues do Nascimento</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.2341902045</b>	
<b>CAPÍTULO 6</b> .....	<b>40</b>
UTILIZAÇÃO DE SULFONATO DE ALQUILBENZENO LINEAR (LAS) E POLICARBOXILATO ÉTER (PCE) COMO REAGENTES PARA FLOTAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO	
<i>José Maria Franco de Carvalho</i>	
<i>Mariane Batista de Oliveira Vasconcelos</i>	
<i>Luanne Phâmella da Silva Henriques e Moreira</i>	
<i>Julia Castro Mendes</i>	
<i>Carlos Alberto Pereira</i>	
<i>Ricardo André Fiorotti Peixoto</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.2341902046</b>	

**CAPÍTULO 7 ..... 50**

COMPORTAMENTO EM TRAÇÃO DE COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIÉSTER E FIBRAS DE CURAUÁ E BANANEIRA CONTÍNUAS E ALINHADAS

*Michel José Caldas Carvalho*

*Douglas Santos Silva*

*Roberto Tetsuo Fujiyama*

**DOI 10.22533/at.ed.2341902047**

**CAPÍTULO 8 ..... 64**

EFEITO DE UM ADITIVO ENZIMÁTICO COMERCIAL NA DEGRADAÇÃO DE PEBD EM MEIO SALINO

*Jéssica Pereira Pires*

*Gabriela Messias Miranda*

*Gabriela Lagranha de Souza*

*Flávia Stürmer de Fraga*

*Alessandro da Silva Ramos*

*Rosane Angélica Ligabue*

*Jeane Estela Ayres de Lima*

*Rogério Vescia Lourega*

**DOI 10.22533/at.ed.2341902048**

**CAPÍTULO 9 ..... 81**

PREPARAÇÃO DE MICROESFERAS DE QUITOSANA/ARGILA PARA USO COMO SISTEMA CARREADOR DO IBUPROFENO

*Matheus Aleixo Maciel*

*Bárbara Fernanda Figueiredo dos Santos*

*Hanniman Denizard Cosme Barbosa*

*Albaniza Alves Tavares*

*Pedro Henrique Correia de Lima*

*Suédina Maria de Lima Silva*

**DOI 10.22533/at.ed.2341902049**

**CAPÍTULO 10 ..... 97**

CONSOLIDAÇÃO POR SINTERIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DE ALUMÍNIO RECICLADO A PARTIR DE LATAS DE BEBIDA VIA METALURGIA DO PÓ

*José Raelson Pereira de Souza*

*Regina Bertília Dantas de Medeiros*

*Mauricio Mhirdauí Peres*

**DOI 10.22533/at.ed.23419020410**

**CAPÍTULO 11 ..... 113**

ELETRODEPOSIÇÃO DE FILMES DE POLIPIRROL EM SUPERFÍCIES DE ALUMÍNIO 2024: INFLUÊNCIA DO ELETRÓLITO

*Andrea Santos Liu*

*Alex Fernandes de Souza*

*Liu Yao Cho*

**DOI 10.22533/at.ed.23419020411**

<b>CAPÍTULO 12</b> .....	<b>128</b>
UMA REVISÃO SOBRE A TECNOLOGIA DE PROCESSAMENTO DE LIGAS METÁLICAS NO ESTADO SEMISSÓLIDO	
<i>Luis Vanderlei Torres</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.23419020412</b>	
<b>CAPÍTULO 13</b> .....	<b>141</b>
INFLUÊNCIA DA TAXA DE RESFRIAMENTO SOBRE MACROESTRUTURA DA LIGA DE ALUMÍNIO SAE 323 SOLIDIFICADO EM MOLDE DE AREIA	
<i>Rafael Brasil da Costa</i>	
<i>Rodrigo da Silva Miranda</i>	
<i>Adilto Pereira Andrade Cunha</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.23419020413</b>	
<b>CAPÍTULO 14</b> .....	<b>149</b>
INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS OPERACIONAIS DA MESA CONCENTRADORA WILFLEY NA CONCENTRAÇÃO DE ESCÓRIA METALÚRGICA DA LIGA FESIMN	
<i>Raulim de Oliveira Galvão,</i>	
<i>Filipe Brito Marinho de Barros</i>	
<i>José Carlos da Silva Oliveira</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.23419020414</b>	
<b>CAPÍTULO 15</b> .....	<b>161</b>
INFLUÊNCIA DO ENSAIO METALÚRGICO DE TEMPERA NA MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS AÇOS	
<i>Rodrigo da Silva Miranda</i>	
<i>Adilto Pereira Andrade Cunha</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.23419020415</b>	
<b>CAPÍTULO 16</b> .....	<b>171</b>
ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA DISTÂNCIA ENTRE CAMADAS NA TÉCNICA DE RECONSTRUÇÃO 3D POR SEÇÃO SERIAL	
<i>Wesley Luiz da Silva Assis</i>	
<i>Talita Fonseca dos Prazeres</i>	
<i>Ana Beatriz Rodrigues de Andrade</i>	
<i>Douglas de Oliveira</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.23419020416</b>	
<b>SOBRE OS ORGANIZADORES</b> .....	<b>179</b>

## EFEITO DE UM ADITIVO ENZIMÁTICO COMERCIAL NA DEGRADAÇÃO DE PEBD EM MEIO SALINO

### **Jéssica Pereira Pires**

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS)

Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais,  
Porto Alegre – RS

### **Gabriela Messias Miranda**

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS)

Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais,  
Porto Alegre – RS

### **Gabriela Lagranha de Souza**

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS)

Escola de Ciências,  
Porto Alegre – RS

### **Flávia Stürmer de Fraga**

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS)

Escola de Ciências,  
Porto Alegre – RS

### **Alessandro da Silva Ramos**

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS)

Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais,  
Porto Alegre – RS

### **Rosane Angélica Ligabue**

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS)

Escola de Ciências,  
Porto Alegre – RS

### **Jeane Estela Ayres de Lima**

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS)

Escola de Ciências,  
Porto Alegre – RS

### **Rogério Vescia Lourega**

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS)

Escola de Ciências,  
Porto Alegre – RS

**RESUMO:** Polietileno vem sendo amplamente utilizado, principalmente no setor de embalagens. Devido as desvantagens de alguns tratamentos para seus resíduos, o desenvolvimento de pesquisas relacionadas a biodegradabilidade é importante para minimizar os efeitos do seu descarte no meio ambiente. O objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento de diferentes composições de Polietileno de Baixa Densidade (PEBD), tais como: PEBD puro e aditivado com enzima comercial, frente a uma degradação hidrolítica. Para isso, foram preparadas duas diluições (5x e 10x) a partir da solução tampão de fosfato-salino (PBS) concentrada 10x. As amostras foram colocadas nas soluções sob agitação, em *shaker* por 45 dias. As amostras foram caracterizadas por



Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC), Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR), Análise Termogravimétrica (TGA) e Microscopia Eletrônica de Varredura com Emissão de Campo (MEV-FEG), com o intuito de verificar suas modificações nas propriedades térmicas, químicas e morfológicas. As amostras em meio salino, diluído 5x, apresentaram aumento no intervalo das temperaturas de degradação, diminuindo a resistência térmica dos materiais. Observou-se o aparecimento de bandas de absorção referente às ligações OH, C=O e C=C no PEBD aditivado, demonstrando que o aditivo pode ter influência no processo de degradação do polímero. Além disso, houve a formação de biofilme nas amostras incorporadas com a enzima, este comportamento pode ser atribuído a presença do aditivo, capaz de provocar alterações na matriz e atrair os micro-organismos. Desta maneira, conclui-se que o aditivo empregado no PEBD pode ser uma alternativa para minimizar os efeitos causados ao meio ambiente pelos resíduos plásticos.

