

Estudos Transdisciplinares nas Engenharias

João Dallamuta
(Organizador)

Atena
Editora
Ano 2019

João Dallamuta

(Organizador)

Estudos Transdisciplinares nas Engenharias

Atena Editora
2019

2019 by Atena Editora
Copyright © Atena Editora
Copyright do Texto © 2019 Os Autores
Copyright da Edição © 2019 Atena Editora
Editora Executiva: Profª Drª Antonella Carvalho de
Oliveira Diagramação: Karine de Lima
Edição de Arte: Lorena Prestes
Revisão: Os Autores

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

Conselho Editorial

Ciências Humanas e Sociais Aplicadas

Prof. 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
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionale 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
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
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Ciências Agrárias e Multidisciplinar

Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

Ciências Biológicas e da Saúde

Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás
Prof.^a Dr.^a Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof.^a Dr.^a Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof.^a Dr.^a Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof.^a Dr.^a Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof.^a Dr.^a Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Prof.^a Dr.^a Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Conselho Técnico Científico

Prof. Msc. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo
Prof.^a Dr.^a Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico
Prof. Msc. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof.^a Msc. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia
Prof. Msc. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista
Prof. Msc. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão
Prof.^a Msc. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal
Prof. Msc. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)	
E82	Estudos transdisciplinares nas engenharias [recurso eletrônico] / Organizador João Dallamuta. – Ponta Grossa, PR: Atena Editora, 2019. – (Estudos Transdisciplinares nas Engenharias; v. 1) Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-85-7247-355-2 DOI 10.22533/at.ed.552193005 1. Engenharia – Pesquisa – Brasil. 2. Transdisciplinaridade. I. Dallamuta, João. II. Série. CDD 620
Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422	

Atena Editora

Ponta Grossa – Paraná - Brasil

www.atenaeditora.com.br

contato@atenaeditora.com.br

APRESENTAÇÃO

Caro(a) leitor(a)

Nesta obra temos um compendio de pesquisas realizadas por alunos e professores atuantes em ciências exatas, engenharia e tecnologia. São apresentados trabalhos teóricos e vários resultados práticos de diferentes formas de aplicação e abordagens de simulação, projetos e caracterização no âmbito da engenharia e aplicação de tecnologia.

Tecnologia e pesquisa de base são os pilares do desenvolvimento tecnológico e da inovação. Uma visão ampla destes temas é portanda fundamental. É esta amplitude de áreas e temas que procuramos reunir neste livro.

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.

Optamos pela divisão da obra em dois volumes, como forma de organização e praticidade a você leitor. Aos autores, agradecemos pela confiança e espírito de parceria.

Boa leitura

João Dallamuta

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO E QUALIDADE DO BIOGÁS	
Carla Caroline Carvalho Poças	
Arlison Darlison Lima Leal	
Aroldo José Teixeira de Souza Filho	
João Areis Ferreira Barbosa Junior	
DOI 10.22533/at.ed.5521930051	
CAPÍTULO 2	6
ANÁLISE DO COMPORTAMENTO FÍSICO-QUÍMICO DE ROCHAS CARBONÁTICAS QUANDO SUBMETIDAS A INJEÇÃO DE CO ₂ SUPERCRÍTICO	
Deodório Barbosa de Souza	
Katia Botelho Torres Galindo	
Analice França Lima Amorim	
Cecília Maria Mota Silva Lins	
Leonardo José do Nascimento Guimarães	
DOI 10.22533/at.ed.5521930052	
CAPÍTULO 3	17
ANÁLISE E CARACTERIZAÇÃO DO POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE PROVENIENTE DO PROCESSO DE RECICLAGEM MECÂNICA E DO POLIESTIRENO PROVENIENTE DA DEGASAGEM DO POLIESTIRENO EXPANDIDO	
Fabiula Danielli Bastos de Sousa	
Thiago Czermainski Gonçalves Alves	
Matheus Alves Rodrigues	
DOI 10.22533/at.ed.5521930053	
CAPÍTULO 4	31
ASSOCIAÇÃO DA FILTRAÇÃO DIRETA E USO DE COAGULANTES NATURAIS E QUÍMICOS NO TRATAMENTO DE ÁGUA DE ABASTECIMENTO	
Edilaine Regina Pereira	
Dandley Vizibelli	
Thaís Ribeiro	
Fellipe Jhordã Ladeia Janz	
José Euclides Stipp Paterniani	
DOI 10.22533/at.ed.5521930054	
CAPÍTULO 5	38
AUTOMATIZAÇÃO DE BRAÇO ROBÓTICO PARA COLETA EM CORPOS HÍDRICOS COM CONTAMINANTES NOCIVOS A SAÚDE HUMANA	
Louise Aimeé Reis Guimarães	
Jussiléa Gurjão de Figueiredo	
Ylan Dahan Benoliel Silva	
DOI 10.22533/at.ed.5521930055	

CAPÍTULO 6 47

AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA ESTRUTURAL DE PÓRTICOS PLANOS DE AÇO PROJETADOS COM ANÁLISE AVANÇADA

Danilo Luiz Santana Mapa
Marcílio Sousa da Rocha Freitas
Ricardo Azoubel da Mota Silveira

DOI 10.22533/at.ed.5521930056

CAPÍTULO 7 62

AVALIAÇÃO DA VAZÃO DE ASPERSORES SUBMETIDOS A DIFERENTES PRESSÕES

Anderson Crestani Pereira
Adroaldo Dias Robaina
Marcia Xavier Peiter
Bruna Dalcin Pimenta
Jardel Henrique Kirchner
Wellington Mezzomo
Marcos Vinicius Loregian
Jhosefe Bruning
Luis Humberto Bahú Ben

DOI 10.22533/at.ed.5521930057

CAPÍTULO 8 70

AVALIAÇÃO DO BINÔMIO TEMPO-TEMPERATURA DE REFEIÇÕES SERVIDAS EM RESTAURANTES *SELF-SERVICE* DE PICOS-PI

Nara Vanessa dos Anjos Barros
Mateus da Conceição Araújo
Adolfo Pinheiro de Oliveira
Iraildo Francisco Soares
Ennya Cristina Pereira dos Santos Duarte
Rodrigo Barbosa Monteiro Cavalcante

DOI 10.22533/at.ed.5521930058

CAPÍTULO 9 77

AVALIAÇÃO DO EFEITO DE ANTIOXIDANTES NATURAIS NA ESTABILIDADE OXIDATIVA DO BIODIESEL

Ingrid Rocha Teixeira
Jander Teixeira Peneluc
Matheus Andrade Almeida
Selmo Queiroz Almeida

