

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

DAVI ANGELO ZANCANARO

**AVALIAÇÃO DA DESPOLIMERIZAÇÃO DO POLIESTIRENO EXPANDIDO POR
MICRO-ONDAS UTILIZANDO ÓXIDO DE GRAFENO E CARVÃO ATIVADO**

CAXIAS DO SUL

2021

DAVI ANGELO ZANCANARO

**AVALIAÇÃO DA DESPOLIMERIZAÇÃO DO POLIESTIRENO EXPANDIDO POR
MICRO-ONDAS UTILIZANDO ÓXIDO DE GRAFENO E CARVÃO ATIVADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos para a 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. Jadna Catafesta.

CAXIAS DO SUL

2021

DAVI ANGELO ZANCANARO

**AVALIAÇÃO DA DESPOLIMERIZAÇÃO DO POLIESTIRENO EXPANDIDO POR
MICRO-ONDAS UTILIZANDO ÓXIDO DE GRAFENO E CARVÃO ATIVADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos para a obtenção da aprovação na disciplina 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. Jadna Catafesta.

Aprovado em 12/07/2021

Banca examinadora

Prof. Dr. Matheus Poletto
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Me. Tomás Augusto Polidoro
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Cesar Aguzzoli
Universidade de Caxias do Sul – UCS

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Matheus Poletto, responsável pela orientação deste trabalho, por toda sua ajuda, dedicação e disponibilidade que teve neste período.

Aos meus amigos, colegas e familiares que me incentivaram todos os dias e ofereceram apoio nos momentos críticos.

Ao doutorando Christian Manera e ao pessoal do LEBio que contribuíram para a realização de alguns detalhes para o desenvolvimento deste trabalho.

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

*“Se o dinheiro for sua
esperança de independência,
você jamais a terá. A única
segurança verdadeira consiste
numa reserva de sabedoria,
experiência e de competência.”*

Henry Ford

RESUMO

Os polímeros estão cada vez mais presentes no cotidiano para substituir outros materiais. Por serem baratos e terem propriedades mecânicas atraentes, foram e ainda são produzidos em larga escala e, conseqüentemente, seus grandes volumes em aterros apresentam um desafio para sua reciclagem. Com isso, o objetivo deste estudo foi avaliar a despolimerização do poliestireno expandido (EPS) através do uso de micro-ondas e, com o auxílio de dois agentes que possuem carbono em sua constituição para auxiliar na despolimerização: o óxido de grafeno (OG) e o carvão ativado (CA). Foram utilizadas diferentes quantidades de OG e CA (0,125, 0,250, 0,5 g), mantendo sempre a massa da amostra de EPS constante de 1 g. Os testes no forno micro-ondas foram realizados em 3 ciclos de 4 minutos cada, com tempo total de 12 minutos por batelada. Dentro do forno, a amostra foi acondicionada no interior de um balão de fundo redondo envolto com lã de rocha. Para caracterizar o material obtido da despolimerização, realizou-se o balanço de massa para avaliar os rendimentos da despolimerização, a Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) e a análise termogravimétrica (TGA). Para a amostra contendo 0,125 g de OG observou-se a formação de uma maior fração sólida, pouca fração gasosa e nenhuma fração líquida. A amostra com 0,25 g de OG apresentou o melhor rendimento de voláteis, com 22,58 % de voláteis, e foi possível observar tanto a fração líquida quanto a gasosa. Os testes com 0,5 g de OG foram insatisfatórios pois trincavam o balão no início do experimento. As amostras com CA não apresentaram grandes indícios visuais de despolimerização, contudo, as amostras com 0,125 g, as com 0,250 g e as com 0,5 g renderam frações gasosas de 5,13; 9,16; e 3,06, respectivamente. A análise de FTIR para as amostras contendo OG apresentaram novas bandas de absorção quando comparada a uma amostra neutra de EPS, enquanto que para as amostras com CA não foi possível observar. Alguns picos de degradação no TGA da amostra contendo OG podem estar correlacionados a formação de compostos mais voláteis após a despolimerização. A amostra com CA não apresentou picos significativos. Este estudo sugere que a transferência de calor da partícula escura para a amostra de EPS é mais efetiva com a utilização de OG, podendo contribuir para a despolimerização do EPS.

Palavras chave: Poliestireno expandido, despolimerização, micro-ondas, óxido de grafeno, carvão ativado.

ABSTRACT

Polymers are increasingly present in everyday life to replace other materials. Because they are cheap and have attractive mechanical properties, they were and still are produced on a large scale and, consequently, their large volumes in landfills present a challenge for their recycling. Thus, the objective of this study was to evaluate the depolymerization of expanded polystyrene (EPS) through the use of microwaves and, with the aid of two agents that have carbon in their constitution to assist in the depolymerization: graphene oxide (OG) and activated charcoal (CA). Different amounts of OG and CA (0.125, 0.250, 0.5 g) were used, always keeping the EPS sample mass constant of 1 g. The tests in the microwave were carried out in 3 cycles of 4 minutes each, with a total time of 12 minutes per batch. Inside the microwave, the sample was placed inside a round-bottomed balloon wrapped up with rock wool. To characterize the material obtained from the depolymerization, a mass balance was performed to evaluate the depolymerization yields, the Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) and a thermogravimetric analysis (TGA). For the sample containing 0.125 g of GC, it was observed the formation of a larger solid fraction, little gaseous fraction and no liquid fraction. The sample with 0.25 g of GC had the best volatile yield, with 22.58% of volatiles, and it was possible to observe both the fraction and liquid to gas. Tests with 0.5 g of OG were unsatisfactory as they cracked the balloon at the beginning of the experiment. The samples with CA did not show a great visual evidence of depolymerization, however, those with 0.125 g, those with 0.250 g and those with 0.5 g yielded gas fractions of 5.13; 9.16; and 3.06, respectively. The FTIR analysis for the samples containing OG showed new absorption bands when compared to a neutral EPS sample, while for the samples with CA it was not possible to observe. Some degradation peaks in the TGA of the OG-containing sample may be correlated with the formation of more volatile compounds after depolymerization. The sample with CA did not present significant peaks. This study suggests that heat transfer from the dark particle to the EPS sample is more effective with the use of OG, which may contribute to EPS depolymerization.

Keywords: Expanded polystyrene, depolymerization, microwave, graphene oxide, activated charcoal.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Geração de RSU no Brasil nos anos de 2009 a 2018 (em milhões de toneladas).....	11
Figura 2 - Cadeia típica de um polímero termorrígido.	15
Figura 3 – Poliestireno.	16
Figura 4 – Poliestireno expandido (isopor).	17
Figura 5 – Esquema da produção em suspensão de poliestireno expandido.	18
Figura 6 – Etapas da reciclagem mecânica.	21
Figura 7 – Esquema geral do processo de pirólise.	23
Figura 8 – Esboço de um equipamento usado para despolimerização por micro-ondas.	24
Figura 9 – Óxido de grafeno no processo de obtenção do grafeno.....	25
Figura 10 – Estrutura esquemática do óxido de grafeno.....	25
Figura 11 – Esquema do processo de despolimerização utilizado para a realização dos experimentos.	29
Figura 12 - Micrografias no MEV do isopor.....	31
Figura 13 - Micrografias no MEV do óxido de grafeno.....	32
Figura 14 - Micrografias no MEV do carvão ativado.....	33
Figura 15 - Fração sólida e de óleo obtidas após a reação no micro-ondas com a amostra de OG 0,250.....	35
Figura 16 - Balão do experimento com a fração gasosa formada.	36
Figura 17 - Espectro de FTIR obtido para as amostras de EPS, OG e CA.	40
Figura 18 - FTIR da despolimerização do EPS com OG.....	41
Figura 19 - FTIR da despolimerização do EPS com CA.	42
Figura 20 - Curvas termogravimétricas das amostras contendo OG.....	43
Figura 21 - Curvas termogravimétricas das amostras contendo CA.	45

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Produção e reciclagem de polímeros em alguns países do mundo (em toneladas).....	12
Quadro 2 – Exemplos de alguns polímeros comumente utilizados no cotidiano.....	13
Quadro 3 – Teores de carvão ativado e óxido de grafeno utilizados nos ensaios.....	29
Quadro 4 – Percentual de voláteis e fração sólido/líquida obtida nos ensaios realizados com OG.....	35
Quadro 5 - Rendimentos dos balanços de massa dos ensaios realizados com CA..	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Potencial energético de alguns resíduos.....	21
Tabela 2 – Área superficial dos agentes de despolimerização utilizados.....	34
Tabela 3 - Dados da análise termogravimétrica das amostras com OG.	44
Tabela 4 - Dados dos ensaios de TGA das amostras com CA.	46

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - % de voláteis.....	30
--------------------------------	----

LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

ABIQUM – Associação Brasileira de Química

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

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

CA – Carvão ativado

EPS – Poliestireno expandido

GHz – Giga hertz

MHz – Mega hertz

NBR – Norma Brasileira

OG – Óxido de grafeno

PC – Policarbonato

PE – Polietileno

PET – Polietileno tereftalato

PMMA – Polimetilmetacrilato

PP – Polipropileno

PS – Poliestireno

PVC – Policloreto de Vinila

RSU – Resíduo Sólido Urbano

T_g – Temperatura de transição vítrea

UV – Ultra violeta

W – Watt

WWF – World Wide Fund for Nature

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
1.1 OBJETIVO GERAL	9
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
2 REFERENCIAL TEÓRICO	10
2.2 GERAÇÃO DE RESÍDUOS POLIMÉRICOS	11
2.3 MATERIAIS POLIMÉRICOS	12
2.3.2 Polímeros termorrígidos	15
2.3.3 Polímeros termoplásticos	15
2.3.4 Poliestireno	16
2.6 RECICLAGEM DO POLIESTIRENO EXPANDIDO	19
2.7 TIPOS DE RECICLAGENS DE POLÍMEROS	20
2.7.1 Reciclagem Mecânica	20
2.7.2 Reciclagem Energética	21
2.7.3 Reciclagem Química	22
2.7 ÓXIDO DE GRAFENO (OG)	24
2.8 CARVÃO ATIVADO (CA)	26
3 MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1 MATERIAIS	28
3.2 MÉTODOS	28
3.2.1 Amostra	28
3.2.2 Metodologia de despolimerização	29
3.2.3 Caracterização dos produtos obtidos	30
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.1 ANÁLISE MORFOLÓGICA	31
4.2 ANÁLISE DE ÁREA SUPERFICIAL (BET)	33
4.3 BALANÇO DE MASSA	34
4.4 ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)	39
4.5 ANÁLISE TERMOGAVIMÉTRICA (TGA)	42
5 CONCLUSÃO	47
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	48

7 REFERÊNCIAS.....	49
---------------------------	-----------

1 INTRODUÇÃO

O aumento contínuo da geração de resíduos sólidos urbanos (RSU), juntamente com a população, causa preocupações em relação a seu gerenciamento a fim de promover uma sociedade mais sustentável. Estando os materiais poliméricos presentes na maioria das coisas utilizadas, estes compreendem uma significativa fração dos resíduos gerados (STREIT, 2016).

Os polímeros passaram a ser produzidos de forma expressiva a partir do ano de 1930, período que antecedeu a Segunda Guerra Mundial, com vários novos tipos de polímeros sintetizados principalmente pelos Estado Unidos. Esse grande aumento na geração de polímeros se deu pela opção de substituir outros materiais que apresentavam dificuldades quanto ao seu transporte como metálicos e cerâmicos. Por apresentar uma enorme gama de aplicações, polímeros como o polipropileno, poliestireno, poliésteres e silicones apresentaram, e ainda apresentam, uma expressiva produção, 2 Mt no ano de 1980 e 380 Mt em 2015 (PRATHIBA *et. al*, 2018). Especificamente o poliestireno, passou a entrar no mercado somente alguns anos após, em 1938, onde então várias toneladas foram produzidas (BORRELLY, 2002).

Na atualidade, o poliestireno é um dos materiais termoplásticos mais usados. Sendo aplicado na sua forma expandida, ou seja, o poliestireno expandido (EPS) na área de embalagens, commodities e isolamentos térmicos (INAGAKI *et. al*, 2001). Tanto que, devido a sua alta demanda, a previsão é que sua produção cresça em 5% a cada ano até 2025 (ADNAN *et al.*, 2016).

Um dos desafios que surgiu então é a reciclagem de grande quantidade de resíduos de EPS gerados. Já que, devido a sua baixa densidade, grande volume e não biodegradabilidade, pode ocupar muito espaço em aterros, se for descartado erroneamente (BARTOLI *et al.*, 2015; KUMAR *et al.*, 2015).

A reciclagem de polímeros iniciou em 1980, porém sua incineração, que era a alternativa inicialmente usada, emite muitos gases prejudiciais na atmosfera, necessitando de um sistema de purificação a jusante do equipamento de incineração (ADNAN *et al.*, 2016). Atualmente, uma maneira mais viável que está sendo utilizada é a despolimerização, que seria a quebra do polímero em seus monômeros base. Todavia, nem sempre é de fácil obtenção, muitas reações de despolimerização necessitam de condições peculiares para que ocorram, como uma temperatura

específica e a adição de bases ou ácidos fortes. Tais processos resultam no final uma complexa mistura de custosa separação (KAMIMURA *et al.*, 2011).

Diante desses aspectos o objetivo deste trabalho é propor uma rota mais limpa para a reciclagem do poliestireno expandido. Seja ela por meio de sua despolimerização, não exigindo um trabalhoso sistema de separação a jusante, visto que a reciclagem é viável somente quando as altas purezas dos produtos estão ao alcance (KAMIMURA *et al.*, 2011).

Essa despolimerização será realizada expondo os resíduos de poliestireno à micro-ondas, entretanto, segundo Nazybullin *et al.* 2015, o aquecimento direto do poliestireno por micro-ondas é inviável pelo fato desse polímero apresentar baixa perda de massa nessa faixa de energia e sugere, assim como Undri *et al.* 2013, utilizar materiais com altas condutividades na faixa do micro-ondas. Tais materiais, como metais ou compostos carbonosos, são capazes de absorver essas ondas eletromagnéticas e transmitir para o polímero em forma de calor. Visto isso, o uso de óxido de grafeno e o carvão ativado, propostos neste estudo, são alternativas viáveis para proporcionar a despolimerização do EPS.