**PALAVRAS-CHAVE:** PEBD, biodegradação, aditivo enzimático.

**ABSTRACT:** Polyethylene has been widely used by industry, especially in the packaging sector. Due to the disadvantages of some treatments for its residues, it is important to develop research related to its biodegradability to minimize the effects of its disposal in the environment. The objective of this work is to evaluate the behavior of different compositions of Low Density Polyethylene (LDPE), such as: pure LDPE and commercial enzyme additive, and pure enzymatic additive, against hydrolytic degradation. For this, the samples were placed in dilute phosphate buffered saline solution (PBS), 5x and 10x, stirred shaker for 45 days. The samples were characterized by Differential Exploration Calorimetry (DSC), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), Thermogravimetric Analysis (TGA) and Scanning Electron Microscopy with Field Emission (SEM), in order to verify changes in thermal properties, chemical and morphological. The samples in 5x diluted medium presented an increase in the degradation temperature range, indicating that this medium was the most aggressive, interfering in the thermal resistance of the materials. The appearance of absorption bands for the OH, C = O and C = C bonds in the additive samples was observed, demonstrating that the additive may have influence on the degradation process of the polymer. In addition, biofilm formation occurred in the samples incorporated with the enzyme, this behavior can be attributed to the presence of the additive, capable of causing changes in the matrix and attracting the microorganisms. It is concluded that the additive can be used as an alternative to minimize the effects caused by plastic waste.

**KEYWORDS:** LDPE, biodegradation, enzymatic additive.

## 1 | INTRODUÇÃO

Os plásticos começaram a ser desenvolvidos no início do século XX, logo após, este tipo de material começou a ser utilizado para a produção de uma ampla gama de

objetos, devido a dois aspectos decisivos: sua versatilidade e o baixo custo. Além disso, outros motivos para o uso cada vez maior dos plásticos são suas características como: durabilidade, estabilidade estrutural e resistência à degradação (PIATTI; RODRIGUES, 2005). Ao mesmo tempo, devido aos seus benefícios, como facilidade de transporte e produção, economia de energia e durabilidade, o plástico vem substituindo outros materiais, tais como: metais, vidros, papéis, entre outros (ECYCLE, 2016).

Dentre as diversas espécies de plásticos conhecidas, destacam-se: o polipropileno (PP), o poliestireno (PS), o politereftalato de etileno (PET), o policloreto de vinila (PVC) e o polietileno (PE) (ABIPLAST, 2016). Entre os usos do PE, o PEBD é o tipo de plástico mais utilizado para a fabricação de embalagem, pois possui grande parte das características ideais, e isto se deve as suas boas características relacionadas à higiene, resistência ao ataque de micro-organismos, e manutenção da qualidade do produto embalado (ECYCLE, 2016).

A substituição dos plásticos sintéticos por biodegradáveis é uma alternativa para minimizar o impacto ambiental dos descartes destes materiais, visto que sofrem degradação com maior facilidade (ROSA; PENTEADO; CALIL, 2000). Porém, a maioria dos plásticos biodegradáveis possuem propriedades que restringem seu emprego, além de serem mais caros em relação aos plásticos convencionais (ROSA; PENTEADO; CALIL, 2000; OJEDA, 2008).

Sendo assim, uma alternativa para amenizar os problemas causados pelos resíduos plásticos no meio ambiente, é a pesquisa e busca por algo que favoreça a degradação destes polímeros, ou a biodegradação (ACHILIAS *et al.*, 2007; LAZAREVIC *et al.*, 2010; FARIA; MARTINS-FRANCHETTI, 2010). Uma alternativa que vem sendo explorada é a obtenção de poliolefinas biodegradáveis, que são obtidas com aditivos especiais, chamados pró-oxidantes ou pró-degradantes. Esses aditivos aceleram o processo de oxidação abiótica catalisando a cisão da cadeia com luz ou calor e iniciando a decomposição em fragmentos oxidados, melhorando a degradabilidade dos polímeros (ROSA; PENTEADO; CALIL, 2000; LIU *et al.*, 2014)

Desta forma, considerando a importância de pesquisas que avaliem o emprego de aditivos para a degradação de poliolefinas, visando minimizar os efeitos causados pelos resíduos plásticos, mas buscando manter as propriedades dos plásticos comuns, o objetivo deste trabalho é avaliar a degradação do polietileno de baixa densidade (PEBD) via ação enzimática (incorporação do aditivo *Pepzyme da PEP Licensing Limited*), sendo este fenômeno chamado de biodegradação.

## 2 | PARTE EXPERIMENTAL

### 2.1 Materiais

No desenvolvimento deste trabalho foram utilizadas as seguintes amostras: plástico comum comercial (PEBD – PB608 da empresa Braskem), plástico aditivado

com 8% de enzima comercial (92% PEBD + 8% Aditivo) e o aditivo enzimático puro (*Pepzyme da PEP Lising Limited*), o qual é composto por 95% de PELBD e 5% de enzima (estes dois materiais foram fornecidos pela empresa Brasilata).

## 2.2 Metodologia

Neste trabalho, foi realizado uma degradação hidrolítica sob condições controladas de agitação, temperatura e pressão, afim de analisar o comportamento de PEBD, PEBD aditivado com enzima e o aditivo enzimático puro quando submetidos a um meio salino. Esta metodologia foi aplicada em três etapas: 1ª etapa, caracterizações das amostras pré-hidrólise; 2ª etapa, ensaio de hidrólise enzimática e 3ª etapa, caracterizações dos produtos pós-hidrólise, conforme a Figura 1. Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Caracterização de Materiais, situado na Escola de Ciências da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS).

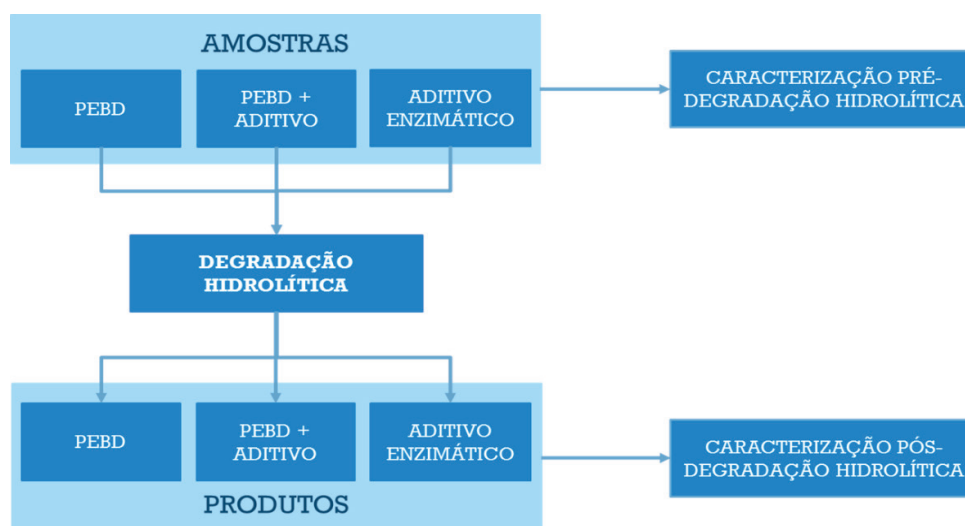


Figura 1. Fluxograma da metodologia realizada.

### 2.2.1 Degradação Hidrolítica

Baseado no trabalho apresentado por Veethahavya *et. al.* (2016), foi realizado um ensaio de degradação hidrolítica das amostras, onde primeiramente foram preparadas duas diluições de 5 e 10x de uma solução tampão de fosfato-salino (PBS) 10x concentrada (marca: LGC Biotecnologia). Posteriormente, as amostras foram colocadas na solução e com o auxílio de um *shaker* foram agitadas por 45 dias a temperatura ambiente e rotação de 50 rpm, conforme ilustrado na Figura 2.

