



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

THAISA MARIA NASCIMENTO

**PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEIS LÍQUIDOS A PARTIR DA PIRÓLISE DE
PLÁSTICOS RESIDUAIS COLETADOS NO MAR**

**RECIFE
2024**



PROGRAMA PRH30.1-ANP/FINEP

Engenharia do processamento de petróleo e gás, produção de biocombustíveis e energias renováveis

Título da Especialização com Ênfase no Setor Petróleo e Gás:
Biocombustíveis e demais energias renováveis.



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Produção de combustíveis líquidos a partir da pirólise de plásticos residuais coletados no mar

Thaís Maria Nascimento

Orientadores

Prof. Dr. José Geraldo de Andrade Pacheco Filho

Dr. Juan Felipe González Alba

2024

THAISA MARIA NASCIMENTO

**PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEIS LÍQUIDOS A PARTIR DA PIRÓLISE DE
PLÁSTICOS RESIDUAIS COLETADOS NO MAR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador(a): Prof. Dr. José Geraldo de Andrade Pacheco Filho

Coorientador(a): Dr. Juan Felipe González Alba

RECIFE

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Nascimento, Thaisa Maria.

Produção de combustíveis líquidos a partir da pirólise de plásticos residuais
coletados no mar / Thaisa Maria Nascimento. - Recife, 2024.

51 p. : il., tab.

Orientador(a): José Geraldo De Andrade Pacheco Filho

Cooorientador(a): Juan Felipe González Alba

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Química -
Bacharelado, 2024.

Inclui referências.

1. Pirólise. 2. Polipropileno. 3. Plástico laminado. 4. Mar. 5. Combustível. I.
De Andrade Pacheco Filho, José Geraldo . (Orientação). II. González Alba,
Juan Felipe. (Coorientação). IV. Título.

660 CDD (22.ed.)

THAISA MARIA NASCIMENTO

**PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEIS LÍQUIDOS A PARTIR DA PIRÓLISE DE
PLÁSTICOS RESIDUAIS COLETADOS NO MAR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Química da
Universidade Federal de Pernambuco, como
requisito para obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Química.

Aprovado em: 19/08/2024

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



JOSE GERALDO DE ANDRADE PACHECO FILHO

Data: 23/10/2024 21:26:12-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. José Geraldo de Andrade Pacheco Filho (Orientador)

Universidade Federal de Pernambuco

Documento assinado digitalmente



JOSE MARCOS FRANCISCO DA SILVA

Data: 23/10/2024 13:41:02-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. José Marcos Francisco da Silva (Examinador Interno)

Universidade Federal de Pernambuco

Documento assinado digitalmente



ROGER THOMAS FRANCOIS FRETY

Data: 23/10/2024 11:44:36-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Roger Thomas François Frety (Examinador Externo)

Universidade Federal de Pernambuco

Dedicatória

À minha mãe e irmã, Maria da Luz e Thais, que foram os pilares de sustentação da minha trajetória até aqui. Em memória do meu pai Josimar que se orgulharia de ver onde cheguei.

Aos meus amigos por todo acolhimento e amor em dias difíceis.

AGRADECIMENTOS

À Deus, em primeiro lugar, que é o meu refúgio e quem me deu a graça necessária para que eu pudesse chegar até aqui.

À minha mãe e irmã, Maria da Luz e Thais Nascimento, que são e sempre foram o meu alicerce em toda minha trajetória pessoal e acadêmica.

Ao meu Vinícius e sua família, por todo amor, carinho e apoio me concedido.

A todos os meus amigos de infância e acadêmicos, em especial Maria Eduarda, Sara Gabriela, Julianny Anjos, Vitória Gouveia, Ívina Luana, Yvisson Matheus, Matheus Leonardo e Glenda Evellyn, por todo carinho e acolhimento de sempre.

Aos meus orientadores José Geraldo e Juan Felipe por todo suporte e aprendizado.

À toda equipe do PRH 30.1 e do laboratório LabRefino/LaTecLim por todo auxílio e paciência.

À Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP e à Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP, por meio do Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – PRH-ANP, suportado com recursos provenientes do investimento de empresas petrolíferas qualificadas na Cláusula de P, D&I da Resolução ANP nº 50/2015. Em particular ao PRH 30.1, do Departamento de Engenharia Química do Centro de Tecnologia e Geociências da UFPE, pelo apoio financeiro.

RESUMO

O crescimento acentuado da demanda global por plásticos está ligado à sua importância em diversos setores comerciais e industriais. Ao mesmo tempo, a quantidade de resíduos plásticos acumulados em ambientes terrestres e aquáticos também aumenta de maneira significativa, gerando problemas ambientais, sociais e econômicos. Esses resíduos exigem uma gestão mais eficiente, especialmente aqueles que não são apropriados para a reciclagem mecânica. Este estudo apresenta uma alternativa que é reciclagem química de plásticos misturados em múltiplas camadas não apropriados para reciclagem mecânica, que são descartados de forma inadequada em oceanos ou praias. A tecnologia empregada é a pirólise térmica e catalítica visando produzir hidrocarbonetos similares aos combustíveis convencionais e à nafta petroquímica. Nesta pesquisa, foram coletados e analisados resíduos plásticos das praias de Recife - PE, onde foram encontrados principalmente polietileno (PE), polipropileno (PP) e poliestireno (PS). Dessa forma, o trabalho sugere o método de reciclagem química por pirólise térmica e catalítica para a produção de um bio-óleo que serve como precursor de combustíveis líquidos. Resíduos de filmes de polipropileno com camadas de alumínio foram submetidos a pirólise em escala laboratorial, resultando em uma mistura de hidrocarbonetos nas faixas de gasolina, querosene e diesel. A pirólise térmica dos resíduos plásticos laminados resultou na formação de produtos aromáticos e aumento de alcanos. O alumínio presente em uma das camadas do plástico laminado atuou como catalisador na reação de pirólise, favorecendo o craqueamento e recombinações dos hidrocarbonetos, em comparação à pirólise do filme sem alumínio. A pirólise catalítica realizada com dois diferentes catalisadores: Zeólitas Ferrierita (Z-Fe) e Ni sobre Zeólitas Ferrierita (5Ni/Z-Fe), por sua vez, não produziu aromáticos em nenhuma das amostras e as taxas de geração de CO₂ foram muito altas. Por outro lado, a hidropirólise mostrou um desempenho superior em comparação às pirólises térmicas e catalíticas realizadas em atmosfera de hélio (He), a qual promoveu reações mais seletivas, resultando em maior conversão de materiais e maior rendimento de produtos líquidos, com menos formação de subprodutos indesejados, como CO₂.

Palavras-chave: Plástico; pirólise; alumínio; combustível.

ABSTRACT

The sharp growth in global demand for plastics is linked to their importance in various commercial and industrial sectors. At the same time, the amount of plastic waste accumulating in terrestrial and aquatic environments is also increasing significantly, creating environmental, social, and economic problems. This waste requires more efficient management, especially that which is not suitable for mechanical recycling. This study presents an alternative: chemical recycling of multilayer mixed plastics that are unsuitable for mechanical recycling and are inappropriately discarded into oceans or on beaches. The technology employed is thermal and catalytic pyrolysis aimed at producing hydrocarbons similar to conventional fuels and petrochemical naphtha. In this research, plastic waste was collected and analyzed from the beaches of Recife - PE, where polyethylene (PE), polypropylene (PP), and polystyrene (PS) were predominantly found. In this way, the study suggests the chemical recycling method via thermal and catalytic pyrolysis to produce a bio-oil that serves as a precursor for liquid fuels. Polypropylene film waste with aluminum layers was subjected to pyrolysis on a laboratory scale, resulting in a mixture of hydrocarbons in the gasoline, kerosene, and diesel ranges. The thermal pyrolysis of laminated plastic waste resulted in the formation of aromatic products and an increase in alkanes. The aluminum present in one of the layers of the laminated plastic acted as a catalyst in the pyrolysis reaction, promoting cracking and recombination of the hydrocarbons compared to the pyrolysis of the film without aluminum. Catalytic pyrolysis conducted with two different catalysts: Ferrierite Zeolites (Z-Fe) and Ni on Ferrierite Zeolites (5Ni/Z-Fe), in turn, did not produce aromatics in any of the samples, and CO₂ generation rates were very high. On the other hand, hydrolysis showed superior performance compared to thermal and catalytic pyrolysis conducted in a helium (He) atmosphere, promoting more selective reactions, resulting in greater material conversion and higher liquid product yields, with less formation of undesirable byproducts like CO₂.