1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a eficiência do óxido de grafeno e do carvão ativado no processo de despolimerização do poliestireno por micro-ondas.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos propostos por este trabalho foram:

Verificar a influência de diferentes teores (125, 250 e 500 mg) de óxido de grafeno e de carvão ativado na despolimerização do poliestireno expandido.

Avaliar o rendimento do processo de despolimerização pelo seu rendimento de voláteis.

Caracterizar os compostos obtidos por meio de suas propriedades físicas e químicas através da análise morfológica, de área superficial, FTIR e TGA.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

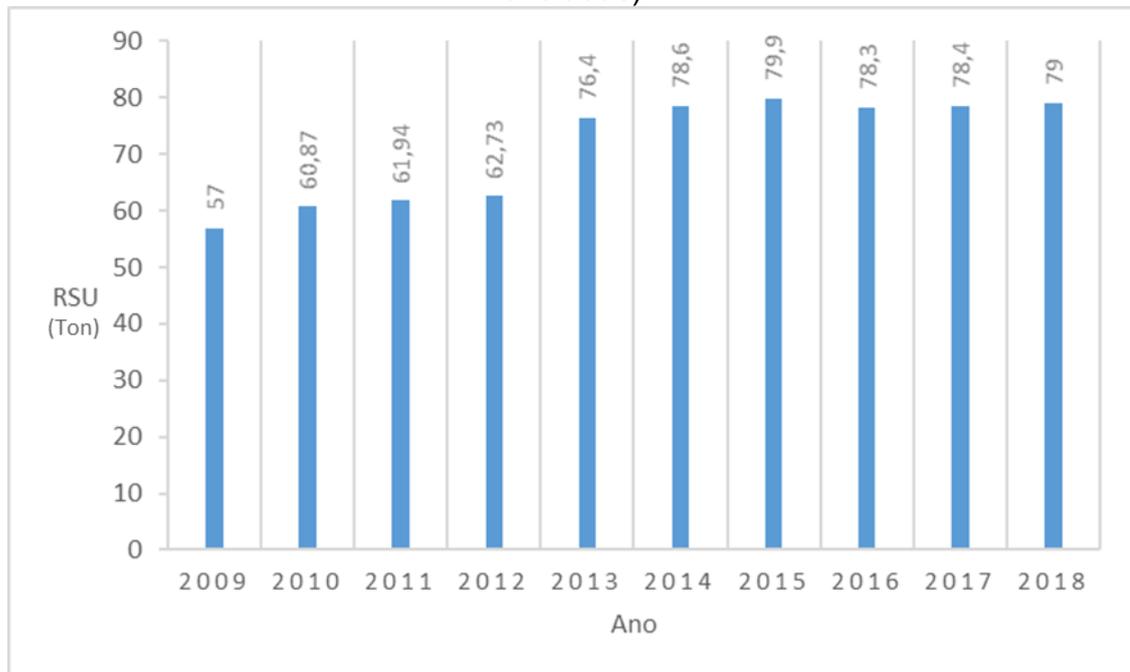
2.1 GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)

A ABNT NBR 10.004, foi elaborada pela Comissão de Estudo Especial Temporária de Resíduos Sólidos, em virtude da preocupação com o desenvolvimento sustentável e questões ambientais. Ela define resíduos sólidos como: resíduos nos estados sólidos e semi-sólidos (lodos) provenientes de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Os resíduos podem ainda ser subdivididos em perigosos (resíduos classe I), não perigosos (resíduos classe II), não inertes (resíduos classe II A) e inertes (resíduos classe II B).

Uma publicação da EOS Organização e Sistemas (2019) relata que a quantidade de RSU gerados mundialmente é de 1.400 milhões de toneladas por ano e ressalta que metade desse valor é produzido por somente 30 países. Caso os padrões se mantenham, a expectativa é que até 2050 a quantidade aumente 350%, indo para 4 bilhões de resíduos gerados por uma população de 9 bilhões de habitantes.

Segundo a Abrelpe (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais), no ano de 2018 foram gerados cerca de 79 milhões de toneladas de RSU no Brasil, 1% a cima do ano anterior. Ainda ressalta que, desse total gerado, 59,5% são destinados em aterros sanitários e 40,5% são despejados em locais inadequados como lixões e aterros controlados. A Figura 1 apresenta a geração de RSU no Brasil nos anos de 2009 a 2018 (ABRELPE, 2018).

Figura 1 – Geração de RSU no Brasil nos anos de 2009 a 2018 (em milhões de toneladas).



Fonte: Adaptado de Abrelpe (2009-2018).

Como visto, a quantidade de RSU coletados foi de 78,4 e 79 milhões de toneladas para os anos de 2017 e 2018, respectivamente. Ainda segundo a Abrelpe, dessas quantidades, 17,1% (14,442 milhões de toneladas) em 2017 e 16,9% (11,308 milhões de toneladas) em 2018 correspondem a resíduos poliméricos.

2.2 GERAÇÃO DE RESÍDUOS POLIMÉRICOS

Aproximadamente metade dos polímeros disponíveis no mercado foram criados a partir do ano de 2000 (World Wide Fund for Nature – WWF, 2019). Segundo *Plastics* (2008), a produção mundial de polímeros passou de 1,5 milhões de toneladas em 1950 para cerca de 254 milhões de toneladas em 2008. Segundo *Geyer et al.* (2017), cerca de 8300 milhões de toneladas de polímeros virgens foram produzidos até 2019, se tornando um dos materiais mais produzidos pelo homem. Deste total, estima-se que 2500 milhões de toneladas (30%) estão atualmente em uso. Especificamente no ano de 2015 foram geradas 6300 toneladas de resíduos poliméricos, onde que, dessa quantidade, cerca de 12% foram incinerados, 9% reciclados e 79% foram acumulados em aterros ou no ambiente natural.

O Brasil, com 11,3 milhões de toneladas, fica somente atrás dos Estados Unidos, China e Índia quanto à geração de resíduos poliméricos. Desse montante, 10,3 milhões de toneladas (91%) foram coletadas e, destas, somente 145 mil toneladas (1,28%) foram recicladas, enquanto que a média global é de 9% (World Wide Fund for Nature – WWF, 2019). O Quadro 1 mostra a produção e a reciclagem dos países que mais geram resíduos poliméricos.

Quadro 1 – Produção e reciclagem de polímeros em alguns países do mundo (em toneladas).

País	Total de lixo polimérico gerado	Total incinerado	Total reciclado	Relação produção e reciclagem
Estados Unidos	70.782.577	9.060.170	24.490.772	34,60%
China	54.740.659	11.988.226	12.000.331	21,92%
Índia	19.311.663	14.544	1.105.677	5,73%
Brasil	11.355.220	0	145.043	1,28%
Indonésia	9.885.081	0	362.070	3,66%
Rússia	8.948.132	0	320.088	3,58%
Alemanha	8.286.827	4.876.027	3.143.700	37,94%
Reino Unido	7.994.284	2.620.394	2.513.856	31,45%
Japão	7.146.514	6.642.428	405.834	5,68%
Canadá	6.696.763	207.354	1.423.139	21,25%

Fonte: Adaptado de World Wide Fund for Nature – WWF (2019).

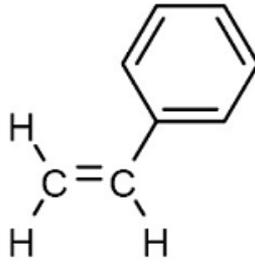
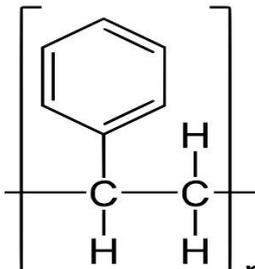
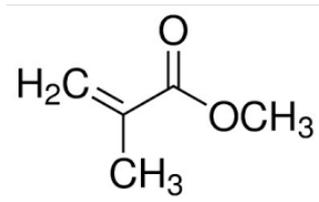
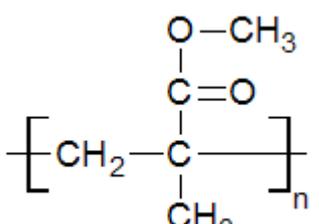
Um fator que explica o enorme acúmulo de resíduos poliméricos é o fato destes não serem biodegradáveis. Muitos monômeros para produção dos polímeros provêm de hidrocarbonetos fósseis, sendo possível somente sua eliminação por tratamentos térmicos como combustão ou pirólise (GEYER *et al.*, 2017).

2.3 MATERIAIS POLIMÉRICOS

Materiais poliméricos são basicamente compostos que apresentam em sua estrutura uma unidade relativamente simples que se repete milhares de vezes. Essas unidades são unidas por ligações covalentes que lhes conferem uma boa estabilidade

físico química. Dentre suas características gerais de baixa densidade e baixa condutividade térmica e elétrica, os polímeros podem ser divididos em dois grandes grupos quanto à sua origem (naturais e sintéticos) e principalmente quanto a suas particularidades físicas (termoplásticos, termorrígidos) (PEREIRA, 2016). O Quadro 2 mostra alguns exemplos de polímeros utilizados no cotidiano.

Quadro 2 – Exemplos de alguns polímeros comumente utilizados no cotidiano.

POLÍMERO	MONÔMERO	UNIDADE REPETITIVA
Polietileno	$\begin{array}{c} \text{H} & & \text{H} \\ & \diagdown & / \\ & \text{C} = \text{C} \\ & / & \diagdown \\ \text{H} & & \text{H} \end{array}$	$\left[\begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\ & \\ -\text{C} & - & \text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{H} \end{array} \right]_n$
Polipropileno	$\begin{array}{c} \text{H} & & \text{H} \\ & \diagdown & / \\ & \text{C} = \text{C} \\ & / & \diagdown \\ \text{H} & & \text{CH}_3 \end{array}$	$\left[\begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\ & \\ -\text{C} & - & \text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{CH}_3 \end{array} \right]_n$
Poli (cloreto de vinilo)	$\begin{array}{c} \text{H} & & \text{Cl} \\ & \diagdown & / \\ & \text{C} = \text{C} \\ & / & \diagdown \\ \text{H} & & \text{H} \end{array}$	$\left[\begin{array}{cc} \text{H} & \text{Cl} \\ & \\ -\text{C} & - & \text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{H} \end{array} \right]_n$
Poliestireno		
Poli (metacrilato de metilo)		

Fonte: Adaptado de ODIAN (2004).

Segundo Streit (2016), a quantidade de resíduos poliméricos está diretamente relacionada a renda de um país. Em países desenvolvidos, como os Estados Unidos, o volume de embalagens é maior que o volume de matéria orgânica gerada, chegando a 88% do que é gerado. No Brasil essa proporção é de 50%. Os setores que mais utilizam / geram resíduos poliméricos são o de embalagens, construção civil, automotivo e eletroeletrônicos.

2.3.1 Introdução sobre a história dos polímeros

Século XX, marcado por uma revolucionária transformação tecnológica com a invenção dos polímeros. Sendo patenteado pela primeira vez em 1907 um polímero essencialmente sintético, por Lord Baekeland. Modificando o rumo da produção de polímeros que, até esse marco, as indústrias eram escassas e os polímeros consistiam essencialmente de matérias primas naturais (HAGE JR, 1998).

O início da indústria de polímeros aconteceu em torno de 1839, com o domínio da tecnologia de vulcanização, que consiste basicamente na aplicação de temperatura e pressão que conferiam um produto de características físico-químicas finais mais atraentes. Porém, somente a partir das décadas de 1920 e 1930 foram feitos estudos mais profundos nesta área por vários pesquisadores famosos da época proporcionando a criação de novos polímeros que, inclusive, os possibilitaram a obtenção de vários prêmios Nobel na área da química (CANEVAROLO JR, 2006).

Um dos fatores importantes que corroborou com essa descoberta foi a necessidade de um novo produto com características adequadas para substituir materiais como metais e cerâmicos. Além desses materiais, incluindo a borracha natural, possuírem maior custo também quase não estavam mais conseguindo suprir suas respectivas demandas. Tornando a sociedade refém do uso dos polímeros, com inúmeras aplicações em áreas como a automotiva, eletroeletrônica, têxtil, embalagens, medicina, aeroespacial, construção civil, entre outras (CANEVAROLO JR, 2006).

2.3.2 Polímeros termorrígidos

Os polímeros termorrígidos são caracterizados por não apresentarem a possibilidade de serem remodelados com o aumento de temperatura, uma vez que possuem ligações cruzadas em sua estrutura. Essa classe é composta principalmente por elastômeros e resinas epóxis (JENOVÊNCIO, 2014). A Figura 2 demonstra de forma superficial a cadeia de um polímero termorrígido com suas ligações cruzadas.

Figura 2 - Cadeia típica de um polímero termorrígido.



Fonte: Adaptado de SILVA e SILVA (2003).

Sob altas temperaturas, esses polímeros se decompõem sem se fundir. Isso é explicado por possuírem em sua estrutura ligações cruzadas que impedem que suas cadeias deslizem umas sobre as outras e que assim seja moldada (SILVA e SILVA, 2003).

2.3.3 Polímeros termoplásticos

Existem uma grande variedade de polímeros termoplásticos, porém 90% do mercado é ocupado por cinco principais que são: o PVC, PET, PE, PP e o PS. Por não apresentarem ligações cruzadas, permitem que suas cadeias deslizem umas sobre as outras quando aquecidos, dando a eles maior moldabilidade, aplicabilidade e opções de reaproveitamento (SILVA e SILVA, 2003; SPINACÉ e PAOLI, 2005).