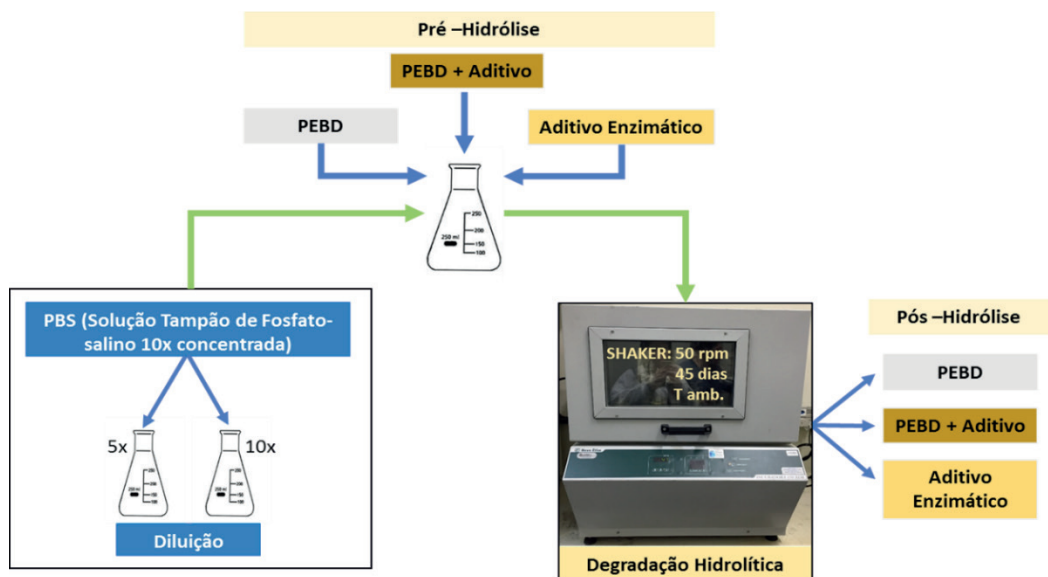


Figura 2. Esquema do ensaio de degradação hidrolítica enzimática.

Para facilitar a leitura do trabalho, foi convencionado que as amostras serão nomeadas de acordo com a Quadro 1.

Amostra		Diluição	Nomenclatura
PEBD comercial	Pré-Hidrólise	-	<b>PEBD puro</b>
	Pós-Hidrólise	5x	<b>C1</b>
		10x	<b>D1</b>
PEBD aditivado com enzima comercial	Pré-Hidrólise	-	<b>PEBD + aditivo</b>
	Pós-Hidrólise	5x	<b>C2</b>
		10x	<b>D2</b>
Aditivo enzimático	Pré-Hidrólise	-	<b>Aditivo</b>
	Pós-Hidrólise	5x	<b>C3</b>
		10x	<b>D3</b>

Quadro 1. Nomenclatura adotada para as amostras.

## 2.2.2 Caracterizações

Nos tópicos a seguir, serão apresentadas as técnicas de caracterização utilizadas para verificar as modificações nas propriedades térmicas e químicas dos materiais após o ensaio de hidrólise, bem como avaliar a sua morfologia. Todas as análises foram realizadas em duplicatas.

### 2.2.2.1 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

A Calorimetria Exploratória Diferencial é uma análise que tem por objetivo determinar as propriedades térmicas das amostras. O comportamento térmico das amostras foi avaliado em um calorímetro, modelo Q20 da TA *Instruments*, entre -90



°C e 200 °C, com taxa de 10 °C/min, sob atmosfera inerte de nitrogênio, sendo as temperaturas determinadas a partir do segundo ciclo de aquecimento. Utilizou-se panelinhas de alumínio com cerca de 60 mg de amostra para cada análise. Estas análises foram realizadas no LCM, da Escola de Ciências da PUCRS. Através das medidas de DSC, é possível determinar o grau de cristalinidade das amostras, conforme a Equação 1. Para tanto, foi considerado como valor de referência, a entalpia de fusão para PEBD 100% cristalino ( $\Delta H_{m,c}$ ) sendo aproximadamente 286,6 J/g (Dartora *et al.*, 2015) e  $\Delta H_m$  sendo a entalpia de fusão da amostra.

$$X\% = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_{m,c}} \times 100$$

Equação 1

#### 2.2.2.2 Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

As análises de infravermelho foram realizadas a fim de avaliar alterações nas bandas de absorção referente às ligações químicas presentes nas amostras. Para tanto, foi utilizado um equipamento *Perkin Elmer Instruments Spectrum One FT-IR Spectrometer* e a aquisição do espectro foi feita com o acessório de amostras UATR (acessório de refletância atenuada total universal) no intervalo de número de onda de 4000 a 650 $\text{cm}^{-1}$ .

#### 2.2.2.3 Análise Termogravimétrica (TGA)

As análises de degradação térmica das amostras foram realizadas em uma termobalança, modelo Q600 da *TA Instruments*, utilizando taxa de aquecimento de 10°C/min, da temperatura ambiente até 600°C sob atmosfera de gás nitrogênio. Utilizou-se cadinho de platina com cerca de 60 mg de amostra para cada análise. Por meio desta técnica obtêm-se as temperaturas iniciais e finais de degradação das amostras.

#### 2.2.2.4 Microscopia Eletrônica de Varredura com Emissão de Campo (MEV-FEG)

As imagens por Microscopia Eletrônica de Varredura foram obtidas em equipamento FEI *Inspect F50* no modo de elétrons secundários (SE) disponível no Laboratório Central de Microscopia e Microanálise (LabCEMM) da PUCRS. Para a análise, cada amostra (aproximadamente 50  $\text{mm}^2$ ) foi fixada a um *stub* e logo após, metalizadas com ouro. Esta técnica foi utilizada para avaliar a morfologia das amostras pré e pós-hidrólise.

### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Propriedades Térmicas

A análise de Calorimetria Exploratória Diferencial foi realizada a fim de se obter

as temperaturas de fusão e cristalização dos materiais. Nas amostras analisadas, a análise de DSC apresentou os resultados expressos na Tabela 1.

Em termos de temperatura de fusão e cristalização, os valores obtidos para as amostras pós-hidrólise em comparação com as amostras pré-hidrólise não apresentaram grandes diferenças. A cristalinidade também não mostrou alterações, uma vez que esta propriedade é totalmente dependente da temperatura de fusão, ou seja, se a temperatura de fusão não apresenta grandes variações não há alteração da cristalinidade. Isto significa que o material não sofreu alterações na sua estrutura, mantendo assim o mesmo comportamento térmico após o ensaio de hidrólise enzimática.

<b>Amostra</b>	<b>T<sub>fusão</sub> (°C)</b>	<b>T<sub>cristalização</sub> (°C)</b>	<b>X%(cristalinidade)</b>
<b>PEBD puro</b>	104,1	88,8	35,5
<b>C1</b>	103,2	87,7	33,9
<b>D1</b>	103,8	87,5	34,9
<b>PEBD + aditivo</b>	104,3	90,9	33,2
<b>C2</b>	103,8	89,6	33,4
<b>D2</b>	103,8	89,5	33,5
<b>Aditivo</b>	104,9	93,8	27,7
<b>C3</b>	104,5	91,5	37,8
<b>D3</b>	104,6	92,0	30,8

Tabela 1. Resultados do DSC.

A razão Análise Termogravimétrica (TG) / Derivada da Análise Termogravimétrica (DTG) foi realizada com o objetivo de avaliar se houveram alterações na temperatura inicial e final de degradação das amostras. A Figura 3 apresenta as curvas de TG/DTG para o PEBD puro, C1 e D1.

