

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS – UEA**  
**ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA – EST**  
**CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**GABRIEL DE OLIVEIRA RODRIGUES**

**PRODUÇÃO DE ESTIRENO VIA PIRÓLISE DE RESÍDUOS DE**  
**POLIESTIRENO A PARTIR DO TRATAMENTO QUÍMICO COM**  
**HIDRÓXIDO DE SÓDIO**

MANAUS

2023

**GABRIEL DE OLIVEIRA RODRIGUES**

**PRODUÇÃO DE ESTIRENO VIA PIRÓLISE DE RESÍDUOS DE  
POLIESTIRENO A PARTIR DO TRATAMENTO QUÍMICO COM  
HIDRÓXIDO DE SÓDIO**

**Monografia apresentada ao Curso de Graduação  
em Engenharia Química da Escola Superior de  
Tecnologia da Universidade do Estado do  
Amazonas, para obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Química.**

**Orientador: Prof. Doutor Sergio Duvoisin Júnior**

**Coorientador: Prof. Doutor Douglas Alberto Rocha de Castro**

**MANAUS**

**2023**

## **Ficha Catalográfica**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).  
**Sistema Integrado de Bibliotecas da Universidade do Estado do Amazonas.**

G118pp Rodrigues, Gabriel de Oliveira  
PRODUÇÃO DE ESTIRENO VIA PIRÓLISE DE  
RESÍDUOS DE POLIESTIRENO A PARTIR DO  
TRATAMENTO QUÍMICO COM HIDRÓXIDO DE SÓDIO  
/ Gabriel de Oliveira Rodrigues. Manaus : [s.n], 2023.  
72 f.: color.; 21 cm.

TCC - Graduação em Engenharia Química -  
Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2023.  
Inclui bibliografia  
Orientador: Sergio Duvoisin Júnior  
Coorientador: Douglas Alberto Rocha de Castro

1. Resíduos Plásticos. 2. Poliestireno. 3. Pirólise. 4.  
Catalisador. 5. Eficiência. I. Sergio Duvoisin Júnior  
(Orient.). II. Douglas Alberto Rocha de Castro  
(Coorient.). III. Universidade do Estado do Amazonas. IV.  
PRODUÇÃO DE ESTIRENO VIA PIRÓLISE DE  
RESÍDUOS DE POLIESTIRENO A PARTIR DO  
TRATAMENTO QUÍMICO COM HIDRÓXIDO DE SÓDIO

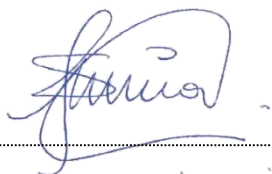
**Elaborado por Jeane Macelino Galves - CRB-11/463**

**GABRIEL DE OLIVEIRA RODRIGUES**

**PRODUÇÃO DE ESTIRENO VIA PIRÓLISE DE RESÍDUOS DE  
POLIESTIRENO A PARTIR DO TRATAMENTO QUÍMICO COM  
HIDRÓXIDO DE SÓDIO**

**Monografia de Conclusão de Curso para obtenção do título de Engenheiro, Habilitação  
em Engenharia Química – Escola Superior de Tecnologia, Universidade do Estado do  
Amazonas**

**Banca Examinadora:**



.....  
**Prof. Dr. Sergio Duvoisin Júnior – Orientador**



.....  
**Profa. Dr. Lizandro Manzato – IFAM**



.....  
**Profa. Dr. Elinéia Castro Costa – UEA**

**Manaus, 10 de março de 2023.**

**“Tentar não; faça ou não faça; tentativa não há.”**  
**Mestre Yoda**

**"Meus ataques não têm efeito em você?  
...quem disse isso?  
Você engoliu o meu sol?  
...quem disse isso?  
Quem decide aqui, sou eu!"**

**Escanor**

**“A felicidade pode ser encontrada mesmo nas horas mais difíceis, se você lembrar de acender a luz”**

**Alvo Dumbledore**

## AGRADECIMENTOS

A Deus por me manter de pé durante toda minha graduação, fortalecendo-me em cada momento, pela saúde e oportunidades.

A Elane Nery, minha mãe, pelo sacrifício e esforço que teve para que eu pudesse concluir esta graduação, apoiando-me desde o início desta jornada até finalizar este trabalho de conclusão de curso. Ao meu avô, João Nery, pelas condições e incentivos dados para eu estudar, trabalhar e principalmente, pelo exemplo de dedicação a família.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Doutor Sergio Duvoisin Júnior, que me ensinou valores inegociáveis, tornando-se referência não só profissionalmente, mas também como pessoa, bem como pelas oportunidades que me deu no campo da pesquisa, pelos ensinamentos, por me preparar para o mercado de trabalho. Ao meu coorientador, Prof. Dr. Douglas Alberto Rocha de Castro, por me preparar para ser um excelente engenheiro químico, por toda paciência, ensino e atenção dedicados a mim durante a produção do meu projeto. A ambos, pela amizade que construímos e por me mostrarem o quanto vale a pena correr atrás de cada um dos nossos sonhos.

As minhas líderes, Sara Kethleen e Aleyde Sales, que além de me mostrarem a importância do companheirismo, no âmbito profissional, tornaram-se grandes amigas, essenciais para os meus dias, dando apoio, incentivo, cuidando de mim durante a elaboração deste projeto.

A Raquel Santiago, meu ombro amigo, sejam em momentos agradáveis ou difíceis, detalhes da minha vida pessoal ou profissional, por todo amparo na finalização deste trabalho. A Carla Estefani pela parceria, ensinamento em gerenciar projetos, amizade acolhedora, por se preocupar em como estou diariamente. A Anne Souza por tornar meus dias mais leves, pelos conselhos em cada etapa que eu enfrentava, por todo cuidado em me manter nos eixos e tomar as melhores decisões, por ser uma amiga tão cuidadosa.

A toda equipe do Grupo de Pesquisa: Química Aplicada à Tecnologia da UEA, tanto na área de Energias quanto na de Monitoramento Ambiental, que me proporcionaram um ambiente de trabalho muito agradável, deram-me apoio, incentivo e sempre me auxiliavam no que fosse necessário para executar da melhor forma os experimentos e análises deste trabalho.

Aos meus amigos (as) que foram meus companheiros(as) desde o início da graduação, nas disciplinas que estudamos juntos, pelas comemorações por uma aprovação, o início de um projeto, o começo em um local de trabalho, por nos ajudarmos durante cada momento importante no ciclo da minha vida. O meu muito obrigado a Isabel Rebello, Rubem Silas, Josué Alves, Paulo Henrique, Gustavo Soares, Marcus Cunha e Ana Begnini.

As minhas parceiras do curso de engenharia química por toda paciência, empenho, dedicação e esforço, pelas noites de estudo, resumos, risadas, desespero antes/depois de uma prova, pelos seminários juntos e cada etapa até essa conclusão de curso, dedico este parágrafo a Maressa Pinho, Maria Eduarda e Pâmela Costa.

Encerrando, a cada um dos docentes e discentes que, direta ou indiretamente, contribuíram para continuar na busca deste sonho de me tornar um Engenheiro Químico.

## RESUMO

Com o aumento na utilização dos materiais plásticos, especialmente dos descartáveis a base de poliestireno, tem-se um crescimento da produção de resíduos sólidos em todo o planeta ocasionando diversos problemas socioambientais. Diante deste fato, diversas metodologias vêm surgindo com o intuito de proporcionar uma rota química de reciclagem eficiente para o tratamento de resíduos plásticos. Nesse contexto, este trabalho proporcionou um estudo sobre a influência catalítica da impregnação química com Hidróxido de Sódio para avaliar a otimização do processo de despolimerização, via Pirólise, do Blend Equimolar de copos descartáveis (PSAI) e embalagens alimentícias (XPS) residuais. Os experimentos foram realizados em triplicatas com amostras sem impregnação e com impregnação para comparação da eficiência do catalisador, em modo batelada, com um reator de aço inox com volume de 260 mL, na temperatura de 500 °C a 1,0 atm, inserido em um forno cilíndrico com controle digital de temperatura, na taxa de 10 °C/min e um sistema de resfriamento formado por um condensador reto. Os produtos obtidos no processo foram os gases não condensáveis, o produto líquido obtido (PLO) e a fase sólida (carvão). As frações líquidas foram caracterizadas através da densidade, viscosidade, índice de refração e cromatografia em CG-FID. Os PLO's obtidos, apresentaram seus rendimentos médios de 66,47% (sem impregnação), 74,73% (com impregnação – lavada) e 54,17% (com impregnação). Já para as características físico-químicas, os valores médios obtidos para os produtos sem impregnação foram de 0,9724  $g/cm^3$  de densidade, 1,3459  $mm^2/s$  de viscosidade e 1,5483 para o índice de refração, para as impregnações químicas com amostras lavadas tem-se 0,9585  $g/cm^3$  de densidade, 1,0457  $mm^2/s$  de viscosidade e 1,5472 para o índice de refração e para as amostras com impregnações químicas tem-se 0,9712  $g/cm^3$  de densidade, 1,2709  $mm^2/s$  de viscosidade e 1,5479 para o índice de refração. Os resultados do CG-FID apontaram a seguinte quantificação dos teores de estireno para as amostras sem impregnação de 54,87%, com impregnação nas amostras lavadas de 63,52% e sem a lavagem das amostras foi de 59,53%. Os dados obtidos experimentalmente mostraram que o NaOH, associado a uma etapa de lavagem posterior a impregnação, é um eficiente catalisador para o processo de pirólise aumentando a pureza do produto líquido obtido e o rendimento do processo, reduzindo o gasto energético do processo, sendo um método viável para a reciclagem desse material e reutilização desses produtos para produção de poliestireno.

**Palavras-chave:** Resíduos Plásticos; poliestireno; pirólise; catalisador; eficiência.

## ABSTRACT

With the increase in the use of plastic materials, especially disposable ones based on polystyrene, there has been an increase in the production of waste all over the planet, which ends up causing several socio-environmental problems. Several methodologies have emerged as means of recycling, such as pyrolysis, in order to provide a technological route for plastic waste. In this context, the project in question aimed to study the impregnation with Sodium Hydroxide as a catalyst for optimizing the pyrolysis process of an Equimolar Blend of disposable cups (PSAI) and food packaging (XPS) waste. The experiments were carried out in triplicates with Sample without impregnation and with impregnation to compare the efficiency of the converter, in batch mode, with a stainless steel reactor with a volume of 260 mL, at a temperature of 500 °C at 1.0 atm, inserted in a cylindrical oven with digital temperature control at a rate of 10 °C/min and a cooling system formed by a straight condenser. The products obtained in the process outside the non-condensable gases, the liquid product obtained (PLO) and the solid phase (coal). The liquid fractions were located by density, velocity, refractive index and GC-FID chromatography. The PLO's obtained, presented their average yields of 66.47% (without impregnation), 74.73% (with impregnation - washed) and 54.17% (with impregnation). As for the physical-chemical characteristics, the average values obtained for the products without impregnation were 0.9724  $g/cm^3$  of density, 1.3459  $mm^2/s$  of and 1.5483 for the index of refraction, for the chemical impregnations with washed samples we have 0.9585  $g/cm^3$  of density, 1.0457  $mm^2/s$  of degree and 1.5472 for the index of refraction and for the Sample with chemical impregnations has 0.9712  $g/cm^3$  of density, 1.2709  $mm^2/s$  of advances and 1.5479 for the index of refraction. The results of the CG-FID indicated the following quantification of styrene contents for the sample without impregnation of 54.87%, with impregnation in the washed samples of 63.52% and without washing of the samples was 59.53%. The data obtained experimentally showed that NaOH, associated with a washing step after impregnation, is an efficient catalyst for the pyrolysis process, increasing the purity of the liquid product obtained and the process yield, reaching the energy expenditure of the process, being a viable method for recycling this material and reusing these products for the production of polystyrene.

Key-words: Plastic Waste, polystyrene; pyrolysis; catalyst; efficiency.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Despejo Inadequado de Plásticos.....	18
Figura 2. Gráfico Geração Mundial de Resíduos Sólidos.....	19
Figura 3. Gráfico Distribuição dos RSU pelo Território Brasileiro.....	20
Figura 4. Poliestireno em Cadeia.....	22
Figura 5. Processo Produtivo do EPS.....	23
Figura 6. Processamento de Pirólise dos Resíduos Plásticos.....	29
Figura 7. Fluxograma da Planta de Pirólise com Reator de Vórtice.....	30
Figura 8. Modelo Reator Batelada.....	33
Figura 9. Fluxograma Geral do Processo.....	36
Figura 10. Resíduos de Copos Plásticos e Embalagens Alimentícias.....	37
Figura 11. Fragmentação Manual.....	37
Figura 12. Estufa para Esterilização e Secagem.....	38
Figura 13. Agitador Mecânico com Amostras.....	39
Figura 14. Chapa de Aquecimento com Amostras.....	40
Figura 15. Reator Batelada.....	41
Figura 16. Layout da Unidade de Pirólise (Laboratório).....	42
Figura 17. Balança Semi-Analítica.....	42
Figura 18. Aparato Experimental para Pirólise em Escala de Bancada.....	43
Figura 19. Processo de Pirólise em Escala de Bancada.....	43
Figura 20. Balança Analítica.....	45
Figura 21. Picnômetro de 25 mL.....	46
Figura 22. Capilar de N°100.....	47
Figura 23. Refratômetro.....	48
Figura 24. Curva Analítica.....	51
Figura 25. Cromatograma da Curva Analítica.....	51
Figura 26. Amostras Secas.....	52
Figura 27. Amostras Impregnadas.....	52
Figura 28. Produtos Obtidos da Pirólise.....	54
Figura 29. Produtos Obtidos da Pirólise com Impregnação Química (Lavadas).....	55

Figura 30. Produtos Obtidos da Pirólise com Impregnação Química (Sem Lavagem).....	56
Figura 31. Cromatograma do PLO sem Impregnação Química.....	59
Figura 32. Cromatograma do PLO com Impregnação Química.....	59
Figura 33. Cromatograma do PLO com Impregnação Química – Lavadas.....	60
Figura 34. Comparativo das Análises Físico-Químicas com o Estireno Comercial.....	63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Principais Categorias do Poliestireno.....	22
Tabela 2. Tipos de Reciclagem.....	25
Tabela 3. Produtos da Pirólise de Alguns Materiais Plásticos.....	31
Tabela 4. Lavagem das Amostras Impregnadas.....	40
Tabela 5. Experimentos de Pirólise (Laboratório).....	44
Tabela 6. Condições do Injetor.....	48
Tabela 7. Condições do Injetor em Relação ao Gás.....	49
Tabela 8. Condições da Coluna SH-Rtx-5.....	49
Tabela 9. Condições do FID.....	50
Tabela 10. Dados da Curva.....	50
Tabela 11. Teor de Umidade.....	53
Tabela 12. Médias dos Rendimentos dos Produtos Líquidos.....	57
Tabela 13. Concentração de Estireno das Amostras.....	58
Tabela 14. Índice de Refração dos PLO's.....	60
Tabela 15. Viscosidade dos PLO's.....	61
Tabela 16. Densidade dos PLO's.....	62

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABRELPE	Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública
CD	<i>Compact Disk</i>
EST	Escola Superior de Tecnologia
EPS	Poliestireno Expandido
NaOH	Hidróxido de Sódio
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
PLO	Produto Líquido Obtido
PS	Poliestireno
PSAI	<i>High Impact Polystyrene</i>
PNRS	Plano Nacional de Resíduos Sólidos
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
XPS	Poliestireno Extrudado

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	15
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	17
2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS.....	17
2.1.1 Resíduos Sólidos Urbanos.....	18
2.1.2 Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil.....	20
2.1.3 Poliestireno.....	21
2.1.4 Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS).....	24
2.2 RECICLAGEM.....	25
2.2.1 Conceito de Reciclagem.....	25
2.2.2 Importância e Vantagens da Reciclagem de Resíduos Sólidos.....	26
2.3 PIRÓLISE.....	28
2.3.1 Despolimerização Térmica.....	31
2.4 REATOR BATELADA.....	32
2.5 CATALISADORES.....	34
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	36
3.1 MATÉRIA-PRIMA.....	36
3.2 PROCESSO DE SECAGEM.....	37
3.3 IMPREGNAÇÃO QUÍMICA.....	38
3.4 O PROCESSO DE PIRÓLISE.....	41
3.4.1 Aparato Experimental.....	41
3.4.2 Experimento.....	42
3.4.3 Rendimentos.....	44
3.5 CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS LÍQUIDOS.....	45
3.5.1 Densidade.....	45
3.5.2 Viscosidade Cinemática.....	46
3.5.3 Índice de Refração.....	47
3.5.4 Cromatográfica com Detector de Ionização de Chama (CG-FID).....	48
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	52

4.1 ASPECTOS DAS AMOSTRAS QUANTO A IMPREGNAÇÃO QUÍMICA.....	52
4.2 PIRÓLISE DO BLEND SEM IMPREGNAÇÃO QUÍMICA.....	53
4.3 PIRÓLISE DO BLEND COM IMPREGNAÇÃO QUÍMICA.....	54
<b>4.3.1 Com Lavagem</b> .....	54
<b>4.3.2 Sem Lavagem</b> .....	56
4.4 RENDIMENTOS DO PROCESSO.....	57
4.5 CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS LÍQUIDOS OBTIDOS.....	58
<b>4.5.1 Análise Cromatográfica com Detector de Ionização de Chama (CG-FID)</b> .....	58
<b>4.5.2 Análise do Índice de Refração</b> .....	60
<b>4.5.3 Análise da Viscosidade</b> .....	61
<b>4.5.4 Análise da Densidade</b> .....	62
<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	64
<b>6 PERSPECTIVAS</b> .....	66
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	67

## 1 INTRODUÇÃO

A utilização dos materiais plásticos tem se tornado fundamental para as diversas áreas da sociedade. Pelas suas características versáteis, podem ser encontrados em restaurantes, universidades, órgãos públicos, residências, dentre outros, o que demonstra não só a alta produção desse material, mas também a importância deste polímero, considerado uma das principais fontes de renda das indústrias. (DIAS, 2016).

