

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL**  
**ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS**  
**GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**  
**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PAULA DE MARCO**

**AVALIAÇÃO DA DESPOLIMERIZAÇÃO DO POLIESTIRENO EXPANDIDO  
ATRAVÉS DO USO DE MICRO-ONDAS**

**CAXIAS DO SUL**

**2020**

**PAULA DE MARCO**

**AVALIAÇÃO DA DESPOLIMERIZAÇÃO DO POLIESTIRENO EXPANDIDO  
ATRAVÉS DO USO DE MICRO-ONDAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção da aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso da Universidade de Caxias do Sul, para o curso de Engenharia Química, sob a orientação do Prof. Dr. Matheus Poletto e coordenação da Profa. Dra. Eliena Jonko.

**CAXIAS DO SUL**

**2020**

**PAULA DE MARCO**

**AVALIAÇÃO DA DESPOLIMERIZAÇÃO DO POLIESTIRENO EXPANDIDO  
ATRAVÉS DO USO DE MICRO-ONDAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção da aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso da Universidade de Caxias do Sul, para o curso de Engenharia Química, sob a orientação do Prof. Dr. Matheus Poletto e coordenação da Profa. Dra. Eliena Jonko.

**Aprovada em 01 de dezembro de 2020.**

**Banca examinadora**

---

Prof. Dra. Jadna Catafesta  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

---

M. Sc. Christian Manera  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Dedico este trabalho aos meus pais Paulo e Marli pelo incentivo para seguir sempre realizando meus sonhos e por saberem da importância em desferir um sorriso sincero em um dia comum.  
A minha irmã Júlia pelo apoio durante essa jornada e por compartilhar comigo seus voos.

## AGRADECIMENTOS

Ao prof. Dr. Matheus Poletto pela orientação, paciência e apoio durante a realização deste trabalho. Por fazer parte da etapa mais importante desta caminhada.

À Lilian Pires e toda empresa Mundial SA pelo incentivo recebido para a finalização deste trabalho.

À Marisa Tondelo, Camila Bárbara e Gabriela Bavaresco pela torcida para que esse trabalho fosse concluído, além das incansáveis palavras de carinho recebidas durante toda essa caminhada.

Ao doutorando Christian Manera pela parceria construída ao passar dos anos e por ajudar nos detalhes deste trabalho.

Aos técnicos do LPol pelo auxílio nas etapas do trabalho e na realização das análises dos resultados.

À Gabriela Fiorio pela amizade e sintonia, por escutar e entender.

Ao Alberto De Marco Dick, Cristina e Luciano Rottini, Larissa Kasper, Ricardo De Marco e Miriam De Marco pela torcida para com o meu futuro.

Ao Ricardinho, Gabi e Isa por fazerem da vida um eterno arco íris. Pela pureza, doçura e risos sinceros.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos que passaram, ensinaram, foram e, principalmente, aos que permaneceram.

*“Todo o bem que eu puder fazer, toda a ternura que eu puder demonstrar a qualquer ser humano, que eu os faça agora, que eu não os adie ou esqueça, pois não passarei duas vezes pelo mesmo caminho.”*

**James Greene**

## RESUMO

Os materiais poliméricos estão cada vez mais presentes no cotidiano e são descartados em larga escala constituindo um desafio para sua reciclagem. Com isso, o objetivo do estudo foi avaliar a despolimerização do poliestireno expandido (EPS) através do uso de micro-ondas. Para tal, utilizaram-se diferentes teores de negro de fumo (0,0125, 0,125, 0,250, 0,5 e 1 g), mantendo a massa da amostra do EPS fixa em 1 g. Todos os testes ocorreram em 3 ciclos, com tempo total de 12 minutos e, o balão de fundo redondo que continha a amostra, foi isolado com lã de rocha. Para caracterizar o material obtido da despolimerização, realizou-se a Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) e a análise termogravimétrica (TGA). O balanço de massa foi realizado para avaliar o rendimento da despolimerização. Os testes com teores de negro de fumo mais elevados (0,5 e 1 g) não foram satisfatórios, pois degradaram a amostra de EPS no início do primeiro ciclo. Para a amostra com razão em massa de EPS e negro de fumo de 1:0,0125, observou-se a formação de uma maior fração sólida, pouca fração gasosa e nenhuma fração de líquido. A amostra com razão 1:0,125 apresentou frações gasosas e líquidas a partir do segundo ciclo, com menor teor de sólido formado. Com o maior teor de negro de fumo (0,250 g) foi possível notar maiores quantidades formadas de fração gasosa e líquida, gerando menor fração sólida. Notou-se um rendimento de mais de 40% em fração gasosa com a amostra 1:0,250 e menos de 1% com o menor teor de negro de fumo. A análise de FTIR para a amostra 1:0,250 apresentou novas bandas de absorção quando comparada a uma amostra neutra de EPS. Observaram-se picos de degradação no TGA que podem estar correlacionados a formação de compostos mais voláteis após a despolimerização. Este estudo demonstrou a possibilidade de despolimerização do EPS via micro-ondas utilizando estruturas carbonosas, o que pode contribuir para a reciclagem do EPS.

**Palavras-chave:** Poliestireno expandido, despolimerização, micro-ondas, negro de fumo.

## ABSTRACT

Polymeric materials are increasingly present in everyday life and are discarded on a large scale, constituting a challenge for their recycling. Thus, the objective of the study was to evaluate the depolymerization of expanded polystyrene (EPS) through the use of microwave. For this, different levels of carbon black (0,0125, 0,125, 0,250, 0,5 and 1g) were used, keeping the EPS sample mass fixed at 1g. All tests took place in 3 cycles, with a total time of 12 minutes, and the flat-bottomed flask containing the sample was isolated with rock wool. In order to characterize the material obtained from depolymerization, Fourier Transformed Infrared Spectroscopy (FTIR) and thermogravimetric analysis (TGA) were performed. The mass balance was performed to evaluate the depolymerization yield. The tests with higher levels of carbon black (0,5 and 1g) were not satisfactory, as they degraded the EPS sample at the beginning of the first cycle. For the sample with mass ratio of EPS and carbon black of 1:0,0125, the formation of a larger solid fraction, little gas fraction and no liquid fraction was observed. The sample with a 1:0,125 ratio showed gaseous and liquid fractions from the second cycle onwards, with a lower content of solid formed. With the highest content of carbon black (0,250 g) it was possible to notice greater amounts formed of gas and liquid fraction, generating less solid fraction. It was noted a yield of more than 40% in gas fraction with the sample 1:0,250 and less than 1% with the lowest carbon black content. FTIR analysis for sample 1:0,250 showed new absorption bands when compared to a neutral sample of EPS. Peaks of degradation were observed in the TGA that may be correlated with the formation of more volatile compounds after depolymerization. This study demonstrated the possibility of depolymerizing EPS by microwave using carbonaceous structures, which can contribute to the recycling of EPS.

**Keywords:** Expanded polystyrene, depolymerization, microwave, carbon black.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Relação da quantidade de resíduos sólidos urbanos com o aumento da população.....	17
Figura 2 - Estrutura química do poliestireno.....	21
Figura 3 - Método de obtenção do poliestireno expandido.....	22
Figura 4 - Disposição final dos RSU coletados no Brasil em 2016.....	25
Figura 5 - Disposição final dos RSU coletados no Brasil em 2017.....	25
Figura 6 - Fluxograma do funcionamento da reciclagem mecânica .....	28
Figura 7 - Simbologia utilizada para identificação de embalagens poliméricas.....	28
Figura 8 - Fluxograma do funcionamento da reciclagem energética.....	30
Figura 9 - Fluxograma do funcionamento da reciclagem química .....	31
Figura 10 - Esquema do processo de reciclagem do PS com antena de alumínio ...	34
Figura 11 - Esquema do processo de reciclagem do PS pelo MAP .....	35
Figura 12 - Esquema do processo de despolimerização do EPS com uso de micro-ondas e negro de fumo .....	38
Figura 13- Fração sólida obtida na amostra EPS/0,0125C .....	41
Figura 14 - Fração gasosa obtida com maiores teores de negro de fumo .....	42
Figura 15 - FTIR da despolimerização do EPS .....	45
Figura 16 - Curvas termogravimétricas para as amostras estudadas .....	48
Figura 17 - Curvas de DTG das amostras avaliadas.....	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Teores do poliestireno expandido e negro de fumo utilizados .....	38
Tabela 2 - Rendimentos obtidos pela despolimerização .....	40
Tabela 3 - Resultados da despolimerização do EPS em micro-ondas na literatura ..	42
Tabela 4 - Bandas do FTIR obtidas pela despolimerização do EPS .....	46
Tabela 5 - Compostos detectados na literatura .....	47
Tabela 6- Resultados da análise termogravimétrica (TGA).....	49

**LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 - Exemplos de polímeros e suas aplicações .....	20
--	----

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABIQUM – Associação Brasileira de Química

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

Abrapex – Associação Brasileira de Poliestireno Expandido

Abrelpe – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

ASTM – American Society for Testing and Materials

EPS – Poliestireno expandido

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)

NF – Negro de fumo

MAP – Pirólise assistida por micro-ondas

Plastivida – Instituto Socioambiental dos Plásticos

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

PS – Poliestireno

RSU – Resíduos sólidos urbanos

$T_g$  – Temperatura de transição vítrea

WWF – World Wide Fund for Nature

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1	OBJETIVO.....	16
1.1.1	<b>Objetivo geral .....</b>	<b>16</b>
1.1.2	<b>Objetivos específicos .....</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>17</b>
2.1	GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS .....	17
2.2	MATERIAIS POLIMÉRICOS .....	19
2.2.1	<b>Poliestireno.....</b>	<b>21</b>
2.2.2	<b>Poliestireno Expandido .....</b>	<b>22</b>
2.2.3	<b>O mercado do poliestireno e poliestireno expandido.....</b>	<b>22</b>
2.3	CICLO DE VIDA DO POLÍMERO .....	23
2.4	RECICLAGEM DE POLÍMEROS.....	24
2.5	TIPOS DE RECICLAGEM DE POLÍMEROS .....	26
2.6	PROCESSOS DE RECICLAGEM DE POLÍMEROS .....	27
2.6.1	<b>Reciclagem Mecânica .....</b>	<b>27</b>
2.6.2	<b>Reciclagem Energética.....</b>	<b>29</b>
2.6.3	<b>Reciclagem Química .....</b>	<b>30</b>
2.7	ESTUDOS REFERENTES À RECICLAGEM DO PS E EPS .....	31
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>37</b>
3.1	MATERIAIS .....	37
3.2	MÉTODOS .....	37
3.2.1	<b>Processamento de reciclagem do EPS reciclado .....</b>	<b>37</b>
3.3	CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS OBTIDOS .....	39
3.3.1	<b>Balço de massa.....</b>	<b>39</b>

<b>3.3.2</b>	<b>Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)</b>	<b>39</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Análise Termogravimétrica (TGA)</b> .....	<b>39</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>40</b>
4.1	BALANÇO DE MASSA.....	40
4.2	ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR).....	43
4.3	ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA) .....	47
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>51</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>52</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>53</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As questões relacionadas ao meio ambiente estão sendo tratadas com relevância por diferentes áreas do conhecimento, com o objetivo de reduzir os danos causados à natureza (ASHTON, 2017). A tecnologia cresceu muito nos últimos anos, trazendo inúmeros benefícios para a sociedade e para a vida apressada que todos têm.

Em virtude disso, muitos artefatos foram criados de modo a facilitar o cotidiano de quem tem pouco tempo, como embalagens que contêm comida ou o café de máquina, ambos produzidos a partir de materiais poliméricos. A maioria das embalagens da indústria alimentícia, por exemplo, são produzidas a partir de poliestireno expandido (EPS).

A quantidade de produtos que são base EPS acarreta em um aumento da geração de resíduos sólidos urbanos, principalmente por não haver conhecimento de que esses produtos possam ser reciclados. A reciclagem de polímeros, portanto, é uma das alternativas mais viáveis para diminuir o impacto ambiental causado quando os materiais utilizados de forma rápida e constante são dispostos em aterros sanitários (WIEBECK e PIVA, 2004).