DOI 10.22533/at.ed.5521930059

CAPÍTULO 10 86

AVALIAÇÃO DO ÍNDICE DE SEVERIDADE DE SECA DE PALMER (PDSI) PARA O MUNICÍPIO DE CRUZ ALTA/RS

Suélen Cristiane Riemer da Silveira
Claudia Fernanda Almeida Teixeira-Gandra
Rita de Cássia Fraga Damé
Marcia Aparecida Simonete
Emanuele Baifus Manke
Maria Clotilde Carré Chagas Neta
Henrique Michaelis Bergmann

DOI 10.22533/at.ed.55219300510

CAPÍTULO 11 93

AVALIAÇÃO DO SUCO MISTO DE ACEROLA COM MANJERICÃO

Michele Alves de Lima
Elynne Kryslen do Carmo Barros
Clélia de Moura Fé Campos
Marilene Magalhães de Brito
Maria Márcia Dantas de Sousa
Karine Aleixes Barbosa de Oliveira
Thamires Mendonça de Carvalho
Robson Alves da Silva

DOI 10.22533/at.ed.55219300511

CAPÍTULO 12 102

COLORIMETRIA APLICADA A ESPÉCIES FLORESTAIS EM MATO GROSSO

Edilene Silva Ribeiro
Joaquim Carlos Gonzalez
William Cardoso Lima
Luzia Elaine Domingues Pimenta Vargas
Roberta Santos Souza

DOI 10.22533/at.ed.55219300512

CAPÍTULO 13 114

COMPORTAMENTO DA ALFACE COM DISTINTAS DOSAGENS DE ESTERCO CAPRINO EM DIFERENTES REGIÕES

Thaís Rayane Gomes da Silva
Marcelo Rodrigues Barbosa Júnior
Cinara Bernardo da Silva
Luan Wamberg dos Santos
Márcio Aurélio Lins dos Santos

DOI 10.22533/at.ed.55219300513

CAPÍTULO 14 122

COMPORTAMENTO DA ALTURA DO CACAUEIRO SOB DIFERENTES QUANTIDADES DE ÁGUA E NITROGÊNIO

Roger Luiz Da Silva Almeida
Roger Luiz Da Silva Almeida Filho
Gustavo Victor De Melo Araújo Almeida

DOI 10.22533/at.ed.55219300514

CAPÍTULO 15 127

CORRELAÇÕES ENTRE AS TEORIAS DE EULER-BERNOULLI E DE SHI-VOYIADJIS PARA VIGAS: UMA ABORDAGEM TEÓRICA E NUMÉRICA

Hilton Marques Souza Santana
Fabio Carlos da Rocha

DOI 10.22533/at.ed.55219300515

CAPÍTULO 16	144
EFICIÊNCIA DOS PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS NA REDUÇÃO DA DEMANDA QUÍMICA DE OXIGÊNIO (DQO)	
Júlia Buffon Laura Cerezolli De Carli Gabriela Madella Kranz Maria Luiza Danielli Zanandréa Murilo Cesar Costelli	
DOI 10.22533/at.ed.55219300516	
CAPÍTULO 17	151
ESTUDO DA REAÇÃO DE ELETRO-OXIDAÇÃO DE GLICEROL EM MEIO ALCALINO	
Micaeli Caldas Gloria Elson Almeida de Souza Paulo José de Sousa Maia	
DOI 10.22533/at.ed.55219300517	
CAPÍTULO 18	167
ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICO ECONÔMICA DO BIOGÁS DA SUINOCULTURA PARA A PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	
Arilson Darlison Lima Leal Carla Caroline Carvalho Poças Aroldo José Teixeira de Souza Filho João Areis Ferreira Barbosa Junior	
DOI 10.22533/at.ed.55219300518	
SOBRE O ORGANIZADOR	172

ANÁLISE E CARACTERIZAÇÃO DO POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE PROVENIENTE DO PROCESSO DE RECICLAGEM MECÂNICA E DO POLIESTIRENO PROVENIENTE DA DEGASAGEM DO POLIESTIRENO EXPANDIDO

Fabiula Danielli Bastos de Sousa

Universidade Federal de Pelotas, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Pelotas - RS

Thiago Czermainski Gonçalves Alves

Universidade Federal de Pelotas, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Pelotas - RS

Matheus Alves Rodrigues

Universidade Federal de Pelotas, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Pelotas - RS

RESUMO: Tendo em vista a imensa gama de aplicação e volume de consumo de polímeros em nossa sociedade e, conseqüentemente, a grande porção que é descartada de forma inadequada no meio ambiente gerando graves problemas ambientais, torna-se necessário investigar as rotas de reciclagem viáveis a cada material, a fim de aprimorá-las ou mesmo implementar produtos amigáveis ao meio ambiente, especialmente nos dias atuais. A nível molecular, os processos de reciclagem estudados para o poliestireno (degasagem em estufa aquecida do poliestireno expandido) e para o polietileno de alta densidade (reciclagem mecânica) causam modificações significativas como resultado dos processos degradativos sofridos por cada material, sendo de grande importância o conhecimento destes mecanismos para compreender a maneira com que ocorrem tais modificações e quais

suas conseqüências na estrutura química e propriedades finais dos polímeros reciclados. Como resultado, o profundo conhecimento das propriedades finais do polímero reciclado torna-se essencial para o seu reprocessamento na produção de novos bens de consumo utilizando matérias-primas recicladas, contribuindo assim à redução do problema da disposição final dos resíduos sólidos urbanos e desenvolvimento sustentável.

PALAVRAS-CHAVE: Polietileno de alta densidade, poliestireno, reciclagem, degradação, desenvolvimento sustentável.

ABSTRACT: In view of the immense range of application and volume of polymer consumption in our society and, consequently, the large portion which is disposed improperly into the environment causing serious environmental problems, it becomes necessary to investigate recycling viable routes to each material in order to improve them or even implement environment-friendly products, especially in the current days. At the molecular level, the recycling processes studied for polystyrene (degassing of expanded polystyrene in heated oven) and high density polyethylene (mechanical recycling) cause significant modifications as result of the degradative processes suffered by each material, being of great importance the knowledge of these mechanisms to understand the manner in

which such modifications occur and what their consequences on chemical structure and final properties of the recycled polymers are. As a result, the deep knowledge of the final properties of the recycled polymer becomes essential for its reprocessing in the production of new consumer goods using recycled raw materials, thus helping to reduce the problem of the final disposal of urban solid waste and sustainable development.