Keywords: Plastic; pyrolysis; aluminum; fuel.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Produção anual de plástico entre 1950 e 2019.	18
Figura 2 –	Geração de RSU nas regiões do Brasil em 2022 e 2022	19
Figura 3 –	Índice de reciclagem de plástico, em 2021, por tipo de material	20
Figura 4 –	Produção global anual de plástico em milhões de toneladas	21
Figura 5 –	Quantidades estimadas de plástico nos mares	22
Figura 6 –	Estrutura do polipropileno	23
Figura 7 –	Parâmetros de processos da reciclagem química.	24
Figura 8 –	Métodos de pirólise de acordo com várias categorias.	26
Figura 9 –	Fluxograma do processo de pirólise catalítica de plásticos.	28
Figura 10 –	Embalagens alimentícias de filmes plásticos metalizados	30
Figura 11 –	Coleta de lixo na praia do Pina, no Recife.	31
Figura 12 –	Solução de H ₂ SO ₄ após a dissolução do alumínio	31
Figura 13 –	Simulação de leito com tubo de quartzo.	33
Figura 14 –	Proporção mássica dos plásticos coletados na praia do Pina.	34
Figura 15 –	FTIR das amostras de plásticos: a) sem Al e b) com Al.	35
Figura 16 –	TG e DTG das amostras de plásticos.	35
Figura 17 –	DSC das amostras de PP com e sem Al	37
Figura 18 –	Pirólises térmicas de PP sem Al e com Al: a) 450°C e b) 500°C.	37
Figura 19 –	Classificação dos hidrocarbonetos nas pirólises térmicas: a) 450°C e b) 500°C	38
Figura 20 –	Faixas de hidrocarbonetos nas pirólises: a) 450°C e b) 500°C.	39
Figura 21 –	Pirólises térmicas a 500°C em: a) cadinho metálico e b) tubo de quartzo	40
Figura 22 –	Classificação dos hidrocarbonetos nas pirólises térmicas a 500°C: a) cadinho e b) tubo de quartzo.	40
Figura 23 –	Pirólises catalíticas a 500°C de PP sem Al e com Al: a) 5Ni-Fe e b) Fe	41
Figura 24 –	Classificação dos hidrocarbonetos nas pirólises catalíticas a 500°C: a) 5Ni-Fe e b) Fe	42
Figura 25 –	Faixas de hidrocarbonetos nas pirólises catalíticas a 500°C: a) 5Ni-Fe e b) Fe	43

Figura 26 –	Hidropirólises a 500°C das amostras de PP com e sem Al.	44
Figura 27 –	Classificação dos produtos da hidropirólise.	44
Figura 28 –	Faixa de hidrocarbonetos dos produtos obtidos da hidropirólise.	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Tipos de pirólise.	24
Tabela 2 –	Composição das amostras de PP com e sem Al.	35

LISTA DE ABREVIACÕES

PA	Poliamida
PE	Polietileno
PET	Tereftalato de Polietileno
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
RSU	Resíduos sólidos urbanos
QAV	Querosene de Aviação
GLP	Gás liquefeito de petróleo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	16
2.1	Objetivo geral	16
2.2	Objetivos específicos	16
3	REVISÃO DE LITERATURA	18
3.1	Polímeros no mundo	18
3.2	Plásticos nos oceanos	20
3.3	Polipropileno	23
3.4	Pirólise	24
3.4.1	<i>Pirólise térmica</i>	26
3.4.2	<i>Pirólise catalítica</i>	27
3.4.3	<i>Pirólise de filmes metalizados</i>	29
4	METODOLOGIA	30
4.1	Coleta dos resíduos plásticos	30
4.2	Preparação das amostras	31
4.3	Caracterização dos filmes plásticos	32
4.3.1	<i>Espectrometria de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)</i>	32
4.3.2	<i>Análise Termogravimétrica (TGA/DTG)</i>	32
4.3.3	<i>Análise imediata</i>	32
4.4	Pirólises e hidropirólises	33
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
5.1	Coleta dos resíduos plásticos	34
5.2	Caracterização dos filmes plásticos	34
5.2.1	<i>Espectrometria de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)</i>	34
5.2.2	<i>Análise Termogravimétrica (TGA/DTG)</i>	35
5.2.3	<i>Análise imediata</i>	36
5.3	Pirólises	37
5.3.1	<i>Pirólises térmicas</i>	37
5.3.2	<i>Pirólises catalíticas</i>	39
5.3.3	<i>Hidropirólises</i>	43
6	CONCLUSÕES	46
	REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