Além das legislações cada vez mais rígidas em relação ao meio ambiente, os fatores que incentivam a reciclagem de materiais poliméricos procedem da necessidade de economizar e preservar os recursos, bem como minimizar os resíduos despejados em lugares inadequados. Com isso, alguns estudos estão sendo feitos para aprimorar as técnicas de reciclagem, como a despolimerização de polímeros utilizando fornos de micro-ondas domésticos.

Observando-se que não há uma grande preocupação com a diminuição do consumo de materiais que são facilmente descartáveis, é de suma importância que haja um engajamento com a reciclagem dos mesmos. Ademais, o presente trabalho possui como objetivo a reciclagem do EPS pós-consumo, visando às técnicas de reciclagem, os possíveis novos produtos gerados e a diminuição de sua quantidade em aterros sanitários.

## 1.1 OBJETIVO

### 1.1.1 Objetivo geral

Avaliar o processo de despolimerização do poliestireno expandido através do uso de micro-ondas.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Avaliar o efeito da variação do teor de negro fumo (0,0125, 0,125, 0,25, 0,50 e 1 g) adicionado ao EPS na despolimerização em micro-ondas.

Avaliar o rendimento do processo.

Caracterizar os compostos obtidos através de propriedades químicas e térmicas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

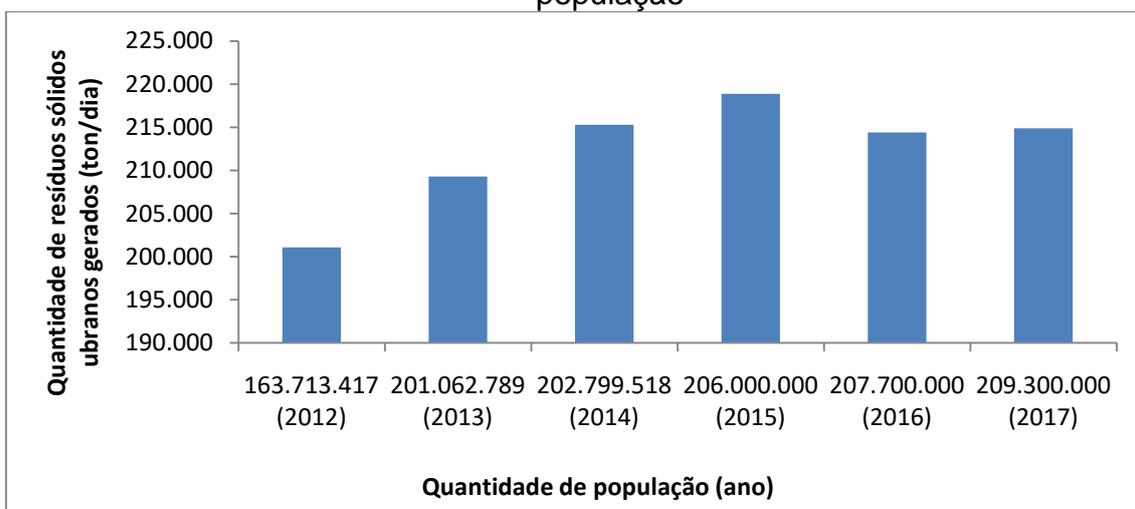
### 2.1 GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

A área tecnológica cresceu muito nos últimos anos, juntamente com o aumento da população, facilitando o cotidiano da sociedade, principalmente pela produção de embalagens descartáveis após o consumo imediato. Conseqüentemente, houve um acréscimo na geração de resíduos sólidos urbanos no país e no mundo (LANDIM et al, 2015).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), através da NBR 10004, definiu os resíduos sólidos como sendo os resíduos nos estados sólido e semissólido, resultantes de atividades que possuem origem industrial, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Podem ser classificados, ainda, em perigosos, não perigosos, inertes e não inertes.

A partir de informações divulgadas pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (Abrelpe) e pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), observa-se, na Figura 1, o aumento da geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) no Brasil com o crescimento populacional, a partir do ano de 2012.

Figura 1 – Relação da quantidade de resíduos sólidos urbanos com o aumento da população



Fonte: Adaptado de Abrelpe (2012-2017).

Percebe-se, que do ano de 2012 para 2013, a população aumentou aproximadamente 22,8% e a geração de RSU subiu 4,09%. Em contrapartida, do

ano de 2014 para 2015, a quantidade de habitantes cresceu 1,58% e os resíduos sólidos 1,66%. O ano de 2015, a partir dos números, marcou um ponto importante para a área ambiental, visto que houve um aumento maior de geração de resíduos do que de pessoas.

Além da definição da NBR 10004, os resíduos sólidos urbanos são popularmente conhecidos como os resíduos que provém das atividades domésticas e comerciais da sociedade, podendo ser classificados como papel e papelão, vidros, metais, polímeros e matéria orgânica. Os dados divulgados no panorama da Abrelpe de 2017 revelam uma geração de RSU de 78,4 milhões de toneladas no Brasil, no referido ano, com somente 91,2% de resíduos coletados, enquanto o restante possuiu destinação imprópria.

Segundo o relatório intitulado “Solucionar a poluição plástica: transparência e responsabilização”, do ano de 2019, produzido e divulgado pelo World Wide Fund for Nature (WWF), desde 2000, o mundo produziu a mesma quantidade de polímeros que em todos os anos anteriores somados. Esse fato é decorrente do baixo custo de produção, da versatilidade e da confiabilidade do polímero, fazendo com que haja um incentivo para a criação de produtos descartáveis, porém, metade de todo os polímeros produzidos se tornam resíduos em até 3 anos.

A pesquisa mostrou que, no ano de 2016, 37% de todo o resíduo polimérico não havia sido tratado de forma correta, isto é, acabaram sendo descartados em locais abertos, ruas ou aterros sanitários não regulamentados. Concluiu-se, ainda, que 80% dos polímeros encontrados em oceanos podem ter sido originários de poluição terrestre. T tamanha quantidade de resíduos encontrados em oceanos e mares pode vir a degradar ou a destruir o ambiente natural da espécie marinha.

No relatório, é estimado que a poluição polimérica dobre até o ano de 2030, sendo os oceanos ainda os mais afetados, uma vez que o crescimento de consumo é maior que o crescimento da capacidade de tratamento de resíduos. Para diminuir o consumo e conseqüentemente a geração de resíduos, é recomendado que fossem eliminados os produtos de uso único e que possuam vida útil de até 1 ano, além de incentivar, financeira e tecnicamente os países média-baixa e baixa renda, para que consigam descartar de forma eficiente seus resíduos.

## 2.2 MATERIAIS POLIMÉRICOS

Os polímeros naturais, que são derivados de plantas e animais, como celulose, latex, lã, algodão, couro e seda e são usados há muito tempo. Já os que provêm de enzimas, são também naturais e com grande importância em processos biológicos e fisiológicos nas plantas e nos animais. Com o passar dos anos, foi possível determinar e desenvolver polímeros, que são sintetizados a partir de moléculas orgânicas pequenas (CALLISTER, 2008).

Conforme Canevarolo (2006, p. 46-52), os polímeros podem ser classificados:

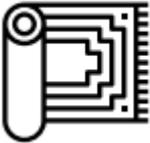
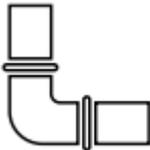
- a) quanto a sua estrutura química – cadeia carbônica ou heterogênea;
- b) quanto ao método de preparação – polímeros de adição ou condensação;
- c) quanto ao comportamento mecânico – plásticos, elastômeros e fibras e;
- d) quanto ao desempenho mecânico – termoplásticos convencionais (*Commodities*), especiais, de engenharia ou de engenharia especiais.

A síntese de polimerização é o processo pelo qual os monômeros são ligados uns aos outros, gerando longas cadeias compostas por unidade de repetição. Geralmente, as matérias-primas para os polímeros sintéticos são derivadas do carvão, do gás natural e do petróleo. As reações podem ser classificadas, de forma geral, em adição e condensação, de acordo com o mecanismo.

Ainda, segundo Callister (2008, p. 408), a polimerização por adição ou reação em cadeia, é um processo no qual as unidades dos monômeros são unidas, uma de cada vez, de forma que se assemelhe a uma cadeia, formando uma macromolécula linear. Por sua vez, a polimerização por condensação ou reação em estágios, é baseada na formação de polímeros a partir de reações intramoleculares, podendo envolver mais de uma espécie de monômero e o que importa não é a química da reação, mas sim o mecanismo de polimerização.

Alguns exemplos de polímeros comuns de uso cotidiano, com suas aplicações, estão descritos no Quadro 1.

Quadro 1 - Exemplos de polímeros e suas aplicações

Polímero	Aplicações
Polietileno Tereftalato (PET) 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Garrafas.</li> <li>• Recipientes para alimentos.</li> <li>• Vestuário de poliéster.</li> <li>• Mantas de primeiros socorros.</li> </ul>
Polipropileno 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carpetes, tapetes e estofados.</li> <li>• Equipamentos de laboratório.</li> <li>• Partes automotivas.</li> <li>• Dispositivos médicos.</li> </ul>
Polietileno 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sacolas plásticas e de resíduos.</li> <li>• Recipientes para alimentos.</li> <li>• Embalagens de <i>hardware</i> de computador.</li> <li>• Acessórios e equipamentos de playgrounds.</li> </ul>
Policloreto de vinila (PVC) 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produtos de encanamento.</li> <li>• Isolamento de cabos elétricos.</li> <li>• Vestuários.</li> <li>• Tubos hospitalares.</li> </ul>
Poliestireno (PS) 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Recipientes para alimentos e bebidas.</li> <li>• Isolamento para construção.</li> <li>• Materiais para embalagens.</li> <li>• Caixas de CD's.</li> </ul>

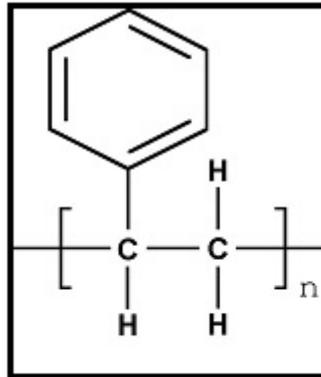
Fonte: Adaptado de Albuquerque (2001) e WWF (2019).

São exemplos de polímeros de cadeia heterogênea os polímeros de dienos, clorados, fluorados, acrílicos, estirênicos. Dentre todos os produtos que derivam do estireno, o poliestireno (PS) é o mais importante, por ser obtido a partir de fácil processamento, possuir baixo custo, bem como possuir resistência ao impacto, resistência térmica e química; podendo assim ser classificado em relação ao seu comportamento e desempenho mecânico (ALBUQUERQUE, 2001).

### 2.2.1 Poliestireno

O poliestireno, segundo Albuquerque (2001, p. 126) foi produzido em quantidades insignificantes até 1946. Sua estrutura química está representada na Figura 2.

Figura 2 - Estrutura química do poliestireno



Fonte: CALLISTER, 2008.

Os materiais poliméricos podem ser classificados em termoplásticos e termorrígidos. O PS é um termoplástico obtido por polimerização em massa, solução, suspensão ou emulsão do monômero de estireno. Amolece e se liquefaz quando é aquecido e endurece uma vez resfriado. Esse processo é reversível e pode ser repetido (CANEVAROLO, 2006).

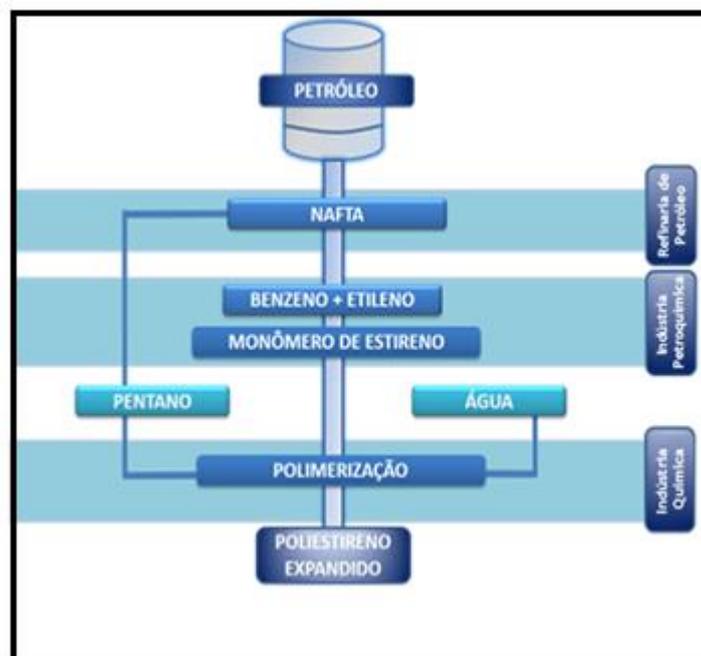
Quando ocorre o fenômeno de transformação de um material sólido com sua estrutura ordenada de cadeias moleculares alinhadas em um líquido viscoso com a estrutura aleatória, diz-se que acontece na temperatura de fusão. Já a temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) é relacionada à temperatura em que o polímero transita do estado que possui características de borracha para o estado rígido (CALLISTER, 2008).