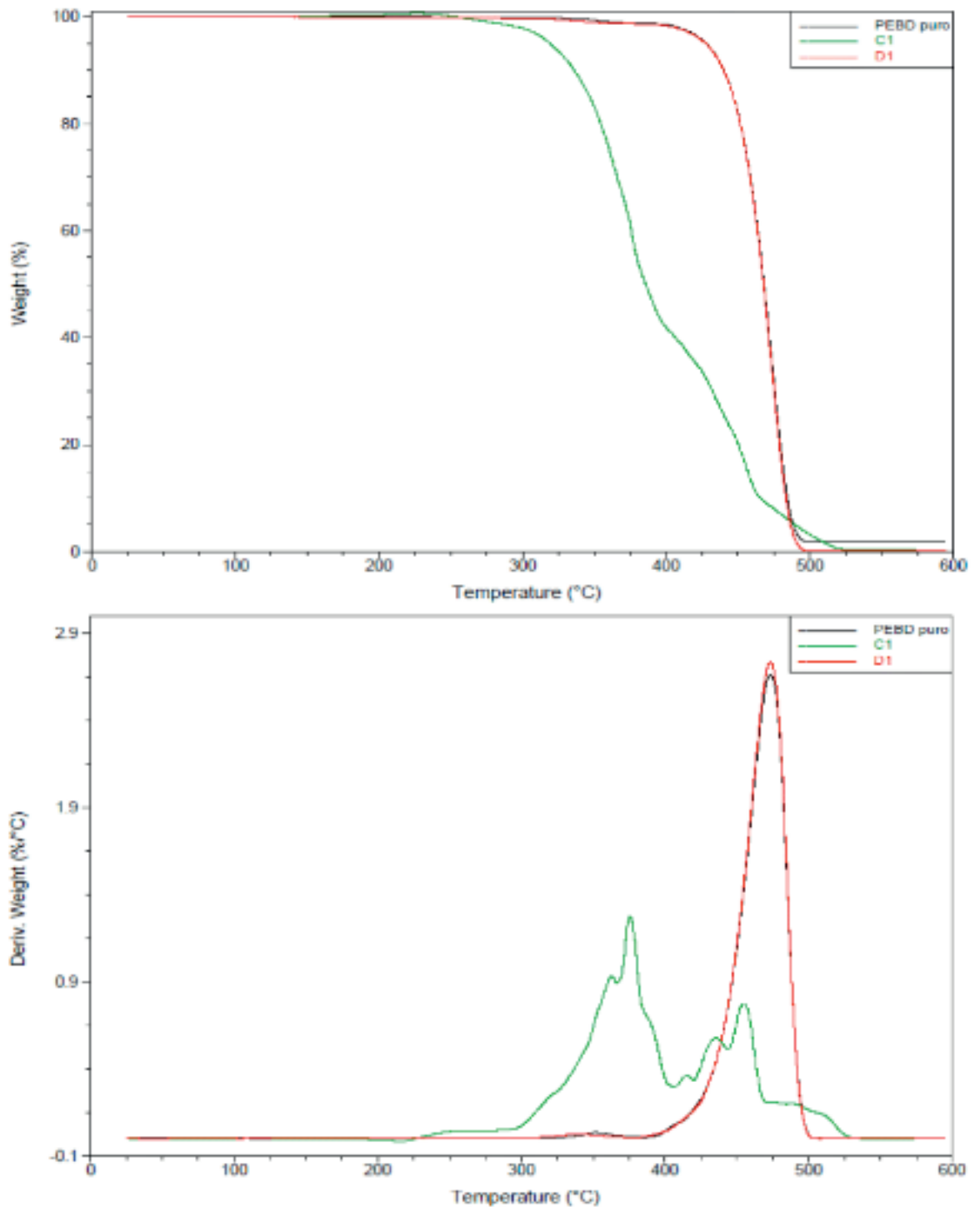


Figura 3. Curva de TG/DTG para PEBD puro.

Por meio dos gráficos apresentados na Figura 3, foram obtidas as temperaturas iniciais e finais de degradação para PEBD puro, as quais são, respectivamente, 401,05 °C e 485,79 °C. Já para C1 e D1, as temperaturas iniciais de degradação foram, respectivamente, 246,76°C e 410,35 °C, e as temperaturas finais de degradação foram, respectivamente, 512,06 °C e 485,95 °C. Desta maneira, foi possível observar que a degradação térmica de C1 ocorreu em dois estágios quando comparado a de PEBD puro e D1 que ocorreu em apenas um estágio. Além disso, o intervalo de temperaturas relativo à degradação térmica de C1 aumentou, indicando assim uma

menor resistência térmica e a presença de compostos voláteis quando comparado a PEBD puro e D1. A Figura 4 apresenta as curvas de TG/DTG para o PEBD + aditivo, C2 e D2.

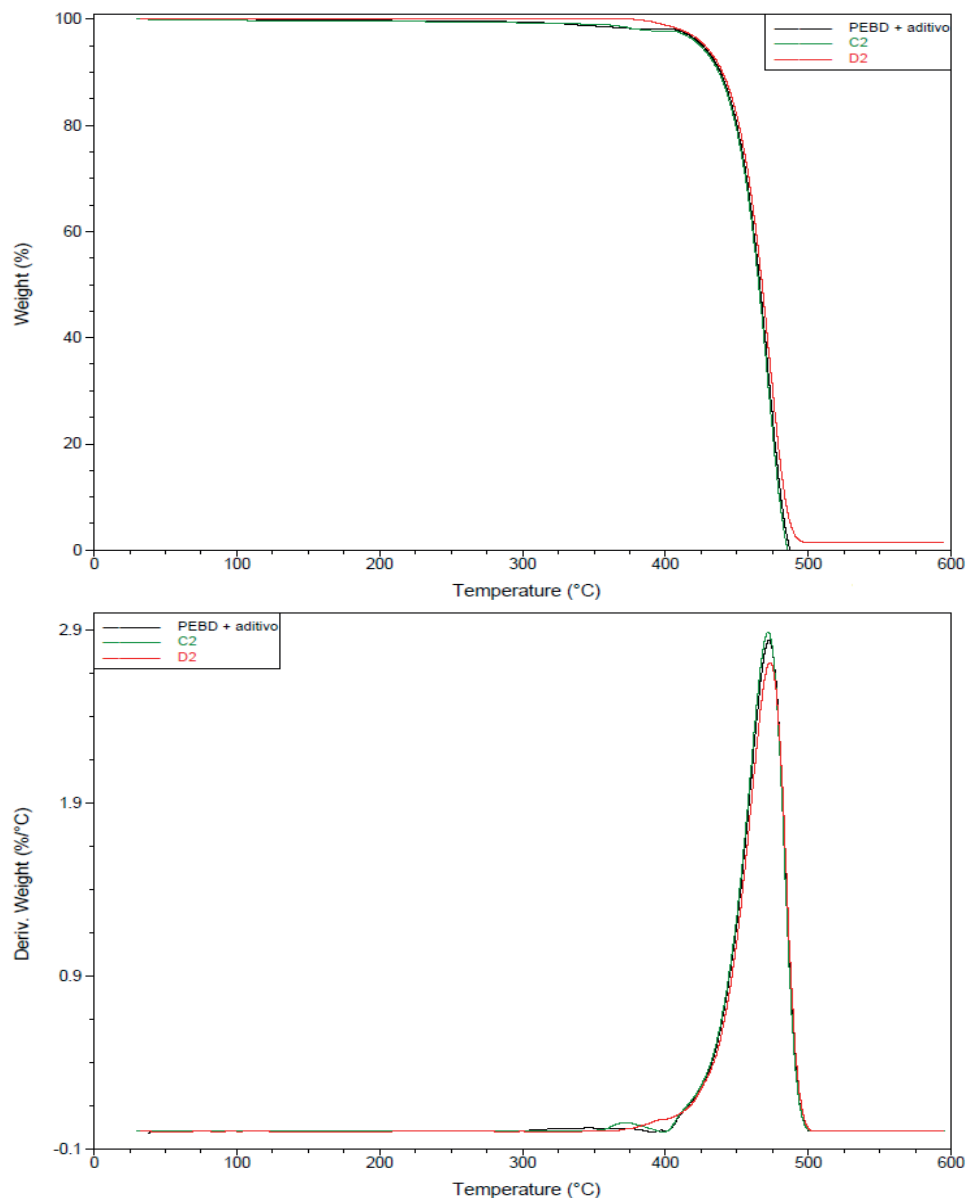


Figura 4. Curva de TG/DTG para PEBD aditivado com enzima.

Para o PEBD + aditivo, as temperaturas iniciais e finais de degradação foram, respectivamente, 381,87 °C e 484,84 °C. Já para C2 e D2, as temperaturas iniciais de degradação foram, respectivamente, 272,94 °C e 389,98 °C, e as temperaturas finais de degradação foram, respectivamente, 468,25 °C e 485,58 °C. Observou-se que tanto C2 quanto D2 apresentaram sua degradação térmica em um estágio quando comparados com PEBD + aditivo, ou seja, apresentando o mesmo comportamento térmico. No entanto, quando avaliou-se os intervalos de degradação destas amostras, foi observado que para C2 este intervalo é maior e a temperatura inicial é menor quando comparado com PEBD + aditivo e D2. Isto indica que houve diminuição da



resistência térmica das amostras, indicando sua maior susceptibilidade a degradação. A Figura 5 apresenta as curvas de TG/DTG para o Aditivo, C3 e D3.