Contudo, o descarte inadequado dos resíduos desses materiais tem se tornado um dos maiores problemas socioambientais da atualidade, no que diz respeito ao lado social, por exemplo, enchentes e alagamentos afetam diretamente as zonas mais carentes das cidades. Quanto à área ambiental, pode-se mencionar, a morte de espécies marinhas por ingestão e asfixia (YAO *et al* 2018).

Os números de reciclagem desses resíduos sólidos demonstram preocupação, pois segundo o estudo realizado pela rede jornalística G1 – Jornal Nacional, até o ano de 2022, foram produzidas mais de 82 milhões de toneladas de resíduos sólidos, e menos de 3% são reciclados, com mais de 3 mil lixões ainda ativos no território brasileiro. (TELES, 2022)

Outro estudo realizado pelo Estadão de São Paulo ainda afirma que, na perspectiva dos analistas da área, se métodos não forem estabelecidos para contornar essas porcentagens o mais breve possível, os dados apontam que até 2050 a quantidade de plásticos distribuídos em aterros e pela natureza será superior a 12 bilhões de toneladas (CASTRO, 2017).

Esse polímero possui características que o tornam um dos dejetos mais perigosos quando despejados de forma inadequada. Uma dessas propriedades é a durabilidade desse material, pois sua degradação não ocorre de forma simples, haja vista que, para que os plásticos se desintegram de forma completa são necessários mais de 400 anos (PARKER, 2020).

Insta mencionar que, dentre os plásticos com a maior visibilidade no mercado estão os materiais a base de Poliestireno. Por ser um polímero com características de um termoplástico ele pode ser moldado e conformado de diversas formas o que demonstra a alta viabilidade econômica que esse material possui, podendo ser encontrado na forma de embalagens alimentícias, copos, talheres, dentre outros (BIASOTTO, 2010).

Diante dessa problemática, nota-se a importância dos meios tecnológicos para tratar os resíduos desse material. Nos campos de pesquisa de métodos que possam tratar os materiais plásticos destaca-se a degradação físico-química, pois garante a qualidade na recuperação da

matéria-prima desse polímero, tornando o processo viável economicamente e, devido a reutilização desse produto, uma reciclagem eficaz (SANJAD, 2018).

Um dos métodos de degradação físico-química mais eficientes para tratar esses dejetos é o processo conhecido como Pirólise, no qual a degradação térmica ocorre em temperaturas acima de 300 °C, sem entrar em contato com qualquer substância oxidante. (VIEIRA, 2011)

Esse método tem grande importância para o tratamento de materiais a base de poliestireno, pois esse processo chega a recuperar mais de 90% do monômero estireno. Com isso, o produto obtido já possui as características que possibilitam a polimerização e, passando pelos processos de tratamento do produto líquido, já pode ser reutilizado. (SZABO, 2011)

Nesse contexto, o problema científico deste trabalho refere-se à aplicação de uma rota tecnológica de reciclagem química de resíduos de poliestireno, uma vez que, estes resíduos sólidos são descartados de forma inadequada, causando diversos impactos socioambientais.

Assim sendo, o objetivo geral deste trabalho consiste na avaliação da impregnação química com NaOH como otimização do processo de despolimerização, via Pirólise, de Blends Equimolar de copos descartáveis (PSAI) e embalagens alimentícias (XPS) residuais para a produção de Estireno e os objetivos específicos são:

- i. Realizar o processo de Pirólise dos Blends equimolar de Copos Plástico (EPS) e Embalagens Alimentícias (XPS) impregnados com NaOH e não impregnados;
- ii. Avaliar a Eficiência dos Processos de Pirólise a partir dos rendimentos e da qualidade dos produtos líquidos obtidos;
- iii. Comparar a qualidade das frações líquidas obtidas com o Estireno Comercial; e
- iv. Verificar o catalisador como rota tecnológica para reciclagem química.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Diversos problemas socioambientais têm surgido com o aumento do consumo dos plásticos descartáveis, intensificando a quantidade de resíduos sólidos no Brasil e em diversos países. Com o descarte incorreto desses materiais, inúmeros transtornos são vistos diariamente como a poluição dos oceanos, as ilhas de plástico e enchentes, principalmente nas áreas consideradas mais carentes, causando o efeito conhecido por impermeabilização urbana (BARBOSA, 2016).

### 2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS

Esses resíduos são os diversos materiais, substâncias ou objetos que são provenientes das atividades exercidas pelo homem, seja através dos processos industriais, da movimentação dos comércios, lugares públicos etc. Cabe ressaltar que existem alguns casos específicos como os lodos das estações de tratamento de água, ou de outros sistemas ambientais, e líquidos que não podem entrar em contato direto com a rede pública de esgoto, também encaixam nas definições deste tipo de resíduo. (ABNT, 2004a)

Com base na NBR 10004 da ABNT 2004, os resíduos sólidos são classificados de acordo com os seus potenciais riscos de contaminação do meio ambiente, podendo ser classificados em:

Classe I ou perigosos: têm características que trazem riscos graves ao meio ambiente e/ou a saúde pública quando manuseados ou dispostos de forma inadequada. Podem ser tóxicos, corrosivos, radioativos, patogênicos, inflamáveis;

Classe II ou não-inertes: não apresentam características de periculosidade nem são inertes. Incluem-se nesta categoria os resíduos sólidos domiciliares e outros combustíveis ou biodegradáveis como madeira, papel e podas de jardim;

Classe III ou inertes: são aqueles que, por suas características intrínsecas, não oferecem riscos à saúde e ao meio ambiente. Quando em contato com a água no teste de solubilização realizado de acordo com a NBR 10006, o lixiviado não excede os padrões estabelecidos na norma NBR 10004.

Ainda dentro da NBR 10004 da ABNT (2004, p. 2), os resíduos sólidos também apresentam uma classificação quanto à sua origem da seguinte forma:

- Doméstico: gerado basicamente em residências;

- Industrial: gerado por indústrias (classe I, II e III);
- Especial: podas de jardins, entulhos de construções e animais mortos.

### 2.1.1 Resíduos Sólidos Urbanos

Os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), também conhecidos como Lixo Seco, são os resíduos observados com maior frequência pela sociedade por serem oriundos das residências, prédios públicos, das áreas comerciais, da construção civil, plásticos, varrição etc. (MANSOR *et al.*, 2010).

Uma das maiores crises ambientais da atualidade tem relação com a produção desses resíduos sólidos, pois a sua gestão não tem se mostrado eficiente ao ponto de evitar os danos socioambientais. Segundo Garcia *et al.* (2016) um dos causadores do aumento no consumo desses produtos são as diversas características que eles apresentam, logo, o padrão de compra intensificado acompanha o despejo incorreto desses resíduos.

A produção de plásticos tem alcançado níveis tão elevados que nos últimos 65 anos girou em torno de 8,3 bilhões de toneladas, na forma de polímeros, embalagens, capas de CD, talheres, copos etc. Uma quantidade expressiva deste material é despejada de forma incorreta, causando graves crises ambientais como a morte por asfixia de muitas espécies aquáticas e a inutilidade de aterros sanitários, dentre outros (AMOS, 2017).

Um dos estudos realizados pelo The World Bank em 2016 apresentou um resultado alarmante sobre a produção diária deste resíduo, no qual os resultados apontaram uma média de 0,74 kg/habitante/dia, totalizando 2,01 bilhões de toneladas de RSU gerados, sendo que 93%, 54% e 39% desses resíduos são despejados de forma inadequada em países de baixa, média e alta renda, respectivamente (Kaza *et al.*, 2018), conforme Figura 1.

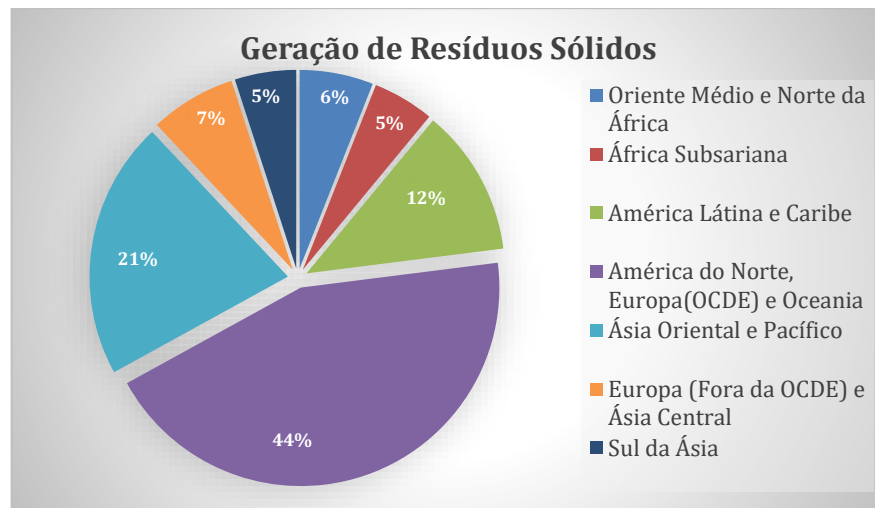
Figura 1 – Despejo Inadequado de Plásticos



Fonte: Mayra (2019)

Segundo os estudos realizados por YAO *et al.* (2018) a geração de resíduos sólidos, em toneladas, se distribuiu pelo globo, no ano de 2018, onde as características de maior produção desses resíduos pelo planeta se concentraram pelas regiões da Ásia, Europa e América do Norte e as menores pelo Oriente Médio e Norte da África. Pode-se verificar um panorama geral desses resíduos descritos na Figura 2.

Figura 2 – Gráfico Geração Mundial de Resíduos Sólidos



Fonte: CORESAB (2020)

Com esse contexto alarmante, a Agenda 2030, pautada no Desenvolvimento Sustentável, foi fundamental para traçar os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) que pudessem minimizar a crise ambiental e social causada pelo despejo incorreto desses resíduos, sendo as ODS foram elaboradas dentro de diversos temas, com aspectos ambientais e sociais (JOHNSTO, 2016; WILSON e ROGERO, 2016).

No campo dos Resíduos Sólidos Urbano (RSU), em busca de meios sustentáveis para a problemática, as medidas tomadas inclinaram-se para redução da geração de resíduos sólidos, prevenção, o aproveitamento energético desse tipo de material, reciclagem e a inserção de tecnologias sustentáveis e a redução de conflitos socioambientais (MALHEIROS, 2008).

Alguns países considerados desenvolvidos, como Alemanha e Dinamarca, adotaram métodos e políticas públicas que tiveram como objetivo reaproveitar os resíduos sólidos. Tais ações foram tão relevantes para esses países que a quantidade de envio aos aterros sanitários diminuiu de forma

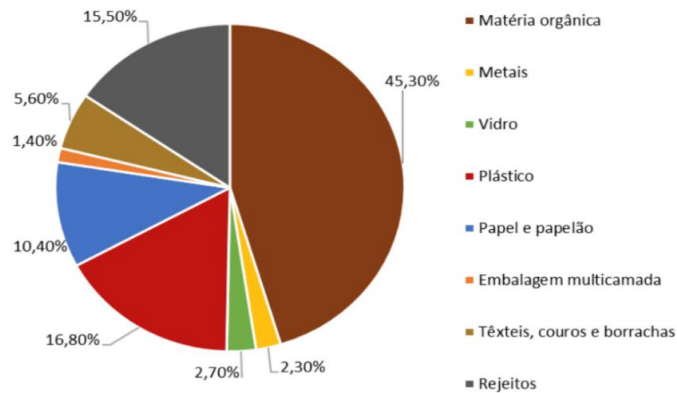
significativa, mostrando que se aplicadas corretamente algumas metodologias podem ser eficientes e adequadas para solucionar essa problemática ambiental (BASSI *et al.*, 2017).

### 2.1.2 Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil

No ranking dos maiores produtores de resíduos plástico do planeta, o Brasil ocupa o quarto lugar que antecede Índia, China e Estados Unidos. O caso da população brasileira se torna um dos mais graves devido à baixa taxa de reciclagem do país, pois, segundo os estudos da WWF Brasil, de um total de 11,3 milhões de toneladas de plásticos em 2019, somente 1,3% é reciclado, ou seja, em torno de 145 mil do total passa por algum tratamento (GORZIZA, 2021).

Com essa característica, o Brasil encontra-se em posições muito inferiores na média global de reciclagem plástica, reciclando apenas 9%, levando em consideração que das 79 milhões de toneladas dos RSU geradas anualmente, dessa quantidade aproximadamente 17% são plásticos como observável na Figura 3 (ABRELPE, 2021).

Figura 3 – Gráfico Distribuição dos RSU pelo Território brasileiro



Fonte: ABRELPE (2021)

Outro dado alarmante sobre o Brasil foi pontuado em uma análise feita pela Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública (Abrelpe), no qual a quantidade de plásticos despejados no país aumentou 15% (13,3 milhões de toneladas), se comparados os anos de 2019 e 2020 (GORZIZA, 2021).

Segundo o Panorama de Resíduos Sólidos de 2017, disponibilizado pela Abrelpe, o Brasil possui uma produção de resíduo em média de 1,04 kg/habitante/dia, sendo 40,9% desses resíduos

encaminhados para um total de 2.976 lixões e 8,8% não passaram por nenhum tipo de coleta, ou seja, estão distribuídos em locais inapropriados (ABRELPE, 2018).

Já para o ano de 2020 com a influência da pandemia da COVID-19, os resultados das pesquisas, realizadas pela Abrelpe, apontaram que não só a produção, como também o consumo de RSU no Brasil aumentou de forma significativa, totalizando 82,5 milhões de toneladas geradas, aproximadamente 226.000 toneladas diárias, em média a produção do brasileiro se tornou 1,07 kg de resíduo por dia (ABRELPE, 2020).

Um dos principais fatores para esse aumento exponencial dos RSU foram as medidas aplicadas para o isolamento social, nos quais as atividades presenciais dos restaurantes, lanches e afins, foram substituídas pelo delivery, e as embalagens alimentícias passaram a ser rotina na vida dos brasileiros (ABRELPE, 2021).

Com toda a biodiversidade brasileira o país costuma ser visto como uma potência econômica, o berço para diversos investimentos, contudo essas questões socioambientais, acompanhadas do crescimento populacional, principalmente na área Amazônica, demonstram a falta de propostas de saneamento, reciclagem, tratamento que possam um dia atender os objetivos da Agenda 2030 (GAUTHIER e MORAN, 2018).

### **2.1.3 Poliestireno**

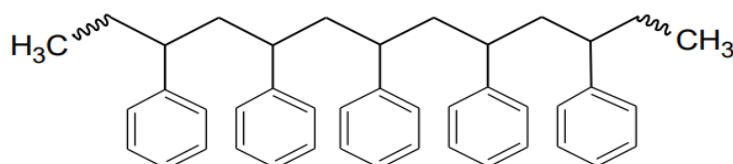
O poliestireno é um dos termoplásticos mais antigos observados pela indústria. Sua primeira aparição na literatura data o ano de 1839, quando Eduard Simon acidentalmente descobriu a substância, contudo, a primeira polimerização só foi concretizada em meados de 1929 pelo químico alemão Herman Staudinger, um dos pioneiros na área de polimerização da época (HAGE, 1998).

A atuação da indústria na produção de poliestireno teve início na Alemanha em 1930 pela IG Farben Industrie, chegando aos Estados Unidos em meados de 1938, sendo da Dow Chemical Company a única planta a operar nas Américas (FREESE, 2013). Desde sua descoberta, tornou-se um material essencial para o consumo diário e um dos mais importantes processos industriais, isto se deve às suas propriedades físico-químicas, baixo custo, e pela ampla possibilidade de aplicações (FREDIANI *et. al.*, 2014).

Um dos RSU mais produzidos é o poliestireno (PS) que é um tipo de termoplástico resultado da polimerização do monômero Estireno. Os materiais com as características de termoplásticos, no

caso do poliestireno, tendem a se tornar líquidos no seu ponto de fusão (210-249 °C) e fluem no ponto de transição vítrea de 100 °C, podendo ser resfriados e reaquecidos sem perdas por degradação. Sua cadeia está representada na Figura 4: (ACHILIAS *et al.*, 2007).

Figura 4 – Poliestireno em Cadeia



Fonte: Pereira (2016)

Nestas faixas de temperatura o PS apresenta-se com altos valores de viscosidade, o que possibilita esse material ser moldado com a característica que sua aplicação exige, conformando-o da forma mais adequada para suas diversas atividades. Essa capacidade também o permite ser considerado um material receptivo aos processos de reciclagem (ACHILIAS *et al.*, 2007). Por ser muito versátil, o poliestireno é produzido em larga escala, seguem as quatro principais categorias desse polímero, representadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Principais Categorias do Poliestireno

<b>Poliestireno</b>	<b>Características</b>	<b>Modificações</b>	<b>Aplicações</b>
Cristal ou Standard	Transparente, rígido, amorfo e quebradiço.	Elevação do Índice de Refração	Divisórias, Embalagens de Maquiagem etc.
Alto Impacto (PSAI)	Resistente e Opaco	Elastômeros de Polibutadieno	Capa de CDs etc.
Extrudado (XPS)	Espuma rígida e leve	Expansão da Resina PS durante a Polimerização	Embalagens Alimentícias etc.
Expandido (EPS)	Semelhante ao XPS	Maior Densidade e Impermeabilidade	Copo Plástico etc.