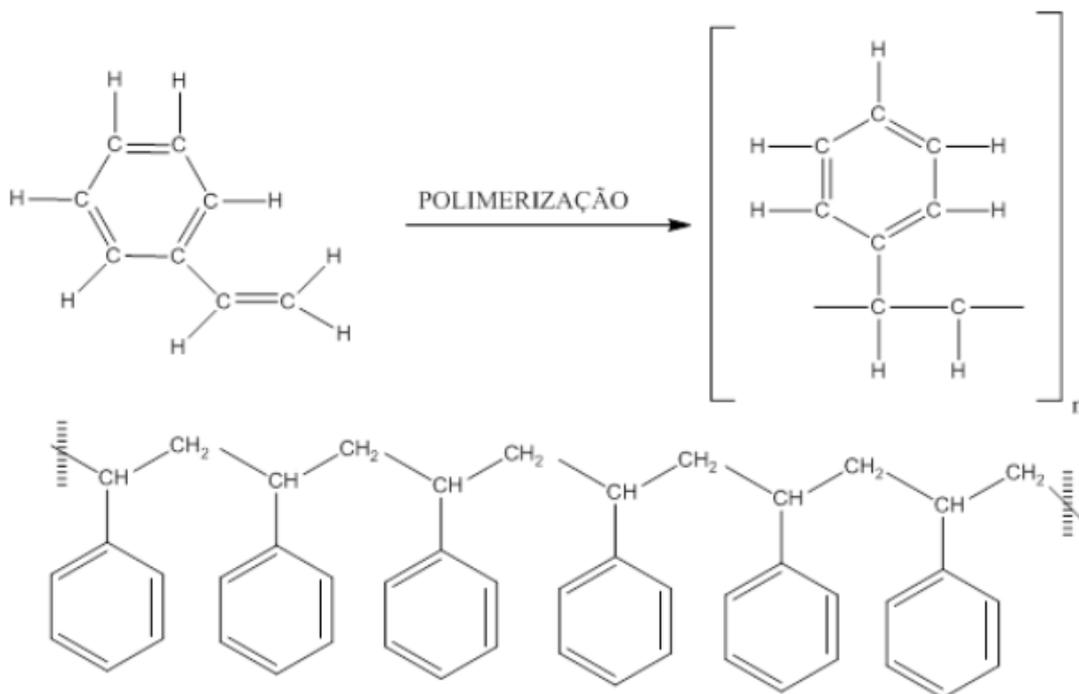
Os termoplásticos, por apresentarem uma maior moldabilidade, possuem um leque maior de aplicações com inúmeras propriedades mecânicas e químicas diferentes. O polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS), policarbonato (PC), polimetilmetacrilato (PMMA), entre outros são exemplos de polímeros que, diferente

dos termorrígidos, podem apresentar variações devido a presença de alguns aditivos, além de apresentarem melhor reciclabilidade (ASKELAND; WRIGHT, 2014).

2.3.4 Poliestireno

O estireno, é a matéria-prima para produção do poliestireno, obtido através do etil benzeno, componente derivado do benzeno e do eteno, provenientes do craqueamento da nafta (BORRELLY, 2002). Para que um monômero seja capaz de formar uma cadeia polimérica ele deve ter pelo menos a funcionalidade 2, isto é, ele deve possuir pelo menos dois pontos reativos, sejam eles grupos funcionais reativos ou ligações duplas (CANEVAROLO JR, 2006). A Figura 3 apresenta o estireno e sua forma de unidades repetidas (poliestireno).

Figura 3 – Poliestireno.



Fonte: Pereira (2016).

Sendo um material cujas propriedades que o caracterizam são: dureza, facilidade de processamento e baixo custo, propriedades isolantes (térmico e elétrico) a aplicações comerciais. Segundo Chauhan *et al.* (2008), polímeros à base de estireno são produzidos em grandes quantidades devido a sua versatilidade e, devido a isso, compreendem uma grande fração dos resíduos sólidos urbanos produzidos.

Segundo Odian (2004), cerca de 11 bilhões de libras de materiais poliméricos à base de poliestireno foram produzidas nos Estados Unidos em 2001. Características como resistência a ácidos e bases aquosos, isolante elétrico, clareza ótica devido à falta de cristalinidade, com boa resistência mecânica em razão da presença dos anéis aromáticos e fácil processamento já que sua temperatura de transição vítrea (T_g) é relativamente baixa (entre 90 e 100 °C) contribuíram para seu uso em larga escala. Apesar disso é facilmente atacado por UV (ultravioleta) e ozônio.

2.3.4.1 Poliestireno expandido (EPS)

Utilizado na maioria dos materiais de isolamento como ar condicionado e em embalagens para alimentos e produtos frágeis, o EPS está entre a maioria dos polímeros produzidos do mundo, porém é mais conhecido com o nome de isopor (CHAUHAN *et al.*, 2008). Com sua composição de cerca de 98% ar e 2% poliestireno, após o processo de expansão, as propriedades químicas do poliestireno se mantêm inalteradas (AMIANTI, 2005). A Figura 4 apresenta uma imagem do poliestireno expandido.

Figura 4 – Poliestireno expandido (isopor).

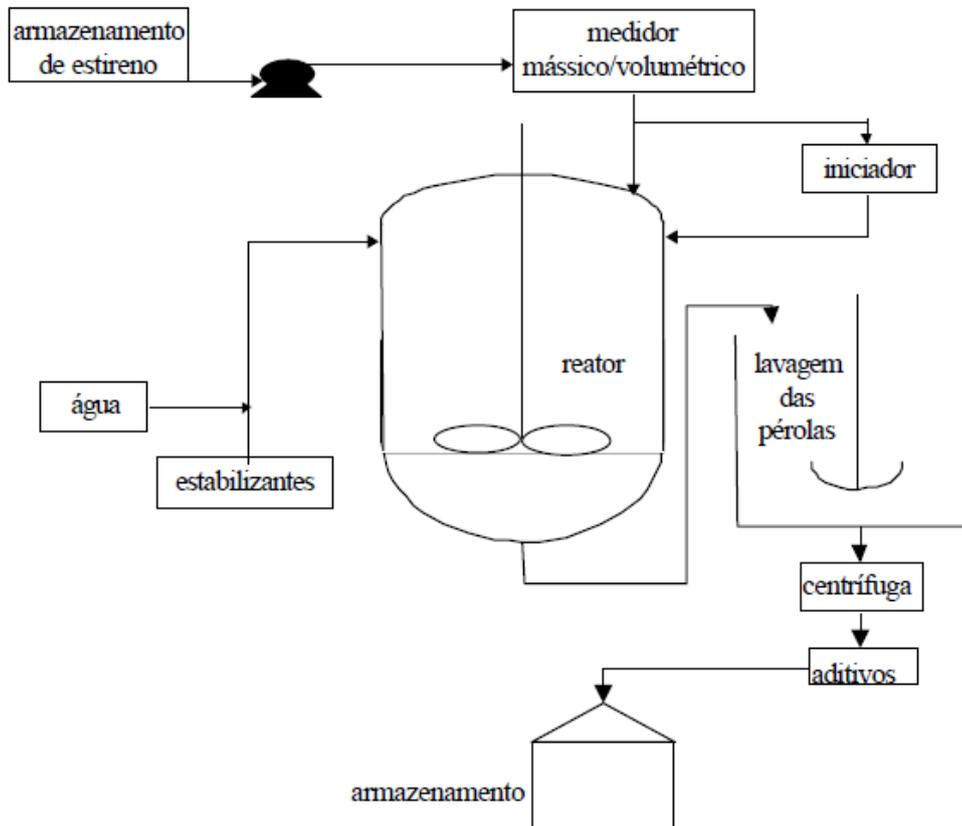


Fonte: Amianti (2005).

O principal meio de produção do EPS é por polimerização por suspensão. Esse processo ocorre em meio aquoso e pode ser dividido em duas etapas. A primeira ocorre a temperatura ambiente, onde são misturados além da água o estireno e o pentano (agente de expansão). Na segunda etapa ocorre um aumento de

temperatura e pressão no reator, permanecendo assim até que a reação se complete. Após as pérolas (o poliestireno assim chamado) são lavadas e secas em uma centrífuga (COSTA, 2006). A Figura 5 apresenta um esquema genérico da produção do poliestireno.

Figura 5 – Esquema da produção em suspensão de poliestireno expandido.



Fonte: Costa (2006).

Em questões ambientais, o EPS não é quimicamente poluente, é composto basicamente por carbono, hidrogênio e ar. Faz-se necessário sua reciclagem pois, devido a sua baixa densidade, ocupa enormes volumes em aterros e, quando devidamente manejado, é possível que seja 100% reaproveitado (Amianti, 2005).

Segundo Poletto *et al.* (2014), o EPS é um dos principais compostos usados para embalagens de produtos, conferindo segurança de produtos frágeis durante o transporte e manuseio quanto ao impacto, umidade, calor e isolamento químico. Além de embalagens, o EPS também é largamente aplicado na construção civil em prédios, estradas e pontes, e outras aplicações específicas como em mobília, estofamentos, entre outros.

A Associação Brasileira de Química (ABIQUM) (2020) cita que, de acordo com um estudo da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, o consumo de EPS anualmente chega a 2,5 milhões de toneladas no mundo, sendo que 36,6 mil toneladas só no Brasil. Em média, cerca de 34% do EPS produzido no país é reciclado, podendo ser completamente reaproveitado para produção de novos produtos como colas, solventes, injetados para confecção de novos objetos e geração de energia.

2.6 RECICLAGEM DO POLIESTIRENO EXPANDIDO

As mesmas propriedades que conferem a versatilidade nesses polímeros como durabilidade e resistência à abrasão, tornam esses materiais de difícil assimilação pela natureza. Sendo um dos polímeros de mais difícil tratamento pelo fato de, assim como os demais polímeros produzidos pelo homem, ser proveniente de hidrocarbonetos fósseis. Além disso, devido a sua baixa densidade, se acumula em amplas áreas nos aterros e no ambiente, podendo ser facilmente espalhado pelo vento (GEYER, 2017).

Um dos fatores que explica o montante de resíduos de EPS produzidos é a especificidade de sua utilização. Quando usado para embalagens, por exemplo, possuirá um formato específico que restringe sua utilização para outros propósitos, se tornando um resíduo imediatamente após seu uso (CHAUHAN *et al.*, 2008).

Além da disposição em aterros, outra prática utilizada para redução da quantidade de resíduos poliméricos era a combustão. Porém, devido a liberação de gases, como o benzeno, dioxinas e outra toxinas que, além de serem poluentes, são extremamente prejudiciais ao homem. Tanto que a prática de incineração está proibida atualmente (World Wide Found For Nature – WWF, 2019; CHAUHAN *et al.*, 2008). Estudo feito por Amianti (2005) diz que, até o ano de 2005 não se buscavam muitas maneiras de reciclar o EPS, pelo fato de ser composto por basicamente ar processos de reaproveitamento se tornavam inviáveis economicamente.

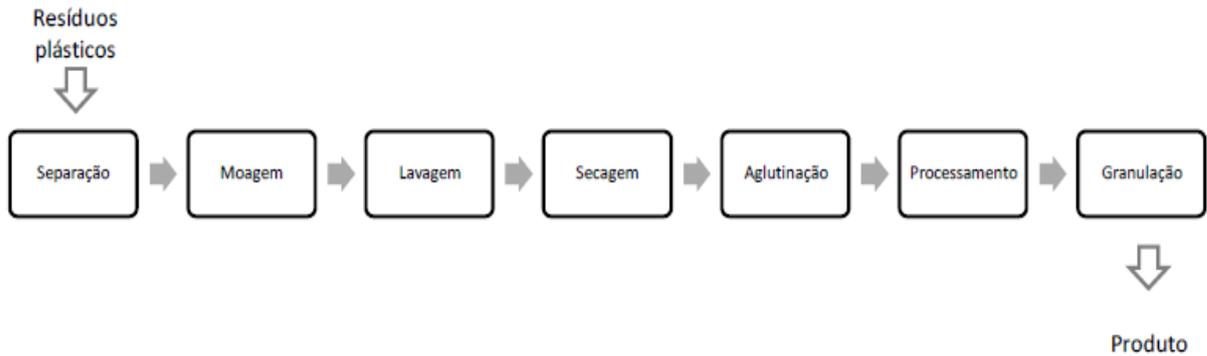
2.7 TIPOS DE RECICLAGENS DE POLÍMEROS

Spinacé e De Paoli (2005) e Poletto *et al.* (2014) explicam que existem 3 tipos de reciclagem de polímeros. Reciclagem primária e secundária (essas duas primeiras também são conhecidas como reciclagem mecânica) que envolvem na criação de novos produtos com as mesmas características dos polímeros originais. Reciclagem terciária ou química, que envolve o uso dos resíduos para a produção de elementos químicos ou combustíveis, e a reciclagem quaternária ou energética com a finalidade de obtenção de energia através da combustão controlada.

2.7.1 Reciclagem Mecânica

Com o objetivo de obter produtos com características semelhantes aos polímeros originais. Esta envolve certas etapas de seleção, moagem, lavagem, secagem e reprocessamento. Na seleção, que pode ser manual ou automatizada, tem o objetivo de separar impurezas (como vidros, papéis, metais e outros polímeros) que possam, porventura, alterar a composição final do polímero a ser reciclado. Foi criada pela ABNT uma simbologia para a segregação entre os diferentes tipos de resíduos poliméricos. Os métodos para separação são baseados na simbologia contida no resíduo, ou ainda por testes (de chama, temperatura de fusão, solubilidade, características físicas e de degradação térmica) que identificam propriedades particulares de cada polímero. Após da segregação vem a etapa de moagem para que, após as etapas de lavagem e secagem, o material seja melhor acomodado no equipamento de processamento. A lavagem serve para remover resíduos de detergente e a secagem para que não ocorra o processo de hidrólise em certos polímeros (SPINACÉ e DE PAOLI, 2008). A Figura 6 apresenta um fluxograma esquematizado das etapas da reciclagem mecânica.

Figura 6 – Etapas da reciclagem mecânica.



Fonte: Monteiro (2018).

2.7.2 Reciclagem Energética

Essa reciclagem não é nada mais que a incineração dos polímeros a fim de se produzir energia. Visto que polímeros são basicamente hidrocarbonetos, possuem um alto potencial energético quando queimados. Porém, além de gerar uma quantidade de energia elevada, a queima de certos polímeros que contenham halogênios (como cloro ou flúor) exemplo do PVC, gera gases tóxicos e carecem de um sistema de tratamento a jusante do processo. A Tabela 1 apresenta o potencial energético de alguns resíduos (PESSÔA, 2018).

Tabela 1 – Potencial energético de alguns resíduos.

MATERIAL	PODER CALORÍFICO [MJ/kg]
Polietileno	41,8
Polipropileno	30,9
Policloreto de vinila	13,3
Poliestireno	39,0
Politereftalato de etileno	21,8
Papel	16,0
Lixo orgânico	3,0

Fonte: Adaptado de PESSÔA (2018).

Monteiro (2018) aponta que, a incineração auxilia na redução da quantidade de resíduos acumulados no meio (cerca de 90%), a facilidade de instalação de uma planta rente a locais geradores de resíduos e o potencial de geração de energia.

Contudo, salienta o controle das emissões gasosas, evitando elementos potencialmente poluidores e elevados investimentos operacionais e de capital.