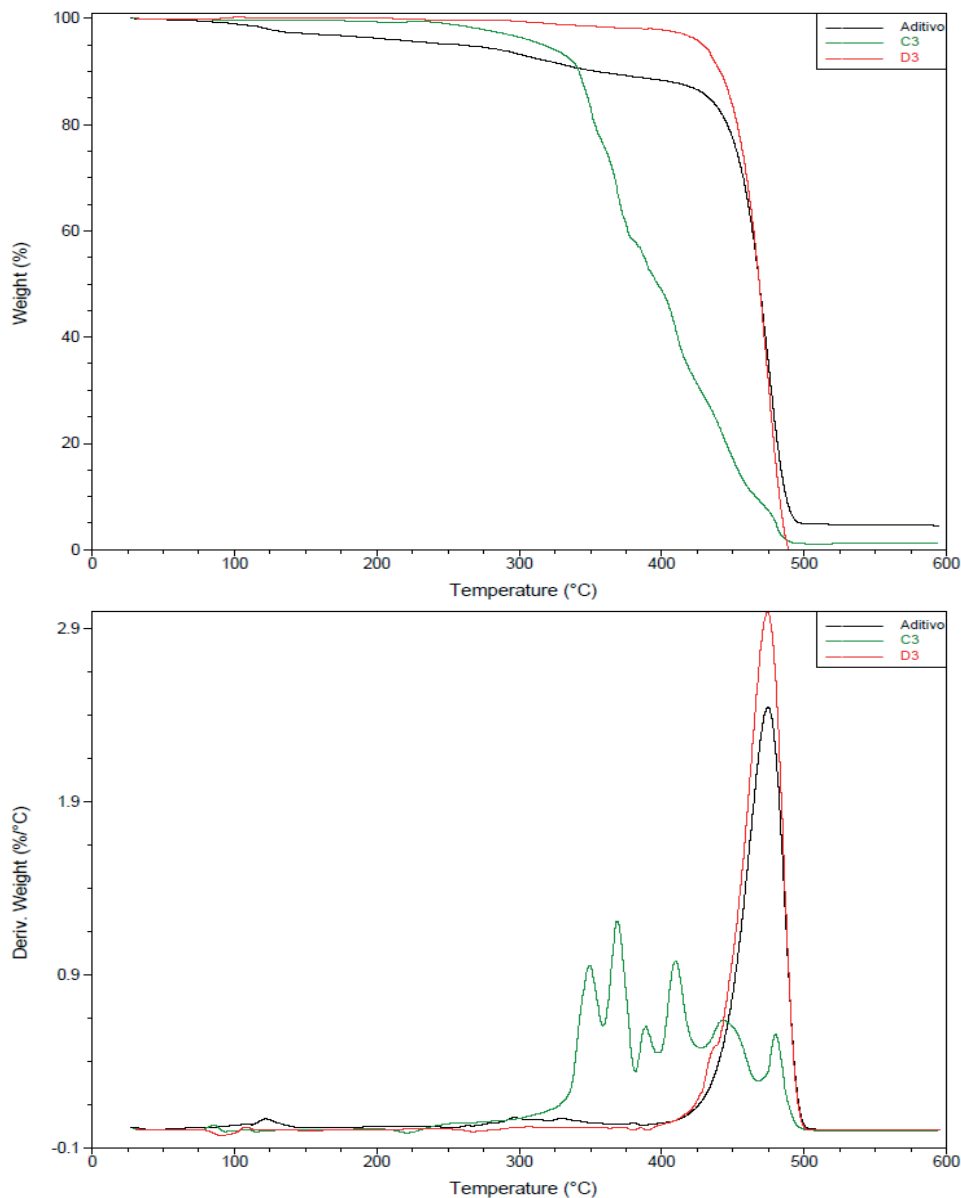


Figura 5. Curva de TG/DTG para o aditivo.

Para o Aditivo as temperaturas iniciais e finais de degradação foram, respectivamente, 281,4 °C e 486,9 °C. Já para C3 e D3, as temperaturas iniciais de degradação foram, respectivamente, 260,27°C e 289,76 °C, e as temperaturas finais de degradação foram, respectivamente, 484,7 °C e 486,24 °C. Observou-se que C3 apresentou sua degradação térmica em múltiplos estágios quando comparado com Aditivo e D3. Quando avaliou-se os intervalos de degradação de C3, foi observado que este intervalo é maior e a temperatura inicial é muito menor quando comparado com Aditivo e D3. No entanto, quando comparamos com a amostra de PEBD utilizada para o ensaio de hidrólise de meio diluído 5x, C1, nota-se que suas DTG são muito parecidas, havendo deslocamento de alguns picos e separação de outros. Além deste

comportamento ser muito próximo ao da matriz em mesmo meio, a enzima presente no aditivo também colabora para este comportamento térmico.

### 3.2 Características Estruturais

A análise de Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier foi realizada para verificar se houveram alterações nas bandas de absorção das amostras referentes às ligações químicas presentes. Na Figura 6, podemos observar o espectro de infravermelho de PEBD puro, C1 e D1.

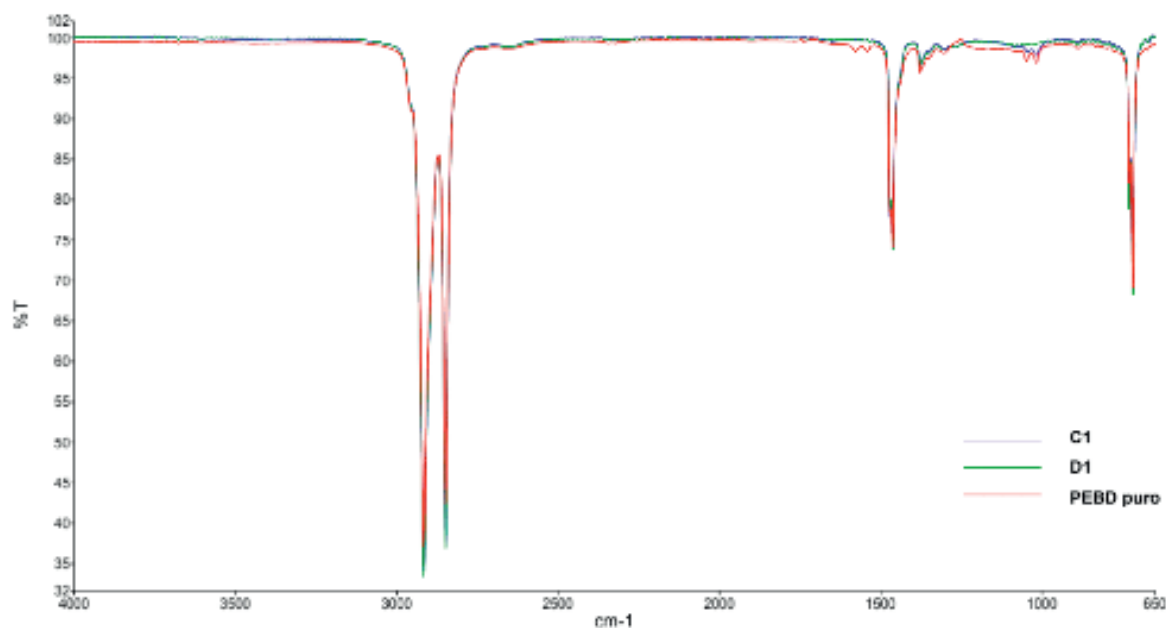


Figura 6. Espectro de infravermelho de PEBD puro.