KEYWORDS: High density polyethylene, polystyrene, recycling, degradation, sustainable development.

1 | INTRODUÇÃO

Atualmente, o crescimento elevado do consumo e o descarte inadequado de materiais poliméricos têm agravado problemas relacionados aos resíduos sólidos urbanos (RSUs). No Brasil, no ano de 2010, foi sancionada uma lei que prevê a redução de geração de resíduos sólidos urbanos, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que traz como propósito levar a população ao consumo sustentável, aumento da reciclagem, reutilização de resíduos sólidos e sua destinação correta (Rodrigues, 2018).

De acordo com a PNRS, a segregação mínima dos RSUs é em resíduos recicláveis, resíduos orgânicos e rejeitos. Os resíduos orgânicos são passíveis de reciclagem através do processo de compostagem; os resíduos recicláveis são passíveis de ser reciclados, sendo compostos principalmente por papel e papelão, vidros, metais e polímeros diversos. Já os rejeitos não podem ser reciclados, e apenas esta classe deveria seguir para aterros sanitários (Rodrigues, 2018).

Sabe-se que cada polímero apresenta suas características físicas, químicas e conseqüente parâmetros de processamento específicos. Então, visando facilitar o processo de reciclagem e evitar perdas, a norma ABNT NBR 13230:2008 da Associação Brasileira de Normas Técnicas é uma grande aliada ao setor de reciclagem de polímeros, pois traz como norma a indicação de simbologia de reciclabilidade e a identificação de materiais plásticos, sendo que cada embalagem apresenta a identificação do tipo de polímero presente na composição da embalagem do produto, conforme Figura 1.

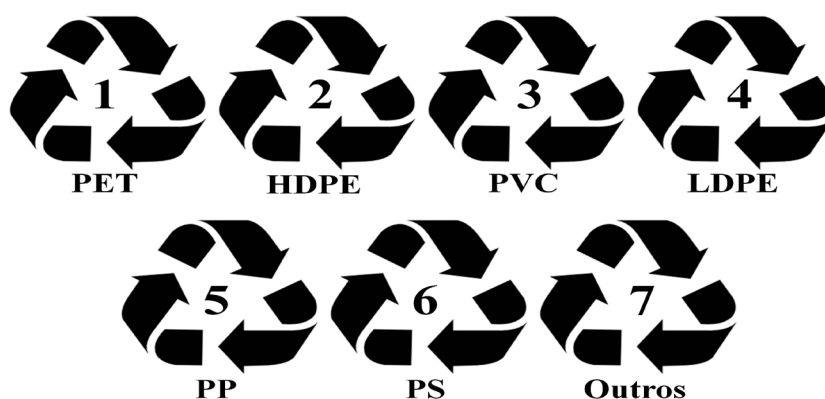


Figura 1: Simbologia e identificação para a reciclagem de embalagens plásticas segundo a Norma ABNT NBR 13230:2008.

Dentre os materiais poliméricos pós-consumo causadores de sérios problemas ambientais devido à disposição inadequada no meio ambiente está o poliestireno expandido (EPS), o qual é constituído de cerca de 5% de poliestireno (PS) em sua forma expandida (EPS), mais conhecido pela marca comercial Isopor®, além de embalagens em geral. Outro material que tem ajudado no agravamento de problemas ambientais, quando o material pós-consumo é disposto de maneira incorreta, é o polietileno de alta densidade (PEAD), um polímero que é largamente utilizado na produção de embalagens em geral. Nesse contexto, a reciclagem trata-se de uma ação sustentável, já que economiza matérias-primas (conservando principalmente o petróleo, um recurso natural não renovável) e energia.

O EPS, material 100% reciclável, possui baixíssima densidade e bom isolamento térmico (entre outras propriedades), o que lhe confere potencial aplicação como embalagens. Ainda, o EPS é frequentemente utilizado para o acondicionamento de eletrodomésticos durante o transporte, evitando choques e impactos do produto. Assim, o EPS está muito presente em nosso cotidiano: na forma de copos descartáveis, utensílios para alimentação, embalagens, caixas e recipientes isolantes térmicos, suportes de eletrodomésticos e muitos outros objetos; entretanto, sua baixa densidade acaba sendo uma contrapartida para a viabilidade econômica de sua reciclagem, pois as peças desse material constituem um enorme volume com uma ínfima massa.

Para o caso de embalagens produzidas com polímeros termoplásticos como o PEAD, uma solução viável para a redução do problema trata-se da reciclagem mecânica. Esse tipo de reciclagem consiste em utilizar materiais poliméricos oriundos de pós-consumo e resíduos de processamento. A reciclagem mecânica tem início na limpeza do material para que se retire resíduos e rótulos. Depois é realizada a triagem, que é feita de acordo com o tipo de polímero. Na sequência é feita a moagem, a qual é realizada para que se tenha a diminuição de tamanho e assim a possibilidade de processamento, com posterior etapa de lavagem. Então, quando o polímero já se encontra em grânulos ele pode ser processado, o processamento é realizado em extrusoras (Rodrigues, 2018). Em se tratando de EPS, das diversas rotas de reciclagem disponíveis, a degasagem em estufa é um método simples e eficiente. No entanto, independente do tipo de polímero a ser reciclado, sabe-se que as etapas às quais os polímeros são submetidos durante o processo são capazes de degradá-los, em maior ou menor grau, podendo acarretar dificuldades ao material reciclado durante sua utilização.

A degradação de um material consiste na perda de propriedades, sejam elas mecânicas, químicas, ópticas, térmicas, dentre outras, em decorrência de diversos fatores como exposição à luz, a agentes químicos, esforços mecânicos ou termomecânicos, condições térmicas e envelhecimento. Todas as classes de materiais estão sujeitas a esses processos, sendo os materiais poliméricos bons exemplos das mudanças decorrentes da degradação.

Sabe-se que cada tipo de material polimérico, devido principalmente à sua estrutura química, apresenta pelo menos um tipo de mecanismo de degradação específico. O conhecimento do(s) mecanismo(s) de degradação de cada material polimérico é de extrema importância, sendo que os níveis de degradação podem ser medidos através de análises químicas, como a espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) e índice de fluidez, pelo uso de viscosímetros. O uso dessas técnicas torna-se cada vez mais importante, uma vez que o controle das propriedades torna-se maior e mais exigente, garantindo um processo de reciclagem mais eficiente e ambientalmente amigável.