Fonte: Adaptado de Cruz (2013)

O Poliestireno Expandido (EPS) e o Poliestireno Extrudado (XPS) são as ramificações desses materiais que apresentam um consumo elevado dentro dos diversos tipos de poliestireno, são os chamados Copos Plásticos e Isopor. Sua composição é basicamente ar e é um dos plásticos fabricados através de pequenos grânulos oriundos de petróleo, tendo 98% de ar e 2% da matéria-prima, possuindo as características físico-químicas dependente da finalidade do produto (THAIS, 2014).

A produção do EPS tem como característica a atuação de alguns ramos da indústria, como verifica-se na Figura 5, onde cada etapa do processo é crucial para fabricação do material, levando em consideração desde os processos relacionados a retirada do petróleo até a formação do EPS, onde será moldado conforme a aplicação a ser realizada.

Figura 5 – Processo Produtivo do EPS



Fonte: (ABIQUIM,2020)

É um dos materiais mais utilizados em todo o planeta com diversas aplicações tais como embalagens alimentícias, copos, pratos, talheres etc. A produção desses plásticos consome em torno de 5% de toda a extração de petróleo e, caso a produção global dobre nos próximos 20 anos, teremos em 2050 um consumo de 20% de todo o petróleo extraído (SOLIS, 2018). Com essa versatilidade, o seu consumo tende a aumentar ao longo dos anos, logo, percebe-se a importância de se estabelecer um plano para o tratamento do EPS e XPS (RODRIGUES *et al.*, 2021).

#### 2.1.4 Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)

O Plano Nacional de Resíduos Sólidos foi instituído através da Lei nº 12.305, no dia 2 de agosto de 2010, inciso XVI do Artigo 3º, baseado na experiência dos países que já têm consolidados seus planos e contextualizado para a realidade brasileira. Esse plano propôs uma determinada ordem de prioridades de não geração, redução, reciclagem, tratamento e “[...] disposição final ambientalmente adequada” (BRASIL, 2010).

Essa PNRS não apenas atua como um “órgão” de investigação, responsabilizando os geradores desses resíduos sólidos, como também elabora um conjunto de planos para cada divisão do país, partindo de projetos a nível Nacional até as questões mais específicas dos Municípios. Os pontos que tornam esses planejamentos possíveis são (AGUIAR *et al.*, 2021):

- Distribuição das chamadas Coletas Seletivas
- Estratégias para Gestão Empresarial dos Produtos
- Apoio aos Catadores de Materiais Recicláveis

Segundo Alfaia *et al.* (2017) o Brasil, como diversos países, possui meios para disposição final dos seus resíduos sólidos como unidades de tratamento e triagem, unidade de manejo de galhos e podas, dentre outros. Contudo, as três principais formas de disposição final desses materiais são os lixões, aterros sanitários e aterros controlados (MACHADO, 2014). Podem ser descritos como:

##### 1. Lixões

Segundo o Ministério do Meio Ambiente (2007) o lixão é considerado uma forma incorreta de dispor os resíduos sólidos urbanos sobre o solo, no qual não há impermeabilização, sem sistema de drenagem de lixiviados e de gases, gerando graves impactos socioambientais.

##### 2. Aterros Sanitários

Segundo Portella (2014) a definição de aterros sanitários é um método de disposição de refugo na terra, sem criar prejuízos ou ameaças à saúde e segurança pública, pela utilização de metodologias da engenharia princípios que possibilitam o refugo de um menor volume possível.

##### 3. Aterros Controlados

Segundo Ribeiro (2000) tem-se aterro controlado como uma rota de disposição do lixo no solo que não gera danos ao meio ambiente ou cause problemas de saúde pública.

Com todos esses locais de despejos chegando a sua inutilização, mediante ao excesso de RSU, percebe-se a importância de tratar essa problemática com a devida seriedade, sendo essencial desenvolver métodos de tratamento e reciclagem para refrear essa crise socioambiental ALFAIA *et al.* (2017).

## 2.2 RECICLAGEM

### 2.2.1 Conceito de Reciclagem

Quanto mais o homem usufruiu dos recursos naturais do planeta e das aplicações industriais, que são necessárias devido ao crescimento populacional, uma quantidade significativa de lixo é produzida no mundo, logo, meios para manter a qualidade de vida dos seres vivos têm se tornado um foco para todas as áreas que buscam solucionar essas questões (KAZA *et al.*, 2018). A reciclagem divide-se em três áreas de atuação, mecânica, química e térmica, conforme Tabela 2:

Tabela 2 – Tipos de Reciclagem

<b>Reciclagem</b>	<b>Características</b>	<b>Vantagem</b>
Mecânica	Transforma os materiais em pequenos grânulos, que posteriormente entram na linha de produção para novos materiais.	Não há modificações nas características químicas.
Química	Consiste no reprocessamento de determinados plásticos para que possam ser reutilizados como materiais da área petroquímica.	Maior versatilidade sobre a composição e possui uma tolerância maior que os outros processos no que tange as impurezas.
Térmica	Capacidade calorífica característica dos plásticos, transformando esses resíduos em energia térmica/elétrica	Fator determinante para novos métodos para matrizes energéticas.

Fonte: Adaptado de PARADELA (2012); PEREIRA (2016)

Nesse contexto, a reciclagem mostra-se uma rota viável para o tratamento desses resíduos, principalmente o lixo seco, e um caminho alternativo para reduzir a exploração dos recursos naturais. (SANJAD, 2018).

Uma das definições de reciclagem encontra-se na Lei nº 12.305/2010, em seu Art. 3º, Inciso XIV:

Art. 3 Para os efeitos desta Lei, entende-se por:

(...)

XIV - reciclagem: processo de transformação dos resíduos sólidos que envolve a alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, com vistas à transformação em insumos ou novos produtos, observadas as condições e os padrões estabelecidos pelos órgãos competentes do Sisnama e, se couber, do SNVS e do Suasa. (BRASIL, 2010)

Recolix (2017) ainda define reciclagem pontuando a diferença entre ela e as abordagens da reutilização da seguinte forma, no qual o conceito de reciclagem é dado como o reaproveitamento de materiais beneficiados como matéria-prima para um novo produto. O reaproveitamento ou reutilização consiste em transformar um determinado material já beneficiado em outro.

Dentro desses conceitos referentes a reciclagem tem-se as questões que cercam a Responsabilidade Compartilhada, que expressa a responsabilidade das diversas áreas da sociedade em torno da problemática dos resíduos. A Lei 12.305/10 define o conceito de Responsabilidade Compartilhada como um conjunto de atribuições individualizadas e encadeadas não só dos fabricantes, mas também dos comerciantes e consumidores, para reduzir o volume de resíduos sólidos e rejeitos gerados, reduzindo os impactos causados à saúde humana e à qualidade ambiental, nos termos desta Lei. (Brasil, 2010)

A reciclagem tem origem na necessidade de um método que possibilitasse contornar os graves problemas causados pelo consumo desenfreado e a conseqüente demanda de resíduos gerados pela população, logo a buscar pelo equilíbrio entre captação, produção e consumo, com o intuito de manter uma harmonia na relação entre homem e natureza, através da utilização consciente e sustentável dos recursos, assim como do reaproveitamento dos resíduos gerados (LOMASSO *et al.*, 2015).

### **2.2.2 Importância e Vantagens da Reciclagem de Resíduos Sólidos**

O tratamento de resíduos sólidos tem um papel fundamental não só para apontar estratégias para preservação ambiental, mas também constitui uma série de programas que proporcionam a prevenção da saúde. (COLTRO, 2018) Um dos principais pontos sobre o destino adequado desses

materiais está ligado ao local de descarte, pois o despejo em lixões e aterros tende a comprometer a qualidade do solo, ar e água, já que são compostos voláteis, metais, solventes, dentre outros (GOUVEIA, 2012).

Como mencionado por Gouveia (2012) as ações referentes a reciclagem têm impactos positivos tanto no meio ambiente como na sociedade como um todo, tal afirmação encontra-se bem elucidada por Zapparoli (2009):

O papel ambiental da reciclagem é referente à diminuição da extração de recursos não renováveis da natureza, além da diminuição da quantidade de lixo jogada em lixões, aterros ou incineradoras de lixo que emitem gases que prejudicam a saúde e o ambiente. Já o papel socioeconômico da reciclagem é oriundo da geração de trabalho e da renda, através da coleta de materiais obtidos de objetos rejeitados e descartados pelas pessoas. Porém, são os setores público e privado, que devem reorientar suas gerências para que o processo de reciclagem seja bem desenvolvido e aceito pela população (ZAPPAROLI, 2009, p. 2).

Segundo Sacramento (2014) a reciclagem além de proporcionar uma importante rota alternativa para reduzir a extração de recursos naturais, tem forte atuação na economia, gerando inovações tecnológicas na área. Podendo sintetizar esses principais benefícios nos seguintes:

- Diminuição da Utilidade dos Aterros;
- Preservação dos Recursos Naturais;
- Economia no Consumo de Energia e Água;
- Redução dos Impactos Ambientais;
- Geração de Renda através de Empregos diretos e indiretos;
- Criação de Novos Negócios. (SACRAMENTO, 2014).

Um dos processos mais conhecidos de reciclagem é a transformação dos RSU plásticos em determinados produtos (químicos ou combustíveis), chamada muitas vezes de “reciclagem terciária”, através de processos termoquímicos, como a Pirólise, que convertem os plásticos nas suas matérias-primas originando novos materiais, o que se mostra vantajoso para a indústria. Nesse contexto, a reciclagem torna-se uma alternativa viável para tratamento de materiais que eram considerados somente como lixo, tornando um grave problema socioambiental em uma solução economicamente benéfica (SACRAMENTO, 2014).

### 2.3 PIRÓLISE

O método conhecido como Pirólise envolve uma reação endotérmica, no qual tem-se uma decomposição térmica sem a presença de ar, em polímeros, por exemplo, são obtidas frações de óleos e gases. Neste processo as cadeias longas poliméricas são quebradas em cadeias (moléculas) menores e mais simples (SHARUDDIN *et al.*, 2016).

Uma das definições mais clássicas desse processo é dada por BASU (2010, p. 365), no qual se dá como o Processo de aquecimento de um combustível (RSU) até temperatura máxima, denominada temperatura de pirólise, por um tempo específico. Após atingir essa temperatura deve-se mantê-la. O processo ocorre na total ausência de oxigênio e necessita de energia externa para ser iniciado.

Esse processo é considerado um dos mais eficazes para refinar e reutilizar materiais como plásticos, pois para decomposição, a reciclagem desses polímeros, apresenta uma temperatura bem inferior à de materiais inorgânicos, apresentando uma menor massa molar o que facilita sua conformação (MIRANDA, 2019).

Tem-se uma semelhança entre a incineração e a pirólise, devido as características endotérmicas dos processos, contudo são métodos diferentes, como afirma Reichert (2015):

É preciso ressaltar a diferença entre a incineração e o aquecimento em ambiente sem oxigênio, que é o caso da pirólise. A queima direta dos resíduos em câmara de combustão produz poluentes, inclusive cancerígenos como dioxinas e furanos. Produz cinzas volantes, que são perigosas e têm alto custo de disposição. E os gases de combustão são altamente agressivos. No caso da pirólise, o processo transforma o lixo em um gás combustível limpo, similar ao gás natural, que pode substituir outros combustíveis sem qualquer risco ambiental ou à saúde pública. A tecnologia pode produzir também biochar a partir de biomassa, que pode ser usado inclusive na agricultura para o combate à desertificação e à perda de carga orgânica.

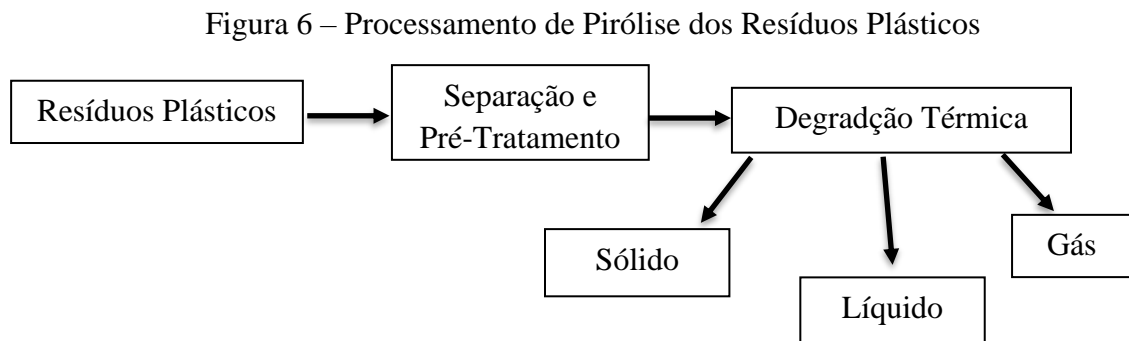
O processo de incineração é bastante confundido em relação a de pirólise, pelo fato de ambos serem endotérmicos, porém estes dois métodos são distintos.

A viabilidade desse processo se encontra na decomposição térmica nos materiais poliméricos, como os plásticos já citados anteriormente, pois, essa etapa gera diversos produtos como gás, líquidos e sólidos residuais. As condições de operação e o tipo de material são os fatores determinantes para o tipo de produto que será obtido, cabe ressaltar que essas condições só são

definidas dependendo do objetivo que se pretende atingir (BUEKENS, 2006). Para exemplificar alguns desses produtos tem-se:

- Sólidos - Características de cinzas e alcatrão, de formas diversificadas.
- Líquidos – Podendo gerar combustíveis, produtos para área petroquímica e principalmente os monômeros de interesse industrial para produção de novos plásticos (BUEKENS, 2006).

Após o pré-tratamento (lavagem e granulação) dos resíduos plásticos, eles passam para a etapa do craqueamento, resultando em três produtos: Sólidos, líquidos e gases. Conforme demonstra o diagrama da Figura 6 (MONTEIRO 2018).



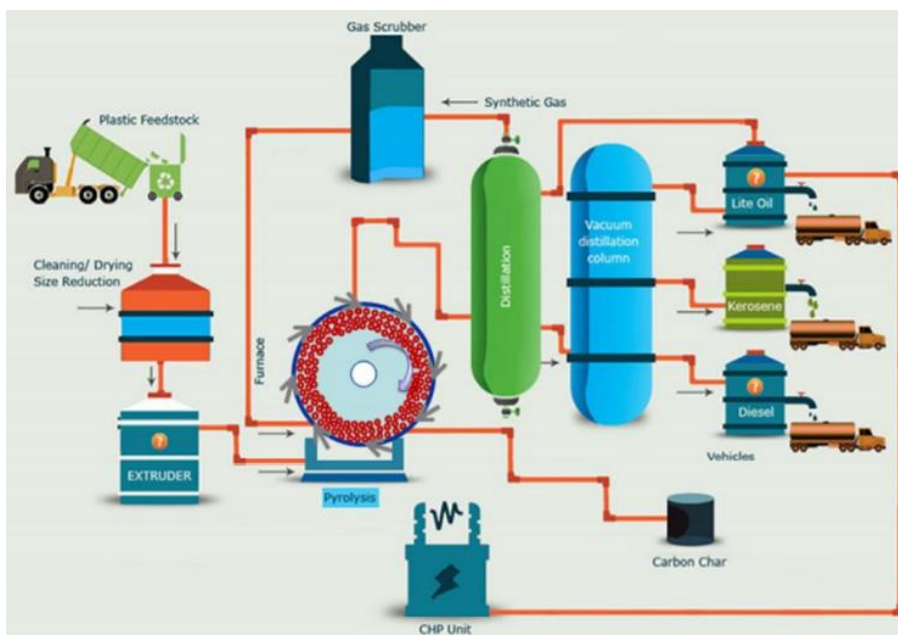
Fonte: Adaptado de MONTEIRO (2018)

Segundo Sharuddin *et al.*, (2016) mesmo sem a contaminação por água e não sendo necessário um alto nível de seletividade para os materiais que irão ser processados, alguns parâmetros são de suma relevância para o processo de pirólise, pois são fatores que alteram de forma significativa os rendimentos e a qualidade dos produtos, são eles:

- Temperatura;
- Pressão;
- Vazão;
- Tipo de reator e tempo de residência; e
- Presença de Catalisadores (SHARUDDIN *et al.*, 2016).

Uma das plantas de pirólise mais comuns encontra-se no fluxograma abaixo, Figura 7, onde concluída a etapa da pirólise tem-se a separação dos produtos, sendo na planta em questão somente o processo de destilação como método para purificar e separar as frações necessárias do produto líquido obtido (PLO). (RAGAERT *et al.*, 2017)

Figura 7 – Fluxograma da Planta de Pirólise com Reator de Vórtice



Fonte: RAGAERT *et al.* 2019

Os produtos oriundos da pirólise possuem uma relação direta com as características do polímero, especificamente sua estrutura, pois, como já mencionado em seção anterior, a pirólise trata-se de uma quebra das ligações, seguida por um rearranjo das moléculas envolvidas no processo. Não só a formação de produtos, como também as características deles são definidas pelo tempo de residência e taxas relativas, sendo essas com a quebra de ligações favorecidas para processos com temperaturas elevadas, compostos como hidrocarbonetos aromáticos, alcenos e alcanos costumam ser obtidos nos produtos dessas reações (BUEKENS, 2006).

Um dos fatores decisivos para velocidade da degradação nesses processos é a temperatura, os resíduos plásticos tendem a apresentar características diferentes nos seus produtos quando submetidos a temperaturas baixas, abaixo de 600 °C, e elevadas, acima de 600 °C, conforme destaca Buekens (2006) na Tabela 3.