Conforme esperado, devido às propriedades do PEBD e sua baixa degradabilidade, pode ser visualizado na Figura 6, o desaparecimento de duas bandas de absorção das amostras diluídas, C1 e D1, que foram observadas nas bandas de aproximadamente 1540 cm<sup>-1</sup> e 1017 cm<sup>-1</sup> do PEBD puro. Segundo a literatura (GULMINE *et al.*, 2003; GUPTA *et al.*, 2014) estas bandas estão associadas a estabilizantes que podem ter sido adicionados no processo de polimerização do PEBD. Sendo assim, a ausência destas bandas nas amostras C1 e D1 podem ser explicadas por uma possível reação entre o meio salino e o estabilizante do PEBD. Na Figura 7, podemos observar o espectro de infravermelho de PEBD + aditivo, C2 e D2.

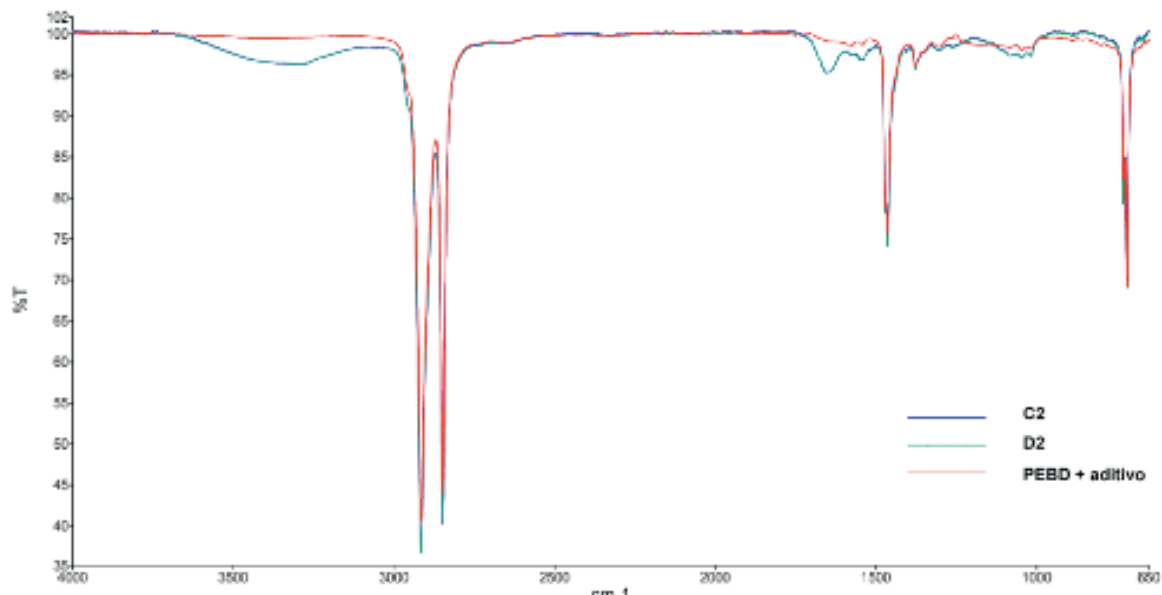


Figura 7. Espectro de infravermelho do PEBD aditivado com a enzima.

A partir da Figura 7 observou-se que houve alterações nas bandas de  $3297\text{ cm}^{-1}$ ,  $1725\text{ cm}^{-1}$  e  $1653\text{ cm}^{-1}$  das amostras C2 e D2 em relação ao PEBD + aditivo, estas bandas estão associadas, respectivamente, as ligações OH, C=O e C=C. A banda correspondente a ligação OH ( $3297\text{ cm}^{-1}$ ), pode ser atribuída a absorção de água, uma vez que o aditivo é enzimático e devido a isto, possui componentes hidrofílicos em sua composição. Segundo Albertsson *et al.* (1987), o aparecimento da banda correspondente a carbonila (C=O) de ácidos carboxílicos ( $1725\text{ cm}^{-1}$ ), pode indicar o início da degradação, visto que estes podem ser produzidos por agentes oxidantes, sendo atacados por micro-organismos que degradam os segmentos mais curtos de cadeias. Além disso, de acordo com a literatura, o aumento do grupo etileno insaturado ( $1653\text{ cm}^{-1}$ ), ocasiona a diminuição da hidrofobicidade, facilitando a acessibilidade para a degradação microbiana (POTTS *et al.*, 1973). Salienta-se que não houve variações entre os espectros das amostras pós-hidrolise em diferentes diluições (5x e 10x).

Na Figura 8, podemos observar o espectro de infravermelho do aditivo, C3 e D3.

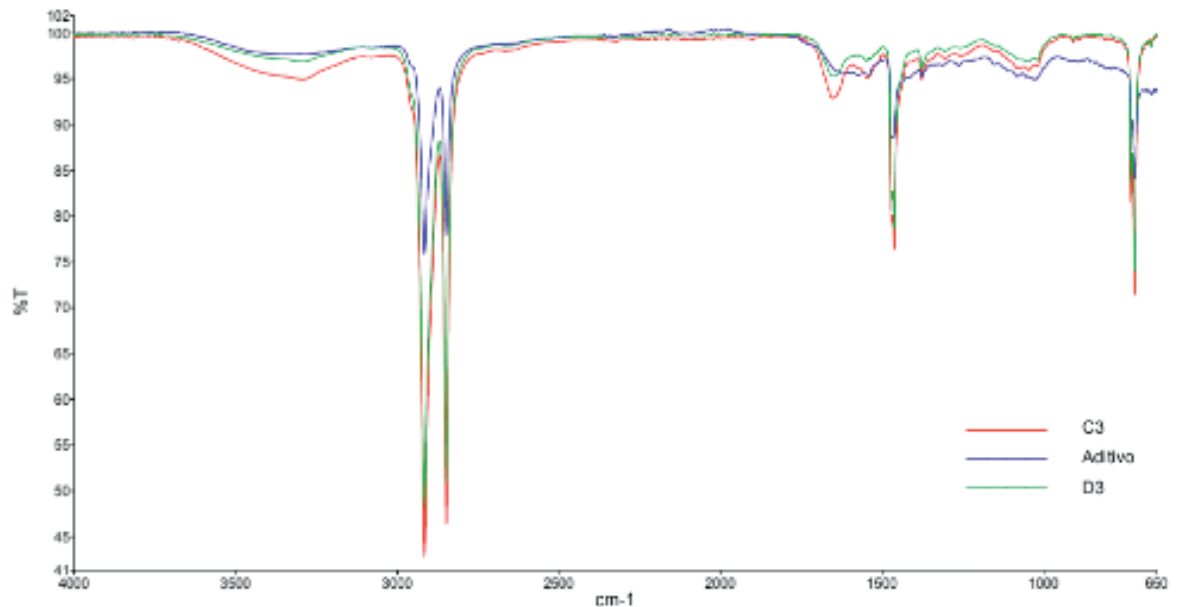


Figura 8. Espectro de infravermelho do aditivo enzimático.

Na Figura 8 foi observado que houve um aumento nas bandas de  $3296,8 \text{ cm}^{-1}$  e  $1654,9 \text{ cm}^{-1}$  das amostras C3 e D3 em relação ao aditivo, estas bandas estão associadas, respectivamente, as ligações OH (correspondente à absorção de água) e C=O de ácidos carboxílicos (correspondente ao início do processo de degradação do material). Observou-se também que houve diferença entre as amostras pós-hidrólise com diferentes diluições. Isto pode estar relacionada ao fato de que a amostra C3 foi submetida ao meio mais concentrado (5x).