O PS, na temperatura ambiente, é um polímero vítreo, que apresenta baixa absorção de energia sob impacto, em decorrência a sua ausência de mobilidade local de segmentos de cadeia, uma vez que sua  $T_g$  ocorre entre 90 e 100 °C (GRASSI, 2001). É caracterizado por sua transparência, sua dureza e sua facilidade de processamento. Originalmente, é duro e amorfo, mas pode apresentar maior resistência ao impacto uma vez modificado (ALBUQUERQUE, 2000).

### 2.2.2 Poliestireno Expandido

O poliestireno expandido (EPS) é um polímero de estrutura celular rígida, que é resultado da polimerização do estireno com água, conforme ilustra a Figura 3. O produto final são pérolas, sendo compostas por 98% de ar e 2% de estireno. Elas são destinadas à expansão, que, por meio de vapor, acabam sendo fundidas e moldadas em diferentes formas (Associação Brasileira do Poliestireno Expandido, 2000).

Figura 3 - Método de obtenção do poliestireno expandido



Fonte: ABIQUIM, 2019.

O EPS foi descoberto na Alemanha, em 1949, pelos químicos Fritz Stasny e Karl Buchholz. No Brasil, é conhecido como Isopor<sup>®</sup>, marca que pertence a empresa Kanuf (ABIQUIM, 2019).

### 2.2.3 O mercado do poliestireno e poliestireno expandido

A revista de divulgação científica brasileira Pesquisa FAPESP, mostrou em seu estudo publicado em julho de 2019, que o PS produzido mundialmente foi de 25 milhões de toneladas, gerando 17 milhões de toneladas de resíduos, em 2015.

O EPS é bastante utilizado, como já citado, para embalagens e na construção civil, isso é decorrente de ser um material isolante e resistir às temperaturas de -50 °C até -80 °C. Aplica-se o EPS na área de construção civil, pois é de fácil manuseio,

leve, tem economia no corte e na mão de obra. Pode ser usado em isolamentos, em painéis divisórios, drenagem, etc (ABIQUIM, 2019).

Também pode ser usado como concreto leve, pois pode ser utilizado de diversas maneiras, além de ser moldado com diversos tamanhos e formatos. A vantagem mais evidente é a redução da massa específica do concreto, de custos com o transporte e agilidade de movimentação com o material (EPS Brasil, 2019).

O EPS é utilizado nas mais diversas formas de embalagens, como caixas térmicas, para conservar alimentos e até embalar eletrodomésticos, pois o material protege contra o impacto, vibrações e protege no transporte. As embalagens englobam às usadas por floriculturas, quando as mesmas vendem mudas dentro de bandejas, fabricadas com EPS (EPS Brasil, 2019).

Em 2017, segundo a Associação Brasileira de Química (ABIQUIM), a produção de EPS no Brasil alcançou 91,7 mil toneladas, representando um aumento de 9% em relação ao ano de 2016. A maior parte produzida foi destinada para a construção civil e o setor de embalagens.

Conforme a Associação Brasileira de Poliestireno Expandido (Abrapex), o Brasil, no ano de 2000, movimentou mais de dez bilhões de reais no setor de embalagens. O EPS é utilizado nas embalagens pelas suas vantagens, como ser impermeável, facilidade de desembalar, permite maiores níveis de empilhamento, além de que cada cliente pode possuir sua própria embalagem caracterizada.

Segundo a ABIQUIM, o Brasil reciclava apenas 13,9% do EPS descartado em 2008. Já no ano de 2014, o país conseguiu aumentar o número para 35%, o que representou, na época, mais de 13 mil toneladas recicladas do pós-consumo do material.

### 2.3 CICLO DE VIDA DO POLÍMERO

A análise do ciclo de vida permite o desenvolvimento de critério e procedimentos para avaliar o impacto ambiental de produtos. Essa avaliação abrange a vida completa do produto, desde quando é criado até o seu descarte ou recuperação.

Primeiramente, a matéria-prima do produto é analisada, para saber se provém de recursos naturais ou não, depois são estudadas as gerações de subprodutos ou se os resíduos são contaminantes. Por fim, observa-se se há a possibilidade de reutilização, reciclagem ou qual a forma apropriada do descarte, após o consumo (WIEBECK; PIVA, 2004).

A vida útil do polímero depende de qual a sua finalidade, uma vez que é constituído por diversos aditivos, fazendo com que cada polímero seja extremamente característico. O EPS, por exemplo, tem tempo indeterminado para decompor-se (ZANIN e MANCINI, 2004).

Ainda conforme o estudo de Wiebeck e Piva (2004), as mesmas indústrias que fabricam, processam ou transformam os polímeros, enfrentam os problemas ambientais e tecnológicos, com o desafio de criarem novos produtos com um tempo de vida útil menor.

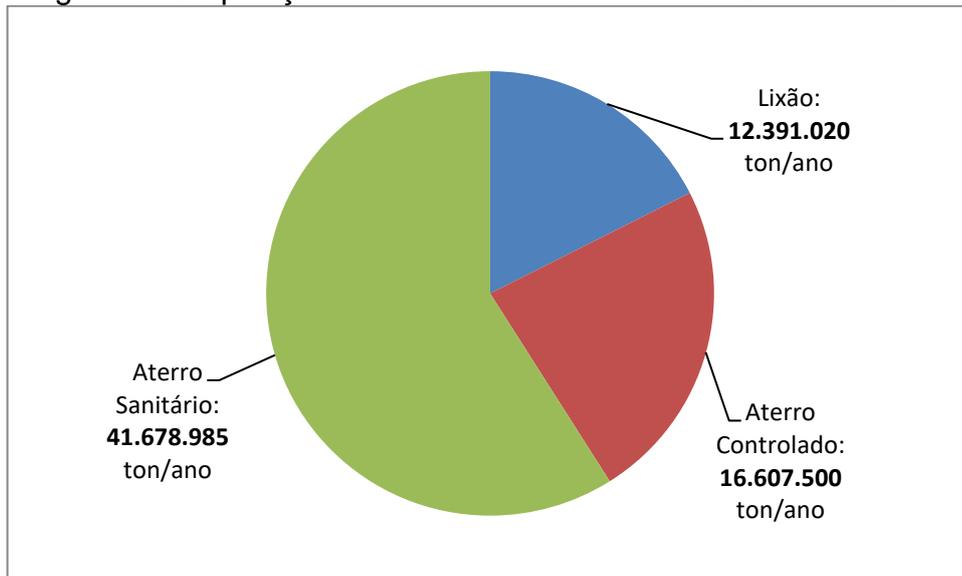
Desde que sejam conhecidas informações suficientes sobre os polímeros, a decomposição dos mesmos pode acontecer, de forma química ou física, desde que suas propriedades sejam divulgadas e que se tenha um interesse comercial para reciclar o produto, além de um incentivo financeiro para o processo de reciclagem se tornar mais viável do que descartar o polímero em lugares inadequados (ZANIN e MANCINI, 2004).

## 2.4 RECICLAGEM DE POLÍMEROS

Os polímeros, apesar de seu aspecto físico comercialmente atraente, apresentam propriedades químicas que os fazem tecnologicamente interessantes. No entanto, os polímeros são um problema ambiental quando descartados incorretamente (WIEBECK e PIVA, 2004).

O Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil de 2017, divulgado pela Abrelpe, informou que 59,1% dos RSU foram encaminhados para aterros sanitários, e 22,9% e 18% para os aterros controlados e lixões, respectivamente. Infelizmente, os aterros controlados e lixões estão presentes em todas as regiões do Brasil, recebendo mais de 80 mil toneladas por dia de RSU. A Figura 4 mostra esses percentuais relacionados ao ano de 2016.

Figura 4 - Disposição final dos RSU coletados no Brasil em 2016

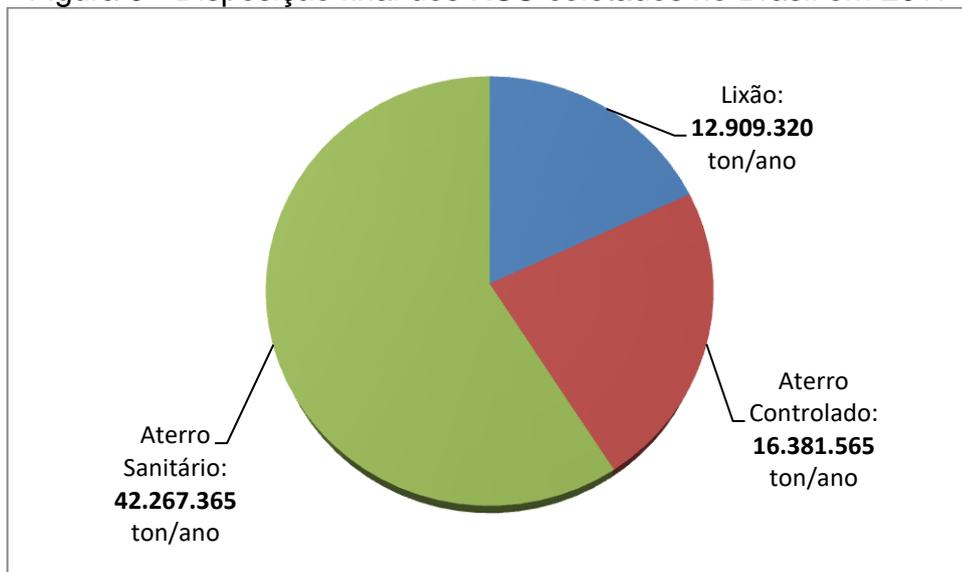


Fonte: Adaptado de Abrelpe, 2017.

Percebe-se, a partir da Figura 4, que a maior parte dos RSU gerados foram destinados aos aterros sanitários. Observa-se que ainda ocorre a destinação em lixões e que o número não está tão distante dos aterros controlados, o que mostra um potencial de poluição ambiental e impactos negativos à saúde, quando são descartados dessa forma.

A Figura 5 expõem os dados da disposição final dos RSU no Brasil, no ano de 2017.

Figura 5 - Disposição final dos RSU coletados no Brasil em 2017



Fonte: Adaptado de Abrelpe, 2017.

Observa-se, que do ano de 2016 para 2017, as quantidades dos RSU que foram descartados em lixões e em aterros controlados se mantiveram muito próximas. Esse fato é preocupante, uma vez que a Lei nº 12.305, da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), diz respeito sobre o fim dos aterros sanitários até o ano de 2021 para todo o Brasil, sendo necessário pensar sobre diferentes tipos de reciclagem.

Na Alemanha, a famosa marca Adidas assumiu um compromisso ambiental, cujo objetivo é utilizar, a partir de 2024, resíduos poliméricos em sua operação de produção. A empresa possui a expectativa de reduzir cerca de 40 toneladas de resíduos (Braskem, 2018).

Se os produtos poliméricos que possuem vida útil de até 1 ano forem eliminados, de forma gradativa, existe a possibilidade de diminuir a demanda dos polímeros em até 40%, até o ano de 2030. Conseqüentemente, a redução dos resíduos pode cair para até 57%, em relação ao cenário atual (WWF, 2019).

Em decorrência do histórico da má reciclagem e da situação atual do meio ambiente, cada vez mais estão sendo procurados incentivos para reciclar os polímeros após o seu consumo, com a finalidade de reutilizá-los e tentar diminuir o impacto causado quando descartados em lugares não apropriados.