No presente trabalho, utilizou-se a degasagem em estufa para o EPS, e a reciclagem mecânica para o PEAD, analisando alterações na estrutura química a partir do FTIR e alterações no índice de fluidez pelo uso do viscosímetro. Nas seções seguintes, serão apresentados os mecanismos de degradação verificados durante a reciclagem do PS e do PEAD.

2 | MECANISMOS DEGRADATIVOS DO PS

O PS é um polímero caracterizado pela presença de radicais fenil, ligados alternadamente em carbonos terciários, ao longo de sua cadeia. À temperatura ambiente, apresenta-se rígido (sua temperatura de transição vítrea está na faixa dos 100°C). Normalmente, é um polímero amorfo (poliestireno atático), contudo, dependendo do tipo de polimerização utilizado, pode apresentar cristalinidade (poliestireno sindiotático).

Conforme citado anteriormente, uma das formas mais conhecidas do poliestireno é o EPS, sigla do inglês *expanded polystyrene*, ou poliestireno expandido, de nome comercial Isopor®. O processo de expansão envolve a incorporação de pentano (em substituição ao CFC, danoso ao meio ambiente, largamente utilizado no passado). As esferas incham conforme o pentano torna-se um gás dentro delas, devido a altas temperaturas provenientes de aquecimento por vapor. A próxima etapa, o armazenamento em silos, permite a estabilização do gás no interior das esferas (“Michigan Foam”). Pode-se dizer que ao menos 95% de sua constituição é “ar” (gás); o restante, poliestireno.

Consistindo na retirada do gás expansor por meio da aplicação de calor, a degasagem (semelhante à pirólise, porém sem controle da atmosfera necessariamente) trata-se, basicamente, do aquecimento do material em equipamentos que proporcionem controle de temperatura, podendo ser variados durante o processo a temperatura e tempo de permanência da amostra à referida temperatura.

No entanto, essa exposição ao calor acarreta em mudanças na estrutura química do material, como resultado de processos degradativos. Um dos mecanismos de degradação térmica existentes em materiais poliméricos é a cisão de cadeia (Faravelli *et al.*, 2001) podendo ser homolítica ou heterolítica. Esse mecanismo é autocatalítico,

ou seja, dividido em três etapas: a iniciação, a propagação e a terminação da reação.

A iniciação da cisão ocorre quando a energia fornecida ao material é capaz de romper uma ligação covalente na cadeia, formando um radical livre e, geralmente, um átomo de hidrogênio instável.

Algumas ligações, por terem energias de ligação menores, são “alvos” preferenciais da cisão. Ligações C-C, por exemplo, são possivelmente as primeiras a serem rompidas pelo fornecimento de calor. Ligações C-H envolvendo carbono terciário (presentes ao longo da cadeia do PS) também podem ser quebradas com maior facilidade do que as que possuem carbono primário ou secundário (De Paoli, 2009).

A propagação usualmente envolve a formação de um peróxido no radical livre, por sua vez removendo outro hidrogênio na cadeia (formando um hidroperóxido) e resultando em mais um radical livre (Jabur, 2011). Cabe ressaltar também que pode ocorrer a captação de átomos de oxigênio da atmosfera, resultando em oxidação, pois não necessariamente a degradação ocorre em meio inerte.

A terminação pode ocorrer por recombinação de dois radicais livres, por exemplo.

Intuitivamente, pode-se afirmar que o processo de cisão de cadeias, consequência da degradação, resulta em perda de propriedades do material, o que pode servir como obstáculo para a utilização de PS reciclado em novos bens de consumo. O mecanismo degradativo simplificado que ocorre no PS, processo de cisão de cadeia, é apresentado na Figura 2. No mecanismo, um segmento de cadeia de PS é apresentado sendo que, a partir do fornecimento de energia (quando superior à energia da ligação C-C de sua cadeia principal), é capaz de rompê-la, gerando um radical livre que, a partir da recombinação a fim de estabilizá-lo, pode vir a ligar-se novamente ou ligar-se a outro(s) elementos/grupos químicos ('X' no esquema), proveniente do próprio sistema ou atmosfera ao qual o material esteja submetido. Maiores detalhes serão fornecidos na seção de Resultados e discussão (seção 5.1).

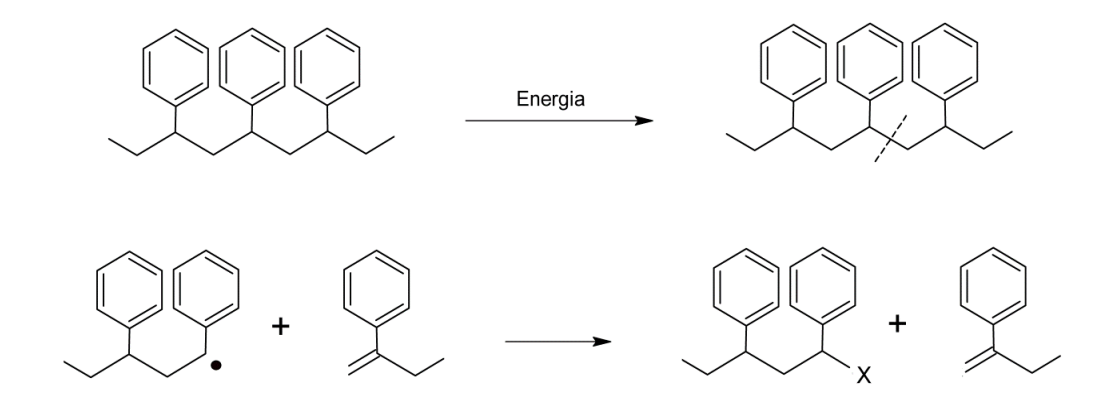


Figura 2: Esquema do mecanismo degradativo simplificado do PS, baseado em Faravelli et al. (Faravelli *et al.*, 2001).

Outro processo de degradação, usual em materiais poliméricos, é a despolimerização. No PS ocorre acima de 250°C. Também pode ser dividida em

iniciação, propagação e terminação (De Paoli, 2009).