### 3.3 Morfologia

A Microscopia Eletrônica de Varredura com Emissão de Campo (MEV-FEG) foi utilizada para avaliar se houve modificações na morfologia das amostras. A Figura 9 apresenta as imagens de MEV-FEG para o PEBD puro, C1 e D



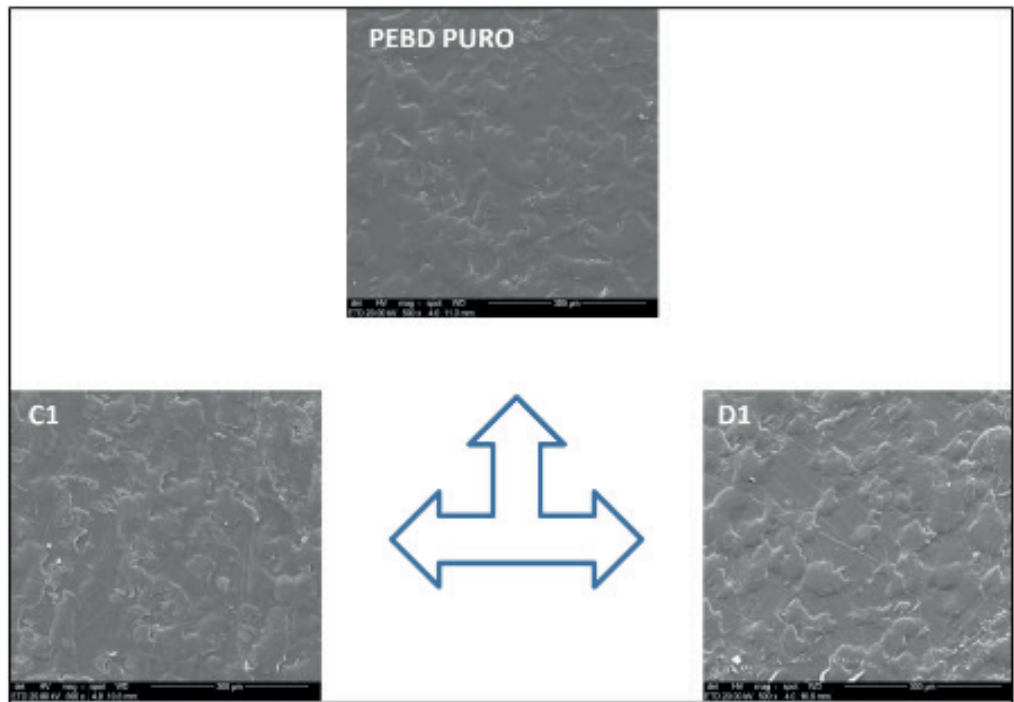


Figura 9 . Imagens de MEV - FEG para o PEBD puro

Observou-se que as amostras C1 e D1 não apresentaram modificações morfológicas quando comparadas com a de PEBD puro, e também não se identificou diferenças entre as amostras C1 e D1. A Figura 10 apresenta as imagens de MEV-FEG para o PEBD + aditivo, C2 e D2.

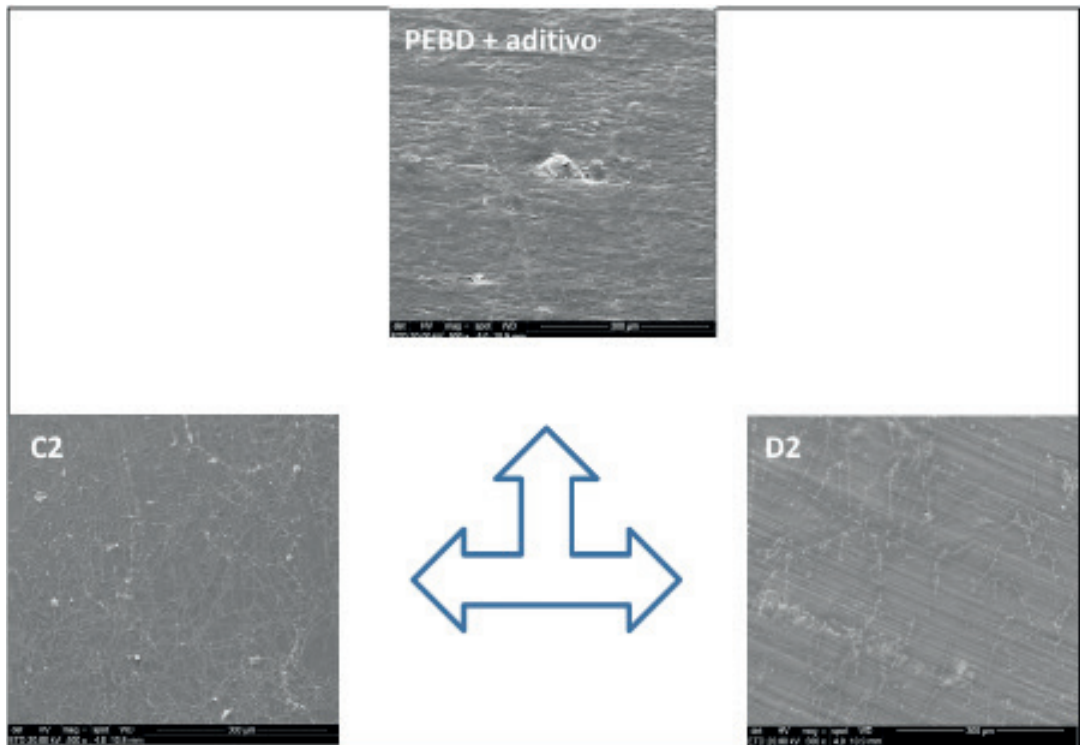


Figura 10. Imagens de MEV-FEG para o PEBD aditivado com enzima.

A partir da Figura 10, observou-se que a morfologia das amostras C2 e D2 mudaram em relação à do PEBD + aditivo, sendo observado a presença de hifas (polissacarídeos excretados pelos micro-organismos) aderidas à superfície da amostra, conforme dados da literatura (MATSUNAGA; WHITNEY, 2000). Os micro-organismos e seus polissacarídeos são responsáveis pela formação do biofilme (FORD, 1993; FLETCHER, 1996; GU, 2003). A biodegradação depende da formação de biofilme, seguida pela quebra do polímero em oligômeros de baixo peso molecular, provavelmente devido às enzimas secretadas pelos micróbios, e após são facilmente assimilados por eles (ARKATKAR *et al.*, 2009).

A formação do biofilme pode ter ocorrido devido à presença da enzima nas amostras, o que possibilita a degradação do PEBD. Notamos também que há uma diferença entre as amostras com diferentes diluições, C2 e D2. A amostra C2 apresenta maior quantidade de polissacarídeos excretados, pois como o meio desta amostra foi diluído apenas 5x, este aumento da concentração aumenta também a degradação superficial da amostra, o que facilita a ação de micro-organismos. A Figura 11 apresenta as imagens do MEV-FEG para o Aditivo, C3 e D3.

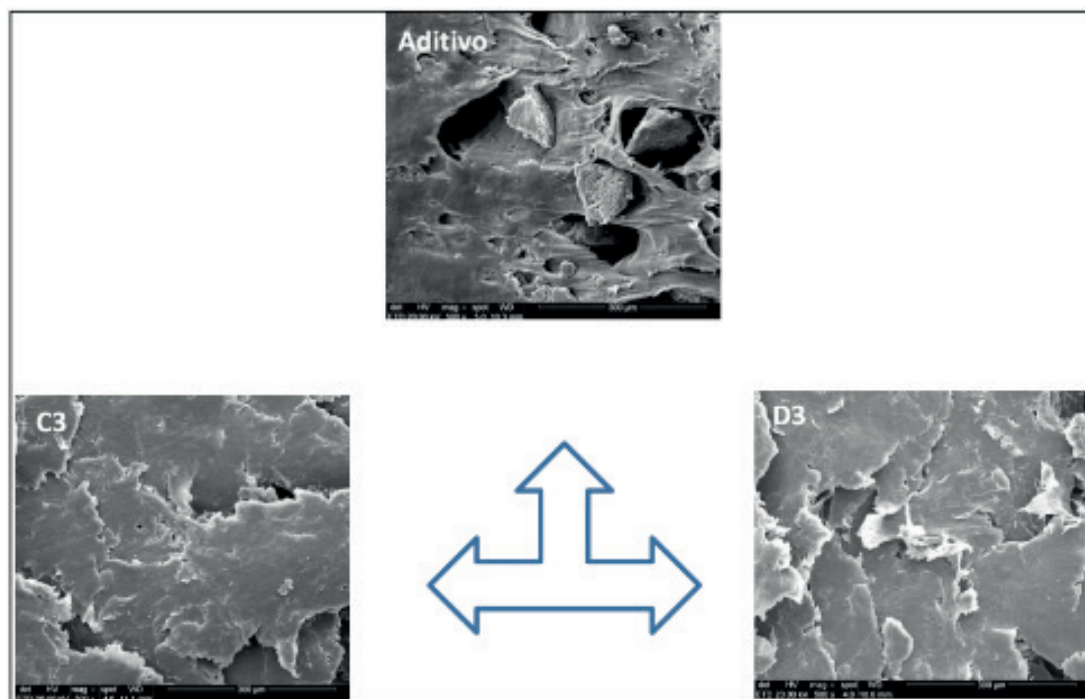


Figura 11. MEV-FEG para o Aditivo.