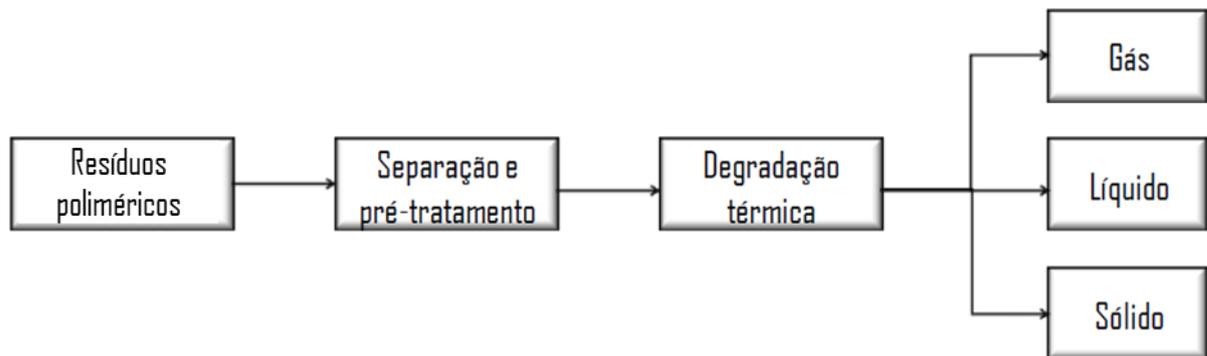
2.7.3 Reciclagem Química

É uma tecnologia avançada que, por meio de certos processos, provoca a despolimerização do polímero em questão em moléculas menores (predominantemente líquidos e gases), sejam elas novas moléculas ou o monômero do polímero original. Além das técnicas de pirólise e micro-ondas, que serão abordadas a seguir, existem outras técnicas, tais como hidrogenação, gaseificação, despolimerização química, fratura catalítica e fotodegradação. Desta forma, os resíduos poliméricos são reaproveitados, sendo inseridos novamente como novos polímeros. A desvantagem deste processo é que não pode ser usado em qualquer polímero. Polímeros obtidos pelo processo de adição por exemplo, que são um dos tipos mais gerados nos resíduos, sofrem a degradação por esse método e não a despolimerização como desejado (PESSÔA, 2018).

2.7.3.1 Reciclagem Química por Pirólise

Pirólise nada mais é que a degradação da matéria em um ambiente deficiente de oxigênio. Contudo, deve-se salientar que neste caso há dois tipos de pirólise. A pirólise a altas temperaturas (acima de 600 °C) que realmente degrada as amostras poliméricas não é indicada nestes casos, pois dificilmente irá recuperar o monômero original. A pirólise a baixas temperaturas que opera entre 450 a 600 °C onde que, neste caso, a probabilidade de despolimerização é bem mais acentuada, podendo haver a formação também de compostos aromáticos e gases leves, como o metano, e líquidos de alta temperatura de ebulição, como ceras (SPINACÉ e DE PAOLI, 2008). A Figura 7 representa um esquema geral do processo de pirólise de resíduos poliméricos.

Figura 7 – Esquema geral do processo de pirólise.



Fonte: MONTEIRO (2018).

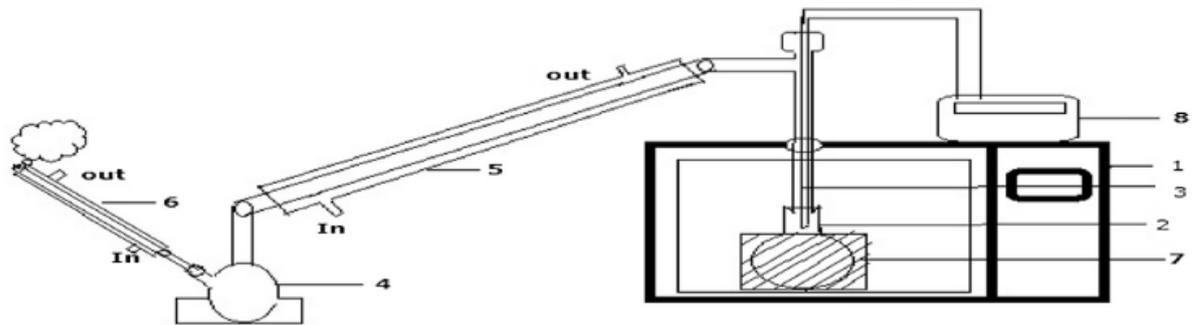
Os três produtos gerados pela pirólise (gás, líquido e sólido) podem ser manipulados com a alteração de parâmetros tais como temperatura, taxa de aquecimento e tempo de residência (MONTEIRO, 2018). Uma desvantagem desse tipo de reciclagem é que necessita de energia para que ocorra, por ser uma reação endotérmica. Pelo fato da degradação das moléculas requerirem alta temperatura e pelos polímeros possuírem baixa condutividade térmica, uma grande quantidade de energia é necessária para que a reação de despolimerização aconteça (SPINACÉ e DE PAOLI, 2008).

2.7.3.2 Reciclagem Química por Micro-ondas

A interação entre o polímero e energia gerada pelo forno micro-ondas proporciona um aumento da temperatura pela absorção da radiação na faixa do micro-ondas (300 MHz a 300 GHz). Seu uso tem vantagem em relação a pirólise pois necessita de menor tempo e menos energia (PESSÔA, 2018). A Figura 8 apresenta um esboço de um forno e os utensílios usados em um processo de despolimerização por micro-ondas.

Raju (2017), descreve que esse método é muito eficiente para a despolimerização de borracha quanto ao rompimento de ligações enxofre-carbono e enxofre-enxofre. Pode ser considerado como um processo de desvulcanização nesse caso.

Figura 8 – Esboço de um equipamento usado para despolimerização por micro-ondas.



Fonte: PRATHIBA *et al.* (2018).

Nota:

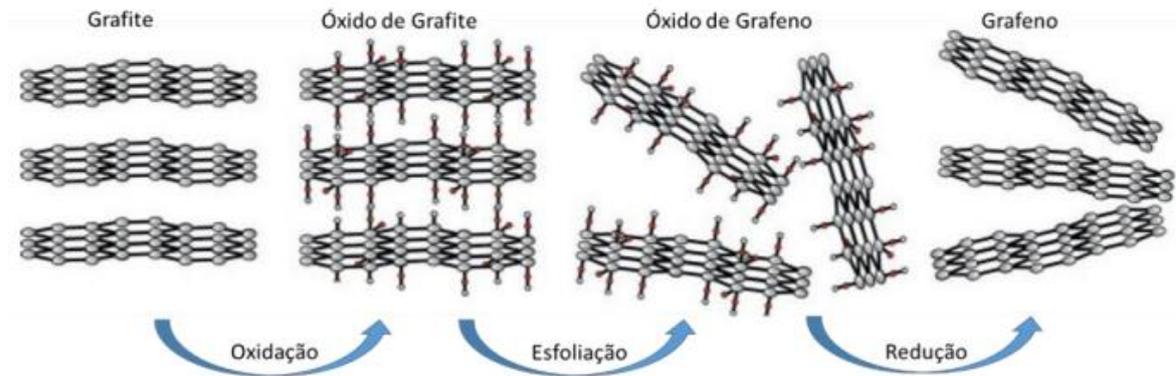
- 1- Forno micro-ondas;
- 2- Frasco de quartzo;
- 3- Termopar;
- 4- Frasco coletor;
- 5- Condensador 1;
- 6- Condensador 2;
- 7- Isolamento de lã de vidro e;
- 8- Indicador de temperatura.

O objetivo de utilizar a despolimerização por micro-ondas é para se obter novos produtos, entre eles o monômero base de formação para que sejam repolimerizados novamente ao polímero original. No caso do poliestireno busca-se, através da despolimerização, a obtenção da maior fração possível de estireno (PESSÔA, 2018).

2.7 ÓXIDO DE GRAFENO (OG)

Sendo uma etapa precursora da formação do grafeno, o OG é obtido pela reação de oxidação do grafite com fortes agentes oxidantes, como ácido sulfúrico, permanganato de potássio e nitrato de sódio (OLIVEIRA, 2018). Quimicamente bem semelhante ao óxido de grafite, pode-se descrever o OG como uma molécula de grafeno com grupos epóxi, hidroxila, carboxílicos e carbonila (MARASCHIN, 2016). A Figura 10 mostra o óxido de grafeno inserido no processo de obtenção do grafeno.

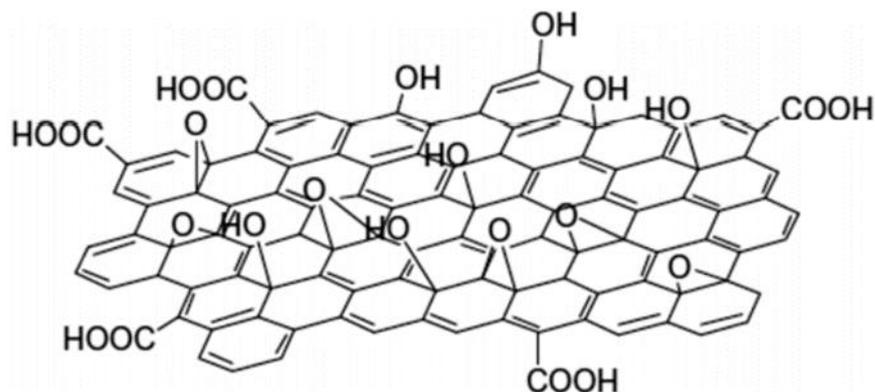
Figura 9 – Óxido de grafeno no processo de obtenção do grafeno.



Fonte: OLIVEIRA, 2018.

Ainda segundo Oliveira (2018) e Maraschin (2016), o OG possui amplas aplicações como em adsorventes e obtenção de nanocompósitos, sistemas de purificação de água, materiais com propriedades bactericidas, dispositivos fotovoltaicos, entre outros. Além de também apresentar um caráter anfifílico, com suas bordas hidrofílicas e seu plano basal hidrofóbico. A Figura 10 apresenta uma estrutura esquemática do óxido de grafeno.

Figura 10 – Estrutura esquemática do óxido de grafeno.



Fonte: MARASCHIN, 2016.

Os grupos funcionais presentes na estrutura do OG estão distribuídos sobre a molécula de forma aleatória. Essa distribuição depende desde do grafite de partida para a produção do OG até das reações realizadas nas etapas intermediárias do processo (BOTAS *et al.*, 2012).

2.8 CARVÃO ATIVADO (CA)

O carvão ativado é um membro da família dos materiais carbonoso que compreendem desde os negros de fumo até grafites nucleares, envolvendo entre eles também fibras de carbono e compostos de eletrodos de grafite. Porém a maioria das aplicações do carvão ativado compreende processos de adsorção como purificação da água por exemplo. Sua maior característica física é sua alta porosidade e, dentro desses poros, uma intensa força de Van der Waals magnifica suas propriedades adsorventes (MARSH; RODRIGUES-REINOSO, 2006).

Segundo Werlang *et al.* (2013), o carvão ativado é produzido a partir de fontes biológicas de carbono que são desidratadas, carbonizadas em um ambiente com deficiência de oxigênio e, por último, passam por um processo de ativação. A maioria dos carvões apresentará pequenas diferenças entre si devido as características do material precursor de sua formação.

De acordo com Mroczec e Kruguer (2003), o carvão ativado possui propriedades diferenciadas quando submetido a um campo de micro-ondas. O carbono funciona como um condutor elétrico pois possui, de certa forma, elétrons livres de carga devido a estrutura do grafite – semelhante a um metal – que buscam orientar-se na direção do campo, fazendo com que o carbono seja aquecido indutivamente.

2.9 ESTUDOS SOBRE A RECICLAGEM DO POLIESTIRENO EXPANDIDO

Undri *et al.* (2013), avaliou a polimerização reversa do poliestireno expandido por micro-ondas assistido por pirólise. Esse modelo permite um aquecimento e conseqüentemente uma reação mais rápida e salienta o uso de metais ou materiais a base de carbono para absorver as micro-ondas e as converter em calor. Foi utilizado uma certa faixa de potência e de composição do sólido carbonoso absorvente. O produto obtido dos experimentos foi um líquido de baixa viscosidade enriquecido de estireno juntamente com baixas quantidades de carvão e gás.

Nazybulin *et al.* (2015) investigaram a decomposição térmica do poliestireno e do polimetilmetacrilato expostos a um campo de micro-ondas. O processo se assemelha ao da Figura 8, com um forno de 2,45 GHz de frequência. A

despolimerização do PS ocorreu em torno de 260 °C, a proporção PS e sólido carbonoso foi de 3:1, com um tempo total de despolimerização de 7 minutos. Obtiveram valores de 60% de rendimento.

Bartoli *et al.* (2015) obtiveram bons resultados com um estudo de despolimerização do PS por micro-ondas em baixas pressões com carbono como absorvedor. Obteve um rendimento de 75% superior ao obtido a temperatura ambiente. O produto era um líquido límpido de baixa densidade e viscosidade ao contrário do líquido marrom formado pela pirólise. A concentração máxima de estireno encontrada no líquido foi de 71,9% em massa.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

O poliestireno expandido utilizado neste trabalho foi proveniente de restos de embalagens coletados na empresa Alumiconte, localizada em Vila Flores, no estado do Rio Grande do Sul.

O carvão ativado utilizado nos experimentos foi fornecido pelo Laboratório de Energia e Bioprocessos (LEBio), localizado na Universidade de Caxias do Sul e preparado segundo a descrição de Ferreira *et. al* (2017).

O óxido de grafeno (OG) utilizado foi obtido de um trabalho anterior (OLIVEIRA *et al.*, 2018). Produzido a partir da oxidação do grafite comercial seguindo o procedimento utilizado por Oliveira *et al.* (2018).

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Amostra

O EPS coletado, proveniente em sua maior parte de embalagens já utilizadas, foi limpo de contaminantes (caso houver) e triturado para que possa ser inserido no balão do ensaio. A sua baixa massa e grande volume impossibilita a utilização de grandes quantidades nos experimentos.

A amostra de EPS, mantida sempre no valor de 1 g, foi misturada com teores diferentes de carvão ativado e óxido de grafeno afim de obter o(s) teor(es) de melhor(es) rendimento(s). O Quadro 3 apresenta a nomenclatura das proporções utilizadas.

Quadro 3 – Teores de carvão ativado e óxido de grafeno utilizados nos ensaios.