A despolimerização inicia-se pela formação de macrorradicais livres, com origem em, por exemplo, defeitos de polimerização. Esses macrorradicais recebem um elétron proveniente da quebra de uma ligação C-C aleatória. Quanto maior a estabilidade desses macrorradicais livres, mais propícia será a propagação da reação de despolimerização. No caso do PS, a presença do carbono terciário, conforme citado anteriormente, acaba sendo um “alvo” preferencial para a quebra da cadeia (visto que a energia necessária para tal, naquele ponto, é inferior em relação às demais ligações), fato que proporciona um macrorradical livre extremamente estável, estabilizado em ressonância com o anel aromático (o qual é ligado ao carbono terciário ao longo da cadeia). Com base nisso, pode-se dizer que, no PS, o efeito da reação de propagação do mecanismo de despolimerização é acentuado graças à presença de carbonos terciários (ligados ao fenil) e à consequente formação de macrorradicais estáveis (De Paoli, 2009).

A terminação pode ocorrer por recombinação de radicais livres, ou pelo processo de cisão- β , onde se forma uma ligação dupla terminal oriunda da quebra de uma ligação C-H de um carbono que se encontra em posição β em relação ao radical livre (De Paoli, 2009).

Vale ressaltar que o mecanismo de despolimerização vem a ocorrer no PS apenas em temperaturas maiores que 250°C (De Paoli, 2009).

3 | MECANISMOS DEGRADATIVOS DO PEAD

De acordo com Hinsken et al. (Hinsken *et al.*, 1991), os principais mecanismos de degradação de PEAD são a cisão de cadeia e ramificação de cadeia seguido de reticulação.

A cisão ocorre quando uma energia localizada numa determinada ligação for superior à energia de ligação. Tal energia pode ser de diferentes formas: luz (fotólise), radiação gama (radiólise), calor (termólise) ou cisalhamento (rompimento mecânico). O polietileno é uma poliolefina que é obtida através de uma polimerização de adição, as poliolefinas tem a quebra de ligação C-C simples reduzindo a massa molar do polímero. A cisão de cadeia pode ser de forma homolítica e heterolítica, dependendo de como a degradação inicia-se. Homolítica corresponde à quebra da ligação covalente com um elétron ficando ligado em cada fragmento, assim originando dois radicais livres; já na heterolítica, o par de elétrons fica ligado a um dos fragmentos e o outro fragmento ficará com falta de elétrons. Em geral, a homolítica, que gera macrorradicais alquila, acontece em maior número (De Paoli, 2009).

No caso das poliolefinas, quando há o rompimento da ligação C-C, serão formados dois macrorradicais alquila que podem recombinar-se ou difundirem-se na massa polimérica, o que vai depender do estado físico, morfologia e temperatura do material. Depois de ocorrer a formação dos radicais livres, a reação radicalar pode

tanto difundir-se como recombinar-se de forma intramolecular ou intermolecular. Caso aconteça uma recombinação intermolecular haverá a reticulação, e caso ocorra a intramolecular ocorrerá a ciclização (De Paoli, 2009).

O início do processo de degradação ocorre devido à formação de radicais alquila (R \cdot) devido à ação conjunta de tensões cisalhantes e temperatura. Caso o oxigênio esteja presente em abundância, ele reagirá facilmente com os macrorradicais, resultando na propagação da degradação através da produção de radicais livres, tais como peróxido (ROO \cdot), alcóxido (RO \cdot), hidroxila (HO \cdot) e produtos instáveis, como o hidroperóxido (ROOH). Tais componentes, altamente instáveis e reativos, atacam a cadeia, abstraindo outros átomos da cadeia carbônica principal do polímero, propagando as reações de degradação (do Nascimento e Pinheiro, 2009).

Ambas cisão- β e quebra do radical peróxido conduzirão à redução da massa molecular do polímero devido à cisão de cadeia das macromoléculas. Cisalhamento mecânico também pode contribuir para o aumento das cisões. Os radicais alquil resultantes reagem de acordo com a Figura 3, podendo ocorrer de acordo com as equações 1 e/ou 2 da figura. Nesse caso, haverá redução da viscosidade do PEAD.

A recombinação de dois macrorradicais corresponde à etapa de terminação da reação, podendo formar insaturações vinílicas e trans-vinilênicas, caso o radical esteja em um carbono primário e secundário, respectivamente (Hinsken *et al.*, 1991). De acordo com Hinsken *et al.* (Hinsken *et al.*, 1991), radicais alquila podem reagir com grupos vinil, resultando na reação de adição e subsequente reticulação, o que causa o aumento na viscosidade do material. O mecanismo simplificado de ramificação de cadeia seguido de reticulação é mostrado na Figura 4.

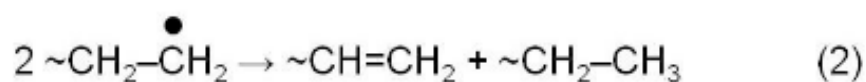
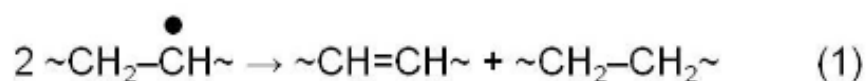


Figura 3: Mecanismo de cisão de cadeia do PEAD (etapa de terminação), baseado em Hinsken *et al.* (Hinsken *et al.*, 1991).

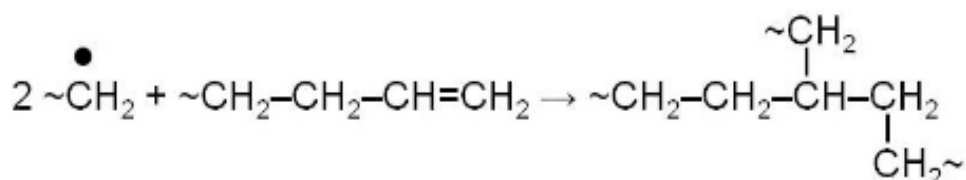


Figura 4: Mecanismo de ramificação de cadeia seguido de reticulação do PEAD (etapa de terminação), baseado em Hinsken *et al.* (Hinsken *et al.*, 1991).

Na sequência será abordada a parte experimental no trabalho, no qual o EPS e PEAD foram reciclados (por degasagem em estufa aquecida e por reciclagem

mecânica, respectivamente), sendo que alterações na estrutura química e índice de fluidez das amostras como resultado de processos de degradação foram analisados.