## 2.5 TIPOS DE RECICLAGEM DE POLÍMEROS

A American Society for Testing and Materials (ASTM D5033), de modo a unificar conceitos, regularizou uma divisão dos tipos de reciclagem de polímeros:

- a) Reciclagem primária – utiliza resíduos da indústria de polímeros para a conversão, visto que a matéria-prima é de fonte confiável e limpa. Ocorre através da seleção de resíduos, moagem, lavagem, secagem e reprocessamento em equipamentos como extrusoras e injetoras. Os novos produtos devem ter características equivalentes aquelas dos produtos originais, produzidos com polímeros virgens.
- b) Reciclagem secundária – possui o mesmo princípio da reciclagem primária, mas a matéria-prima pode provir de sucatas ou resíduos poliméricos. Nesse caso, o produto final obtido tem propriedades inferiores ao de origem.

- c) Reciclagem terciária – realizada através de processos tecnológicos, como a despolimerização. Os produtos obtidos através desse procedimento podem ser submetidos a novos processos de polimerização, processamento, industrialização e utilização.
- d) Reciclagem quaternária – consiste em reciclar o polímero pela combustão, com o objetivo de aproveitar o conteúdo energético. Geralmente, os produtos finais são a energia e a emissão gasosa, obtendo dióxido de carbono, quando a combustão é completa (EHRIG, 1992; ZANIN, 2004).

A reciclagem primária e secundária também são conhecidas como reciclagem mecânica ou física, mas o diferencial é que na reciclagem primária são utilizados polímeros pós-industrial, enquanto na secundária, é pós-consumo. Chama-se de química e energética, respectivamente, a reciclagem terciária e quaternária (SPINACÉ e DE PAOLI, 2005).

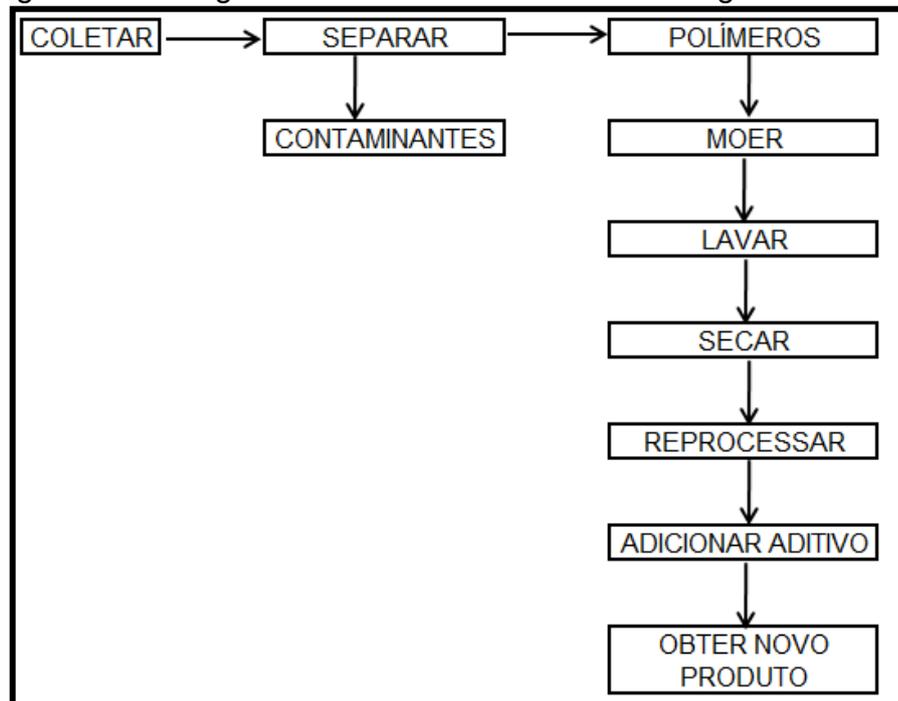
## 2.6 PROCESSOS DE RECICLAGEM DE POLÍMEROS

Há outra divisão disposta pela ASTM, que ressalta sobre o processo de reciclagem que o polímero sofrerá, sendo a reciclagem mecânica, energética e química.

### 2.6.1 Reciclagem Mecânica

A reciclagem mecânica acontece pelo reprocessamento por extrusão, injeção, termoformagem, moldagem por compressão e para esses métodos ocorrerem, são necessários outros procedimentos, que incluem etapas de separação do resíduo polimérico, moagem, lavagem, secagem, reprocessamento e a transformação do polímero em produto acabado, como ilustra a Figura 6 (SPINACÉ e DE PAOLI, 2005).

Figura 6 - Fluxograma do funcionamento da reciclagem mecânica

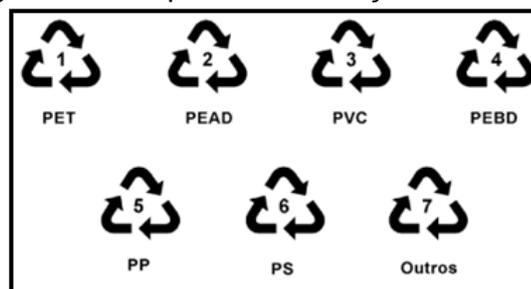


Fonte: Adaptado de Braskem, 2018.

Na etapa de separação, limitam-se as impurezas para níveis inferiores a 1% m/m, visto que a presença de contaminantes indesejados pode vir a alterar as propriedades dos polímeros. A separação dos polímeros pode ser manual ou automatizada e no Brasil, em virtude da maioria das empresas de reciclagem ser de pequeno porte, com a mão de obra mais barata, a separação se ocorre, na maioria das vezes, de forma manual (SPINACÉ e DE PAOLI, 2005).

Através da identificação da simbologia que contém nas embalagens dos produtos (Figura 7) fornecida pela NBR 13.230 da ABNT ou pela utilização de testes como odor dos vapores de queima, aparência da chama, temperatura de fusão e solubilidade, sendo baseados em suas características físicas e de degradação térmica, que são distintas, consegue-se separar os polímeros.

Figura 7 - Simbologia utilizada para identificação de embalagens poliméricas



Fonte: ABNT NBR 13230.

Sendo:

- PET = Poli(tereftalato de etileno);
- PEAD = Polietileno de alta densidade;
- PVC = Poli(cloreto de vinila);
- PEBD = Polietileno de baixa densidade;
- PP = polipropileno e;
- PS = Poliestireno.

Depois de separados, os resíduos poliméricos são moídos em moinhos de facas rotativas e peneirados na forma de “pellets”. Ressalta-se a importância de que o material moído tenha dimensões uniformes para que a fusão ocorra também com uniformidade. A presença de pó, por sua vez, atrapalha o escoamento do material nos equipamentos de processo (SPINACÉ e DE PAOLI, 2005).

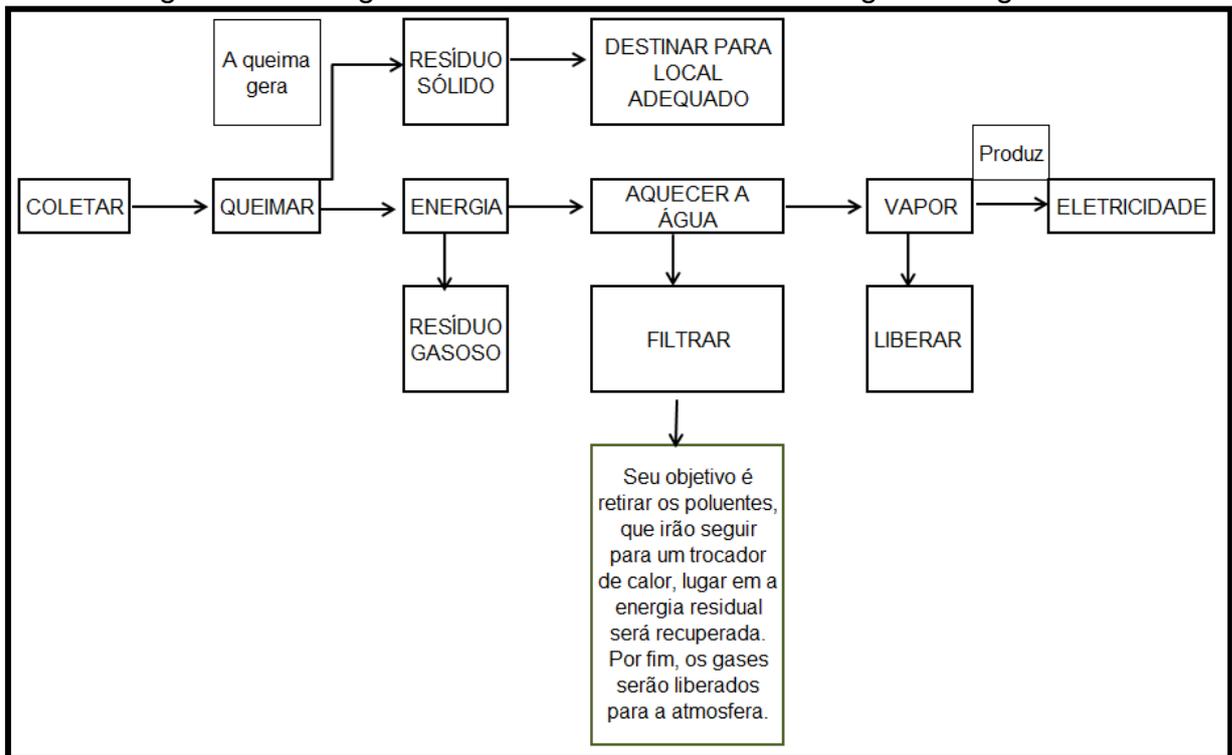
Após a moagem, o polímero é lavado em tanques. A secagem é muito importante, pois alguns polímeros podem sofrer hidrólise durante o reprocessamento e pode ser realizada por processo mecânico ou térmico. Por fim, são colocados aditivos como antioxidantes, plastificantes etc. Esse polímero reciclado é utilizado para a fabricação de outros produtos, diferentes dos que deram origem ao resíduo (ZANIN e MANCINI, 2004).

### **2.6.2 Reciclagem Energética**

A reciclagem energética é a tecnologia que transforma os resíduos em energia elétrica ou térmica, aproveitando o alto poder calorífico que os polímeros contêm para a realização do processo. A combustão é realizada com excesso de oxigênio, a fim de produzir dióxido de carbono, água (vapor) e energia (ZANIN; MANCINI, 2004).

Todos os gases quentes são aspirados para uma caldeira de recuperação, lugar em que é produzido o vapor. A Figura 8 exemplifica o processo da reciclagem energética, contendo todas as etapas.

Figura 8 - Fluxograma do funcionamento da reciclagem energética



Fonte: Adaptado de Braskem, 2018.

A vantagem da reciclagem energética é o fato de que todos os polímeros podem estar misturados, não necessitando uma separação prévia. Em virtude do poder calorífico do polímero ser elevada, um quilo de polietileno possui capacidade de gerar 12 kWh de energia, valor semelhante ao do óleo diesel (ZANIN; MANCINI, 2004).

De acordo com o Instituto Socioambiental dos Plásticos (Plastivida, 2010), a reciclagem energética diminui o problema dos aterros sanitários, reduzindo a emissão de gases nesses lugares, bem como o impacto ambiental negativo causado com a existência desses locais. Tal reciclagem permite que haja a recuperação energética dos materiais poliméricos, com a possibilidade de ser aplicada em centros urbanos, acarretando na diminuição do custo do transporte do resíduo para aterros que, anteriormente, eram mais distantes.

### 2.6.3 Reciclagem Química

A reciclagem química envolve a despolimerização do polímero, com o objetivo de obter produtos químicos básicos a partir dos resíduos poliméricos. Pode ser dividida em solvólise e em reciclagem termoquímica (ZANIN; MANCINI, 2004).