Nome da amostra	Carvão Ativado			Óxido de Grafeno		
	CA 0,125	CA 0,250	CA 0,500	OG 0,125	OG 0,250	OG 0,500
Quantidade dos agentes de despolimerização (g)	0,125	0,250	0,5	0,125	0,250	0,5

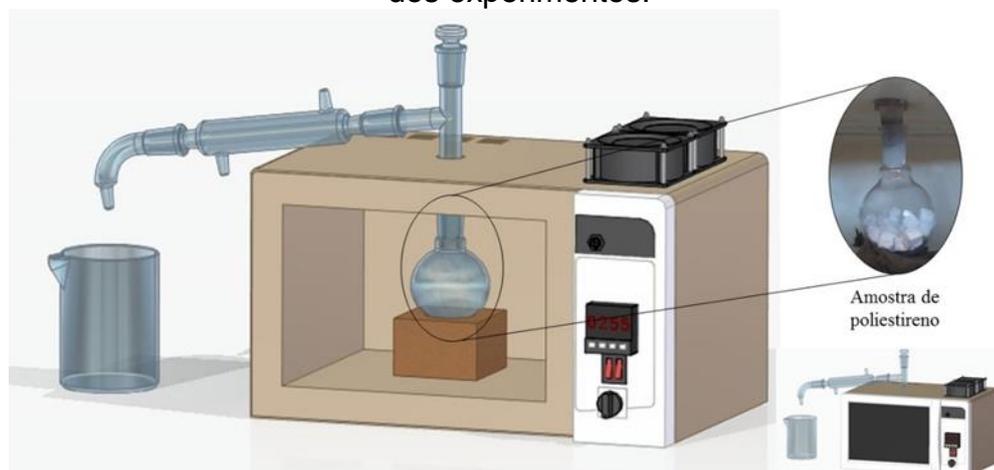
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

A amostra foi acondicionada dentro de um balão volumétrico envolto por lã de rocha como material isolante térmico. Os números 2 e 7 apresentados na Figura 8 exemplificam o acondicionamento da amostra.

3.2.2 Metodologia de despolimerização

A despolimerização foi realizada em um forno micro-ondas da marca Electrolux, com 400 W de potência. O tempo que a amostra permaneceu dentro do aparelho foi de 12 minutos. Este tempo foi adotado com base em estudos realizados anteriormente por Marco (2019), também sobre a despolimerização do EPS por micro-ondas. A Figura 11 apresenta um esboço montado do sistema de despolimerização.

Figura 11 – Esquema do processo de despolimerização utilizado para a realização dos experimentos.



Fonte: MANERA (2021).

O objetivo da utilização dos agentes de despolimerização carbonosos é para que estes absorvam energia e passem para o polímero, promovendo sua despolimerização em seu monômero base. Um aparato de condensação foi montado na parte externa do micro-ondas, como pode-se observar na Figura 11, para que os gases produzidos pelo processo sejam condensados e retidos em um bquer.

3.2.3 Caracterização dos produtos obtidos

3.2.3.1 Análise morfológica

As informações morfológicas das amostras foram obtidas por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) em um equipamento da marca JOEL, modelo JSM 6060 com uma tensão de aceleração de 10 kV.

3.2.3.2 Análise de área superficial

A área superficial foi determinada usando as isotermas de Langmuir e Brunauer-Emmett-Teller (BET) em um analisador de área superficial e tamanho de poro, Nova 1200e da Quantachrome Instruments por adsorção de N₂ a 77K.

3.2.3.3 Balanço de massa

Foi realizada a pesagem da amostra em uma balança analítica antes e após cada ensaio para determinar o balanço de massa e avaliar desta forma a fração sólida, líquida e gasosa obtidas. A análise foi realizada em triplicata. O percentual de voláteis foi calculado de acordo com a Equação 1.

$$\% \text{ de voláteis} = \left[\frac{(A - B)}{A} \right] \cdot 100 \quad (1)$$

Sendo A a massa inicial da amostra e B a massa final. Para os cálculos, a massa do balão e dos agentes de despolimerização foram considerados constantes.

3.2.3.4 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

A análise foi realizada em um equipamento da marca Nicolet IS10 - Termo Scientific. Esta análise foi utilizada para determinar os grupos funcionais presentes na fração líquida e/ou sólida de produto coletado. O resultado foi obtido por meio da média de 32 varreduras, intervalo de 4000 cm^{-1} a 400 cm^{-1} , com resolução de 4 cm^{-1} .

3.2.3.5 Análise Termogravimétrica

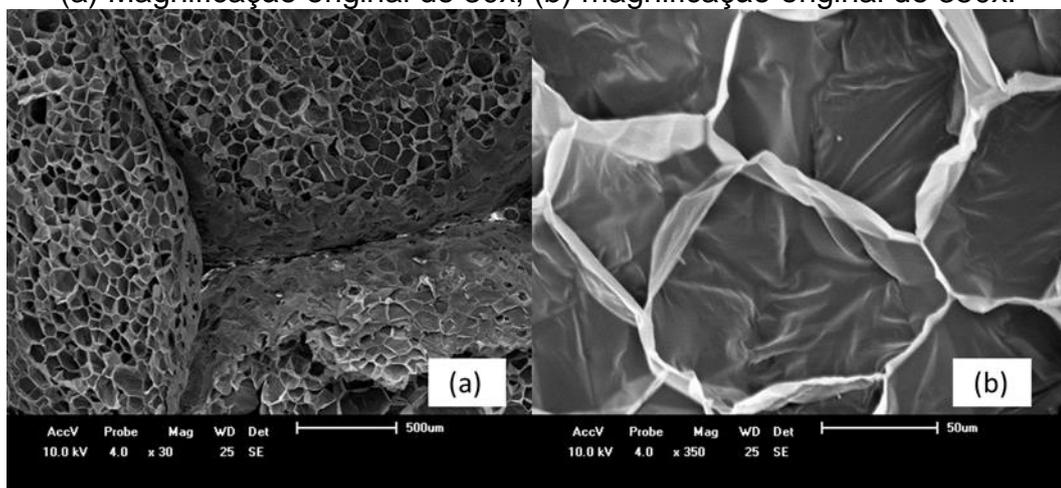
As análises termogravimétricas (TGA) foram realizadas em um equipamento da marca Shimadzu modelo TGA-50. A análise foi realizada com taxa de aquecimento de $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, com faixa de temperatura de 23 a $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, em atmosfera de N_2 a um fluxo de $50\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE MORFOLÓGICA

A Figura 12 (a) e (b) mostra as micrografias obtidas por MEV da amostra de isopor, nas magnificações de 30 e 350 vezes, respectivamente.

Figura 12 - Micrografias no MEV do isopor
(a) Magnificação original de 30x; (b) magnificação original de 350x.

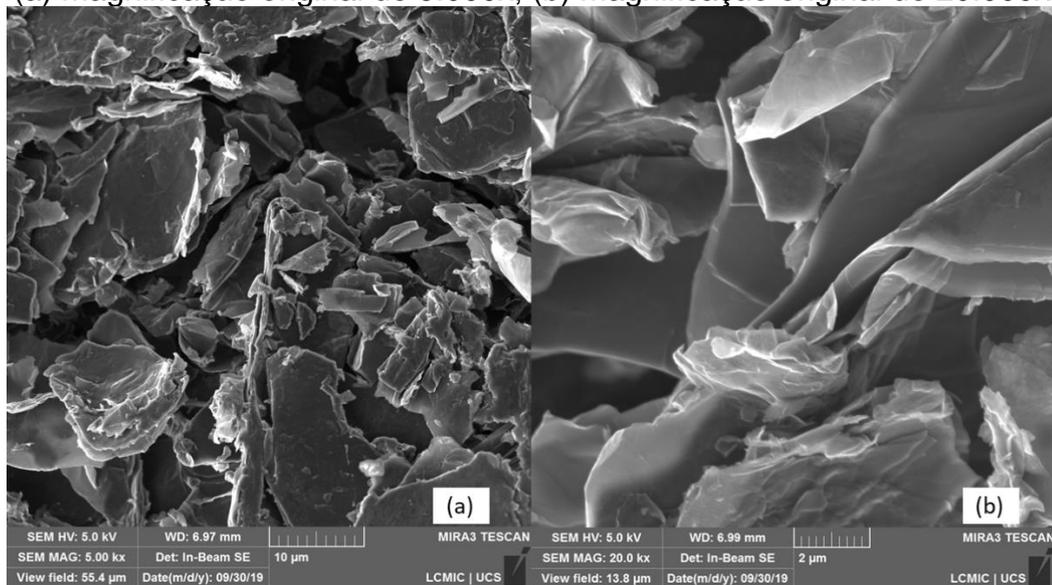


Fonte: Elaboração do próprio autor (2021).

Em ambas a figuras (a) e (b) pode-se observar uma estrutura celular repleta de ar, característica do processo de polimerização do estireno. O poliestireno expandido é composto por cerca de 2% em massa de poliestireno e 98% em massa de ar (AMIANTI, 2005).

A Figura 13 (a) e (b) apresenta as micrografias obtidas por MEV, com magnificações de 5.000 e 20.000 vezes, da amostra de óxido de grafeno.

Figura 13 - Micrografias no MEV do óxido de grafeno
(a) magnificação original de 5.000x; (b) magnificação original de 20.000x

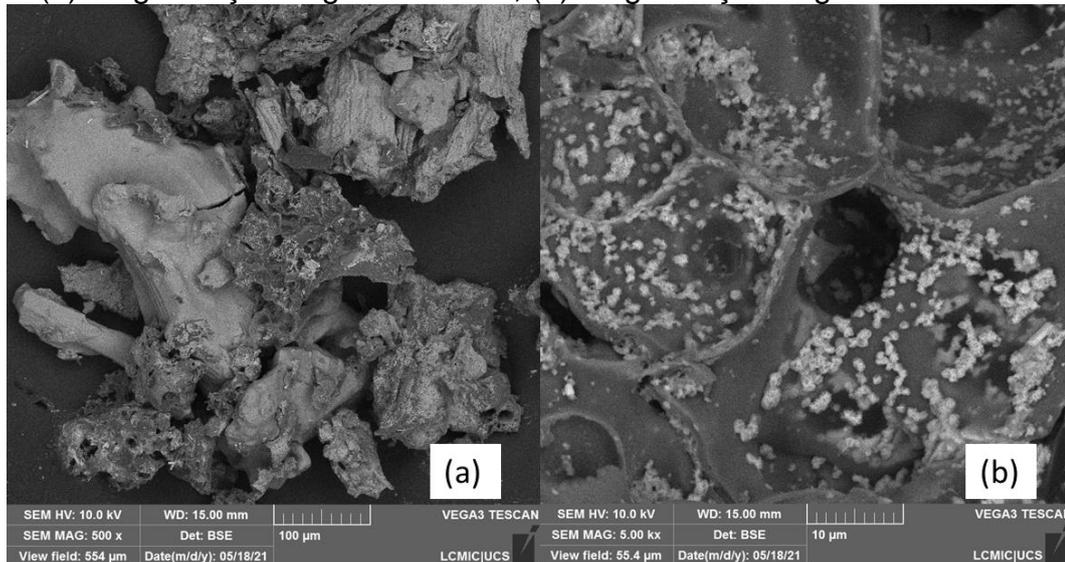


Fonte: Elaboração do próprio autor (2021).

Na Figura 13(a) está apresentada a micrografia do OG disperso na forma de pó. Já na Figura 13(b), com um grau de magnificação maior, pode-se observar um material semelhante a um filme fino, composto por diversas lamelas. Essa estrutura lamelar, de elevada área superficial, é característica desse tipo de composto (OLIVEIRA *et al.*, 2018).

A Figura 14 (a) e (b) apresenta as micrografias, com magnificações de 500 e 5.000 vezes, da amostra de carvão ativado.

Figura 14 - Micrografias no MEV do carvão ativado
 (a) magnificação original de 500x; (b) magnificação original de 5.000x.



Fonte: Elaboração do próprio autor (2021).

Com base na Figura 14 pode-se observar que a morfologia do CA tem características rugosas e com grande número de poros, que lhe conferem uma elevada área superficial. Essa característica rugosa e com grande número de poros é proporcionada por sua matéria-prima ser de origem vegetal, neste caso o capim elefante (*Pennisetum purpureum*), e também pelos processos de degradação térmica (pirólise/gaseificação) que a amostra é submetida até a obtenção do carvão ativado. Tanto o processo de pirólise quanto o de gaseificação envolvem altas temperaturas associadas com a ausência parcial ou total de oxigênio que, nestas condições, favorecem a liberação da matéria volátil presente na estrutura vegetal, conferindo assim essa estrutura característica. Segundo trabalho de Pinto *et. al* (2013), o elevado número de poros confere ao carvão ativado sua elevada área superficial que, na maioria dos carvões varia de 200 a 1500 m².g⁻¹.

4.2 ANÁLISE DE ÁREA SUPERFICIAL (BET)

A Tabela 2 apresenta os dados da área superficial do óxido de grafeno e do carvão ativado.

Tabela 2 – Área superficial dos agentes de despolimerização utilizados.

	Óxido de grafeno	Carvão ativado
Área Superficial (m².g⁻¹)	34,00	438,12

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Pela análise de BET o CA apresentou uma elevada área superficial, cerca de 10,2 vezes maior em relação ao OG. Fato esse um tanto inesperado, pois o OG utilizado está em nível nanométrico. Quanto maior a área superficial, maior será o espaço para a incidência da energia proveniente do forno micro-ondas, possibilitando uma maior quantidade para transformação desta em calor. Um fator que afetou na área superficial do OG possivelmente foi a atração eletrostática entre as lamelas, mantendo-as sobrepostas e, assim, gerando uma estrutura final mais densa.

4.3 BALANÇO DE MASSA

O balanço de massa foi realizado com o objetivo de observar se houve alguma alteração significativa no sistema dos ensaios, já que, teoricamente, ocorreu uma reação química no interior balão. Essa reação pôde ser confirmada com a observação da formação de gás e gotículas de líquido ao longo do sistema montado. A Figura 15 apresenta o produto de poliestireno após a reação no micro-ondas para a amostra de poliestireno com OG.

Figura 15 - Fração sólida e de óleo obtidas após a reação no micro-ondas com a amostra de OG 0,250.



Fonte: O autor (2021).