4 | METODOLOGIA

4.1 MATERIAIS

Foi utilizado o EPS proveniente de lojas de eletrodomésticos da cidade de Pelotas, e o PEAD proveniente de embalagens de materiais de limpeza descartados da Universidade Federal de Pelotas. No caso do PEAD, todas as embalagens apresentam o código 2 (referente ao PEAD), de acordo com a Norma ABNT NBR 13230:2008 (Figura 1).

4.2 MÉTODOS

4.2.1 DEGASAGEM DO EPS

Os resíduos de EPS coletados foram cortados em formas irregulares. Estes foram degasados em estufa a 150°C a diferentes períodos de tempo, de 1 a 5 horas, para análise da influência do tempo de degasagem nas propriedades finais do PS reciclado. Após a degasagem, as amostras foram moídas em moinho de facas da marca Marconi. A nomenclatura das amostras segue o tempo de degasagem em estufa.

4.2.2 LIMPEZA, CORTE, MOAGEM E EXTRUSÃO DO PEAD

As embalagens de PEAD foram lavadas com detergente neutro em água corrente. Depois de secas ao ambiente, foram cortadas de formas irregulares e moídas em moinho de facas da marca Marconi, resultando num pó de granulometria homogênea. O material resultante foi então extrudado, variando o número de extrusões. As propriedades das amostras foram analisadas de acordo com o número de extrusões. Utilizou-se uma extrusora de rosca simples da marca ECO, com temperaturas de todas as zonas de aquecimento do barril de 180°C e com uma rotação de 100 rpm. As amostras extrudadas em formato de macarrão foram moídas em moinho de facas da marca Marconi. A nomenclatura das amostras refere-se ao respectivo número de extrusões ao qual foi submetida.

4.2.3 ANÁLISE DE ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO

As mudanças ocorridas na estrutura química das amostras como resultado do processo de extrusão (PEAD) e do processo de degasagem (EPS) foram analisadas por espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier com reflexão total atenuada (FTIR-ATR), utilizando-se um espectrofotômetro IRPrestige-21, da marca Shimadzu, na faixa de espectro de 4000 cm⁻¹ a 500 cm⁻¹, e 21 varreduras.

4.2.4 ANÁLISE DO ÍNDICE DE FLUIDEZ

A análise do índice de fluidez foi realizada para verificar a influência da alteração da estrutura química das amostras no seu índice de fluidez. Foi realizada em um plastômetro da marca CEAST Italy, modelo Melt flow modular line, a 200°C (PS) e a 190° (PEAD), e carga de 5 kg, de acordo com a norma ASTM D 1238.

5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 EPS

A Figura 5 apresenta os resultados de índice de fluidez das amostras degasadas.

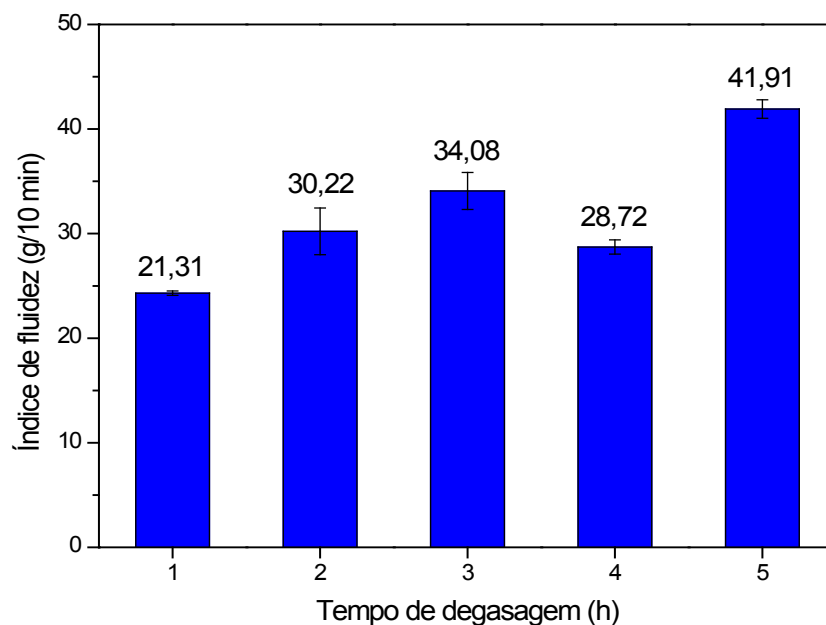


Figura 5: Valores de índice de fluidez das amostras degasadas.

O gráfico mostra grandes variações na fluidez das amostras, em função do tempo de permanência destas em estufa aquecida. Tais variações observadas devem-se aos processos degradativos sofridos pelo EPS durante o processo de degasagem em estufa, sendo que o aumento nos valores de índice de fluidez refere-se à redução da viscosidade das amostras degasadas devido ao mecanismo de cisão de cadeia, conforme previamente discutido na seção 2 deste trabalho.

A Figura 6 apresenta os resultados de FTIR das amostras degasadas.

Na análise de FTIR-ATR, pôde-se notar o surgimento de dois picos estranhos ao padrão para o PS, sendo o pico em 2350 cm^{-1} referente à formação de dióxido de carbono (Danon, Stair e Weitz, 2011) e o pico em 3335 cm^{-1} referente ao estiramento de ligação O-H (Oh *et al.*, 2005). Observa-se claramente variação dos picos de acordo com o tempo de exposição das amostras, sendo que o relacionado às ligações O-H apresenta variações mais significativas.