Tabela 3 – Produtos da Pirólise de alguns Materiais Plásticos

<b>Polímero</b>	<b>Produtos abaixo de 600°C</b>	<b>Produtos acima de 600°C</b>
PE (Polietileno)	Graxas, parafina e alfa-olefinas	Gases e Óleos Leves
PP (Polipropileno)	Vaselina e Olefina	Gases e Óleos Leves
PS (Poliestireno)	Estireno e seus Oligômeros	Estireno e seus Oligômeros
PET (Poli (Tereftalato de Etileno))	Ácido benzoico e Ácido Tereftálico	Ácido benzoico e Ácido Tereftálico

Fonte: Adaptado de Buekens (2006).

A principais vantagens de se utilizar essa metodologia como reciclagem de RSU são (AL-SALEM *et al.*, 2017; ARENA *et al.*, 2006):

- Reciclagem eficiente dos resíduos plásticos;
- Reciclagem direta de plásticos contaminados por sujeira, dentre outros; e
- Reciclagem de plásticos laminados que são materiais de difícil tratamento por métodos tradicionais.

### 2.3.1 Despolimerização Térmica

Segundo Scheirs e Kaminsky (2006) a despolimerização térmica consiste em um processo físico-químico que converte um polímero em sua matéria prima, ou seja, seu monômero. Esses processos costumam ser descritos por equações empíricas ou modelos que envolvam reações elementares. Como essas operações levam em consideração a cadeia molecular, as composições e estruturas dos sistemas envolvidos podem sofrer alterações dependendo do processo.

A pirólise segue o modelo clássico para degradação de hidrocarbonetos, tendo seu ponto de partida nas reações de iniciação, seguido do rompimento das estruturas que formam o polímero, com o processo dependendo diretamente das características do mecanismo quanto a sua natureza radicalar (SCHEIRS e KAMINSKY, 2006).

Como as combinações de radicais não são tão usadas nesses processos, os produtos obtidos tendem a apresentar um potencial ainda maior quando submetidos a presença de um catalisador. Entretanto, nos procedimentos catalíticos, os produtos dessas operações são considerados

ramificados. Esse fato se dá pelas reações de isomerização e craqueamento ocorrerem de forma simultânea em todo o processo (SCHEIRS e KAMINSKY, 2006).

Não importa como se dê a degradação, a primeira etapa é chamada de iniciação, e está relacionada ao rompimento de uma ligação química covalente, gerando espécies completamente reativas, que são as responsáveis pelo decorrer das etapas de degradação. Para que o processo se torne possível, é necessária uma fonte de energia que favoreça essa quebra das ligações, tais como calor, luz, radiação ou ataque químico, dentre outras. (MIRANDA, 2016)

O poliestireno é um dos polímeros mais submetidos a essas etapas de despolimerização térmica, pois o Estireno é um monômero essencial para a indústria petroquímica, com uma produção mundial que ultrapassa 20 milhões de toneladas por ano, tendo suas características de Densidade:  $0,9060 \text{ g/cm}^3$ , Viscosidade:  $0,8388 \text{ mm}^2/\text{s}$  e Índice de Refração: 1,5469 (INNOVA, 2018; MIRANDA, 2016),.

## 2.4 REATOR BATELADA

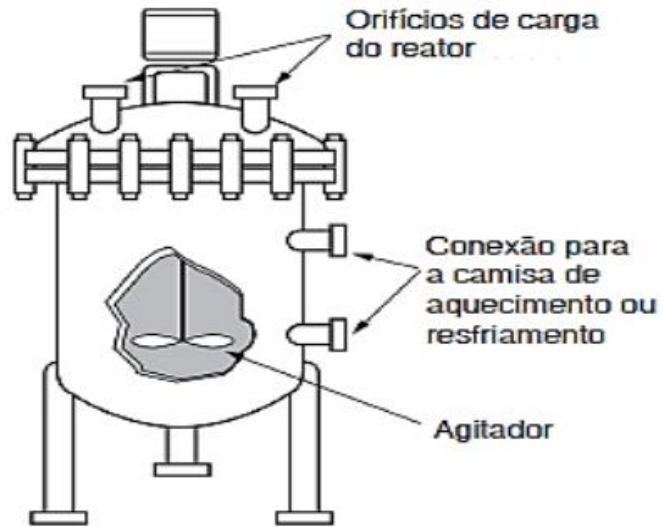
Os reatores químicos são mecanismos (equipamentos) que têm como principal objetivo proporcionar uma reação química com suas condições devidamente controladas e seus produtos com as características esperadas do processo. Esses aparelhos suportam elevadas temperaturas e pressões para que a reação química ocorra da forma desejada, tendo uma transferência de massa e calor de forma eficaz. (SANTOS, 2002)

Reatores considerados descontínuos (batelada) apresentam a característica de não possuir nenhuma corrente de entrada e nem saída enquanto a reação química está acontecendo. Essa forma de processamento é comum para operações em escalas menores, como (FOGLER, 2014):

- Processos que ainda estão em desenvolvimento;
- Processos que em condições contínuas não são viáveis;
- Produção de produtos com custo elevado (FOGLER, 2014)

As etapas desse reator trata-se unicamente de reagentes inseridos no reator, passando pela reação envolvida no processo e saem somente uma vez, um exemplo deste reator é observado na Figura 8 (FOGLER, 2014).

Figura 8 – Modelo Reator Batelada



Fonte: FOGLER (2014)

Um dos fatores decisivos para que as conversões destes reatores sejam tão eficientes, como na pirólise, tem relação direta com o tempo em que os reagentes permanecem em operação de batelada, quanto maior a duração dessa permanência maior serão as conversões. Logo, a conversão do reator de batelada é dada em função do tempo, assim a equação de projeto desse reator é dada por (LEVENSPIEL, 2000):

$$N_{A0} \frac{dX}{dt} = -r_A V \quad (01)$$

As vantagens e desvantagens desse tipo de reator são:

✓ Vantagens

- Proporciona elevadas conversões;
- O tempo de residência segue o que foi definido;
- Equipamentos adaptáveis a diversas operações;
- Prático quanto a limpeza; e
- As reações são controladas de forma eficaz por (LEVENSPIEL, 2000);

✓ Desvantagens

- Mão de obra elevada;
- Os produtos das reações sofrem modificações dependendo de como se realiza a batelada; e
- Projetar processos em larga escala (LEVENSPIEL, 2000);

## 2.5 CATALISADORES

Os catalisadores são considerados substâncias que quando inseridas a uma reação apresentam uma rota alternativa para o processo reacional, tendo papel fundamental em diversos processos químicos, seja nas etapas industriais, em laboratórios especializados em pesquisa ou ambientes acadêmicos (PARSHALL, 1992).

Quantidades mesmo que pequenas de catalisadores são eficazes para mudar as rotas de uma reação, a atuação dessas substâncias proporciona as seguintes vantagens para a reação (PARSHALL, 1992):

- Viabilidade Econômica;
  - Menor Gasto Energético
  - Diminuição do Consumo de Reagentes
- Velocidade dos Processos;
- Processos altamente seletivos; e
- Redução no consumo de matérias primas (PARSHALL, 1992);

Dentre as vantagens dos catalisadores destacam-se três delas:

- A atividade que eles exercem;
- A seleção que eles proporcionam; e
- A estabilidade nas reações.

O aumento da velocidade das reações é diretamente ligado a atividade dessas substâncias. No que diz respeito a seletividade, ela favorece o sentido da reação que se adapta melhor as características do reator o que favorece um produto, minimizando os produtos indesejáveis. Já a estabilidade, afirma quantos ciclos da reação o catalisador suporta sem perder as suas propriedades, ou seja, não exercer mais sua atividade (DALPOZZO, 2015).

Um dos processos mais importantes envolvendo catalisadores é a chamada Catálise Homogênea, onde o catalisador tem características semelhantes no que diz respeito a fase que está inserido, logo, pode ser considerado um catalisador não só disponível para o meio racional, como também possibilitando um maior controle dos processos no qual está inserido (KAZEMI *et al.*, 2018).

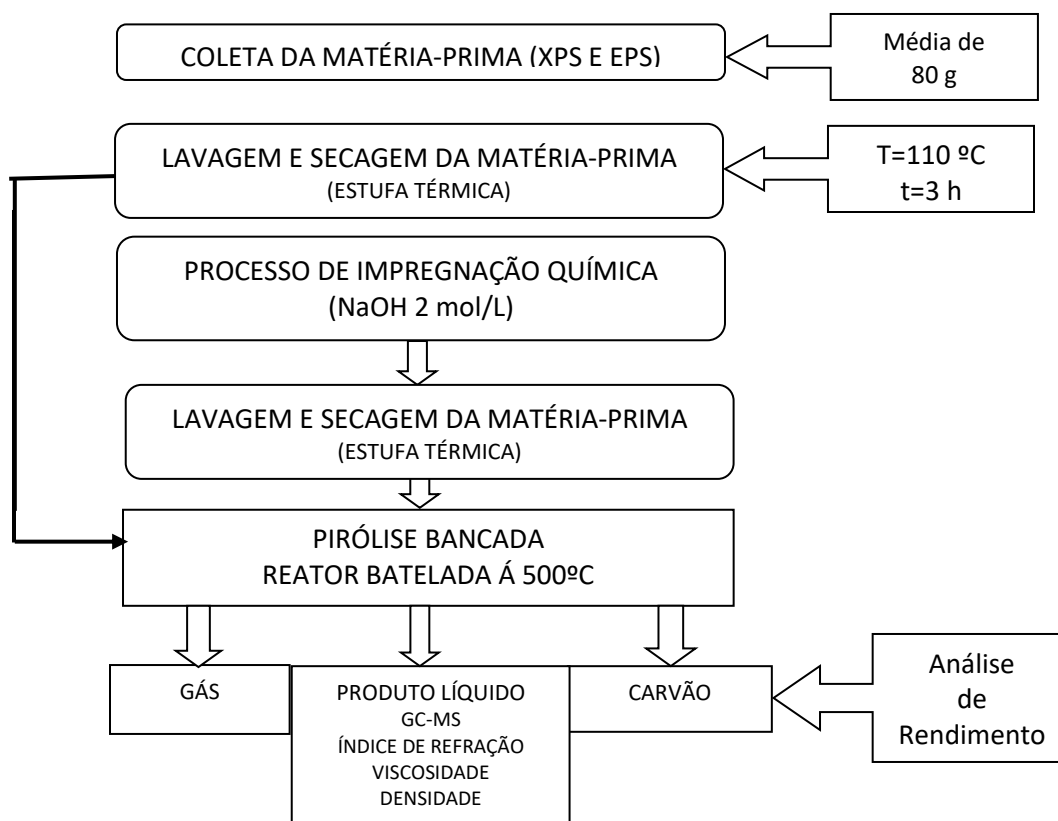
No âmbito industrial os catalisadores funcionam como componentes de suma relevância para o aumento de algum processo em que seu uso é imprescindível, principalmente na área

petrolífera, onde o uso de catalisadores dá a possibilidade, de forma mais rápida para obtenção dos derivados de petróleo. Nesse contexto, baseado nos estudos de Castro (2019), Santos (2019) e Rodrigues (2021) acredita-se que o Hidróxido de Sódio pode atuar como esse tipo de catalisador no processo de pirólise de resíduos sólidos. Neste trabalho será verificada a funcionalidade do NaOH como catalisador no intuito de reduzir o gasto energético do processo, melhorar os rendimentos e características físico-químicas dos produtos líquidos obtidos dos experimentos.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia aplicada nos procedimentos experimentais deste projeto consiste não só em operações reacionais, como também em métodos analíticos, partindo de um tratamento prévio da matéria-prima, a análises de eficiência do processo, conforme Fluxograma geral apresentado na Figura 9.

Figura 9 – Fluxograma Geral do Processo



Fonte: Adaptado de Castro (2019), Rocha (2019)

#### 1.1 MATÉRIA-PRIMA

Para realização do Processo de Pirólise foi utilizada como matéria-prima: Copos Plástico (EPS) e Embalagens Alimentícias (XPS). Esses materiais foram coletados nas lixeiras do Restaurante Universitário da Escola Superior de Tecnologia, em duas coletas de 240g (café, almoço e lanche), nos dias de segunda-feira e terça-feira, na unidade da Universidade do Estado do Amazonas, localizada no bairro Parque 10, Av. Darcy Vargas - 1200, Manaus/AM, conforme a Figura 10.

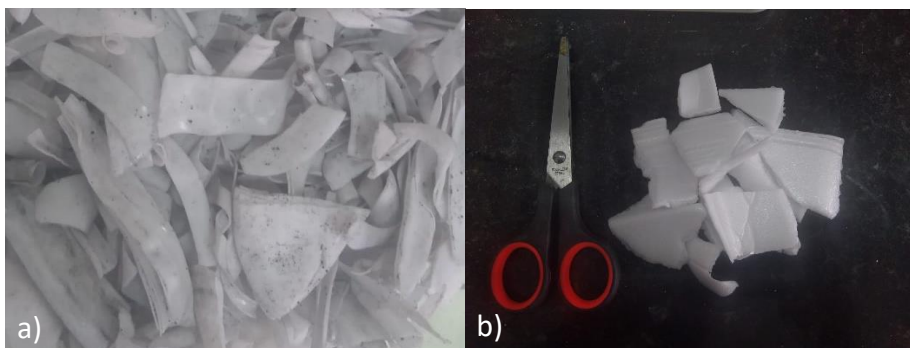
Figura 10 – Resíduos de Copos Plásticos e Embalagens Alimentícias



Fonte: PRÓPRIA (2022)

Como esses polímeros são utilizados para armazenar alimentos e bebidas, possuem certa umidade, fez-se necessária a realização do processo de Secagem, pois o excesso de umidade não favorece as reações de Pirólise. Antes da etapa de secagem foi realizada uma fragmentação manual da matéria-prima, com uma tesoura para o melhor condicionamento das amostras no reator, conforme Figura 11.

Figura 11 – Fragmentação Manual



Legenda: a) Copos Plásticos Cortados; b) Isopor Cortado

Fonte: PRÓPRIA (2022)

## 1.2 PROCESSO DE SECAGEM

O material coletado foi higienizado com água corrente e detergente neutro com o intuito de remover os resíduos localizados em suas superfícies. Após esta lavagem, a matéria-prima, que não seria imposta ao processo de impregnação, passou pela secagem em uma Estufa para Esterilização e Secagem, Marca – MEDICATE, MOD.1.3 (Figura 12), a 110°C, com duração de 3 horas, no

Laboratório C35 do Grupo de Pesquisa: Química Aplicada a Tecnologia (QAT/EST/DEQ/UEA), com a finalidade de reduzir a umidade do EPS e XPS coletados.

Figura 12 – Estufa para Esterilização e Secagem



Fonte: PRÓPRIA (2022)

Para a determinação da umidade foi realizada a separação das amostras, em triplicata, após secagem (1g), em béqueres, e colocadas em uma Estufa para Esterilização e Secagem, Marca – MEDICATE, MOD.1.3 (Figura 12), a 105°C, com duração de 2 horas, no Laboratório C35 do Grupo de Pesquisa: Química Aplicada a Tecnologia (QAT/EST/DEQ/UEA) conforme ABNT NBR 6467:2006. Após as 2 horas, as amostras foram condicionadas em um dessecador por 20 minutos e realizadas as pesagens em balança analítica. Após esta etapa as amostras voltaram para estufa por mais 30 minutos e assim, o processo se repetiu até a massa das amostras estabilizarem.

Tem-se o teor de umidade dado pela Equação 2:

$$U (\%) = \frac{M_i - M_f}{M_i} \times 100 \quad (02)$$

Onde:

**U** = umidade relativa (%);

**M<sub>f</sub>** = massa final (matéria-prima pós o processo de secagem) (kg);

**M<sub>i</sub>** = massa inicial (matéria-prima úmidas) (kg).

### 1.3 IMPREGNAÇÃO QUÍMICA

O processo de impregnação química na matéria-prima foi realizado correspondendo a escala de laboratório dos experimentos referentes a Pirólise. Com essas características, cada batelada passou pelo processo de impregnação com solução aquosa de 2,0 mol.L<sup>-1</sup> de hidróxido de sódio (NaOH) para o blend proposto. A proporção (massa da matéria-prima/volume da solução)

de NaOH) de matéria-prima em solução utilizada possuiu a razão de (1:2), respectivamente, ou seja, o volume da solução de NaOH foi o dobro da massa do blend. O hidróxido de sódio P. A micropérolas (SYNTH – H1028.01. AH; Pureza: 99 %; Validade: 05/2022) foi utilizado para o preparo das soluções de impregnação dos experimentos. (CASTRO, 2019)

O procedimento foi executado no Laboratório - C35 do Grupo de Pesquisa: Química Aplicada a Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, da Universidade do Estado do Amazonas, com o auxílio de um agitador mecânico (FISATOM, MOD. 715) constituído por um impelidor na forma de hélice marítima e controle analógico de velocidade de rotação, a temperatura ambiente e pressão atmosférica, e uma velocidade de agitação de 500 RPM, para 80 g de amostra e 160 mL de solução, por um período de 20 minutos, conforme mostrado na Figura 13. (CASTRO, 2019)

Figura 13 - Agitador Mecânico com Amostras



Fonte: PRÓPRIA (2022)

Após o tempo no agitador magnético a amostra foi passada para um béquer de 3L e colocada em uma chapa de aquecimento (QUIMIS) a 150°C para diminuir o volume de NaOH do recipiente antes de ir para estufa de secagem, conforme Figura 14.