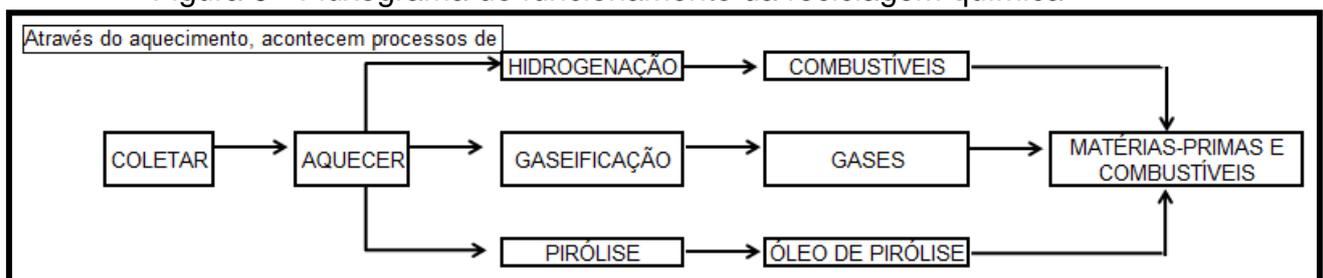
Na solvólise, a base da despolimerização é o uso de solvente e o processo é viável para polímeros que provêm da polimerização em etapas ou de condensação (ZANIN; MANCINI, 2004). Assim, os polímeros são decompostos até as moléculas originais ou intermediárias dos produtos que os originaram, possibilitando o reaproveitamento na produção de novos polímeros (PIVA; WIEBECK, 2004).

Na reciclagem termoquímica, a estrutura química do polímero é destruída por meio de calor e, normalmente, usam-se oxigênio e hidrogênio, como reagentes do processo. Os métodos englobados são a pirólise, gaseificação e hidrogenação.

A pirólise é uma tecnologia da reciclagem química, definida como uma fragmentação térmica de moléculas grandes em menores, na ausência ou na deficiência de oxigênio da atmosfera. Possui diversas vantagens, principalmente para resolver problemas dos resíduos sólidos, seja como fonte de redução de resíduos pós-consumo ou como fonte de matéria-prima para novos materiais poliméricos (MUSTAFA, 1993).

Na hidrogenação, por sua vez, as cadeias dos polímeros são quebradas usando hidrogênio e calor, resultando em produtos que podem ser processados por refinarias (SPINACÉ; DE PAOLI, 2005). A finalidade é a obtenção de um produto líquido, com valor agregado maior daqueles obtidos pela pirólise ou hidrogenação (ZANIN; MANCINI, 2004). A Figura 9 elucida as etapas da reciclagem química.

Figura 9 - Fluxograma do funcionamento da reciclagem química



Fonte: Adaptado de Braskem, 2018.

## 2.7 ESTUDOS REFERENTES À RECICLAGEM DO PS E EPS

Segundo Hussain et al (2011), o descarte de polímeros é uma grande ameaça ao meio ambiente, pois a maioria não é biodegradável. Quando descartados em aterros sanitários, ocupam muito espaço e a sua incineração é um processo caro.

Prathiba (2018), por sua vez, ressalva que os polímeros são produtos relativamente baratos e modernos.

Undri et al (2013) destacam que o PS é o termoplástico aromático mais empregado no mundo, pois pode ser utilizado desde embalagens para comida até como isolante térmico em construções. A matéria-prima aromática é obtida a partir do refino de frações de petróleo, sendo de suma importância à reciclagem dos resíduos de PS, com o objetivo de não poluir o meio ambiente e preservar as reservas de petróleo.

Em virtude de sua alta estabilidade e baixa densidade, o PS causa um rápido enchimento em aterros sanitários, sendo assim, os processos de reciclagem estão se tornando cada vez mais obrigatórios (BARTOLI et al, 2015). O principal processo considerado é a reciclagem mecânica, mas a mesma não é aplicada quando o resíduo provém contaminado ou degradado.

Portanto, nos últimos anos, as tecnologias como combustão e pirólise foram sendo desenvolvidas, como a pirólise assistida por micro-ondas (MAP, sigla em inglês). O MAP é uma abordagem rápida e ecológica da pirólise, com o objetivo de processar diferentes materiais (BARTOLI et al, 2015).

O aquecimento por micro-ondas tornou-se uma alternativa viável, pois fornece aquecimento homogêneo e volumétrico. As reações rápidas, a seletividade do produto e a relação custo-benefício fez com que essa tecnologia se tornasse útil na área da química. Esses fornos de micro-ondas podem fazer com que a temperatura alcance até 1000 °C (1273 K) (HUSSAIN et al, 2011).

Bartoli et al (2015) concluíram que a despolimerização é uma maneira de processar os resíduos de PS, recuperando o estireno e demais hidrocarbonetos aromáticos. Representa um processo químico eficiente para esse tipo de polímero, obtendo outros produtos, além de não poluir o meio ambiente.

Os resíduos para o experimento de Bartoli et al (2015) foram obtidos de caixas limpas, sendo aquecidos a 380 K, com o intuito de obter flocos de tamanho 2 cm x 2 cm. A pirólise foi realizada em um forno micro-ondas, que trabalhou com 2,45 GHz e foi equipado com um termômetro infravermelho, fornecendo informações sobre a

temperatura geral do interior do forno e não sobre a temperatura na superfície da amostra.

Os flocos foram misturados com o absorvedor de micro-ondas antes da pirólise e, posteriormente, aquecidos em uma atmosfera de nitrogênio, formando um líquido marrom. A pirólise foi interrompida quando não se detectava mais a evolução de gás e a concentração máxima de estireno no líquido, em peso, foi atingida quando se utilizou um sistema de fracionamento, com pressão residual de 21,3 kPa.

O estudo foi realizado com três modificações de equipamentos, visto que na primeira, uma bomba de vácuo de membrana foi inserida entre o sistema de coleta e líquido e o suporte de gás para obter menos pressão no interior do forno, denominado de A.

O segundo experimento (B) ocorreu com os mesmos equipamentos já descritos, porém, uma coluna de fracionamento foi adicionada entre o forno e o sistema de condensação. O terceiro equipamento usou o mesmo princípio de A, juntamente com uma corrente de nitrogênio, que era medida com um medidor de vazão, enquanto o sistema de vácuo era eliminado.

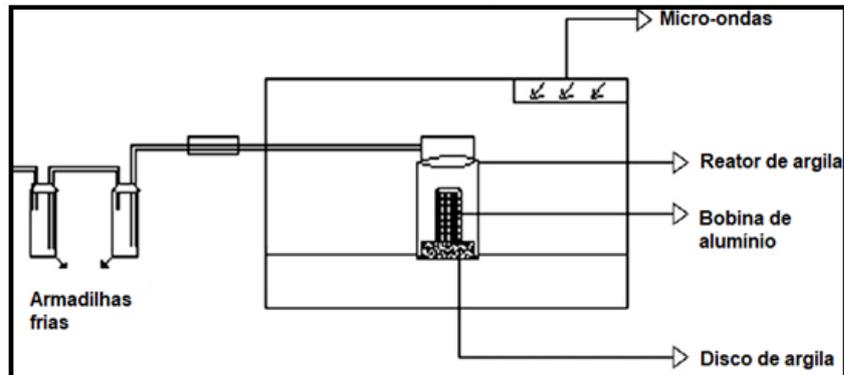
Após realizar o experimento com modelos de equipamentos diferentes (A, B ou C), variando pressão e temperatura, Bartoli et al (2015), atribuíram o alto rendimento de líquido, maior de 90%, à destilação rápida de compostos formados a partir da degradação térmica, evitando a degradação do carvão. Com a configuração B, o rendimento de líquido foi maior de 80%, havendo um aumento do rendimento sólido.

Notou-se, no trabalho, que os melhores resultados foram obtidos com a temperatura mais alta, próxima de 570 K e que a diminuição da pressão resultou em um rendimento menor. O uso da corrente de nitrogênio, do equipamento C, facilitou a destilação do resíduo, resultando em um maior rendimento de líquido, com menos tempo.

Hussain et al (2011) investigaram se a pirólise é decorrente do fluxo de micro-ondas ou do aquecimento. Concluíram que é devida ao calor gerado na antena de alumínio, visto que o PS é transparente às micro-ondas. Para o experimento, usaram um forno de micro-ondas doméstico, abriram uma espécie de janela na

lateral do equipamento e colocaram uma bobina de alumínio, dentro do forno, que foi utilizada como fonte de calor. A Figura 10 exemplifica o processo.

Figura 10 - Esquema do processo de reciclagem do PS com antena de alumínio



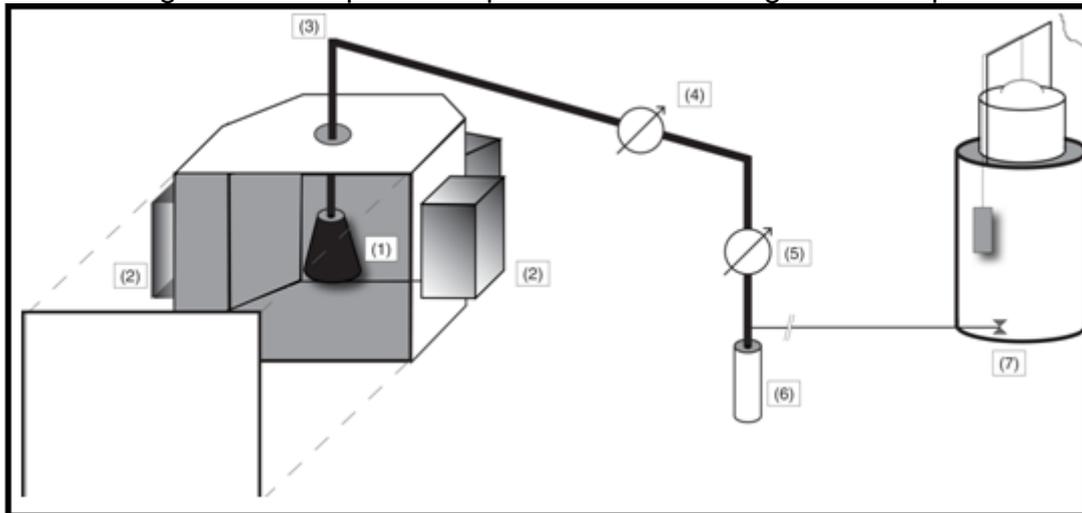
Fonte: Adaptado de Hussain et al (2011).

O resíduo de PS foi convertido em gases, óleo e carvão através da pirólise por interação de micro-ondas com a antena de alumínio, processo que resulta em maior eficiência do que o convencional. Os produtos gasosos foram determinados com testes químicos, a partir de uma solução de cloreto de cobre I e permanganato de potássio. O melhor rendimento foi a conversão de 88% de PS em líquido (HUSSAIN et al, 2011).

Undri et al (2013) destacam que a pirólise do PS aconteceu com temperatura de 623 K, em um forno micro-ondas, com potência de 3 kW, obtendo um líquido viscoso escuro, rico em compostos aromáticos, como benzeno, tolueno, etilbenzeno e estireno. Os experimentos foram realizados em atmosfera sem qualquer gás de arraste, evitando a formação de compostos com nitrogênio.

A despolimerização dos seus resíduos de PS ocorreu com o objetivo de produzir estireno e outros compostos aromáticos através do MAP, sendo executado por diferentes potências e absorvedores. Um líquido claro e de baixa viscosidade, contendo estireno, sempre foi coletado como principal produto. A Figura 11 ilustra o esquema do MAP utilizado.

Figura 11 - Esquema do processo de reciclagem do PS pelo MAP



Fonte: UNDRI et. al, 2013.

Sendo:

- 1- Reator;
- 2- Geradores de micro-ondas;
- 3- Termômetro;
- 4- Resfriador a 298 K;
- 5- Resfriador a 263 K;
- 6- Frasco coletor de líquido e;
- 7- Sistema de coleta de gás.

Prathiba et al (2018) observam, ainda, que o estudo de micro-ondas foi estendido para a pirólise de resíduos de polímeros, como o PS, na presença de alumínio e conseqüentemente, sua interação com as micro-ondas, com o objetivo de reciclar e poluir menos o meio ambiente.

No experimento, usou-se forno um micro-ondas com potência de 450 W, temperatura de 330 °C, resíduo de PS juntamente com carvão ativado. Essas condições resultaram no melhor rendimento, de aproximadamente 93%.

A despolimerização foi realizada com temperatura de 450-550 °C, baseada, segundo Maksimov et al (2019), em demais literaturas do assunto. Nesse trabalho, quando a temperatura subiu de 450 °C para 500 °C, percebeu-se um aumento de

rendimento do polímero, de 66% para 85%. Porém, quando a temperatura ascendeu para 550 °C, não foi observada nenhuma diferença no rendimento.