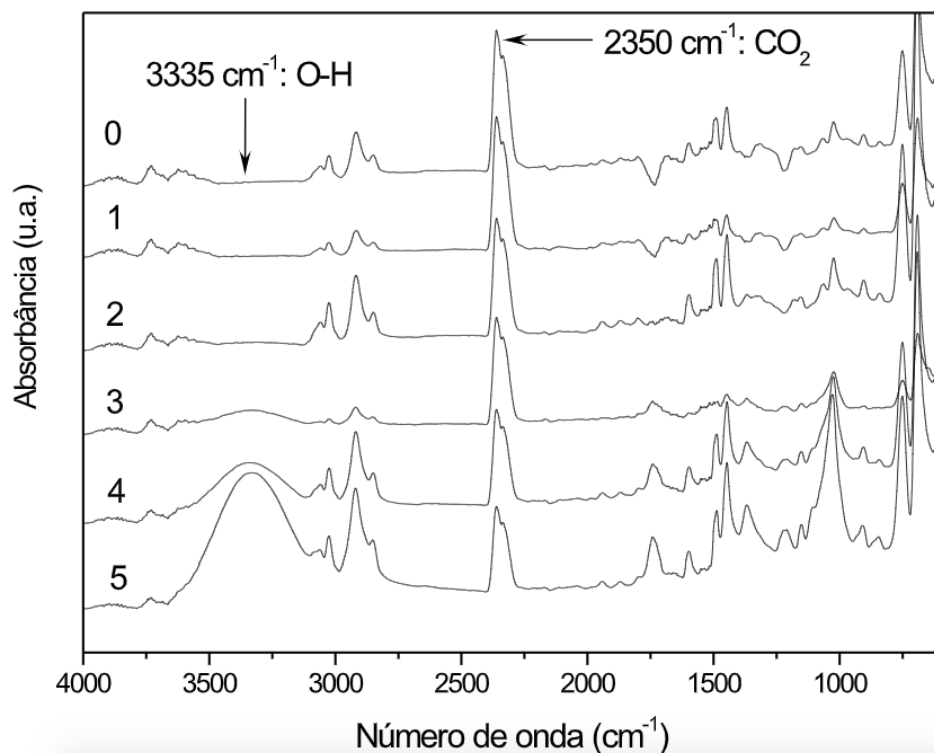


Figura 6: Espectros de FTIR obtidos para as amostras degasadas.

Sugere-se, assim, que o EPS, ao passar por degasagem, sofra processo de degradação térmica por cisão de cadeia. A observação de dióxido de carbono nas amostras deve-se, provavelmente, a algum gás ou composto utilizado na fabricação ou incorporado em algum momento da vida útil do material, visto que não houve como ter conhecimento da procedência das peças coletadas.

Já as ligações O-H presentes nas amostras degasadas de 3 a 5 horas podem ter surgido durante a fase de propagação da cisão de cadeia, sendo que as reações envolvendo radicais livres liberam átomos de hidrogênio da cadeia. Estes, então, além de formarem hidroperóxidos com esses radicais, podem ter se unido ao oxigênio da atmosfera, pois esta não era inerte durante a degasagem. Essa oxidação, então, pode ser responsável pela variação observada na fluidez das amostras. Ambos os picos observados de O-H e CO₂ referem-se ao 'X' representado no mecanismo degradativo simplificado do PS (Figura 2), os quais atuam estabilizando radicais livres formados durante a cisão de cadeia do PS.

5.2 PEAD

Os resultados do índice de fluidez das amostras analisadas estão presentes na Figura 7.

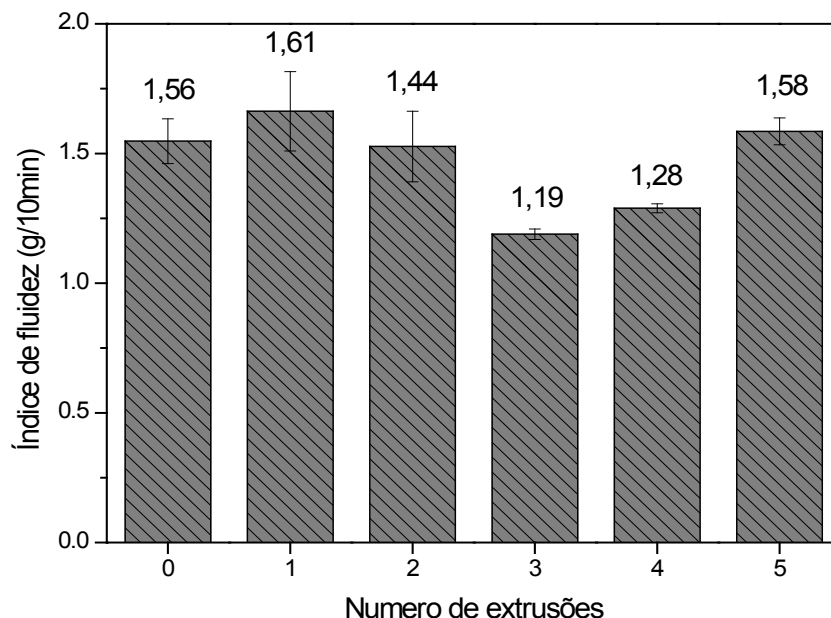


Figura 7: Valores de índice de fluidez das amostras de PEAD extrudadas.

De acordo com os resultados, percebe-se que os valores de índice de fluidez das amostras variaram de acordo com o número de extrusões, sendo resultado do grau de degradação termomecânica sofrida pela amostra. De acordo com Hinsken et al. (Hinsken *et al.*, 1991), os radicais alquila e grupos vinila resultam no aumento da massa molecular devido à ramificação e reticulação da cadeia central, enquanto a cisão e a quebra do radical peróxi resultam na diminuição da massa molecular do polímero. Os principais mecanismos de degradação do PEAD são a cisão de cadeia e a ramificação de cadeia seguida por reticulação. Assim, a cisão de cadeia reduz a viscosidade da amostra, enquanto a reticulação aumenta sua viscosidade, acarretando mudanças no índice de fluidez.

De acordo com Silvano et al. (Silvano *et al.*, 2013), o aumento do número de ciclos de reprocessamento leva à formação de mais radicais alquila, aumentando a probabilidade de que eles se combinem e produzam grupos de insaturação. Tais alterações na estrutura das amostras podem ser confirmadas através da análise de FTIR (Figura 8).

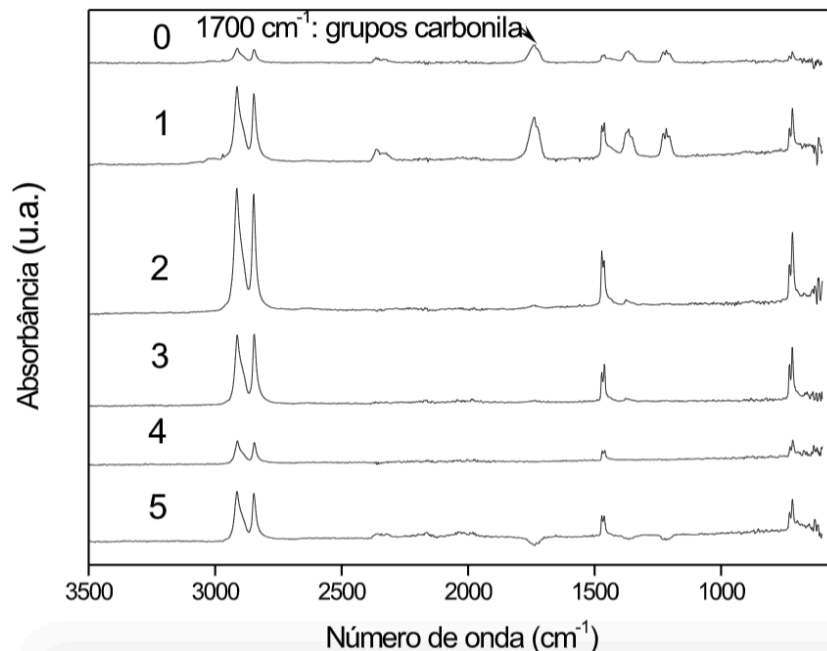


Figura 8: Espectros de FTIR das amostras, de acordo com o número de extrusões.