Pelas imagens de MEV-FEG não foi possível observar alterações morfológicas na amostra C3 e D3 em relação ao Aditivo. Convém salientar que este aditivo apresenta porosidade na sua estrutura, o que não foi verificado nas amostras PEBD puro e PEBD + aditivo, o que pode ter dificultado a visualização das alterações ocorridas.

## 4 | CONCLUSÃO

A partir dos resultados apresentados para as propriedades térmicas obtidos pela análise de DSC, verificou-se que as temperaturas de fusão e cristalização, assim como a cristalinidade das amostras, não apresentaram alterações após a degradação hidrolítica nas condições utilizadas (45 dias à temperatura ambiente). No entanto, para a análise de TGA, as amostras em meio salino, diluído 5x, apresentaram um aumento do intervalo das temperaturas de degradação, indicando que o meio mais concentrado foi mais agressivo, diminuindo a resistência térmica dos materiais, sugerindo uma maior degradabilidade da amostra.

Ao mesmo tempo, ocorreu o surgimento de algumas bandas de absorção referente às ligações OH (indicando a absorção de água no material), C=O (associado ao início da degradação do material) e C=C (associado a diminuição da hidrofobicidade do material), nas amostras aditivadas em ambos os meios. A partir disso, pode-se concluir que o aditivo favoreceu a absorção de água no material, e por consequência, a ação dos micro-organismos, acelerando o processo de degradação do polímero aditivado em relação ao PP puro. Além disso, foram constatadas alterações morfológicas no PEBD aditivado, exibindo a formação de biofilme para as duas diluições, entretanto, as amostras de PEBD + aditivo colocadas no meio salino, diluído 5x (C2), apresentaram maiores quantidades de polissacarídeos excretados (hifas), isto pode ser decorrente da adição da enzima que possivelmente provocou alterações na matriz, demonstrando-se atrativa aos micro-organismos, permitindo assim, a degradação hidrolítica.

Levando em consideração os resultados obtidos a partir das caracterizações (DSC, FTIR, TGA e MEV-FEG), pode-se concluir que PEBD aditivado apresenta maiores alterações após o ensaio de degradação hidrolítica em comparação com o PEBD comercial. Isto sugere que à presença do aditivo enzimático *Pepzyme* facilita e possibilita a ocorrência da biodegradação do material, podendo ser utilizados como uma possível alternativa para minimizar impacto ambiental causado pelos resíduos de PEBD.

## REFERÊNCIAS

ABIPLAST. **Os plásticos**. 2016. Disponível em: <<http://www.abiplast.org.br/site/os-plasticos>> Acesso em: 28 de agosto de 2016.

ACHILIAS, D. S., ROUPAKIAS, C. P., MEGALOKONOMOS, A. A., LAPPAS, E. V., ANTONAKOU. Chemical recycling of plastic wastes made from polyethylene (LDPE and HDPE) and polypropylene (PP). **Journal of Hazardous Materials**, v. 149, n. 3, p. 536-542, 2007.

ALBERTSSON, A. C., ANDERSSON, S. O., KARLSSON, S. The mechanism of biodegradation of polyethylene. **Polymer Degradation and Stability**, v. 18, n. 1, p. 73-87, 1987.

ARKATKAR, A., ARUTHELVI, J., SUDHAKAR, M., BHADURI, S., UPPARA, P. V., DOBLE, M. Approaches to enhance the biodegradation of polyolefins. **The Open Environmental Engineering Journal**, v. 2, n. 1, 2009.

DARTORA, P., SANTANA, R., MOREIRA, A. The influence of the long chain branches of LLDPE on processability and physical properties. **Polímeros**, 25, 6, 531-539, 2015.

ECYCLE. **De onde vêm e o que são os plásticos?** 2016. Disponível em: <<http://www.ecycle.com.br/component/content/article/35/676-de-onde-vem-e-o-que-sao-os-plasticos.html>> Acesso em: 26 de agosto de 2016.

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

FLETCHER, M. Diversity of surfaces and adhesion strategies. **Bacterial adhesion: molecular and ecological diversity**, v. 19, n. 1, 1996.

FORD, T. E. The microbial ecology of water distribution and outfall systems. **Aquatic Microbiology: An ecological approach**. 1993.

GU, J. Microbiological deterioration and degradation of synthetic polymeric materials: recent research advances. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 52, n. 2, p. 69-91, 2003.

GULMINE, J. V., JANISSEK, P. R., HEISE, H. M., AKCELRUD, L. Degradation profile of polyethylene after artificial accelerated weathering. **Polymer Degradation and Stability**, v. 79, n. 3, p. 385-397, 2003.

GUPTA, N., SAXENA, R. K., SHARMA, B., SHARMA, S., AGRAWAL, A. K., JASSAL, M., MANCHANDA, R. K. Leaching of plastic polymers by plastic vials used for storing homoeopathic medicines: A preliminary study. **Indian Journal of Research in Homoeopathy**, v. 8, n. 2, p. 95, 2014.

LAZAREVIC, D., AOUSTINA, E., BUCLET, N., BRANDT, N. Plastic waste management in the context of a European recycling society: Comparing results and uncertainties in a life cycle perspective. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 55, p. 246-259, 2010.

LIU, X., GAO, C., SANGWAN, P., YU, L., TONG, Z. Accelerating the degradation of polyolefins through additives and blending. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 131, n. 18, 2014.

MATSUNAGA, M., WHITNEY, P. J. Surface changes brought about by corona discharge treatment of polyethylene film and the effect on subsequent microbial colonisation. **Polymer Degradation and Stability**, v. 70, n. 3, p. 325-332, 2000.

OJEDA, T. F. M. **Biodegradabilidade de materiais poliméricos**. Rio Grande do Sul. 2008. 128 p. Tese de Doutorado – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

PIATTI, T. M., RODRIGUES, R. A. F. Plásticos: características, usos, produção e impactos ambientais. **Maceió. Edufal**, 2005.

POTTS, J. E., CLENDINING, R. A., ACKART, W. B., NIEGISCHE, W. D. **In Polymer Science and Technology**, Editora: J. Guillet, 1973.

ROSA, D. S., PENTEADO, D. F., CALIL, M. R. Propriedades Térmicas e Biodegradabilidade de PCL e PHB em um Pool de Fungos. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 15, p. 75-80, jun. 2000.

VEETHAHAVYA, K. S., RAJATH, B. S., NOOBIA, S., KUMAR, B. M. Biodegradation of Low Density Polyethylene in Aqueous Media. **Procedia Environmental Sciences**, v. 35, p. 709-713, 2016.

## **SOBRE OS ORGANIZADORES**

**Henrique Ajuz Holzmann** - Professor assistente da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação em Tecnologia em Fabricação Mecânica e Engenharia Mecânica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Doutorando em Engenharia e Ciência dos Materiais pela Universidade Estadual de Ponta Grossa. Trabalha com os temas: Revestimentos resistentes a corrosão, Soldagem e Caracterização de revestimentos soldados.

**Ricardo Vinicius Bubna Biscaia** - Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduado em Engenharia Mecânica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Doutorando em Engenharia de Produção pela UTFPR. Trabalha com os temas: análise microestrutural e de microdureza de ferramentas de usinagem, modelo de referência e processo de desenvolvimento de produto e gestão da manutenção.

Agência Brasileira do ISBN  
ISBN 978-85-7247-235-7



9 788572 472357