Sabe-se, ainda, que o EPS, quando descartado, é um material totalmente reciclável, podendo retornar ao ciclo produtivo, gerando benefícios no seu pós-consumo. Porém, o fato do EPS ser descartado como resíduo comum é considerado irregular, visto que é não biodegradável. Isso acontece, pois muitos consumidores desconhecem a informação de que o material pode ser reciclado.

Sendo assim, no presente trabalho será avaliada a viabilidade da despolimerização do EPS em um micro-ondas. Ressalta-se que é de suma importância observar que os processos de despolimerização do PS e EPS através do uso de micro-ondas, variam de acordo com os equipamentos utilizados, por mais que o princípio seja o mesmo. Todos os demais fatores, como temperatura, tempo de processo, potência do equipamento, origem do material, a utilização ou não de uma partícula escura, pode alterar o rendimento obtido no final.

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1 MATERIAIS**

O poliestireno expandido (EPS) para a realização dos experimentos foi obtido de embalagens pós-consumo oriundas da coleta seletiva do município de Caxias do Sul. O negro de fumo foi fornecido pela empresa Cabot na forma de pó com granulometria média de 150  $\mu\text{m}$ .

#### **3.2 MÉTODOS**

Nos subitens seguintes, estarão descritos os métodos e as técnicas que foram utilizadas para reciclar e caracterizar o poliestireno expandido reciclado.

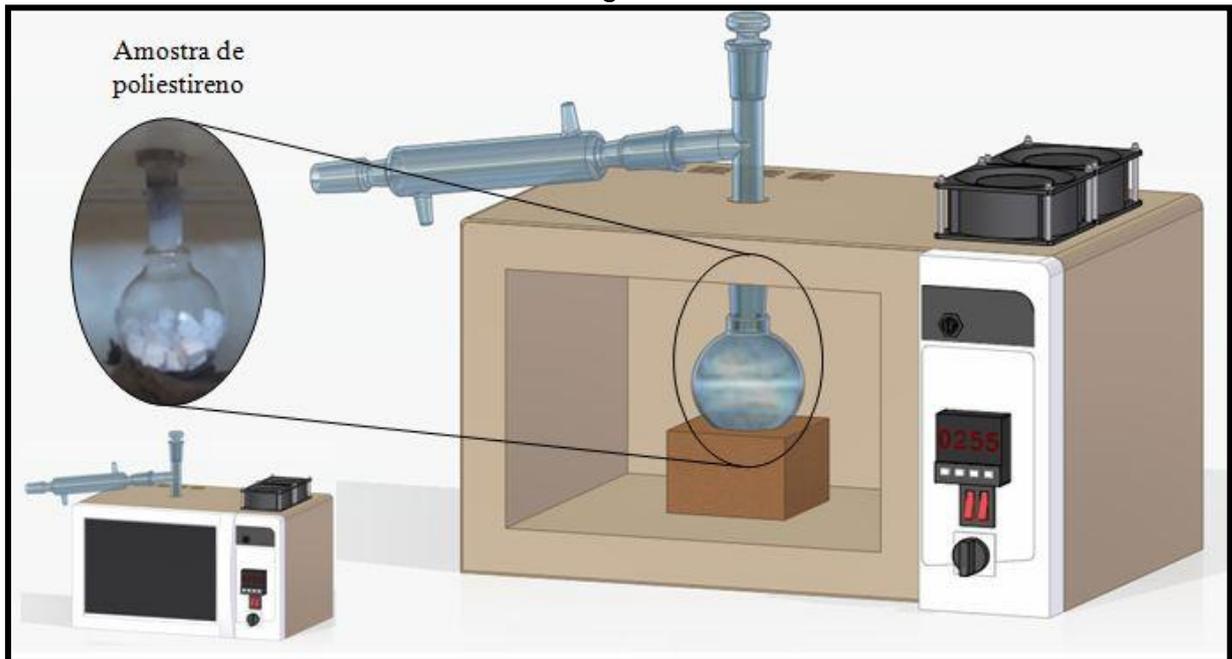
##### **3.2.1 Processamento de reciclagem do EPS reciclado**

Os resíduos de EPS passaram por uma triagem inicial, que teve como objetivo retirar qualquer sujidade do material. As embalagens alimentícias de poliestireno expandido não foram usadas no trabalho, sendo então, retiradas no momento de início da separação do material.

A despolimerização foi realizada em um micro-ondas marca Electrolux, que opera com potência de aproximadamente 400 W.

Utilizou-se a amostra cortada em tamanhos de cubos de aproximadamente 8  $\text{cm}^3$ . Assim, foi previamente pesada e colocada em um balão de fundo redondo com a respectiva proporção de negro de fumo (NF), conforme mostrado na Tabela 1 e o sistema foi isolado com lã de rocha para auxiliar na reação de despolimerização. O balão foi conectado com um sistema de condensação, utilizando um condensador simples. A Figura 12 representa o esquema do processo de despolimerização realizado no LPol.

Figura 12 - Esquema do processo de despolimerização do EPS com uso de micro-ondas e negro de fumo



Fonte: MANERA (2020).

A relação entre a massa de EPS e negro de fumo está apresentada na Tabela 1. Para maior confiabilidade dos resultados, os testes foram realizados em triplicata.

Tabela 1 - Teores do poliestireno expandido e negro de fumo utilizados

Amostra	Massa EPS (g)	Massa negro de fumo (g)
E1 – E2 – E3 (EPS/0,0125C)	1	0,0125
E4 – E5 – E6 (EPS/0,125C)	1	0,125
E7 – E8 – E9 (EPS/0,250C)	1	0,250
E10 – E11 – E12 (EPS/0,500C)	1	0,500
E13 – E14 – E15 (EPS/1C)	1	1,000

Fonte: A Autora (2020).

Como mostrado na Tabela 1, foram testados os teores de 0,0125, 0,125, 0,25, 0,50 e 1 g de negro de fumo mantendo fixa a massa de EPS utilizada. O tempo total de exposição das amostras foi de aproximadamente 12 min, divididos em três ciclos de 255 segundos cada. O ciclo de 255 segundos já estava determinado no micro-

ondas utilizado, sendo assim, escolheu-se um tempo médio (12 min) para avaliar, ao final do experimento, se seria muito ou pouco tempo para que a despolimerização ocorresse.

### 3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS OBTIDOS

#### 3.3.1 Balanço de massa

O balanço de massa foi realizado em triplicata com o intuito de avaliar o grau de conversão do EPS em fração líquida e/ou gasosa por meio da radiação do micro-ondas.

#### 3.3.2 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

A análise de espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) foi utilizada para determinar os grupos funcionais presentes no resultado da despolimerização. A análise foi realizada em um equipamento Nicolet IS10- Termo Scientific disponível no Laboratório de Polímeros. O resultado foi obtido através da média de 32 varreduras, no intervalo de  $4000\text{ cm}^{-1}$  a  $400\text{ cm}^{-1}$ , com resolução de  $4\text{ cm}^{-1}$ .

#### 3.3.3 Análise Termogravimétrica (TGA)

A análise termogravimétrica tem como objetivo medir a variação de massa da amostra em função da temperatura ou do tempo, enquanto é submetida a condições controladas de aquecimento, com fluxo de gás inerte e vazão determinada. A análise foi realizada no Laboratório de Polímeros da Universidade de Caxias do Sul, com o equipamento Shimadzu TGA-50. A taxa de aquecimento utilizada foi de  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$  em atmosfera de nitrogênio com fluxo de  $50\text{ mL}/\text{min}$ , em uma faixa de temperatura de  $23^{\circ}\text{C}$  até  $800^{\circ}\text{C}$ . Utilizou-se uma massa de amostra de aproximadamente  $10\text{ mg}$ .

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 BALANÇO DE MASSA

O balanço de massa foi realizado para avaliar a conversão do poliestireno expandido em fração líquida e/ou gasosa através da despolimerização ocorrida no micro-ondas com o negro de fumo. Com o intuito de verificar somente a perda de massa obtida pela despolimerização do EPS no micro-ondas, o negro de fumo foi considerado inerte durante todo o processo de despolimerização.

A adição de negro de fumo é necessária para que ocorra a despolimerização, visto que, por ser uma partícula escura absorve a radiação no comprimento de onda do micro-ondas, enquanto que o EPS é praticamente transparente a radiação. Cabe ressaltar também que testes iniciais foram realizados com 1 g de negro de fumo e 1 g de EPS. Contudo, foram observadas faíscas dentro do micro-ondas com menos de 10 s após o início do processo. Medições da temperatura do balão com o auxílio de um termômetro infravermelho digital revelaram que a temperatura da mistura foi de aproximadamente 300 °C, fazendo com que o balão que continha a amostra trincasse em função da elevada temperatura ao qual ele foi submetido.

Os testes utilizando 0,5 g de negro de fumo e 1 g de EPS também não foram satisfatórios. Similarmente observou-se a formação de faíscas, porém com tempos superiores a 30 s de exposição à radiação. Assim, as concentrações de 0,5 e 1 g de negro de fumo não se mostraram adequadas para realizar a despolimerização.

Com isso, foram escolhidos teores menores de negro de fumo para realizar os testes e os resultados estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Rendimentos obtidos pela despolimerização

(continua)

<b>Amostra</b>	<b>Massa EPS (g)</b>	<b>Massa NF (g)</b>	<b>Conversão em voláteis (%)</b>	<b>Média da Conversão (%)</b>
EPS1	1,011	0,015	0,69	0,62±0,12
EPS2	1,032	0,023	0,48	
EPS3	1,019	0,014	0,69	

				(conclusão)
EPS4	1,105	0,132	13,21	14,79±1,39
EPS5	1,035	0,132	15,36	
EPS6	1,006	0,146	15,81	
EPS7	1,040	0,265	44,42	53,46±13,27
EPS8	1,070	0,265	68,69	
EPS9	1,005	0,261	47,26	

Fonte: A Autora (2020).

Com o teor de 0,0125 g de NF foi observada uma pequena fração gasosa, não sendo possível notar a formação de uma fração líquida. A Figura 13 mostra a formação do sólido obtido após os 3 ciclos de testes.

Figura 13 - Fração sólida obtida na amostra EPS/0,0125C



Fonte: A Autora (2020).

Para os teores mais elevados de NF, observaram-se maiores quantidades de frações gasosas, com menor formação de fração sólida quando comparada a amostra de EPS/0,0125C. Uma pequena fração de líquido foi observada para as amostras de EPS/0,125C e EPS/0,250C.

Com exceção da amostra com teor de 0,0125 g de NF, foi possível observar nas demais, a partir do segundo ciclo, a formação de frações gasosas, como mostra a Figura 14. Ressalta-se, porém, que não foi possível condensar a fração gasosa durante a realização dos experimentos.

Figura 14 - Fração gasosa obtida com teores intermediários de negro de fumo



Fonte: A Autora (2020).

Avaliando as informações acima, é possível observar que o melhor rendimento alcançado na despolimerização do EPS com o negro de fumo em um reator micro-ondas foi com a massa de 0,25 gramas de negro de fumo, conseguindo um resultado acima de 40%.

Percebe-se que os rendimentos dentro da triplicata se mantiveram próximos. Contudo, o rendimento de mais de 68%, obtido para a amostra EPS 8, durante uma das despolimerizações da amostra contendo 0,25 g de NF, pode ter ocorrido em decorrência de um melhor isolamento térmico com a lã de rocha na hora de realização do teste.

A Tabela 3 compara os resultados obtidos com outros trabalhos da literatura, em que todos os autores utilizaram materiais carbonáceos para auxiliar na despolimerização, sendo eles carvão (C), carvão ativado (CA) e negro de fumo (NF).

Tabela 3 - Resultados da despolimerização do EPS em micro-ondas na literatura  
(continua)

Amostra	Razão entre massa do EPS e material carbonáceo	Massa do polímero (g)	Tempo (min)	Conversão em voláteis (%)	Referência

					(conclusão)
EPS + NF	10:2,5	1,00	12	53,46	Este estudo
EPS + C	100:47,3	100,00	22	3,7	Undri et al (2013)
EPS + CA	10:1	50,00	5,5	5,74	Prathiba et al (2018)
EPS + NF	10:1,25	1,00	12	14,79	Este estudo

Fonte: A Autora (2020).