Tanto o OG quanto o carvão CA utilizados como agentes de despolimerização foram considerados inertes para os cálculos referentes ao balanço de massa. Vale ressaltar que certos parâmetros, como a massa de 1 g de EPS e o tempo de 12 min, foram considerados constantes, pois foram baseados naqueles realizados anteriormente por Marco (2019) utilizando o mesmo equipamento, modificando-se apenas as concentrações dos agentes de despolimerização para que não seja perdido o controle do sistema com a oscilação de muitas variáveis. O Quadro 4 apresenta o percentual de voláteis obtidos nos balanços de massa dos ensaios realizados utilizando OG.

Quadro 4 – Percentual de voláteis obtidos nos ensaios realizados com OG.

Amostra	% de voláteis
OG 0,125	1,43 ± 0,65
OG 0,250	22,58 ± 2,24

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

As amostras OG 0,125 apresentaram um rendimento abaixo do esperado. Fator este que pode ser influenciado pela quantidade de lã de rocha que foi colocada em torno do balão, por ela ser assentada manualmente sua disposição em volta do

balão sempre irá variar de ensaio para ensaio. Testes preliminares feitos com somente metade da lã de rocha cobrindo o balão não apresentaram quaisquer indícios de despolimerização. A hipótese da massa de OG ser muito pequena e insuficiente para que ocorra a despolimerização, como citado anteriormente, não deve ser excluída.

Os demais ensaios com OG 0,250, que apresentaram os melhores resultados, foram realizados com uma condição diferente de tempo de exposição à radiação de micro-ondas. Foi utilizado um tempo de 4 min, o que representa apenas um ciclo de exposição à radiação, visto que o tempo máximo para cada ciclo utilizado no equipamento é de apenas 4 min. Com essas condições foi possível observar a formação de gás e de pequenas gotículas dentro do balão, além da fração sólida, como pode-se observar na Figura 16. A fração gasosa, tanto no balão quanto a que passou no condensador, não foi possível de ser coletada pela necessidade, talvez, de um equipamento mais eficaz de condensação. Nesses experimentos não foi optado por um tempo total de 12 minutos estabelecido nos materiais e métodos com receio de que essas condições pudessem trincar o balão.

Figura 16 - Balão do experimento com a fração gasosa formada.



Fonte: O autor (2021).

Os testes com amostra OG 0,500, que possui uma concentração de 0,5 g de OG apresentaram uma severa reação dentro do balão já nos primeiros segundos após a início do ensaio. Foi possível observar pequenas faíscas dentro do forno e uma intensa formação de gás na saída do balão, sendo imediatamente cessado o ensaio ao serem notadas essas condições. Acredita-se que, devido a quantidade de OG ser elevada e por sua alta capacidade de absorção da radiação e a subsequente transformação das micro-ondas em calor a temperatura dentro do balão atingiu valores superiores a 300 °C, que foram suficientes para volatilizar o EPS, mesmo com alguns segundos de ensaio, mas também gerou calor suficiente para trincar o balão e promover faíscas durante o experimento. Desta forma, optou-se por não mais utilizar essa condição de teste durante a realização dos experimentos.

O Quadro 5 apresenta o percentual de voláteis obtido durante a realização dos ensaios utilizando CA.

Quadro 5 – Percentual de voláteis obtidos nos ensaios realizados com CA.

Amostra	% de voláteis
CA 0,125	5,13 ± 0,56
CA 0,250	9,16 ± 0,69
CA 0,500	3,06 ± 0,01

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Os testes com as amostras de CA 0,125 não foi possível observar a formação da densa massa gasosa como em algumas experiências anteriores. Contudo, percebeu-se uma redução no volume de EPS dentro do balão e esse estava com um aspecto de levemente “cozido”.

As amostras CA 0,250 apresentou um aumento do teor de voláteis em torno de duas vezes superior a amostra de CA 0,125. O dobro da massa de carvão possibilitou mais quantidade de agente de despolimerização para absorver a energia das micro-ondas e transferi-la para a amostra de EPS.

Contudo, para a amostra de CA 0,500, houve uma queda na porção de voláteis gerada, não seguindo uma linearidade com o aumento da fração de CA. Fato este que pode ser explicado por fatores externos tais como o sistema de isolamento do balão que poderia acarretar em uma transferência de calor não uniforme do CA para o EPS.

Pôde ser observado em alguns dos experimentos uma relação entre a massa dos agentes de despolimerização utilizada com a ocorrência ou não da reação. Em casos onde a quantidade de OG ou de CA foi muito pequena não foi possível observar qualquer indício de despolimerização pois, acredita-se, que ambos ficaram concentrados em um pequeno ponto e pela sua quantidade não foi possível que atingisse a temperatura ideal para que o processo ocorresse. Já, outros ensaios apresentaram uma instabilidade muito alta em seus resultados, com significativas variações nas bateladas realizadas, inclusive entre as triplicatas onde haviam condições iniciais de ensaio parecidas.

Bartoli *et al.* (2015) realizaram experimentos envolvendo a despolimerização do poliestireno por pirólise assistida por micro-ondas com dois agentes de despolimerização: um pó de carbono proveniente de pneus e carboneto de silício. Em um sistema com o controle de fatores como pressão, fluxo de nitrogênio e potência do micro-ondas conseguiu-se, em sua melhor condição, um rendimento de 94,3% de rendimento de fração líquida. Nesse ensaio foi utilizado 101,2 g de poliestireno e pó de carbono a uma razão (PS/carvão) de 2,21, com um tempo de 28 min a um fluxo de 0,215 L/min de N₂. As conclusões do autor foram que uma pressão menor auxilia nos resultados, assim como temperaturas de em torno de 800 °C.

Nos experimentos de Prathiba *et. al* (2018) foi realizado em um forno micro-ondas e a amostra foi colocada em um frasco de quartzo revestido por lã de vidro, com um sistema de condensação no final do processo e o agente de despolimerização foi o carvão ativado de área superficial 691,87 m².g⁻¹. Em sua melhor condição foi utilizado 50 g de EPS com a proporção de 10:1 com o carvão ativado, a uma temperatura de 418 °C por 1 h, gerando um rendimento em óleo de 93,04 % em massa. Contudo, pode-se observar que o rendimento da fração gasosa sofreu uma queda com o aumento da quantidade do agente de despolimerização e temperaturas abaixo de 400 °C contribuem mais ainda para sua diminuição.

Undri *et. al* (2013) também realizaram um experimento usando a despolimerização por micro-ondas com o carbono como agente de despolimerização variando a potência do micro-ondas, tempo de residência e as quantidades de PS/carvão. Em sua melhor condição obteve cerca de 66 % de estireno na fração líquida com as condições de ensaio de 22 min de tempo de residência, 100 g de EPS com relação de 2:1 com o carvão, atingindo uma temperatura de 407 °C. O autor relata

que com menores potências no micro-ondas auxiliam no rendimento da fração líquida, enquanto que potências mais altas ajudam na formação do sólido remanescente pela sua alta capacidade de aquecer a amostra.

4.4 ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

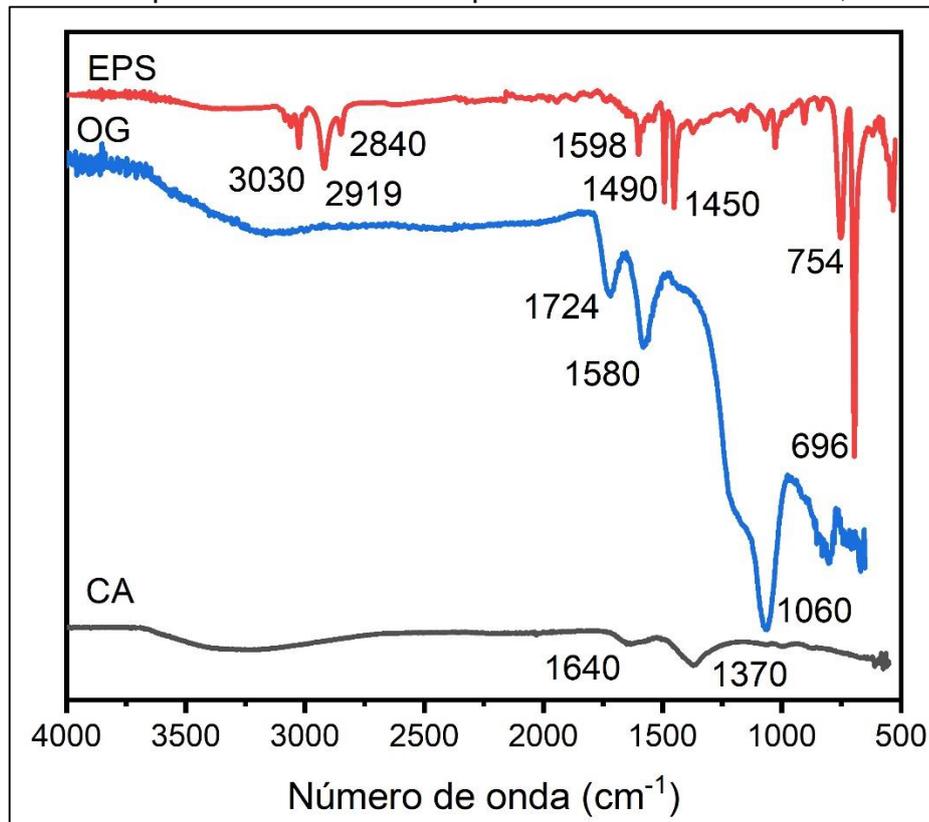
A Figura 17 apresenta o espectro de FTIR obtido para os materiais abordados em seu estado virgem.

Segundo Amianti (2005), bandas típicas de estiramento C-H e C-C aromáticos e alifáticos na região de 3050 cm^{-1} e 2850 cm^{-1} são bem visíveis, características do poliestireno, que se assemelha às obtidas neste trabalho (3030 a 2840 cm^{-1}). As bandas de 1450 a 1598 correspondem ligações C=C de compostos aromáticos e a deformação aguda em torno de 696 indica a presença do anel aromático.

O OG, obtido pelo método descrito por Oliveira *et al.*(2018) apresentou o espectro bem idêntico ao da autora que também confirma semelhança de bandas com Chen *et. al* (2013). Segundo esses autores, as bandas de 1724 cm^{-1} representam grupos carbonila, a de 1580 cm^{-1} carbono aromático e a 1060 cm^{-1} podendo ser álcoois ou fenóis.

Para o CA, segundo Teixeira (2020), bandas em torno de 1640 cm^{-1} , geralmente de ligações C=O é típico da presença de água, que pode estar relacionado à desidratação da biomassa. As bandas em torno de 1500 cm^{-1} correspondem a ligação C=C de aromáticos e podem ser atribuídos a dois possíveis fatores, à estrutura da lignina presente na matéria vegetal que passou inalterada pelos eventos de pirólise e ativação ou à formação de produtos oriundos da pirólise ou da ativação, com anéis aromáticos em sua estrutura.

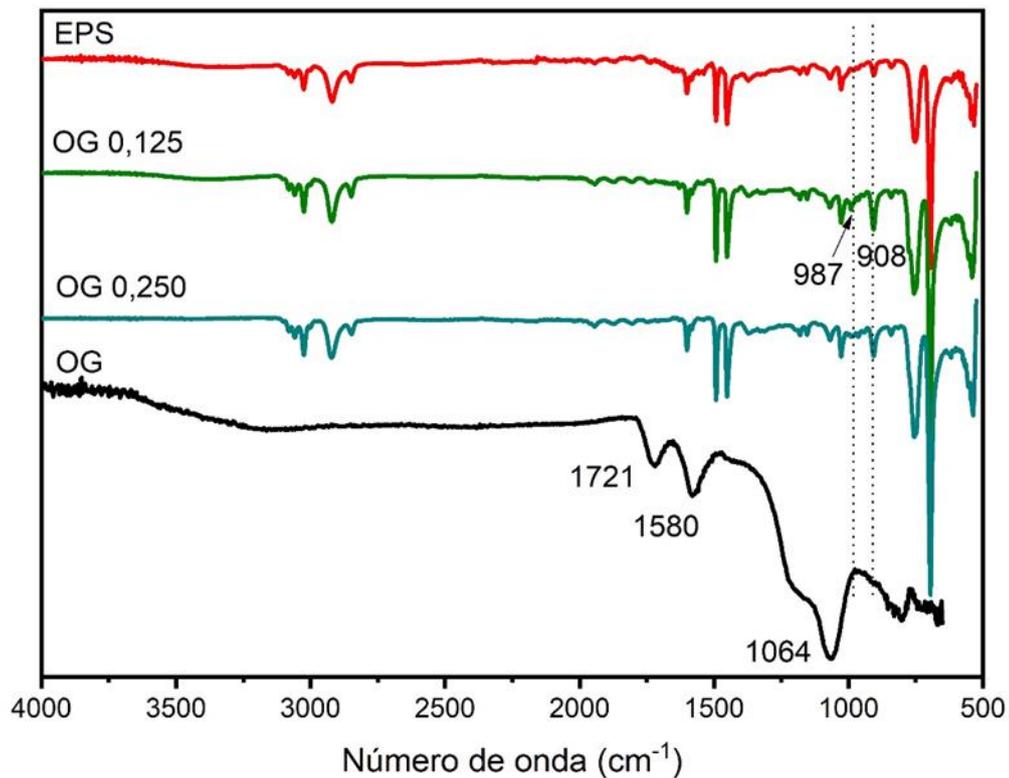
Figura 17 - Espectro de FTIR obtido para as amostras de EPS, OG e CA.



Fonte: O autor (2021).

Com a adição do OG pode-se observar o surgimento de algumas novas bandas que podem ser relacionadas a despolimerização do EPS, estas estão identificadas na Figura 18. A amostra de OG 0,250, onde foi identificada visualmente a melhor reação dentro do balão, poderia talvez, ter formado mais outros compostos com mais tempo de exposição às micro-ondas, porém, a batelada teve que ser conduzida a um tempo mais curto pela severidade das reações ocorridas no interior do balão.