Figura 14 – Chapa de Aquecimento com Amostras



Fonte: PRÓPRIA (2022)

Para verificação do comportamento da impregnação química foram realizados experimentos com amostras lavadas e não lavadas. Para o processo com etapa de lavagem, consistiu em:

1. Verificou-se o pH das amostras impregnadas com NaOH - pH = 12,55;
2. Mediu-se o pH da água corrente do Laboratório C35(QAT) - pH = 5,95;
3. As amostras foram lavadas com água corrente;
4. As medições de pH foram feitas a cada 1 min e um balde foi utilizado para medição do volume de água necessário para que o pH das amostras convergisse para o valor da água corrente.

Esta etapa pode ser descrita conforme a Tabela 4:

Tabela 4 – Lavagem das Amostras Impregnadas

<b>pH da Amostra</b>	<b>Volume de Água Corrente (L)</b>	<b>Tempo (min)</b>
12,55	0	0
12,19	2	1
11,36	4	2
9,64	6	3
8,20	8	4
7,25	10	5
6,19	12	6

Fonte: PRÓPRIA (2023)

## 1.4 O PROCESSO DE PIRÓLISE

### 1.4.1 Aparato Experimental

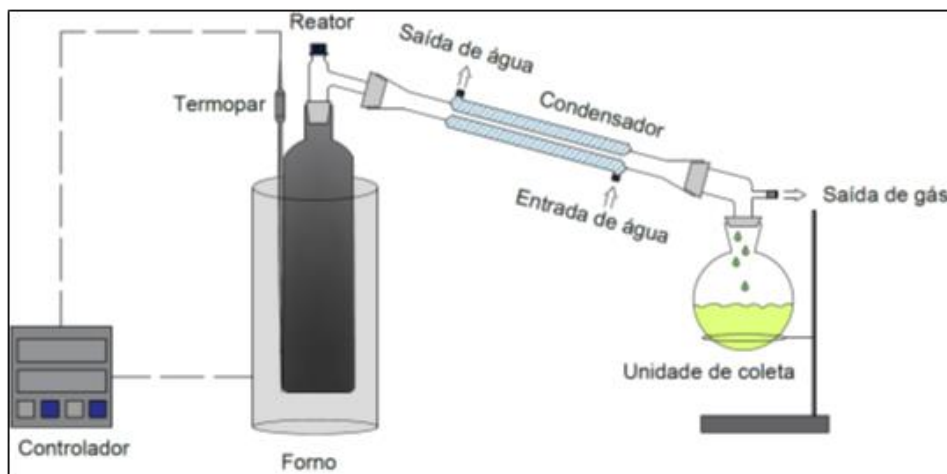
Todos os ensaios de pirólise foram realizados no Laboratório C35 do Grupo de Pesquisa: Química Aplicada a Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, da Universidade do Estado do Amazonas. Com o objetivo de realizar o processo de pirólise, em modo batelada, foi montado um aparato experimental constituído por um reator de aço inox com volume de 260 mL (Figura 15, um forno cilíndrico encamisado (resistência elétrica 1500 W) com controle digital de temperatura (Controlador + Termopar do tipo J), um sistema de resfriamento formado por um condensador reto com fluxo de água operando à pressão atmosférica, a temperatura ambiente ( $\pm 25$  °C), e na saída do condensador um Erlenmeyer de 125 mL(experimentos sem impregnação química) e um Funil de 125mL(experimentos com impregnação química), onde foram coletadas as frações líquidas obtidas na pirólise. Por não se ter uma literatura tão ampla sobre os processos de impregnação com NaOH em materiais plásticos optou-se pelo funil para verificação mais detalhada do processo. Com isso, tem-se o layout da unidade representado pela Figura 16. (SANTOS, 2019; ROCHA, 2019)

Figura 15 – Reator Batelada



Fonte: PRÓPRIA (2022)

Figura 16 - Layout da unidade de Pirólise (Laboratório)



Fonte: SANTOS (2019)

#### 1.4.2 Experimento

Foram pesados 80g de matéria-prima em uma balança semi-analítica (SHIMADZU, modelo UX-420H), Figura 17, e essa massa foi introduzida dentro do reator antes do aquecimento.

Figura 17 – Balança Semi-Analítica



Fonte: PRÓPRIA (2022)

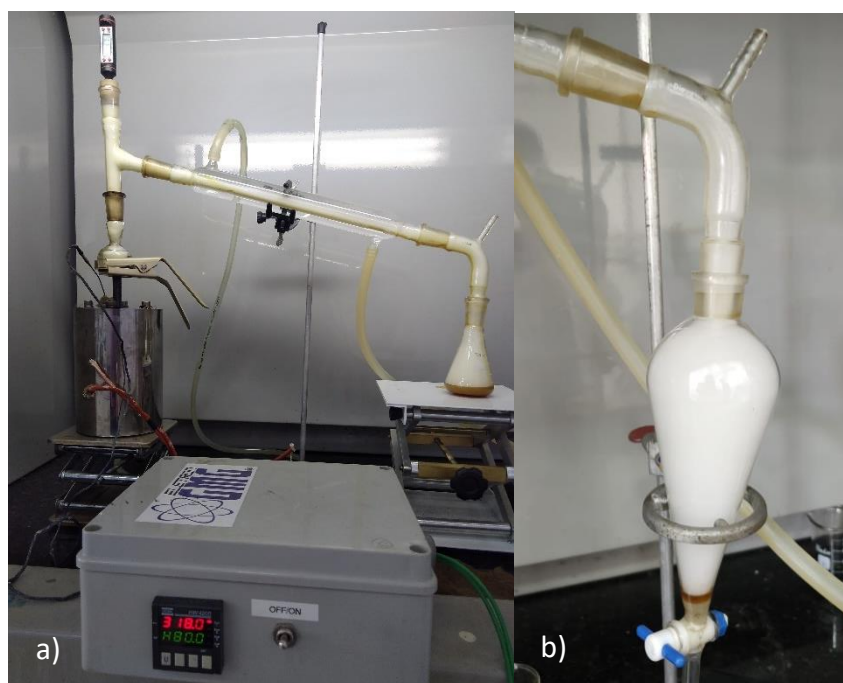
Com isso, o reator foi inserido no forno cilíndrico encamisado, e com o auxílio do sistema de controle (Controlador de Temperatura) programou-se a taxa de aquecimento e a temperatura final de processo (*set-point*). No intuito de evitar a perda de energia do sistema, mantendo a temperatura do procedimento constante, usou-se uma lã de rocha para isolamento térmico, assim, o experimento pode ser iniciado, conforme Figura 18 e Figura 19. (ROCHA, 2019)

Figura 18 – Aparato Experimental para Pirólise em Escala de Bancada



Fonte: PRÓPRIA (2022)

Figura 19 – Processo de Pirólise em Escala de Bancada



Legenda: a) Processos sem Impregnação; b) Processos com Impregnação

Fonte: PRÓPRIA (2022)

Para verificação da eficiência da impregnação química foram realizados nove procedimentos reacionais, até a temperatura de 500 °C a 1 atm, possuindo uma taxa de

aquecimento, definida nas configurações do controlador, de  $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  , conforme Tabela 5. (CASTRO, 2019)

Tabela 5 – Experimentos de Pirólise (Laboratório)

Experimento	Matéria-Prima 80g (Blend – 50%)	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	Impregnação Química
1.1	Copo (EPS) + Embalagem (XPS)	500	-
1.2	Copo (EPS) + Embalagem (XPS)	500	-
1.3	Copo (EPS) + Embalagem (XPS)	500	-
2.1	Copo (EPS) + Embalagem (XPS)	500	NaOH + Lavagem
2.2	Copo (EPS) + Embalagem (XPS)	500	NaOH + Lavagem
2.3	Copo (EPS) + Embalagem (XPS)	500	NaOH + Lavagem
3.1	Copo (EPS) + Embalagem (XPS)	500	NaOH
3.2	Copo (EPS) + Embalagem (XPS)	500	NaOH
3.3	Copo (EPS) + Embalagem (XPS)	500	NaOH

Fonte: PRÓPRIA (2022)

### 1.4.3 Rendimentos

A massa de matéria-prima inserida no reator e as massas que serão obtidas nos experimentos são de suma relevância para os cálculos de rendimento, não só dos produtos líquidos, como também do carvão e gás, oriundos da pirólise. Os valores de rendimento dos processos foram calculados pelas seguintes equações 3, 4 e 5:

$$R_{PLO} = \frac{m_{PLO}}{m_{MP}} \times 100\% \quad (03)$$

$$R_{Carvão} = \frac{m_{Carvão}}{m_{MP}} \times 100\% \quad (04)$$

$$R_{Gás} = \left(1 - \frac{m_{PLO}}{m_{MP}} - \frac{m_{Carvão}}{m_{MP}}\right) \times 100\% \quad (05)$$

Onde:

$R_{PLO}$  = Rendimento do produto líquido orgânico (%);

$R_{Carvão}$  = Rendimento de carvão (%);

$R_{Gás}$  = Rendimento de gases não condensáveis e perdas de massa;

$m_{PLO}$  = Massa de produto líquido orgânico (g);

$m_{MP}$  = Massa de matéria-prima (g);

$m_{Carvão}$  = Massa de carvão (g).

## 1.5 CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS LÍQUIDOS

### 1.5.1 Densidade

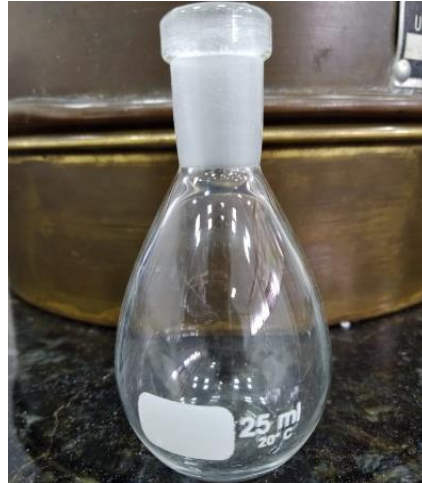
Essas análises foram realizadas no Laboratório C35 do Grupo de Pesquisa: Química Aplicada a Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas. Os experimentos referentes a esta metodologia baseam-se na ABNT NBR 7148, que determina a massa por unidade de volume da amostra que está contida em um picnômetro, devidamente calibrado por uma solução considerada de referência. Cabe ressaltar que as amostras foram mantidas a 20 °C devido as condições do Estireno Comercial. Para esta análise foi utilizada uma balança analítica (SHIMADZU, MOD.AUY – 220) para as pesagens, representada na Figura 20, e um picnômetro de 25 mL, conforme Figura 21. (ROCHA, 2019)

Figura 20 – Balança Analítica



Fonte: PRÓPRIA (2022)

Figura 21 – Picnômetro de 25 mL



Fonte: PRÓPRIA (2022)

O procedimento consiste nas medições:

1. Massa do Picnômetro Vazio;
2. Massa do Picnômetro com Amostra; e
3. Massa de Amostra calculada pela diferença

Com essas medições pode-se calcular a densidade pela Equação 6:

$$\rho = \frac{m_a}{v_p} \quad (06)$$

Onde:

$\rho$  = Densidade da amostra (g/cm<sup>3</sup>);

$m_a$  = Massa da amostra (g);

$v_p$  = volume do picnômetro (cm<sup>3</sup>)

### 1.5.2 Viscosidade Cinemática

As análises referentes a viscosidade cinemática foram realizadas no Laboratório C35 do Grupo de Pesquisa: Química Aplicada a Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas. Foi utilizado um capilar de N°100, com diâmetro de 0,63 mm, conforme Figura 22, onde obteve-se o tempo de escoamento do líquido entre as marcas destacadas no capilar, conforme a norma ASTM D 445 (2006). Cabe ressaltar que os experimentos desta análise foram realizados em um banho a 20 °C, devido as condições desta análise para comparação do Estireno Comercial (ROCHA, 2019)

Figura 22 – Capilar de N°100



Fonte: PRÓPRIA (2022)

Calculada conforme a Equação 7:

$$V = K (t - v) \quad (07)$$

Onde:

$V$  = Viscosidade cinemática (cSt);

$K$  = Constante do capilar;

$t$  = Tempo de escoamento da amostra (s); e

$v$  = Fator de correção do tempo.

### 1.5.3 Índice de Refração

As análises referentes ao Índice de Refração foram realizadas no Laboratório C35 do Grupo de Pesquisa: Química Aplicada à Tecnologia da Universidade Estadual do Amazonas, essa análise seguiu a AOCS cc 7-25 e foi determinada utilizando um refratômetro de bancada modelo ABBE RTA – 100, sendo as amostras na temperatura de 20 °C devido as condições desta análise no Estireno Comercial. (ROCHA, 2019)

Figura 23 – Refratômetro



Fonte: PRÓPRIA (2022)

#### 1.5.4 Análise Cromatográfica com Detector de Ionização de Chama (CG-FID)

A composição química para quantificar o estireno nos produtos líquidos foi realizada por Cromatografia Gasosa com Detector de Ionização de Chama (CG-FID) na Central Analítica do Grupo de Pesquisa Química Aplicada a Tecnologia (GP-QAT/EST/UEA), utilizando as condições representadas nas seguintes tabelas:

A Tabela 6 demonstra as condições usadas para o Injetor:

Tabela 6 – Condições do Injetor

<b>Parâmetros</b>	<b>Condições</b>
Temperatura	250 °C
Modo de Injeção	Split
Tempo de Amostragem	1.00 min

Fonte: PRÓPRIA (2023)

Os dados na Tabela 7 determinam os parâmetros utilizados para o Injetor no que diz respeito ao Gás,  $N_2$ , usado no processo:

Tabela 7 – Condições do Injetor em Relação ao Gás

<b>Parâmetros</b>	<b>Condições</b>
Pressão	45 kPa
Fluxo Total	73.3 mL/min
Fluxo da Coluna	1.38 mL/min
Velocidade linear	25.1 cm/sec
Purge Flow	3 mL/min
Split Ratio	50

Fonte: PRÓPRIA (2023)

Os dados na Tabela 8 determinam os parâmetros utilizados para a Coluna no processo de análise:

Tabela 8 – Condições da Coluna SH-Rtx-5

<b>Parâmetros</b>	<b>Condições</b>
Temperatura	50 °C
Tempo de Equilíbrio	1 min
Número de série	1301801
Data de Instalação	18/09/26
Coluna Max. Temp	330 °C
Comprimento	30.0 m
Diâmetro Interno	0.32 mm ID
Espessura do Filme	0.25 um

Fonte: PRÓPRIA (2023)

Os dados na Tabela 9 determinam os parâmetros utilizados para o FID no processo de análise:

Tabela 9 – Condições do FID

<b>Parâmetros</b>	<b>Condições</b>
Temperatura	270 °C
Taxa de Amostragem	160 msec
Tempo de Parada	30 min
Makeup Gas	$N_2$
Makeup Flow	30 mL/min
Fluxo de $H_2$	40 mL/min
Fluxo de Ar	400 mL/min

Fonte: PRÓPRIA (2023)

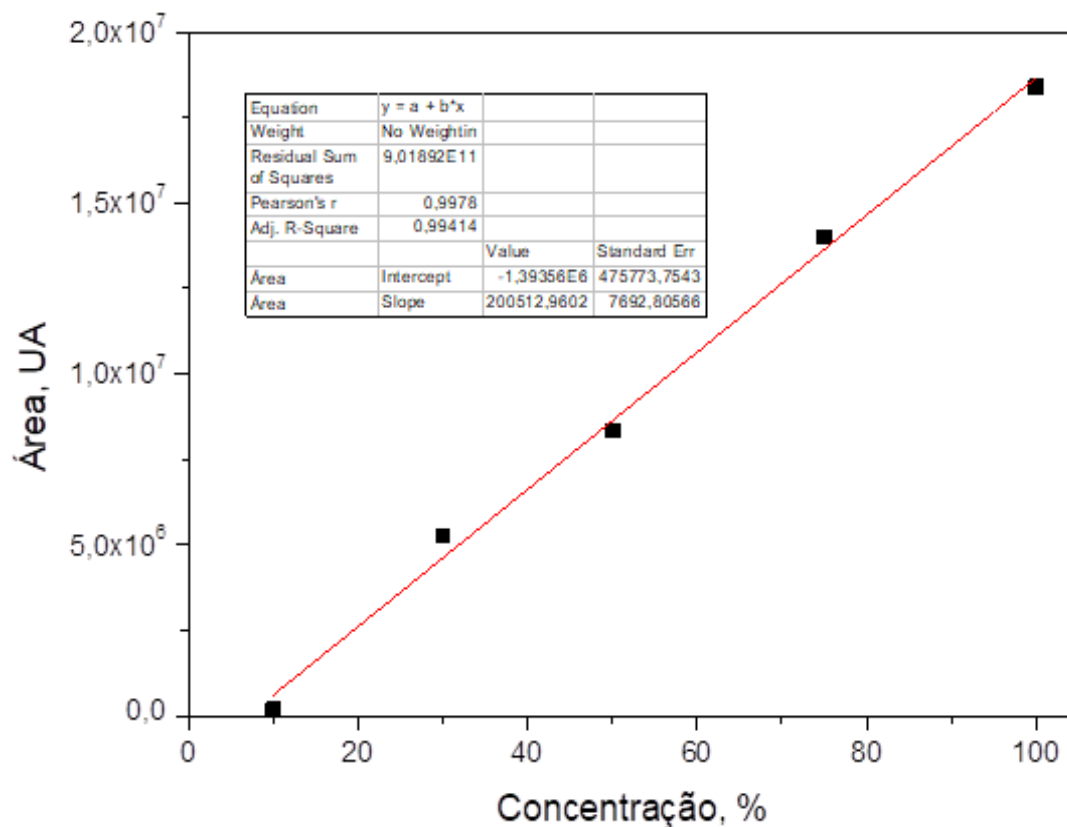
A curva da concentração de estireno (m/m) padrão foi preparada com o Estireno Comercial (ACROS ORGANICS; Lote: A0409301; Pureza: 99,9%; Código: 132790010) e o reagente Acetona, e os pontos foram preparados na proporção de diluição dados por 100 $\mu$ L(amostra) para 1mL(reagente) conforme Tabela 10 e Figura 24:

Tabela 10 – Dados da Curva

<b>Porcentagem(%)</b>	<b>Condições</b>
100	Estireno
75	75% Estireno + 25% Acetona
50	50% Estireno + 50% Acetona
30	30% Estireno + 70% Acetona
10	10% Estireno + 90% Acetona
0	Acetona

Fonte: PRÓPRIA (2023)

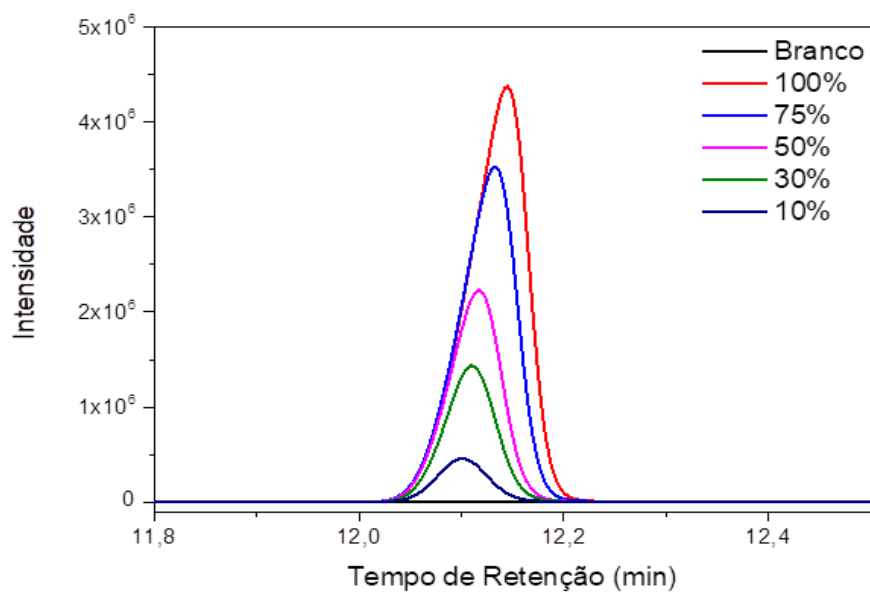
Figura 24 – Curva Analítica



Fonte: PRÓPRIA (2023)

A curva em forma de cromatograma, referente ao CG-FID, pode ser vista na Figura 25:

Figura 25 – Cromatograma da Curva Analítica



Fonte: PRÓPRIA (2023)

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 ASPECTOS DAS AMOSTRAS QUANTO À IMPREGNAÇÃO QUÍMICA

As amostras após passarem pelo processo de secagem apresentaram uma característica contraída, conforme Figura 26:

Figura 26 – Amostras Secas

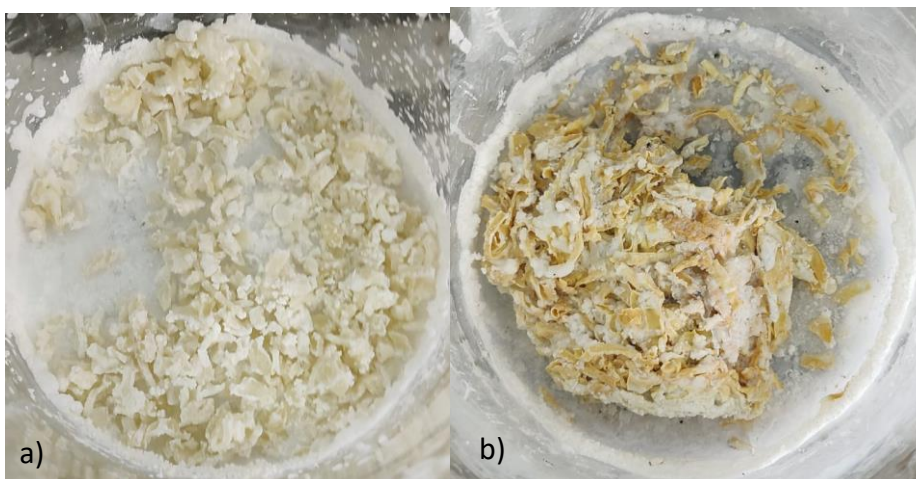


Legendas: a) Isopor; b) Copo Plástico

Fonte: PRÓPRIA (2023)

A matéria-prima, após ser submetida a impregnação química, passou pela etapa de secagem, resultando em uma amostra contraída e possibilitando verificar o efeito da impregnação por NaOH, conforme Figura 27:

Figura 27 – Amostras Impregnadas



Legendas: a) Isopor Impregnado; b) Copo Impregnado

Fonte: PRÓPRIA (2023)

Através das figuras 26 e 27 foi possível verificar as diferenças nas características das amostras analisadas, onde há uma mudança não só na coloração da matéria-prima, perdendo a cor completamente branca, tornando-se amarelada, como também na estrutura da matéria-prima, surgindo uma massa de NaOH envolta das amostras.

Os ensaios para determinação dos teores de umidade foram realizados e os seus valores obtidos estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Teor de Umidade

Matéria-Prima	Sem Impregnação (%)	Com Impregnação (%)
XPS	$0,02 \pm 0,015$	$0,18 \pm 2,01$
PS	$0,003 \pm 0,002$	$0,24 \pm 1,74$

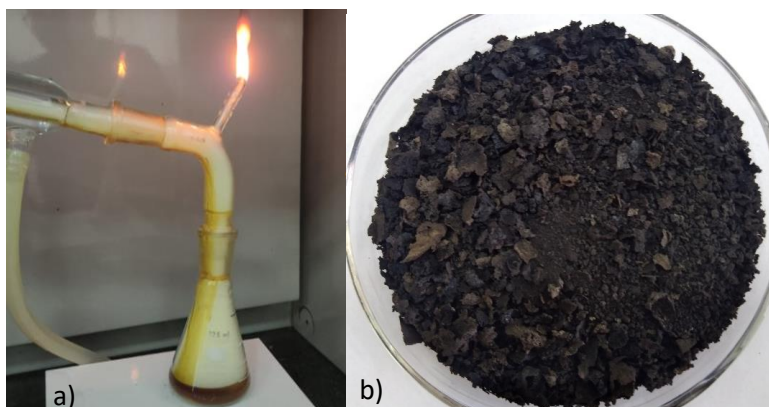
Fonte: PRÓPRIA (2023)

Insta mencionar que determinar o teor de umidade é fundamental para o estudo dos plásticos, pois caso seus valores sejam altos tem-se, principalmente, alterações nas propriedades mecânicas do material. Assim, com os resultados obtidos percebeu-se que o teor de umidade está coerente as características desse tipo de material, mostrando a eficiência do processo de secagem o qual as amostras foram submetidas (HARPER, 2003). Cabe ressaltar que a mudança observada nos resultados das amostras impregnadas se deu pelas características do hidróxido de sódio, pois o NaOH é hidroscópico, ou seja, absorve umidade com facilidade. No instante da pesagem acreditava-se que houve esta absorção.

#### 4.2 PIRÓLISE DO BLEND SEM IMPREGNAÇÃO QUÍMICA

Os experimentos referentes ao processo de pirólise apresentam três frações: fração líquida (PLO), uma fração sólida (carvão) e a fração gasosa (gases não condensáveis), assim como descrito por Miranda (2019), conforme Figura 28.

Figura 28 - Produtos Obtidos da Pirólise



Legenda: a) PLO e Gases não Condensáveis; b) Carvão  
Fonte: PRÓPRIA (2023)

Para os processos envolvendo a pirólise sem impregnação com NaOH, na temperatura média de  $226,6 \pm 3,42$  °C iniciou-se a formação de gás, ao atingir a temperatura de  $303,4 \pm 1,27$ °C foi possível verificar a formação de produto líquido com uma coloração escura, contudo não muito intensa. Esses resultados podem ser comparados com os estudos de Monteiro (2018), no qual o surgimento dos produtos se dão em faixas de temperatura semelhantes as observadas neste experimento. A partir da temperatura média de  $418,2 \pm 4,39$  °C, o PLO apresentou uma coloração completamente escura, tendo sua intensidade proporcional ao aumento da temperatura, o que pode ser confirmado pelas análises de Rodrigues (2021), no qual a pirólise acima de 400°C apresenta seu produto líquido com essas características.

Por conseguinte, tanto a temperatura responsável pelo início da formação de produtos, quanto a de decomposição máxima da amostra estão próximas àquelas observadas por Oliveira (2018) em suas análises termogravimétrica.

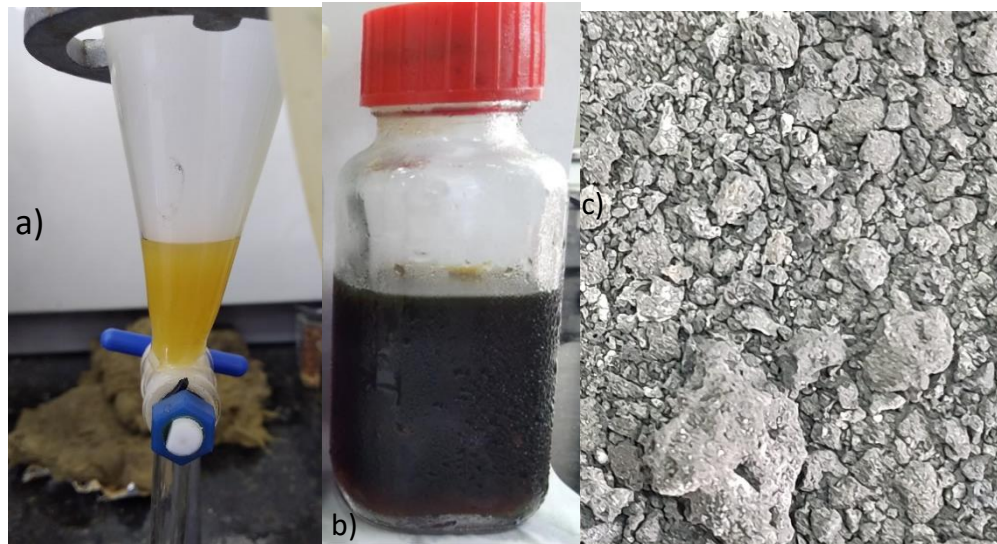
### 4.3 PIRÓLISE DO BLEND COM IMPREGNAÇÃO QUÍMICA

#### 4.3.1 Com Lavagem

O comportamento dos experimentos referentes as amostras impregnadas com NaOH lavadas, produziram as frações comuns aos processos envolvido a pirólise que são: a fração líquida (produto líquido orgânico), uma fração sólida (carvão) e uma fração gasosa (gases não

condensáveis) assim como descrito pelos estudos de Dos Santos (2021), conforme apresentado na Figura 29.

Figura 29 - Produtos Obtidos da Pirólise com Impregnação Química (Lavadas)



Legenda: a) PLO e Gases não Condensáveis; b) PLO após 272 °C; c) Carvão  
Fonte: PRÓPRIA (2023)

Já para os processos envolvendo a pirólise com impregnação química (NaOH), a temperatura média para formação do gás foi de  $157,5 \pm 1,35$  °C e, ao atingir a temperatura de  $203,6 \pm 3,24$  °C, foi possível verificar a formação de produto líquido apresentando uma coloração com aspecto mais claro. A partir da temperatura média de  $272,2 \pm 1,02$  °C, o PLO apresentava uma coloração completamente escura, tendo sua intensidade proporcional ao aumento da temperatura. Comparando outros métodos de otimização da pirólise como o estudado por Almeida (2022), onde o processo é realizado com uma etapa de leito fixo contendo alumina, tem-se a temperatura de formação de gás em torno de 253°C, com uma fração de líquido mais clara, contudo exigiu um maior gasto energético que o observado no processo de pirólise contendo impregnação química, mostrando a eficácia desse catalisador se comparado a outros meios.

Tanto a temperatura responsável pelo início da formação de produtos, quanto a de decomposição máxima da amostra foram menores, ou seja, diminui-se o gasto energético do processo, quanto a energia e duração do mesmo, se comparado aos experimentos sem impregnação química.

### 4.3.2 Sem Lavagem

Os experimentos referentes as amostras impregnadas com NaOH, que não passaram pela etapa de lavagem, mantiveram-se os produtos, ou seja, uma fração líquida (produto líquido orgânico), uma fração sólida (carvão) e uma fração gasosa (gases não condensáveis) assim como descrito por Palmay-Paredes et al. (2021), conforme apresentado na Figura 30

Figura 30 - Produtos Obtidos da Pirólise com Impregnação Química (Sem Lavagem)



Legenda: a) PLO e Gases não Condensáveis; b) Carvão  
Fonte: PRÓPRIA (2023)

Os processos envolvendo a pirólise com impregnação química nessas condições, a temperatura média para formação do gás foi de  $175,3 \pm 4,56$  °C e, ao atingir a temperatura de  $217,1 \pm 5,29$  °C, foi possível verificar a formação de produto líquido, o qual o PLO apresentava uma coloração completamente escura, tendo sua intensidade proporcional ao aumento da temperatura. (QURESHI, 2020)

Semelhante ao processo com lavagem tanto a temperatura responsável pelo início da formação de produtos, quanto a de decomposição máxima da amostra foram menores, ou seja, diminui-se o gasto energético do processo, no que se refere a energia e duração do mesmo, se comparado aos experimentos sem impregnação química, o que se assemelha ao estudado por CASTRO (2019). Contudo, verificou-se que sem a lavagem das amostras há um aumento nas temperaturas tanto de surgimento do gás, quanto a de formação do PLO, o que mostra a importância desta etapa para a eficiência do catalisador no processo.

#### 4.4 RENDIMENTOS DO PROCESSO

Em termos de rendimento, os produtos provenientes da pirólise do Blend Equimolar (Copos Plásticos e Embalagens de Isopor) apresentaram uma diferença significativa entre as alterações propostas para os experimentos. Os rendimentos dos produtos pirolíticos foram calculados de acordo com as equações 03, 04 e 05, conforme Tabela 12

Tabela 12 – Médias dos Rendimentos dos Produtos Líquidos

Temperatura (°C)	Condições das Amostras	Produtos		
		PLO (%)	Carvão (%)	Gases e Perdas (%)
500	Sem Impregnação	66,47 ± 1,68	5,85 ± 0,66	27,68 ± 1,04
500	Impregnação + Lavagem	74,73 ± 0,14	14,61 ± 1,77	8,66 ± 0,92
500	Impregnação	54,17 ± 0,84	22,76 ± 2,23	23,07 ± 1,49

Fonte: PRÓPRIA (2023)

Os estudos realizados, para o copo plástico, por Rodrigues (2021) e Junior (2020), para o isopor, ambos sem impregnação química, demonstram a eficiência desse processo na obtenção desses produtos, no qual os rendimentos obtidos experimentalmente por aquele, ultrapassam os 63% quanto ao PLO e para este, os experimentos apontaram em torno de 60% quanto ao PLO.

A partir dos resultados demonstrados na Tabela 11, pode-se constatar que a pirólise realizada com as amostras impregnadas com NaOH, lavadas posteriormente, apresentaram os maiores rendimentos de PLO e o menor de gases não condensáveis quando comparado ao processo sem impregnação química e com impregnação sem a etapa de lavagem.

Os processos sem o catalisador e sem lavagem apresentaram os produtos gasosos muito acima do esperado, logo, os rendimentos líquidos foram baixos em ambos os casos, mostrando a importância dessa etapa final de tratamento das amostras.

Com os rendimentos analisados, constatou-se a eficiência do NaOH, com um tratamento de lavagem das amostras, como catalisador dos experimentos pirolíticos, aumentando os rendimentos da pirólise, reduzindo as perdas e gastos energéticos.

## 4.5 CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS LÍQUIDOS OBTIDOS

### 4.5.1 Análise Cromatográfica com Detector de Ionização de Chama (CG-FID)

As concentrações de estireno(m/m) obtidas nos experimentos foram determinadas através das análises em GC-FID, conforme Tabela 13

Tabela 13 – Concentração de Estireno das Amostras

<b>Amostras (Blend)</b>	<b>Concentração</b>
Sem Impregnação Química	54,87 ± 2,5
Impregnação Química – Lavada	63,52 ± 1,2
Impregnação Química	59,53 ± 1,5

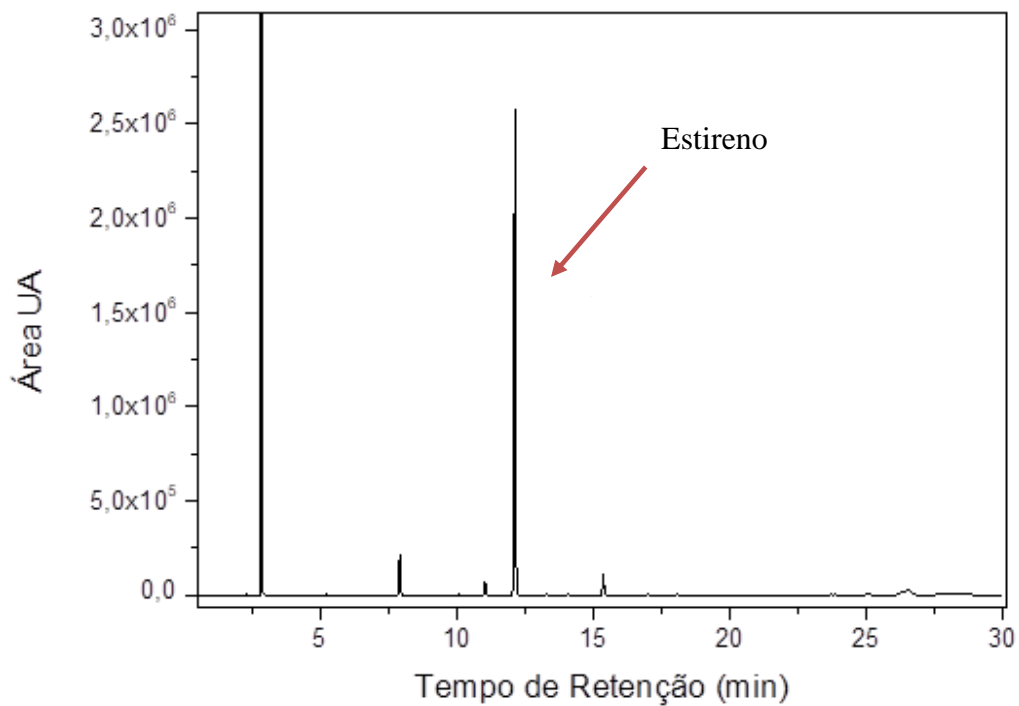
Fonte: PRÓPRIA (2023)

Com os resultados do CG-FID, verificou-se a eficiência do catalisador para o processo de purificação dos produtos oriundos dos experimentos pirolíticos, pois, as maiores concentrações de estireno são para os produtos líquidos obtidos no processo de pirólise envolvendo os blends com as amostras impregnadas com NaOH.