Para explicar o efeito do aumento do teor de negro de fumo na despolimerização, foi possível notar que quanto maior o teor de NF, maior era a absorção da radiação do micro-ondas, o que leva ao aumento de temperatura do sistema, fornecendo energia suficiente para despolimerizar o poliestireno em moléculas de baixa massa molar e que foram volatizadas durante o experimento.

Segundo Menéndez et al (2010) os materiais de carbono conseguem absorver de forma eficiente a radiação de micro-ondas, sendo assim, são facilmente aquecidos pelas radiações provenientes do micro-ondas. Essa característica faz com que o carbono seja usado para aquecer, de forma indireta, outros materiais, além de poder atuar como catalisador e receptor de micro-ondas em reações heterogêneas.

O estudo de Undri et al (2013), por sua vez, relata que a maior quantidade de carbono na reação de pirólise de micro-ondas com o EPS resultou em um maior rendimento. Destaca que esse comportamento pode ser em decorrência de um forte aquecimento do carbono, causando um ponto de elevada temperatura na amostra em questão.

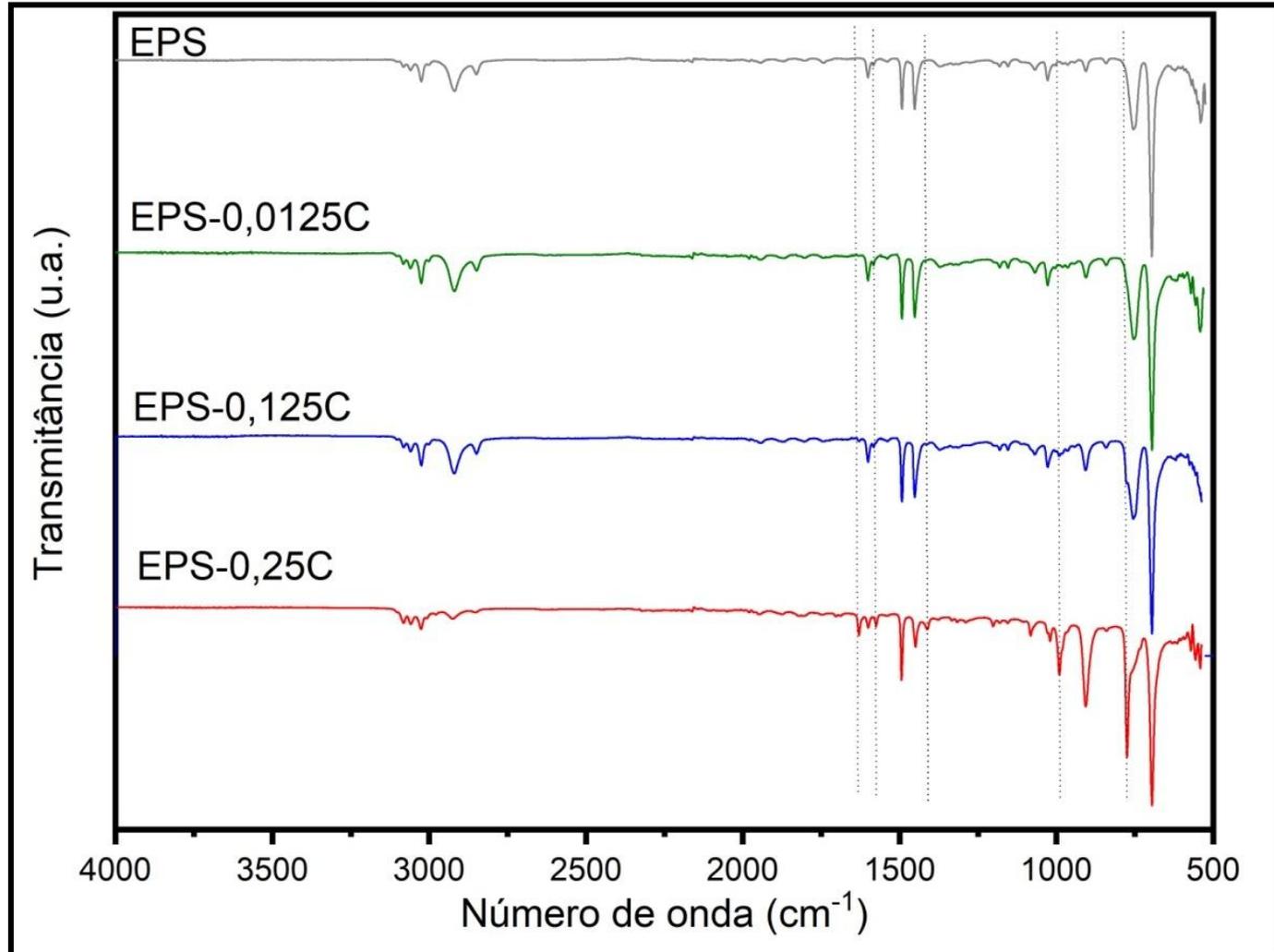
#### 4.2 ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

Segundo o estudo de Yovani et al (2008), o EPS possui banda correspondente a deformação axial do grupo C-H presentes na estrutura do anel aromático com absorção em  $3081\text{ cm}^{-1}$ . As bandas em  $3001\text{ cm}^{-1}$ ,  $2923\text{ cm}^{-1}$  e  $2850\text{ cm}^{-1}$  estão associadas às ligações C-H do grupo  $\text{CH}_2$ . Ocorrem absorções entre  $1943$  e  $1728\text{ cm}^{-1}$ , que estão ligadas com a monossustituição em anéis aromáticos. O

estiramento com absorção em  $1452\text{ cm}^{-1}$  ocorre na ligação do grupo  $\text{CH}_2$  com  $\text{C}=\text{C}$  do anel aromático e, por fim, a banda de  $1069\text{ cm}^{-1}$  está relacionada com a ligação C-H fora do plano.

Com o aumento no teor de negro de fumo adicionado no momento da despolimerização, observa-se o surgimento de bandas em  $1629\text{ cm}^{-1}$ ,  $1575\text{ cm}^{-1}$ ,  $1412\text{ cm}^{-1}$ ,  $991\text{ cm}^{-1}$  e  $775\text{ cm}^{-1}$  para todas as amostras despolimerizadas. As bandas estão destacadas na Figura 15.

Figura 15 - FTIR da despolimerização do EPS



Fonte: A Autora (2020)

A Tabela 4 apresenta o número de onda e a atribuição das bandas (legenda abaixo) que surgiram após a despolimerização em micro-ondas.

Tabela 4 - Bandas do FTIR obtidas pela despolimerização do EPS

Número de onda (cm <sup>-1</sup> )	Atribuição*	EPS	EPS/0,0125C	EPS/0,125C	EPS/0,250C
1629	C=C	-	L	L	L
1575	C=C-H	L	L	L	M
1412	C-H	L	L	L	M
775	C-H (aromática)	-	L	M	I
991	C-H	L	L	M	I

\* Undri et al (2013).

\* Mo et al (2012).

Fonte: A Autora (2020).

Sendo:

- L = banda leve;
- M = banda moderada e
- I = banda intensa

As bandas em 1629 cm<sup>-1</sup> estão relacionadas com a ligação C=C de anel aromático, que podem ser: CH=CH<sub>2</sub>, C=CH<sub>2</sub> ou CH=CH (MO et al, 2012). A banda em 1575 cm<sup>-1</sup> é atribuída ao grupo funcional arila, que é derivado de um anel aromático. As bandas em 1412 e 991 cm<sup>-1</sup> são correspondentes ao estiramento de C-H no plano e fora do plano, respectivamente. Por fim, a banda em 775 cm<sup>-1</sup> está relacionada com a ligação aromática de C-H fora do plano, atribuída a um anel benzênico monossustituído (UNDRI et al, 2013).

A amostra com o menor teor de negro de fumo apresentou somente bandas leves, sendo similar à amostra de EPS sem a adição de NF. O fato pode estar correlacionado à baixa taxa de conversão em fração gasosa que a amostra atingiu no balanço de massa.

Os estudos de Bartoli et al (2015) e Undri et al (2013) encontraram, respectivamente, 33 e 21 compostos no líquido resultante da despolimerização do

EPS ocorrida no micro-ondas. Ambos detectaram, que em maiores quantidades foram detectados 3 principais compostos, que estão demonstrados na Tabela 5.

Tabela 5 - Compostos detectados na literatura

<b>Composto detectado</b>	<b>Média da quantidade encontrada (%) – Undri et al (2013)</b>	<b>Média da quantidade encontrada (%) – Bartoli et al (2015)</b>
Estireno	56,55	53,80
Tolueno	9,85	7,78
$\alpha$ -metilestireno	11,98	13,62

Fonte: A Autora (2020).

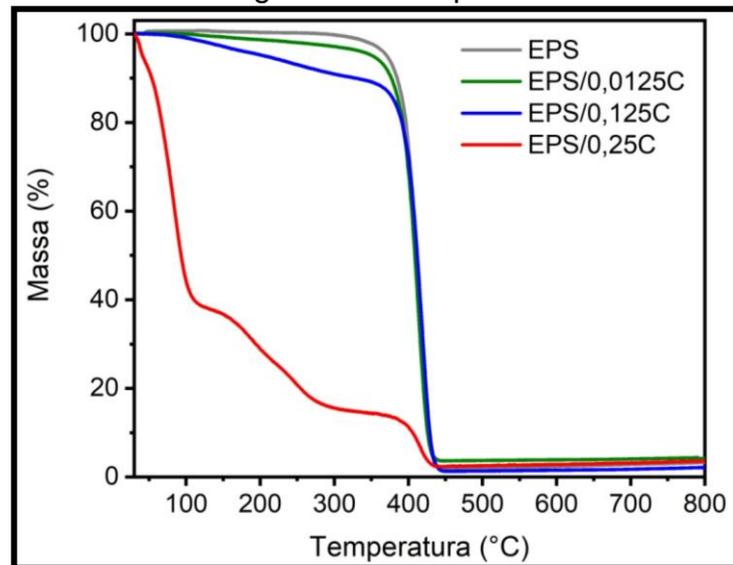
Undri et al (2013) afirmaram que os compostos benzeno, tolueno, etilbenzeno, estireno e  $\alpha$ -metilestireno chegam a somar mais de 90% dos compostos presentes na fração de líquido no final da despolimerização do EPS. A média da quantidade encontrada, nesse estudo, de etilbenzeno é de 9,38% enquanto que para o benzeno foi de 1,52%. Em contrapartida, Bartoli et al (2015) não detectaram etilbenzeno, mas a média de benzeno foi de 0,92%.

Observa-se, então, que banda de carácter intensa só foi identificada na amostra que continha maior teor de negro de fumo. Quando a mesma amostra é relacionada ao balanço de massa, percebe-se que foi a que apontou maior taxa de conversão em fração gasosa.

#### 4.3 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA)

Os resultados da análise do TGA podem ser observados nas Figuras 16 e na Figura 17. A amostra intitulada EPS/0,0125C apresentou uma redução na estabilidade térmica quando comparada ao EPS, com uma perda de massa de aproximadamente 3% até a temperatura de 305 °C. Ressalta-se que o maior evento de perda de massa ocorreu entre 325 e 450 °C. A amostra EPS/0,125C indicou uma perda de massa de 12% entre 100 e 370 °C e sendo o maior evento de perda de massa na faixa de temperatura entre 370 e 450 °C.