Figura 18 - FTIR da despolimerização do EPS com OG

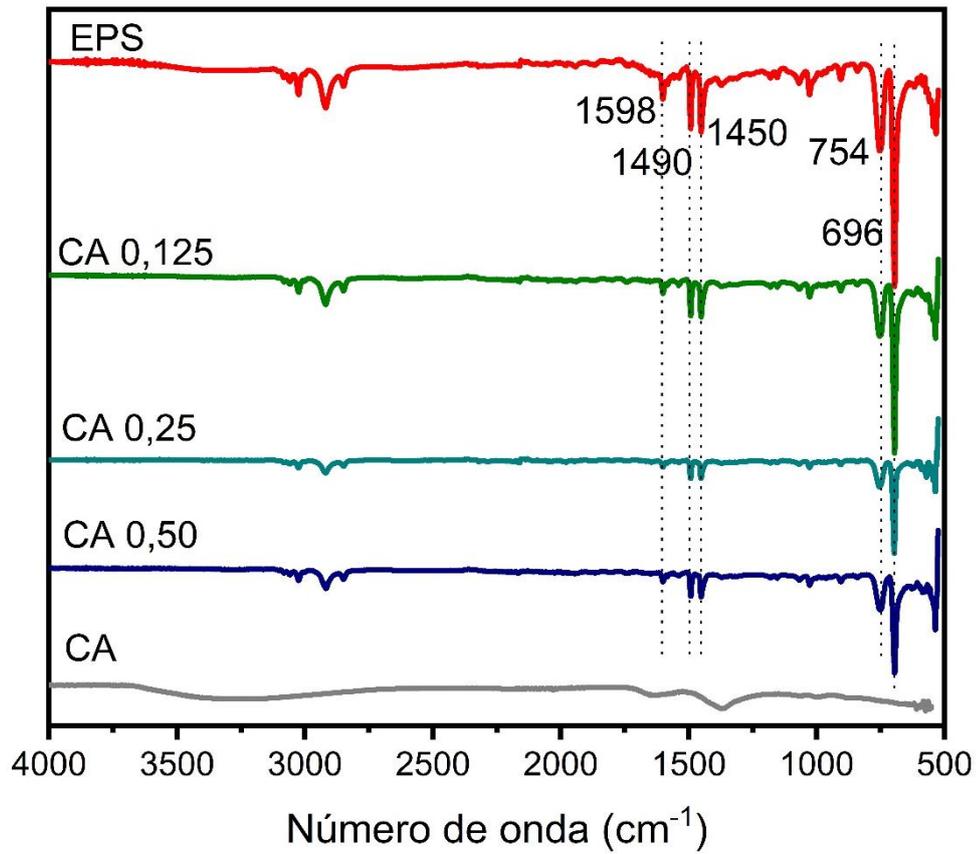


Fonte: O autor (2021).

As bandas na região de número de onda de 987 cm^{-1} e 908 cm^{-1} foram as que mais apresentaram mudança em relação ao espectro original do EPS. Estas correspondem a ligação C-H do grupo vinil fora do plano. Pode-se que as bandas da amostra OG 0,125 estão levemente mais acentuadas em relação a amostra OG 0,250, isso pode estar relacionado ao maior tempo de exposição à radiação com possível formação de grupos contendo hidroxilas.

A Figura 19 apresenta o FTIR referente aos ensaios utilizando CA.

Figura 19 - FTIR da despolimerização do EPS com CA.



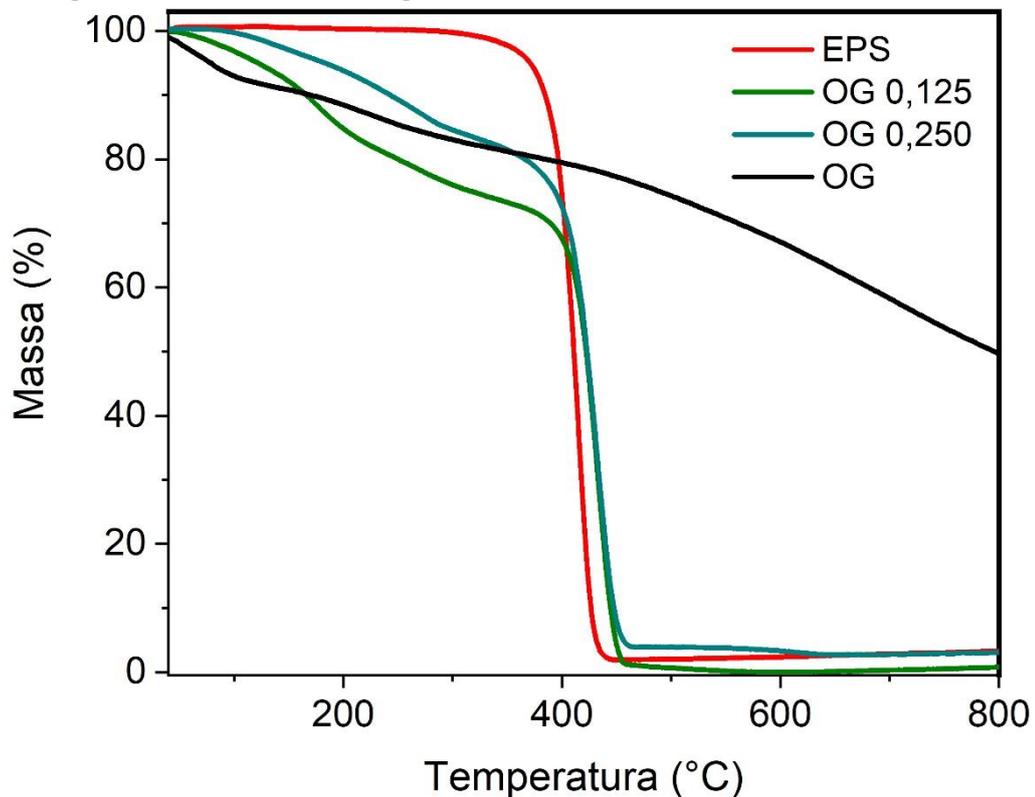
Fonte: O autor (2021).

A despolimerização das amostras contendo CA apresentou bandas praticamente idênticas à amostra de EPS *in natura*. Pode-se concluir que, por este método de análise, não houve formação de novos compostos ou, pelo menos, não foi possível identificá-los.

4.5 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA)

Os resultados da análise termogravimétrica das amostras contendo OG, do EPS e do OG estão representados na Figura 20. Pode-se observar que, em relação à curva do EPS *in natura*, as amostras com a adição do OG apresentaram diminuição da estabilidade térmica, isto pode ser decorrente da formação de novos compostos menos voláteis durante os testes. Percebe-se também que a curva de OG 0,125 sofreu uma diminuição maior que a OG 0,250, podendo estar associado ao fato dela ter ficado uma batelada completa de 12 min exposta à radiação, enquanto que a amostra OG 0,250 permaneceu somente 4 min.

Figura 20 - Curvas termogravimétricas das amostras contendo OG.



Fonte: O autor (2021).

Pode-se observar também na Figura 20 que a amostra constituída somente de OG apresenta três eventos de perda de massa. O primeiro está entre a temperatura ambiente até 100 °C, o segundo está localizado entre 100 e 280 °C representando uma perda de 10 % de sua massa e, por último, há uma degradação mais lenta de 280 a 800 °C com uma perda de aproximadamente 30 %. Estes eventos estão relacionados aos obtidos por Oliveira *et al.*(2018) que podem ser associados à perda da umidade da amostra, à degradação de hidroxilas, carbonilas ou outros agrupamentos e, a última, à combustão dos anéis aromáticos, respectivamente.

A amostra de EPS *in natura* apresentou apenas um evento de perda de massa entre 300 e 450 °C. Este evento, típico do EPS, representa a decomposição de sua estrutura (PRATHIBA *et al.*, 2008).

A Tabela 3 apresenta uma avaliação mais detalhada da análise de TGA das amostras com OG. A T3 % PD é a temperatura de 3% de perda de massa para cada amostra, com ela pode-se concluir que a amostra OG 0,250 é mais estável. A T Pico é a temperatura de pico, ou seja, a temperatura de máxima degradação da amostra. As amostras despolimerizadas com OG apresentaram um evento de perda de massa em 177 °C para a amostra OG 0,125 e para a amostra OG 0,250 esse evento foi

deslocado para 276 °C. A ocorrência de um evento de perda de massa em temperaturas intermediárias entre as temperaturas de pico do OG e do EPS indica a formação de compostos intermediários, ou seja, compostos de baixa massa molar em relação ao EPS, que podem ter sido originários de sua despolimerização. A maior temperatura de pico para a amostra com 0,25 g de GO em relação a amostra com 0,125, pode estar relacionado ao menor tempo de despolimerização ao qual a amostra OG 0,250 foi submetida. Desta forma, a despolimerização ocorreu em menor extensão, gerando compostos de maior massa molar o que acarretaria em um aumento da T Pico 1. Este fato também pode estar refletindo no teor de cinzas, conforme mostrado na Tabela 3. A T Pico 2 não variou entre as amostras que tinham a adição de OG, uma vez que variações de $\pm 5^\circ\text{C}$ no TGA podem ser o erro do equipamento. Este comportamento pode indicar que ainda restou uma quantidade de EPS não despolimerizada, uma vez que esta temperatura está relacionada com a temperatura de máxima de degradação do EPS.

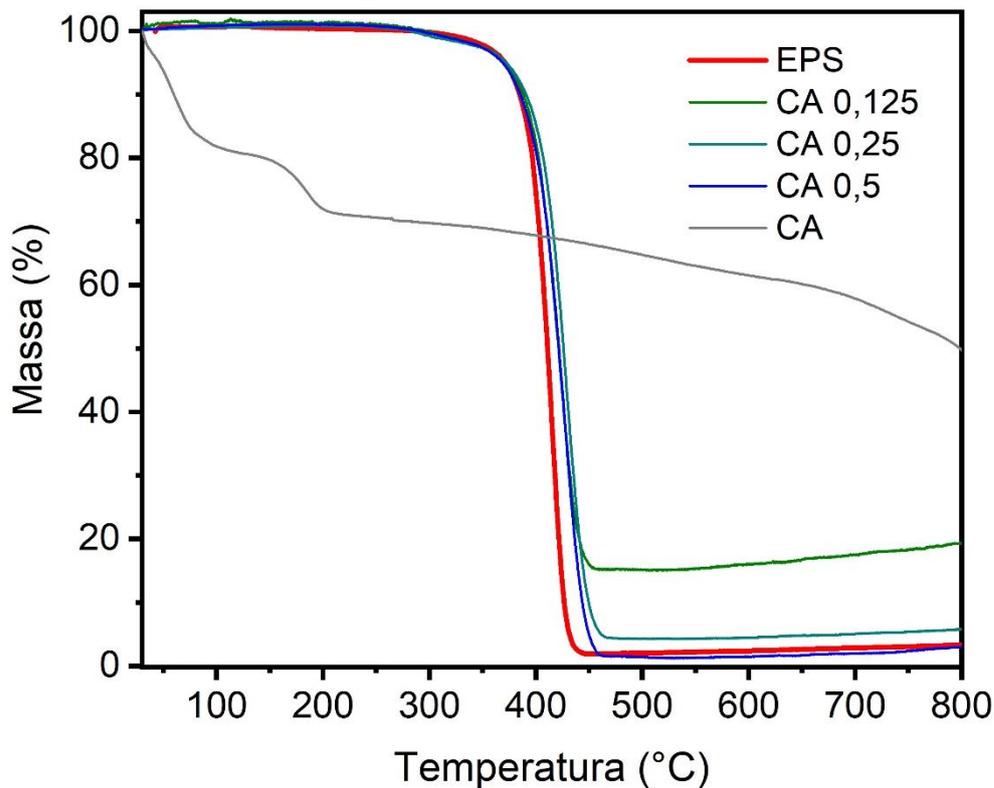
Tabela 3 - Dados da análise termogravimétrica das amostras com OG.

	T 3 % PD (°C)	T Pico 1 (°C)	T Pico 2 (°C)	Teor de cinzas (%) (800 °C)
EPS	358	---	421	3,3
OG	38	---	184	49,8
EPS/OG0,125	98	177	433	0,8
EPS/OG0,25	151	276	433	3,1
EPS/OG0,50	---	---	---	---

Fonte: elaborado pelo autor (2021).

A Figura 21 apresenta os dados relacionados a curva termogravimétrica das amostras envolvendo o CA.

Figura 21 - Curvas termogravimétricas das amostras contendo CA.



Fonte: O autor (2021).

A amostra de CA pura apresentou um evento de perda de massa da temperatura ambiente até aproximadamente 110°C, com perda de 20% de massa e temperatura de máxima degradação em 60°C. Um segundo evento entre 110-210°C com 10% de perda de massa e temperatura de máxima degradação em 184°C. Por fim, ocorre uma degradação mais lenta de 210°C até 800°C. Geralmente o primeiro evento de perda de massa está associado com a perda de umidade da amostra e, os demais, segundo Hayashi *et al.*(2002) são decorrentes de reações entre o carbono presente e o K_2CO_3 utilizado para promover a ativação do char.

As demais amostras envolvendo EPS com CA não apresentaram diferenças em relação a amostra de EPS *in natura*. A Tabela 4 apresenta uma avaliação mais detalhada da análise de TGA das amostras com CA.

Tabela 4 - Dados dos ensaios de TGA das amostras com CA.

	T 3 % PD (°C)	T Pico (°C)	Teor de cinzas (%) (800 °C)
EPS	358	421	3,3
CA	38	184	49,8
EPS/CA0,125	357	423	19,3
EPS/CA0,25	355	426	5,8
EPS/CA0,50	354	427	2,9

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Com base na tabela acima pode-se observar que não houveram significativas mudanças entre as temperaturas de T3% PD e T Pico. As pequenas diferenças podem ser atribuídas a variações do equipamento. O teor de cinzas das amostras com CA apresentou diferenças entre as amostras, talvez pelo fato de que a amostra despolimerizada pode ter a contaminação de algum sal inorgânico, possivelmente K_2CO_3 que é geralmente utilizado para promover a ativação do char, conforme comentado anteriormente. Da mesma forma que os resultados de FTIR, as análises de TGA não comprovaram a despolimerização do EPS com a utilização de CA.

5 CONCLUSÃO

A despolimerização por micro-ondas é um processo alternativo de reciclagem do poliestireno expandido, convertendo-o em novos produtos mais atraentes. Porém, necessita de algum outro material capaz de absorver a radiação e transformá-la em calor para que a despolimerização possa ocorrer, já que o polímero em questão carece dessa característica por si só.

Neste trabalho foi proposto a utilização de dois elementos para auxiliar com a absorção das micro-ondas, o óxido de grafeno e o carvão ativado. A princípio, os resultados sugerem que a transferência de calor da partícula escura para a amostra de EPS é mais efetiva com a utilização de OG.