A etapa de lavagem mostrou-se um fator determinante para obtenção de um produto mais purificado, pois os resíduos impregnados e lavados posteriormente apresentaram valores acima de 63% em volume deste monômero. Isto pode ser justificado devido ao catalisador reter os aditivos que são adicionados na Polimerização do Estireno Comercial, otimizando a reação de despolimerização, bem como favorecendo diversos fatores do processo como redução do gasto energético e aumento do rendimento (NASCIMENTO, 2018).

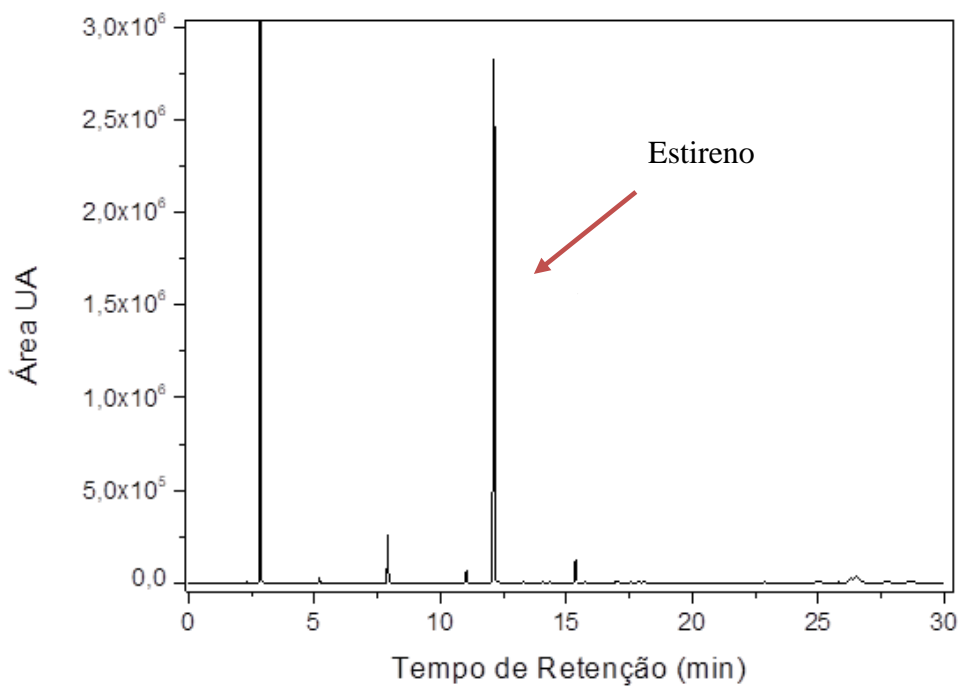
Os cromatogramas referentes aos processos sem impregnação, Figura 31, e com impregnação química, Figura 32, respectivamente, podem ser verificados a seguir:

Figura 31 – Cromatograma do PLO sem Impregnação Química



Fonte: PRÓPRIA (2023)

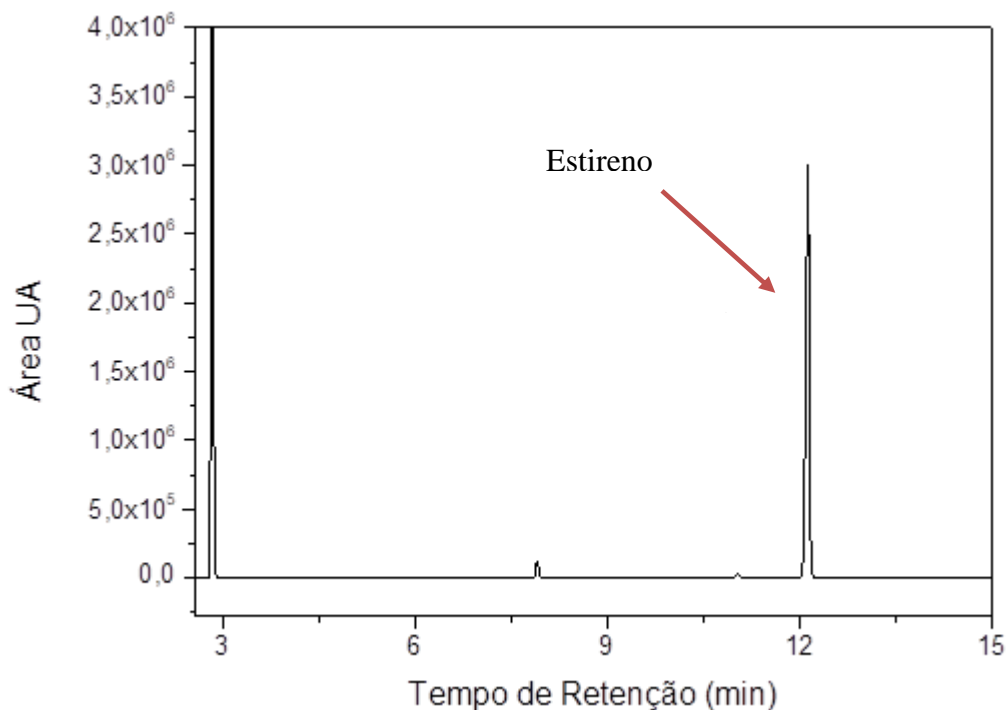
Figura 32 – Cromatograma do PLO com Impregnação Química



Fonte: PRÓPRIA (2023)

Como demonstrado na Tabela 13 as amostras que passaram pela impregnação química e seguidas de uma lavagem obtiveram a maior concentração de estireno, ou seja, o maior pico durante as análises referentes ao GC-FID, conforme a Figura 33

Figura 33 – Cromatograma do PLO com Impregnação Química - Lavadas



Fonte: PRÓPRIA (2023)

#### 4.5.2 Análise do Índice de Refração

A análise do índice de refração se deu através do ajuste do Refratômetro ABBE RTA – 100 com água destilada (IR 25°C = 1,333). Os resultados foram expressos na Tabela 14 a seguir:

Tabela 14 – Índice de Refração dos PLO's

Temperatura (°C)	Condições das Amostras	Índice de Refração a 25 °C
500	Sem Impregnação	1,548 ± 0,002
500	Impregnação – Lavagem	1,547 ± 0,003
500	Impregnação	1,548 ± 0,002

Fonte: PRÓPRIA (2023)

Os polímeros, em sua maioria, conforme Callister (2002), possuem seus índices de refração na faixa de 1,45 a 1,60. Como os resultados desses índices apresentaram valores acima de 1,54 verificou-se a coerência com a literatura envolvida nesse material, onde o valor médio de índice de refração para o poliestireno é de 1,60 (CRC HANDBOOK, 2002).

Com os resultados do índice de refração dos PLO's, observou-se dados próximos ao valor do Estireno Comercial - 1,5469 (INNOVA, 2018), ou seja, ambos os valores de índice de refração se aproximaram ao valor comercial, percebe-se que a impregnação química por NaOH favoreceu a formação de compostos mais leves, observados na redução do índice de refração.

#### 4.5.3 Análise da Viscosidade

Os resultados das análises de viscosidade estão descritos na Tabela 15:

Tabela 15 – Viscosidade dos PLO's

<b>Temperatura</b> (°C)	<b>Condições das Amostras</b>	<b>Viscosidade</b> <b>a 20 °C</b> <b>(mm<sup>2</sup>/s)</b>
500	Sem Impregnação	1,346 ± 0,004
500	Impregnação – Lavagem	1,046 ± 0,002
500	Impregnação	1,271 ± 0,006

Fonte: PRÓPRIA (2023)

A análise de viscosidade representada na tabela anterior demonstra o quanto a impregnação com NaOH é relevante para essa característica físico-química dos PLO's, pois o catalisador utilizado fez com que os valores comesçassem a convergir, principalmente os experimentos que envolveram a etapa de lavagem, para os dados informados pelos fabricantes de estireno: 0,8388 mm<sup>2</sup>/s (INNOVA, 2018).

Há uma diferença significativa entre as viscosidades obtidas experimentalmente e os dados fornecidos pelo fabricante. Tal variação se dá pela presença dos aditivos e dos produtos orgânicos oriundos da própria decomposição do poliestireno.

#### 4.5.4 Análise da Densidade

Os resultados da densidade absoluta dos produtos líquidos orgânicos obtidos nos processos de pirólise, são apresentados na Tabela 16 abaixo:

Tabela 16 – Densidade dos PLO's

<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Condições das Amostras</b>	<b>Densidade a 20 °C (g/cm<sup>3</sup>)</b>
500	Sem Impregnação	0,972 ± 0,001
500	Impregnação – Lavagem	0,959 ± 0,001
500	Impregnação	0,971 ± 0,001

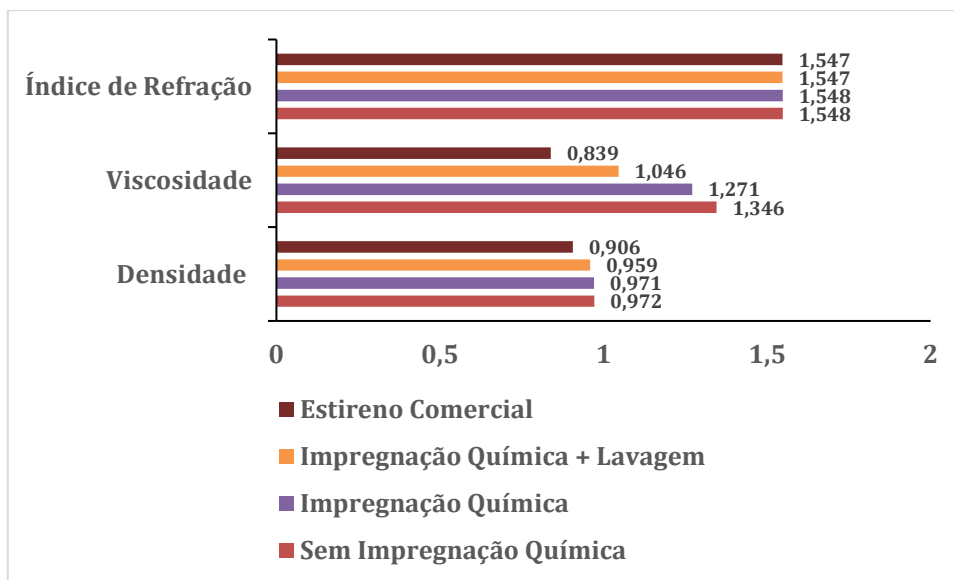
Fonte: PRÓPRIA (2023)

A partir dos resultados das densidades experimentais, observou-se que os valores se aproximaram das densidades informadas pelos fabricantes do Estireno Comercial: 0,9059 g/cm<sup>3</sup> (PLASTIC EUROPE, 2018), 0,9011 g/cm<sup>3</sup> (LYONDELLBASELL, 2018) e 0,9060 g/cm<sup>3</sup> (INNOVA, 2018). Essa variação observada entre os valores das densidades experimentais e das densidades dadas pelos fabricantes, pode ser explicada pela presença de outros compostos orgânicos no PLO, como os aditivos que dão a característica da matéria-prima utilizada, que podem ser características do próprio processo de pirólise, ou, possíveis diferenças nas metodologias de análise.

Notou-se que a impregnação com NaOH deixou o produto menos denso, principalmente o processo com lavagem, o que influencia diretamente entre os valores das densidades experimentais e os valores das densidades do estireno comercializado pelas indústrias. Não obstante, a impregnação química, por si só, não favoreceu a densidade, se comparada ao Estireno Comercial, como foi possível verificar no processo sem a lavagem, ou seja, para que a impregnação química possa atingir seus objetivos propostos nas amostras é necessária uma lavagem delas.

De uma forma geral as análises de densidade, viscosidade e índice de refração, comportaram-se, em comparação ao Estireno Comercial, conforme Figura 34.

Figura 34 – Comparativo das Análises Físico-Químicas com o Estireno Comercial



Fonte: PRÓPRIA (2023)

## 5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados experimentais dos processos de pirólise, percebeu-se a formação de um produto líquido orgânico (PLO), carvão e gases não condensáveis, o que pode ser confirmado com a literatura da área.

As mudanças proporcionadas pelo catalisador foram significativas para a pirólise, pois as alterações verificadas nos experimentos com impregnação mostraram-se de suma relevância para a otimização do processo pirolítico. Um dos fatores que mais sofreu alteração foi a temperatura de saída do produto líquido, observando-se uma redução de 100 °C para os experimentos com impregnação química.

Outro fator importante foi a implementação de uma etapa de lavagem posterior a impregnação química, pois esta etapa proporcionou um decaimento de mais 20 °C na obtenção do produto líquido. De forma geral, a atuação do catalisador foi eficiente para os experimentos de pirólise nos quais a impregnação química proporcionou uma redução no gasto energético do processo.

Os rendimentos variaram não só em relação aos processos com e sem impregnação, mas também com o implemento da etapa de lavagem, sendo esse último o responsável pelo maior rendimento dos experimentos, em média 74,73%. Os resultados obtidos com o catalisador associado a uma etapa de lavagem podem ser considerados satisfatórios, pois, verificou-se um aumento de 10% no rendimento do produto, comparado com o processo sem impregnação, e de 20%, comparado a impregnação sem lavagem.

Com a cromatografia com detector de ionização de chama, foi possível observar a importância do catalisador para purificação dos produtos obtidos nos processos, já que as maiores concentrações de estireno foram observadas na despolimerização das amostras impregnadas, principalmente nas amostras seguidas da etapa de lavagem.

Com as características físico-químicas dos produtos obtidos foi possível verificar a viabilidade do catalisador, uma vez que a densidade e a viscosidade dos produtos apresentaram valores próximos ao do estireno comercial, com algumas diferenças que se dão pela presença dos aditivos e dos produtos orgânicos oriundos da própria decomposição do poliestireno, já, para o índice de refração, o valor variou bem menos em relação aos outros, bem semelhante ao estireno puro.

A impregnação química com NaOH apresentou resultados satisfatórios em cada variável analisada do processo, proporcionando um aumento na pureza e rendimento, aproximando as características dos produtos da pirólise do estireno puro, mostrando-se uma via tecnológica para a reciclagem química de resíduos plásticos a base de poliestireno.

## **6 PERSPECTIVAS**

As principais sugestões para trabalhos futuros consiste em variáveis não estudadas neste projeto e um novo processo, a saber:

- 1) Estudar a produção e composição dos gases produzidos;
- 2) Variar as concentrações de NaOH e verificar as modificações que podem ocorrer no processo; e
- 3) Realizar uma destilação nos produtos líquidos obtidos, pois, retirando o restante dos aditivos e resquícios do processo de pirólise, será possível verificar a pureza desses produtos de forma mais assertiva.

## REFERÊNCIAS

- ABIQUIM (São Paulo). **O que é EPS? 2020**. Disponível em: <<http://www.epsbrasil.eco.br/eps/index.html>>. Acesso em: 19 julho 2022
- ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2021/2020/2018**. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br>>. Acesso em: 14/07/2022.
- ACHILIAS, D. S.; KANELLOPOULOU; MEGALOKONOMOS, P.; ANTONAKOU, E.V.; LAPPAS, A. A. Chemical Recycling of Polystyrene by Pyrolysis: Potential Use of the Liquid Product for the Reproduction of Polymer. *Journal Macromolecular Materials Engineering*, v. 292, 2007, p. 923–934.
- AGUIAR, E. S; RIBEIRO, M. M; VIANA, J. H; PONTES, A. N. **Panorama da disposição de resíduos sólidos urbanos e sua relação com os impactos socioambientais em estados da Amazônia brasileira**. urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana, 13, 2021, e20190263. <https://doi.org/10.1590/2175-3369.013.e20190263>
- Alfaia, R. G., Costa, A. M., & Campos, J. C. (2017). Municipal solid waste in Brazil: A review. *Waste Management & Research*, 35(12), 1195-1209.
- Almeida, Gustavo M. A , Leonardo P. Barros , Gabriel O. Rodrigues, Nélio T. Machado2 , Sergio D. Junior , Douglas A. R. De Castro. **Influência Da Quantidade De Catalisador Em Leito Fixo Na Recuperação De Estireno Via Pirólise De Resíduos De Xps**. XL Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, 2022.
- AL-SALEM, S. M. A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste (PSW). *Journal of Environmental Management*, [s. l.], v. 197, p. 177–198, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.084>
- AMOS, Jonathan. **Poluição ameaça 'tornar a Terra um 'Planeta de plástico'**. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/geral-40677873>>. BBC News, ano 23/07/2017. Acesso em: 29/07/2022
- ANDREAS, Bassi; CHRISTENSEN, T. H; DAMGAARD, A. **Environmental performance of household waste management in Europe: an example of 7 countries**. *Waste Management*, 69, 2017, 545-557. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.042>. PMID:28797625
- ARENA, Umberto. **An innovative process for mass production of multi-wall carbon nanotubes by means of low-cost pyrolysis of polyolefins**. *Polymer Degradation and Stability*, Volume 91, Issue 4, April 2006, Pages 763-768
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR – 10004. **Resíduos sólidos: Classificação**. Rio de Janeiro; 2004.
- BARBOSA, Vanessa. 6 pecados ambientais da sacola plástica. **Revista Exame 2016**. Disponível em: <https://exame.abril.com.br/brasil/6-pecados-ambientais-da-sacola-plastica/> . Acesso em: 14 de julho de 2022.