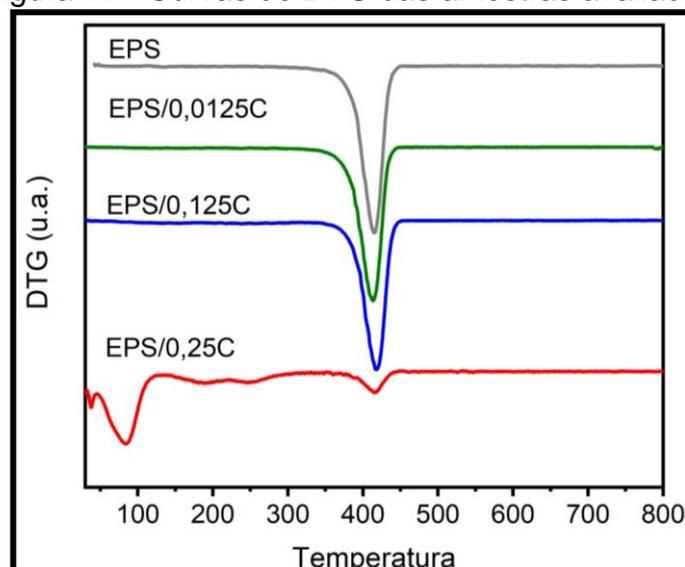
Figura 16 - Curvas termogravimétricas para as amostras estudadas



Fonte: A Autora (2020).

A amostra EPS não contém a adição de negro de fumo, assim, pode-se observar, na Figura 16, um comportamento similar entre as amostras de EPS e EPS/0,0125C. Conforme o teor de NF aumenta, observa-se uma alteração na curva termogravimétrica, principalmente quando se atinge o teor da amostra de EPS/0,25C. A presença de um maior teor de negro de fumo acelera a reação de despolimerização do EPS e acarreta na formação de compostos mais voláteis. Por fim, a amostra EPS/0,25C possui 5 eventos de perda de massa, como pode ser observado nas curvas da derivada da perda de massa (DTG), que estão representadas na Figura 17.

Figura 17 - Curvas de DTG das amostras avaliadas



Fonte: A Autora (2020).

O primeiro evento ocorre entre 30 e 45 °C, com um pico em 38 °C e uma perda de massa 3%. O segundo acontece entre 45 e 124 °C, com um pico em 85 °C e uma perda de massa de 59%. O terceiro estende-se de 140 a 222 °C, sendo que o pico transcorre em 189 °C e a perda de massa é de 13%. O quarto evento, por sua vez, realiza-se entre 222 e 290 °C, com um pico em 247 °C e a perda de massa é de aproximadamente de 9%. O último evento é entre 355 e 450 °C, com um pico em 416 °C e a perda de massa de 12%.

O estudo de Prathiba et al (2018) mostra, no resultado do TGA, que a temperatura de decomposição do EPS ocorreu em 400 °C e a temperatura de decomposição máxima aconteceu em 425 °C. Ressalta-se, que no trabalho citado, utilizaram-se carvão ativado na despolimerização do EPS, com razão de 10 g de amostra para 1 g de carvão ativado.

Observa-se, na Tabela 6, que as amostras apresentaram redução na temperatura de 3% de perda de massa e isso pode estar associado com a formação de compostos de baixa massa molar. Os resultados do teor de cinzas não apresentaram uma tendência, o que pode estar associado a quantidade de massa reduzida utilizada na análise de TGA.

A T3% PD é a temperatura de 3% de perda de massa para cada amostra. Esse parâmetro foi adicionado para verificar como varia a estabilidade térmica das amostras após a despolimerização. A T Pico, por sua vez, é a temperatura de pico de degradação.

Tabela 6- Resultados da análise termogravimétrica (TGA)

<b>Amostra</b>	<b>T3% PD (°C)</b>	<b>T Pico (°C)</b>	<b>Teor de Sólido Residual (%) (800 °C)</b>
EPS	358	415	3,3
EPS/0,0125C	305	413	4,2
EPS/0,125C	154	418	2,2
EPS/0,25C	38	416	3,6

Fonte: A Autora (2020).

Observa-se que a T Pico não variou entre as amostras, uma vez que as variações de  $\pm 5$  °C no TGA pode ser erro do equipamento. Além disso, o EPS tem apenas um evento de perda de massa, que ocorre entre 300 e 450 °C.

## 5 CONCLUSÃO

O processo de despolimerização através do uso de micro-ondas mostrou-se uma alternativa para a reciclagem do poliestireno expandido. Percebeu-se que há a necessidade da adição de algum material a base de carbono, uma vez que o EPS é praticamente inerte a radiação.

A utilização do negro de fumo como a partícula escura para auxiliar no processo de despolimerização foi eficiente, mas nem todos os teores utilizados apresentaram eficácia. Foram descartados os teores de 0,5 e 1 g de negro de fumo, pois quando utilizados nos testes, perceberam-se a formação de faíscas dentro do micro-ondas e o balão que continha a amostra de EPS foi trincado. O acontecimento está condicionado com o material de carbono ser utilizado para aquecer, de forma indireta, outros materiais, através da radiação.

Quando utilizou-se o teor de negro de fumo de 0,0125 g, observou-se a formação de uma fração sólida, pouca fração gasosa e não foi verificada a presença de fração líquida. Com o aumento do negro de fumo para 0,125 g, notou-se a formação de líquido, gás e, por consequência, menos sólido. Por fim, com o maior teor de negro de fumo utilizado, sendo 0,250 g, percebeu-se uma maior formação de fração gasosa, com rendimentos acima de 40%, além de um aumento de fração líquida e uma menor identificação de fração sólida.

Os melhores resultados foram obtidos com o maior teor de negro de fumo (0,25g), pois foi possível perceber novas bandas de absorção na análise de FTIR. Destaca-se, ainda que no TGA, que a temperatura de pico não variou entre as amostras, mas a temperatura de 3% de perda de massa para a amostra com o maior teor de negro de fumo foi de 38 °C enquanto para a amostra com menor teor foi de 305 °C. Essas diferenças descritas acima estão diretamente ligadas com o aumento do teor de negro de fumo nas amostras, visto que a amostra com o menor teor não teve alterações em análises e sua conversão em fração gasosa ficou abaixo de 1%.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para a realização de trabalhos futuros, propõem-se:

Variar o tempo de exposição à radiação;

Testar outras estruturas carbonosas, como grafeno, óxido de grafeno e carvão ativado para avaliar se o rendimento melhora quando comparado ao negro de fumo;

Realizar a análise de cromatografia líquida (HPLC) das amostras obtidas após a despolimerização e;

Aprimorar o aparato (micro-ondas) de despolimerização previamente desenvolvido.

## REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, Jorge A.C. **Planeta plástico**: tudo o que você precisa saber sobre plásticos. Porto Alegre: Sagra, 2001. 283 p.

ASHTON, Elisa Guerra. **Design, inovação e sustentabilidade: estudo da reciclagem de produtos multi-materiais poliméricos sem separação prévia**. Orientador: Prof. Dr. Wilson Kindlein Junior e coorientação da Profa. Dra. Lauren da Cunha Duarte. 2017. Tese (Pós Graduação em Design) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO – Abiplast. Disponível em: <http://www.abiplast.org.br/>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA QUÍMICA – ABIQUIM. Comissão setorial de EPS. Disponível em: <http://www.epsbrasil.eco.br/eps/index.html>. Acesso em: 14 set. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. Embalagens e acondicionamento plásticos recicláveis: identificação e simbologia – NBR 13.230, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. Resíduos Sólidos – Classificação, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE POLIESTIRENO EXPANDIDO – ABRAPEX. Disponível em: <http://www.abrapex.com.br/01OqueeEPS.html>. Acesso em 21 set. 2019.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL – BNDES. **Aspectos gerais do poliestireno**, Rio de Janeiro, n.16, p. 123-136, 2002.

Disponível em:

[https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2350/1/BS%2016%20Aspectos%20Gerais%20do%20Poliestireno\\_P.pdf](https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2350/1/BS%2016%20Aspectos%20Gerais%20do%20Poliestireno_P.pdf). Acesso em 18 set. 2019.

BARTOLI, Mattia et al. Depolymerization of polystyrene at reduced pressure through a microwave assisted pyrolysis. **Journal Of Analytical And Applied Pyrolysis**, [s.l.], v. 113, p.281-287, maio 2015. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jaap.2015.01.026>.

BRASKEM. Bluevision. Mecânica, energética ou química? Como os tipos de reciclagem funcionam. Disponível em:

<https://bluevisionbraskem.com/inteligencia/mecanica-energetica-ou-quimica-como-os-tipos-de-reciclagem-funcionam/>. Acesso em 18 set. 2019.

CALLISTER, William D. **Ciência e engenharia dos materiais**: uma introdução. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 705 p.

CANEVAROLO JÚNIOR, Sebastião Vicente. **Ciência dos polímeros**: um texto básico para tecnólogos e engenheiros. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2006. 280 p.

EHRIG, R. J. **Plastics recycling**: products and processes. Munich: Hanser, 1992. 289 p.

GRASSI, V.G.; FORTE, M.M.C.; DAL PIZZOL, M.F. Aspectos morfológicos e relação estrutura-propriedades de poliestireno de alto impacto. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**. Vol 11, n.3, p. 158-168, 2001.

HUSSAIN, Zahid et al. The conversion of waste polystyrene into useful hydrocarbons by microwave-metal interaction pyrolysis. **Fuel Processing Technology**, [s.l.], v. 94, n. 1, p.145-150, fev. 2012. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.10.009>

LANDIM, Ana Paula Miguel et al. Sustentabilidade quanto às embalagens de alimentos no Brasil. **Polímeros**, [s.l.], v. 26, n. , p.82-92, 19 jan. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0104-1428.1897>

MAKSIMOV, Anton L. et al. Thermal depolymerization of polystyrene in highly aromatic hydrocarbon médium. **Journal Of Analytical And Applied Pyrolysis**. [s.l.]. Maio, 2019. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.05.001>

MANERA, Christian. **Desenho reator**. Destinatário: Paula De Marco. [s.l.]. 26 out. 2020. 1 mensagem eletrônica.

MENÉNDEZ, J. A. et al. Microwave heating process involving carbon materials. **Fuel Processing Technolog** [s.l.], v. 91, n. 1, p. 1-8, jan, 2010. Elsevier BV.

<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.08.021>

MO, Yu. et al. Comparative pyrolysis upcycling of polystyrene waste: thermodynamics, kinetics, and product evolution profile. **J Therm Anal Calorim.** [s.l.], v. 111, p. 781-788, maio, 2012.

MUSTAFA, Nabil. **Plastics waste management: disposal, recycling and reuse.** New York, US: Marcel Dekker, 1993. 413 p.

PLASTIVIDA – Instituto Socioambiental de Plásticos. Mais de 30 mil toneladas de isopor reciclado. Disponível em: <http://www.plastivida.org.br/index.php/sala-de-imprensa/noticias/593-mais-de-30-mil-toneladas-de-isopor-reciclado?lang=pt>. Acesso em 19 set. 2019.

POLÍTICA NACIONAL DOS RESÍDUOS SÓLIDOS. Lei nº 12.305 de 02 de agosto de 2010.

PRATHIBA, R.; SHRUTHI, M.; MIRANDA, Lima Rose. Pyrolysis of polystyrene waste in the presence of activated carbon in conventional and microwave heating using modified thermocouple. **Waste Management**, [s.l.], v. 76, p.528-536, jun. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2018.03.029>.

SPINACÉ, Márcia Aparecida da Silva; DE PAOLI, Marco Aurélio. A tecnologia da reciclagem de polímeros. **Química Nova.** V. 28, n. 1, p. 65-72, 2005.

UNDRI, Andrea et al. Reverse polymerization of waste polystyrene through microwave assisted pyrolysis. **Journal Of Analytical And Applied Pyrolysis**, [s.l.], v. 105, p.35-42, jan. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaap.2013.10.001>

WIEBECK, Hélio; PIVA, Ana Magda. **Reciclagem do plástico.** São Paulo: Artliber, 2004. 111 p.

World Wide Fund for Nature. **Solucionar a poluição plástica: transparência e responsabilização.** 2019. Disponível em: <http://promo.wwf.org.br/solucionar-a-poluicao-plastica-transparencia-e-responsabilizacao>. Acesso em: 18 set. 2019.

YOVANI, Adan et al. Synthesis and characterization of the polystyrene – asphaltene graft copolymer by FT-IR spectroscopy. **Ciencia, Tecnologia y Futuro.** Colombia. vol. 3. n. 4, p. 157-167, nov. 2008.

ZANIN, Maria; MANCINI, Sandro Donnini. **Resíduos plásticos e recicagem: aspectos gerais e tecnologia.** São Carlos, SP: UFSCar, 2004. 143 p.