O grupo carbonílico na região de 1700 cm^{-1} que aparece nas amostras 0 e 1 refere-se à cisão de cadeia (Silvano *et al.*, 2013). Nessas amostras, maiores valores de índice de fluidez como resultado da cisão de cadeia foram observados como consequente redução na viscosidade das amostras. Nas demais amostras não foi observado a presença desse pico, sendo que elas apresentaram menores índices de fluidez, como provável resultado da reticulação das cadeias e aumento da viscosidade. De acordo com Silvano et al. (Silvano *et al.*, 2013), o grupo carbonila é produzido pelo radical alquila e reação com o oxigênio, o radical alquila tira um elétron da ligação C-C, o acontecimento transforma no grupo oxidado no grupo carbonílico e a cadeia polimérica sofre um mecanismo de cisão- β .

6 | CONCLUSÕES

Em relação ao EPS, a análise da estrutura química, realizada via FTIR, evidenciou a alteração em duas ligações: O-H, que provavelmente refere-se à oxidação do PS ocorrida durante o processo de degasagem (por processos oxidativos), e formação de dióxido de carbono, cuja causa está supostamente relacionada ao gás usado como agente expensor do PS na produção do EPS.

Já em relação ao PEAD, o processo de reciclagem mecânica, principalmente a etapa do processamento em extrusora, é capaz de degradá-lo em diferentes graus. De acordo com os resultados, observou-se que acontece uma variação nos níveis de viscosidade do material, conforme varia o número de extrusões como consequência dos mecanismos de degradação por cisão de cadeia e ramificação seguida por reticulação. Foi possível observar que quando há cisão das cadeias a massa molecular diminui, consequentemente o material fica menos viscoso; de maneira contrária

acontece quando há reticulação do material, sua massa molecular aumenta e assim sua viscosidade torna-se maior.

De forma geral, as modificações químicas observadas no PS e PEAD, resultantes dos processos de degradação ocorridos durante o processo de reciclagem, tendem a dificultar a utilização desses materiais em processos posteriores, dada a redução de propriedades (especialmente mecânicas) que os polímeros reciclados apresentarão. A degradação, assim, apresenta-se como um obstáculo tanto na reutilização direta desses polímeros reciclados quanto na reincorporação destes em outros processamentos. Ainda, por estarem degradados, esses polímeros podem ter uma difícil reinserção no mercado na forma de outros produtos, pois a perda de propriedades torna o material reciclado economicamente menos atrativo do que o mesmo material virgem.

A partir desse ponto, buscam-se alternativas que corroborem a implementação de materiais reciclados em novos produtos, como a incorporação de aditivos (preferencialmente de fontes naturais) que reduzam os efeitos da degradação, aprimorando ou recuperando as propriedades perdidas pelo polímero durante a reciclagem.

O conhecimento das propriedades finais do polímero reciclado, como a viscosidade do material de acordo com seu processo de degradação, torna-se útil para o reprocessamento do material na produção de novos bens de consumo utilizando matérias-primas recicladas, contribuindo assim à redução do problema da disposição final dos RSUs e ao desenvolvimento sustentável.

7 | AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório Centro de Desenvolvimento e Controle de Biomateriais (CDC-Bio) da Universidade Federal de Pelotas e ao Laboratório de Materiais da Universidade Federal do ABC pelo uso das instalações laboratoriais.

REFERÊNCIAS

DANON, A.; STAIR, P. C.; WEITZ, E. FTIR study of CO₂ adsorption on amine-grafted SBA-15: Elucidation of adsorbed species. **The Journal of Physical Chemistry C**, v. 115, n. 23, p. 11540–11549, 2011.

DE PAOLI, M.-A. **Degradação e estabilização de polímeros**. São Paulo: Artliber, 2009.

FARAVELLI, T. *et al.* Thermal degradation of polystyrene. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 60, n. 1, p. 103–121, 2001.

HINSKEN, H. *et al.* Degradation of polyolefins during melt processing. **Polymer Degradation and Stability**, v. 34, n. 1–3, p. 279–293, 1991.

JABUR, A. R. Thermal degradation effect on the fracture toughness of glass filler reinforced unsaturated polyester resin composite. **The Iraqi Journal For Mechanical And Material Engineering**, v. 11, n. 4, p. 709–719, 2011.

_____. **Michigan Foam**. Disponível em: <http://www.michiganfoam.com/eps_technical_info.html>. Acesso em 10/01/2019.

NASCIMENTO, E. ; PINHEIRO, L. A. Estudo da degradação termo-oxidativa do polietileno de alta densidade. **Anais do 10º Congresso Brasileiro de Polímeros**, 2009.

OH, S. Y. *et al.* FTIR analysis of cellulose treated with sodium hydroxide and carbon dioxide. **Carbohydrate Research**, v. 340, n. 3, p. 417–428, 2005.

RODRIGUES, M. A. **Revalorização de resíduos poliméricos através da produção de blendas ecologicamente corretas contendo materiais biodegradáveis**. Universidade Federal de Pelotas, 2018.

SILVANO, J. D. *et al.* Effect of reprocessing and clay concentration on the degradation of polypropylene/montmorillonite nanocomposites during twin screw extrusion. **Polymer Degradation and Stability**, v. 98, n. 3, p. 801–808, 2013.

SOBRE O ORGANIZADOR

João Dallamuta: Professor assistente da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação em Engenharia de Telecomunicações pela UFPR. MBA em Gestão pela FAE Business School, Mestre pela UEL. Trabalha com Gestão da Inovação, Empreendedorismo e Inteligência de Mercado.

Agência Brasileira do ISBN
ISBN 978-85-7247-355-2