**BASU, Prabir. Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory.** Burlington: Ed. Elsevier, 2010. 365 p.

BUEKENS, A. G. 2006. Introduction to Feedstock Recycling of Plastics. [book auth.] J. Scheirs and W. Kaminsky. **Introduction to Feedstock Recycling of Plastics: Converting Waste Plastics into diesel and Other Fuels.** Edithvale: John Wiley Sons, Ltd, 2006, p. 79.

BIASOTTO, Eloisa; PACHECO, Èlen; BONELLI, Cláudia. **Meio Ambiente, Poluição e Reciclagem – 2ª Edição.** Editora Edgard Blücher Ltda, ano de 2010, São Paulo. p.106.

Brasil. (2010, 2 de agosto). Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos.** Brasília: Diário Oficial da União.

CALLISTER, W. D. **Ciencia e Engenharia de Materiais: Uma introdução;** LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 5ª Edição, RJ, 2002.

CASTRO, D. A. R. **Processo de Produção de Bio-Óleo e Bio-Adsorventes Via Pirólise das Sementes De Açaí (Euterpe oleracea Mart.).** Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia). Universidade de Federal do Pará. Belém. 2019.

CASTRO, Fabio. **Somente 9% do plástico produzido pela humanidade foi reciclado.** Matéria do Jornal Estadão de São Paulo, 19 de julho de 2017. Estadão Sustentabilidade. Matéria está disponível em: <https://sustentabilidade.estadao.com.br/noticias/geral,estudo-revela-que-humanidade-ja-produziu-8-3-bilhoes-de-toneladas-de-plastico,70001896312>. Acesso: 22/08/2022.

COLTRO, Leda; GASPARINO, Bruno; QUEIROZ, Guilherme. **Reciclagem de Materiais Plásticos: A Importância da Identificação Correta.** Revista Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 18, nº2, p. 119-125, 2008.

CORESAB. **A Incineração de Resíduos Urbanos.** Consórcio Regional de Saneamento Básico-Central, 8 de julho de 2020.

**CRC handbook of chemistry and physics: a ready-reference book of chemical and physical data,** Lide, D. R. 83° Edition, CRC Press, New York, 2002.

CRUZ, O. A. B. **Evaluación del Proceso de Reciclaje de Polímeros Matagalpa 2012.** Trabajo Monográfico Para Optar al Título de Ingeniero Industrial y de Sistemas. Universidad Nacional Autonoma de Nicaragua, UNAN FAREM – Matagalpa, 2013.

DAOLIO, Paula. **Avaliação do Potencial da Pirólise de Resíduos Sólidos Urbanos como Processamento Termoquímico para Recuperação de Matéria e Energia, 2015.** Trabalho de Conclusão de Curso. Curso Superior de Engenharia Ambiental, Campus Londrina, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

DALPOZZO R. Magnetic nanoparticle supports for asymmetric catalysts. **Green Chem.**, 17, 3671-3686, 2015.

DIAS, Juliana. **Rotas de Destinação dos Resíduos Plásticos e seus Aspectos Ambientais: Uma Análise de Potencialidade da Biodegradação, 2016.** Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

DOS SANTOS, H. A. **Modelagem e otimização do processo para produção de óleo de pirólise a partir de embalagens de polipropileno.** Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química – UFSJ, 2021.

FREDIANE, P. **Waste/contaminated polystyrene recycling through reverse polymerization.** In: **Lynood. Polystyrene: synthetics, characteristics and applications.** New York: Nova, 2014. cap. 1, p. 1-30.

FREESE, J. **Análise do ciclo de vida de copos plásticos de poliestireno e canecas de cerâmica utilizados para servir café em um ambiente de trabalho.** 2013. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

FOGLER, H. Scott. **Elementos de Engenharia das Reações Químicas.** 4a edição. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2009.

GARCIA, M. B. S. Resíduos sólidos: responsabilidade compartilhada. **Revista Científica Semioses**, v. 9, n. 2, p. 77-91, 2016.

GAUTHIER, C; MORAN, E. F. **Public policy implementation and basic sanitation issues associated with hydroelectric projects in the Brazilian Amazon: Altamira and the Belo Monte dam.** *Geoforum*, 97, 2018, 10-21. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoforum.2018.10.001>.

GORZIZA, Amanda. APENAS 1,3% DO LIXO PLÁSTICO GERADO NO BRASIL É RECICLADO. **Revista Folha de São Paulo UOL Piauí, 2021.** Disponível em: <https://piaui.folha.uol.com.br/apenas-13-do-lixo-plastico-gerado-no-brasil-e-reciclado/&gt> ; Acesso em: 21/03/2022.

GOUVEIA, Nelson. **Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social.** *Ciência e Saúde Coletiva*, v. 17, n. 6, p. 1503-1510, 2012

INNOVA. **Estireno monômero inibido: Ficha de informações de segurança.** Disponível em: <http://www.innova.com.br/arquivos/documentos/produtos/PT-566830aa2ac9b-FISPQ-FISPQ-FISPQ-FISPQ-FISPQ-FISPQ-FISPQ-FISPQ-FISPQ.pdf> Datado em 05/07/2018 Acesso em: 30/01/2023.

JOHNSTON, R. (2016). **Arsenic and the 2030 Agenda for Sustainable Development.** In *Arsenic Research and global sustainability: Proceedings of the Sixth International Congress on Arsenic in the Environment (As2016)* (pp. 12-14). New York: CRC Press.

HAGE, E. **Aspectos históricos sobre o desenvolvimento da ciência e da tecnologia de polímeros. Polímeros: Ciência e Tecnologia**, 1998.

HARPER, Charles A. PETRIE, Edward M. **Plastics Materials and Process: A Concise Encyclopedia**. Hoboken, John Wiley.

KAZEMI, M.; GHOBADI, M.; MIRZAIE, A. **Based on cobalt ferrite nanoparticles (CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> MNPs) as catalyst and support: Magnetically recoverable nano-catalysts in organic synthesis**. *Nanotechnol. Rev.*, 7 (1), 43-68, 2018.

KAZA, S.; YAO, L.; BHADA-TATA, P.; VAN WOERDEN, F. (2018). **What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050**. Washington: World Bank. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>.

Lei Federal nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências**. 2010. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm) - acesso em 29 de julho de 2022.

LOMASSO, A. L. **Benefícios e desafios na implementação da reciclagem: um estudo de caso no centro mineiro de referência em resíduos (CMRR)**. *Revista Pensar Gestão e Administração*, v. 3, p. 1-20, 2015.

LYONDELLBASELL. **Product handling guide: styrene monomer**. 2017. Disponível em: Acesso em: 30 de janeiro de 2023.

MACHADO, Paulo Affonso Leme. **Direito Ambiental Brasileiro**. 22 ed. São Paulo: Malheiros Editores, 2014.

MALHEIROS, T. F.; PHILIPPI JUNIOR, A.; COUTINHO, S. M. V. **Agenda 21 nacional e indicadores de desenvolvimento sustentável: contexto brasileiro**. *Saúde e Sociedade*, v. 17, n. 1, p. 7-20, 2008.

MANCIO, A.A. **Produção, fracionamento e desacidificação de biocombustíveis obtidos via craqueamento térmico catalítico de óleos vegetais**. 2015. 325f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2015.

MANSOR, M. T. C.; CAMARÃO, T. C. R. C. C.; CAPELIN, M.; KOVACS, A.; FILET, M.; SANTOS, G. A.; SILVA, A. B. **Caderno de Educação Ambiental: Resíduos Sólidos**. São Paulo: SMA, 2010.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **MECANISMO DE DESENVOLVIMENTO LIMPO APLICADO A RESÍDUOS SÓLIDOS**. Brasília – DF, 2007. Disponível em < [http://www.mma.gov.br/estruturas/srhu\\_urbano/\\_publicacao/125\\_publicacao12032009023918.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/srhu_urbano/_publicacao/125_publicacao12032009023918.pdf)>. Acesso em 23 de julho de 2022.

MIRANDA, Débora Micheline Vaz. **Degradação térmica e catalítica dos polímeros poli(acrilonitrila-co-butadieno-co-estireno) (ABS) e poliestireno de alto impacto (HIPS) oriundos de resíduos eletroeletrônicos**/Débora Micheline Vaz de Miranda. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2016.

MIRANDA, D. M. V. de. **Reciclagem Química via Pirólise e Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de Resíduos Plásticos**. 2019. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2019.

MONTEIRO, Alessandra. **Contribuição Da Reciclagem Química De Resíduos Plásticos Para O Desenvolvimento Sustentável**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.

NASCIMENTO, Ronaldo Ferreira do et al. **Cromatografia gasosa: aspectos teóricos e práticos**. 2018.

OLIVEIRA, Carolina S. **Estudo do processo de despolimerização do poliestireno (psai e xps) via pirólise em escala de bancada**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Amazonas, 2018.

PALMAY-PAREDES, P. G.; MOROCHO-DELGADO, S.; PUENTE-GUIJARO, C.; DONOSO-QUIMBITA, C. Thermic pyrolysis of polypropylene waste as a source of fuel. **Revista Mexicana de Ingeniería Química**, v. 20, n. 2, p. 1019-1027, 2021.

PARADELA, F. M. R. **Estudo da pirólise de misturas de resíduos de plásticos, pneus e biomassa**. Dissertação (Doutorado em Engenharia Química e Bioquímica). Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2012.

PARKER, Laura. **Poluição por plástico é um problema grave — mas ainda não é tarde demais para solucioná-lo**. Matéria National Geographic: “Planeta ou Plástico?”, publicada na data 11/10/2020. Disponível em: <https://www.nationalgeographicbrasil.com/ciencia/2020/10/poluicao-por-plastico-e-um-problema-grave-mas-ainda-nao-e-tarde-demais>. Acesso em: 03/08/2022.

PARSHALL, G. W., ITTEL, S. D., **Homogeneous Catalysis - The Applications and Chemistry of Catalysis by Soluble Transition Metal Complexes**, John Wiley & Sons, Inc., New York, 31-42, 1992.

PEREIRA, M. **Estudo do processo de craqueamento termo-catalítico de polímeros (polietileno, polipropileno e poliestireno) para produção de combustível**. 2016. Tese (Doutorado em engenharia de recursos naturais) – Universidade Federal do Pará, Belém.

PLASTICS EUROPE. **Styrene monomer: safe handling guide**. 2018. Disponível em: <[https://www.plasticseurope.org/application/files/7015/3736/4512/Styrene\\_HSE\\_brochure\\_EN\\_July2018\\_20180822.pdf](https://www.plasticseurope.org/application/files/7015/3736/4512/Styrene_HSE_brochure_EN_July2018_20180822.pdf)>. Acesso em: 30 de janeiro de 2023.

PORTELLA, Márcio Oliveira; RIBEIRO, José Cláudio Junqueira. **Aterros sanitários: aspectos gerais e destino dos resíduos**. Direito Ambiental e sociedade, v. 4, n.1, p. 115-134, 2014.

QURESHI, Muhammad Saad et al. **Pyrolysis of plastic waste: Opportunities and challenges.** Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, v. 152, p. 104804, 2020.

RAGAERT, Kim; DELVA, Laurens; VAN GEEM, Kevin. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. **Waste Management**, v. 69, p. 24-58, 2017.

RECOLIX. **A importância da reciclagem para o meio ambiente. 2017.** Disponível em <http://recolix.com.br/meio-ambiente-e-sustentabilidade> - Acesso em 29 de julho de 2022.

REICHERT. F. **INNOVA Energias Renováveis investe R\$ 4 milhões no Parque Científico e Tecnológico da Unicamp.** Fevereiro de 2015. Disponível em: <http://www.inova.unicamp.br/parquecientifico/2015/02/376/>

RIBEIRO, Túlio Franco; LIMA, Samuel do Carmo. **Coleta Seletiva de Lixo Domiciliar - Estudo de Casos.** Caminhos de Geografia, Uberlândia, v.2, n. 1, p. 50-69, dez. 2000.

ROCHA, K. L. A. **Investigação do Processo de Destilação do Produto Líquido Obtido da Pirólise de Resíduos Plásticos a base de Poliestireno.** Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Química da Faculdade de Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas. Manaus, Amazonas, 2019.

RODRIGUES, G. O.; QUARESMA, C. C. V.; PESSOA JUNIOR, W. A. G.; MANZATO, L.; MACHADO, N. T.; CASTRO, D. A. R.; DUVOISIN JR, S. **Influence Of Temperature On The Pyrolysis Process For The Treatment Of Polystyrene-Based Plastic.** In: 16° Congresso Brasileiro de Polímeros, 2021, OURO PRETO. Proceedings of the 16th Brazilian Polymer Conference (16° CBPOL), 2021. v. 1. p. 122-126.

JUNIOR, S Duvoisin, MIA Andrade, VFC Lobato, GO Rodrigues e Douglas Castro. **Influência Da Temperatura No Processo De Pirólise De Resíduos Descartáveis Para Obtenção Do Monômero Estireno.** Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2020.

SACRAMENTO, S. S. Projeto de proteção ambiental: Descarte de lixo doméstico nas vias públicas do bairro de Nova Dias d'Avila, município de Dias D'avila – BA, 2014. 29f. **Dissertação (Metodologia da pesquisa)** - Curso de Especialização em Gestão Ambiental em Municípios, Universidade Tecnológica Federal Do Paraná, Medianeira, 2014.

SANJAD, H. C. **Reciclagem como alternativa para a eficiência e sustentabilidade econômica do setor de resíduos sólidos urbanos no município de Belém - PA.** 2018. 136f. Tese de mestrado (Mestrado em Engenharia Hídrica) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.

SANTOS, V. A.; VASCONCELOS E.C. **Extrapolação de dados cinéticos obtidos em reatores químicos homogêneos.** Revista Química & Tecnologia, Pernambuco, ano 1, n.1, p. 11-19, jul/dez. 2002.

SANTOS, M. C. **Estudo do processo de craqueamento termocatalítico da borra de neutralização do óleo de palma para produção de biocombustível**. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais). Universidade de Federal do Pará. Belém. 2015.

SANTOS, W. G. **Craqueamento termico catalítico de pneus inservíveis**. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais). Universidade de Federal do Pará. Belém. 2019.

SHARUDDIN, Shafferina Dayana Anuar et al. A review on pyrolysis of plastic wastes. **Energy conversion and management**, v. 115, p. 308-326, 2016.

SCHEIRS, J. W. Kaminsky, Feedstock **Recycling and Pyrolysis of Waste Plastics: Converting Waste Plastics into Diesel and Other Fuels**, John Wiley & Sons, (2006).

SOLIS, Martyna. **Potential of chemical recycling to improve the recycling of plastic waste**. 2018.

SZABO, E; OLAHA, M; RONKAY, F; MISKOLCZI, N; BLAZO, M. **Characterization of the liquid product recovered through pyrolysis of PMMA – ABS waste**. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, v. 92, p.19-24, 2011.

TELES, Giovana. **Após 12 anos de espera, Brasil passa a ter plano para tratamento de resíduos sólidos**. G1 – Jornal Nacional, 14 de abril de 2022. Disponível em: <https://g1.globo.com/jornal-nacional/noticia/2022/04/14/apos-12-anos-de-espera-brasil-passa-a-ter-plano-para-tratamento-de-residuos-solidos.ghtml>. Acesso: 20/02/2023

VIEIRA, G. E. G., PEDROZA, M. M., SOUSA, J. F., PEDROZA, C. M. **O Processo de Pirólise como Alternativa para o Aproveitamento do Potencial Energético de Lodo de Esgoto – Uma Revisão**. Revista Liberato, v. 12, p. 81 – 95, 2011.

THAIS, H. L. N. EPS: poliestireno expandido. **POLIESTIRENO EXPANDIDO, 2014**. Disponível em: <https://comonuvens.wordpress.com/2014/05/22/eps-poliestireno-expandido/>. Acesso em: 19 de julho de 2022.

ZAPPAROLI, I. D. **A Questão Socioambiental da Reciclagem: A prática da população londrinense**. Serviço Social em Revista, v. 12, p. 1-19, 2009.

YAO, L; WOERDEN, F; KAZA; BHADA-TATA, P. **What a waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050**. Washington: World Bank Group, 2018.

WILSON, D. C.; ROGERO, A. C. **Waste management as a political priority**. In United Nations Environment Programme (Ed.), Global Waste Management Outlook. New York: United Nations, 2016. <https://doi.org/10.18356/765baec0-en>.