Foram variados em três concentrações diferentes os teores de OG. Quando utilizou-se 0,125 g de OG foi obtido um rendimento em torno de 1,43 % de voláteis, sendo comprovado visualmente a baixa conversão. A condição com 0,25 g de OG, como pode-se ver, foi a melhor condição com rendimento em torno de 22,58 % de voláteis, com a formação de líquido e de uma densa fase gasosa. Não foi possível realizar os testes com a massa de 0,5 g de OG, visto que essas condições trincavam o balão de vidro.

Para os ensaios com CA foi obtido um rendimento em torno de 5,13 % de voláteis para a amostra com 0,125 g de CA, 9,16 % para a amostra com 0,25 g de CA e 3,06 % para a amostra com 0,5 g de CA. Esses três resultados não apresentaram um aumento linear como se esperava, sendo o último podendo ter intervenções externas.

Com os resultados de FTIR da amostra de 0,25 g de OG foi possível observar o surgimento de novas bandas, o que indica a formação de novos compostos. Para as amostras envolvendo CA não foi possível observar alterações na análise de FTIR. Da mesma forma podemos destacar as curvas de TGA, para as amostras com OG apresentaram uma diminuição na sua estabilidade, mais acentuada nos ensaios com 0,125 g de OG do que nas com 0,25 g de OG devido ao maior tempo de batelada utilizado, indicando a formação de compostos com menor massa molar que a do EPS. Para os testes com CA, as curvas de TGA foram semelhantes entre eles, não sendo possível confirmar se realmente houve a formação de novos elementos.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para o desenvolvimento de trabalhos futuros, propõe-se:

- Aprimorar o aparato de despolimerização previamente desenvolvido, para um melhor controle dos parâmetros de ensaio;
- Realizar testes com a variação do tempo de exposição à radiação;
- Realizar a análise de cromatografia líquida (HPLC) das amostras obtidas após a despolimerização e;
- Testar outras estruturas com capacidade de absorção da radiação na faixa de micro-ondas, como por exemplo o grafeno, para atuarem como agentes de despolimerização.

7 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA QUÍMICA – ABIQUIM. Comissão setorial de EPS. Disponível em: <http://www.epsbrasil.eco.br/noticia/view/168/e-possivel-reciclar-eps-isopor%C2%AE-entenda-as-tecnicas-e-os-resultados-desse-processo.html>. Acesso em: 3 nov. 2020.

ADNAN; SHAH, Jasmin; JAN, Muhammad Rasul. Recovery of Valuable Hydrocarbons from Waste Polystyrene Using Zinc Supported Catalysts. **Springer Science**. New York. Out. 2016.

AMIANTI, Marcelo. Uso e Aplicação do Poliestireno Expandido (EPS) Reciclado para Impermeabilização por Impregnação de Superfícies de Concreto Pré-fabricado. 2005. 123 f. Dissertação de Mestrado (Engenharia de Materiais). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT. Ouro Preto-MG. 2005.

ASKELAND, Donald R.; WRIGHT, Wendelin J. Ciência e engenharia dos materiais, 3 ed. São Paulo, SP: Cengage Learning, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2011.

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 DAS EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13220:** Embalagens e acondicionamento plásticos recicláveis - Identificação e simbologia. 2008.

BARTOLI, Matia; ROSI, Luca; FREDIANI, Marco; UNDRI, Andrea; FREDIANI, Piero. Depolymerization of polystyrene at reduced pressure through microwave assisted pyrolysis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**. 7 p. 2015.

BORRELLY, Daniel Fernandes. Estudo comparativo da degradação de poliestireno e de poliestireno de alto impacto por envelhecimentos natural e artificial. 2002. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade de São Paulo. São Paulo-SP, 2002.

BOTAS, Cristina; ÁLVAREZ, Patrícia; BLANCO, Clara; SANTAMARÍA, Ricardo; GRANDA, Marcos; ARES, Pablo; RODRÍGUES-REINOSO, Francisco; MENÉNDEZ, Rosa. The effect of the parent graphite on the structure of graphene oxide. **Elsevier**. p(275-282). 2012.

CALLISTER, Willian D. Materials science and engineering: an introduction. 8ª edição, United States of America: John Wiley & Sons, Inc, 2010.

CANEVAROLO JR, Sebastião Vicente. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 2 ed. rev. amp. Artliber editora, 2006. p.282.

Challa G. Polymer Chemistry – An Introduction. Ellis Horwood. London, 1993.

CHAUHAN R. S.; GOPINATH S.; RAZDAN P.; DELATTRE C.; NIRMALA G. S.; NATARAJAN R. Thermal decomposition of expanded polystyrene in a pebble bed reactor to get higher liquid fraction yield at low temperatures. **Waste Management**. p. 2140-2145. 2008.

CHEN, Ji et al. An improved Hummers method for eco-friendly synthesis of graphene oxide. *Carbon*, [s.l.], v. 64, p.225-229, nov. 2013. Elsevier BV.

COSTA, Letícia Alves da. Síntese e caracterização do poliestireno expansível: emprego conjunto de água e pentano como agentes de expansão. 2006. 150 f. Dissertação de mestrado (Programa de pós-graduação em ciência e engenharia de materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2006.

EOS Organização e Sistemas. Os números dos resíduos sólidos no mundo. Disponível em: <https://www.eosconsultores.com.br/os-numeros-dos-residuos-solidos-no-mundo/>. Acesso em: 01 nov. 2020.

FERREIRA, S. D.; BASSANESI, G. R.; LAZZAROTTO, I. P.; POLETTO, P.; GODINHO, M.; OSÓRIO, E. Preparação e caracterização de carvão quimicamente ativado com K_2CO_3 a partir do biochar de capim elefante. 57º Congresso Brasileiro de Química. Gramado-RS. 2017.

GEYER, Roland; JAMBECK, Jenna R.; LAW, Kara Lavander. Production, use, and fate of all plastics ever made. **SCIENCE ADVANCES**. jul. 2017.

GRAUSE, Guido; BUEKENS, Alfons; SAKATA, Yusaku; OKUWAKI, Akitsugu; YOSHIOKA, Toshiaki. Feedstock recycling of waste polymeric material. **J Mater Cycles Waste Manag**. Nov. 2011.

HAGE JR., Elias. Aspectos históricos sobre o desenvolvimento da ciência e da tecnologia de polímeros. *Polímeros*, São Carlos, v. 8, n. 2, p. 6-9, June 1998. Available from <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14281998000200003&lng=en&nrm=iso>. access on 02 Oct. 2020. <https://doi.org/10.1590/S0104-14281998000200003>.

HAYASHI, Jun'ichi; UCHIBAYASHI, Mikihiro; HORIKAWA, Toshihide; MUROYAMA, Katsuhiko; GOMES, Vincent G. Synthesizing activated carbons from resins by chemical activation with K_2CO_3 . **Pergamom Carbon**. p. 2747–2752. 2002.

INAGAKI, Yasuhito; KIUCHI, Shigeo. Converting waste polystyrene into a polymer flocculant for wastewater treatment. **Chemical Feedstock Recycling**. p. 14-19. 2001.

JENOVÊNCIO, Guilherme. Análise e Implementação de modelo constitutivo de viscoplasticidade em regime de deformação finita: aplicação em polímeros termoplásticos. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

KHALAF, Hussain I.; HASAN, Omar A. Effect of quaternary ammonium salt as a phase transfer catalyst for the microwave depolymerization of polyethylene terephthalate waste bottles. **Chemical Engineering Journal**. p. 45-48. 2012.

KAMIMURA, Akio; YAMAMOTO, Shigehiro; YAMADA, Kazuo. Depolymerization of Unsaturated Polyesters and Waste Fiber-Reinforced Plastics by using Ionic Liquids: The Use of Microwaves to Accelerate the Reaction Rate. **ChemSusChem**. p. 644-649. 2011.

KUMAR, P. Senthil; BHARATHIKUMAR, M.; PRABAKHARAM, C.; VIJAVAM, S.; RAMAKRISHNAN, K. Conversion of waste plastics into low-emissive hydrocarbon fuels through catalytic depolymerization in a new laboratory scale batch reactor. **Energy, environment, economics and thermodynamics**. Fev. 2015.

MANERA, Christian. Desenho reator. Destinatário: Davi Angelo Zancanaro. [s.l.]. 15 mai. 2021. 1 mensagem eletrônica.

MARASCHIN, Thuany Garcia. Preparação de óxido de grafeno e óxido de grafeno reduzido e dispersão em matriz polimérica biodegradável. 2016. 99 f. Dissertação de mestrado (Engenharia e tecnologia de materiais) – Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2016.

MARCO, Paula de. Despolimerização do poliestireno expandido através do uso de micro-ondas. 2019. 34 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, 2019.

MARSH, Harry; RODRIGUEZ-REINOSO, Francisco. **Activated Carbon**. Elsevier Science & Technology Books, 2006, p. 536.

MATOS, Carolina Ferreira de. Materiais nanocompósitos multifuncionais formados por látices poliméricos e grafeno ou óxido de grafeno: síntese, caracterização e propriedades. 2015. 149 f. Tese de doutorado (Química) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

MROCZEC, Uwe; KRUGUER, Klaus. Untersuchungen zur Regeneration von Aktivkohlen durch Mikrowellen. **Chemie Ingenieur Technik**. p. 955-958. 2003.

MOBERG, Å.; FINNVEDEN, G.; JOHANSSON, J.; LIND, P. Environmental impacts of landfilling of solid waste compared to other options. **Environmental Strategies Research Group**. Universidade de Stockholm. Suécia, 2001.

MONTEIRO, Alessandra de Rocha Duailibe. Contribuição da Reciclagem Química de Resíduos plásticos para o Desenvolvimento Sustentável. 2018. 339 f. Tese de Doutorado (Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2018.

NASYBULLIN, A. R.; DANILAEV, M. P.; BOGOSLOV, E. A. Research of the thermal destruction mechanism of non-absorbing polymers with microwave energy exposure. Anais: X International conference on antenna theory and techniques. Kharkiv, 2015.

ODIAN, George. **Principles of Polymerization**. 4 ed. Nova York. Wiley-Interscience. 2004. 839 p.

OLIVEIRA, Fernando Mendes de. Estudo da utilização do óxido de grafeno e do óxido de grafeno imobilizado em matriz de poli(divinilbenzeno) visando o tratamento do rejeito radioativo líquido contendo céσιο-137. 2018. 99 f. Dissertação de mestrado (Tecnologia nuclear) – Instituto de pesquisas energéticas e nucleares. São Paulo. 2018.

OLIVEIRA, Morgana de; POLETTO, Matheus; SEVERO, Tiago Cassol. Rota química para produção de óxido de grafeno a partir de oxidação do grafite comercial. **Revista Interdisciplinar de Ciência Aplicada**. Vol. 3. 2018.

PEREIRA, Michele Silva. Estudo do processo de craqueamento termocatalítico de polímeros (polietileno, polipropileno e poliestireno) para produção de combustível. 2016. 239 f. Tese de doutorado (Engenharia de recursos naturais) – Universidade Federal do Pará. Belém. 2016.

PESSÔA, Vitor Alves de Figueiredo. Reciclagem e Reutilização de Materiais Poliméricos Plásticos. 2018. 50 f. Trabalho Conclusão de Curso (Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2018.

POLETTI, Matheus; ORNAGHI Jr, Heitor L; ZATERRA, Ademir J. Expanded Polystyrene: Thermo-Mechanical Recycling Characterization and Application. In: **Polystyrene Synthesis, Characteristics and Applications**. Nova York: Cole Lynwood, 2014. p.(53-72).

PINGALE, N. D.; SHUKLA, S. R. Microwave-assisted aminolytic depolymerization of PET waste. **European Polymer Journal**. p. 2695-2700. Jun. 2009.

PINTO, Marcos Vinícios de Souza; SILVA, Denilson Luz da; SARAIVA, Augusto César Fonseca. Obtenção e caracterização de carvão ativado de caroço de buriti (*Mauritia flexuosa* L. f.) para a avaliação do processo de adsorção de cobre (II). *Acta Amazonica*. 2013, v. 43, n. 1, p. 73-80. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0044-59672013000100009>>. Epub 06 Nov 2012. ISSN 1809-4392. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672013000100009>. Acesso em: 09/06/2021.

Polímeros. Ciências da natureza e suas tecnologias. Disponível em: https://cejarj.cecierj.edu.br/pdf_mod4/CN/Unidade05_Quimica_Modulo4.pdf. Acesso em: 13/10/2020.

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**. Mar. 2018.

RAJU, Francis. Recycling of polymers: methods, characterization and applications. Wiley-VCH. 276 p. Mahatma Gandhi University. 2017.

SILVA, André Luis Bonfim Bathista e; SILVA, Emerson Oliveira da. Conhecendo materiais poliméricos. 84 f. Virtus Et Sapientia. Universidade Federal de Mato Grosso. 2003.

SILVERTEIN, R. M. *et al.* Spectrometric identification of organic compounds. 7. ed. Nova York: John Wiley. 2005.

SPINACÉ, Márcia Aparecida da Silva; PAOLI, Marco Aurélio de. A tecnologia da reciclagem de polímeros. *Quim. Nova*. Vol. 28, No. 1, p. 65-72. Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2005.

STREIT, Angélica Fátima Mantelli. Resíduos Poliméricos: quantificação, caracterização, lavagem e tratamento do efluente gerado no processo. 2016. 126 f.

Dissertação (mestrado em engenharia química) – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria. 2016.

TEIXEIRA, Josué da Luz. Obtenção e caracterização do carvão ativado a partir da casca de coco verde. 2020. 88 f. Dissertação (mestrado em engenharia mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2020.

UNDRI, Andrea; FREDIANI, Marco; ROSI, Luca; FREDIANI, Piero. Reverse polymerization of waste polystyrene through microwave assisted pyrolysis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**. p. 35-42. Florença. Out. 2013.

WERLANG, Eliana Betina; SCHNEIDER, Rosana de Cassia de Souza; RODRIGUEZ, Adriane Lawisch; NIEDERSBERG, Carolina. Produção de carvão ativado a partir de resíduos vegetais. **Revista Jovens Pesquisadores**. v. 3, n. 1, p. 156-167, 2013.

WORLD WIDE FOUND FOR NATURE – WWF. Brasil é o 4º país do mundo que mais gera lixo. 2019. Disponível em: <https://www.wwf.org.br/?70222/Brasil-e-o-4-pais-do-mundo-que-mais-gera-lixo-astico#:~:text=O%20Brasil%2C%20segundo%20dados%20do,Estados%20Unidos%2C%20China%20e%20%C3%8Dndia>. Acesso em: 19/10/2020.