O mercado mundial é marcado por diversas invenções e tecnologias que impactam diretamente a qualidade dos materiais. Os polímeros representam uma importante descoberta devido à sua capacidade de moldagem e enorme utilidade em diversos setores industriais (Iroegbu *et al.*, 2020). Constituído de uma grande estrutura de moléculas iguais unidas entre si (monômeros), o polímero é dividido em duas principais categorias: natural e sintético. O polímero natural é aquele que pode ser encontrado na natureza, como a borracha. O polímero sintético, denominado de plástico (Lakhia *et al.*, 2024), é obtido a partir de reações químicas e advém de matérias-primas como petróleo e carvão (Boyle; Örmeci, 2020).

Desde a sua criação em 1907 com a baquelite (Lakhia *et al.*, 2024), o plástico tornou-se indispensável em todo o mundo e sua demanda de produção aumenta a cada ano. O aumento da produção de plásticos descartáveis está diretamente atrelado ao aumento no índice de descarte desses materiais. Sua característica de alta durabilidade às condições extremas, incapacidade de biodegradação e a sua dificuldade de decomposição podem causar alto índice de acumulação no ambiente terrestre. Segundo dados do Atlas do Plástico (2020), estima-se que aproximadamente 9 bilhões de toneladas de plásticos foram produzidas no mundo entre 1950 e 2017, nos quais apenas 9% são reciclados anualmente. O baixo índice de reciclagem atrelado à expressiva produção desses materiais e a sua falta de biodegradação explicam a alta taxa de descarte inadequado e acúmulo no meio ambiente.

No Brasil, o destino dos plásticos segue um padrão que pode explicar a baixa porcentagem de reciclagem no país. Cerca de 7,7 milhões de toneladas de plásticos são direcionadas aos aterros sanitários, enquanto os outros 2,4 milhões são descartados de forma irregular em ambientes a céu aberto (World Wide Fund For Nature, 2019). Segundo levantamentos de dados do Banco Mundial “What a Waste 2.0” (2018), o Brasil é o 4º maior produtor de lixo plástico no mundo com cerca de 11,3 milhões de toneladas produzidas por ano, os quais apenas 1,28% desses resíduos são realmente reciclados e reinseridos na cadeia produtiva (World Wide Fund For Nature, 2019).

No ambiente marinho, foi estimado que a quantidade de plásticos é de aproximadamente 75 a 199 milhões de toneladas, números que tendem a triplicar até 2040 se não houver planos de intervenção. Esse problema pode gerar prejuízos de até US \$8 bilhões por ano (Unep, 2021). O transporte desses plásticos até o oceano acontece através de diversas fontes, como o descarte no mar, o lixo descartado nas areias de praias, e arraste pelo vento. Entretanto, grande parte dos plásticos marinhos é proveniente dos rios, via descarte direto e arraste por águas pluviais (Atlas Do Plástico, 2020).

A presença de macro e micro plásticos nos oceanos ameaçam a vida marinha e as aves (Watt *et al.*, 2021). Os macroplásticos representam a parcela de plásticos de tamanhos maiores que 5cm (Watt *et al.*, 2019). No ambiente marinho, a fragmentação desses resíduos resulta em partículas de tamanho que variam de 1 a 5 mm, chamadas de microplásticos. O tamanho dos plásticos presente no oceano tem importância devido à sua periculosidade no ecossistema e na fauna. Partículas maiores, denominadas de macroplásticos, podem gerar emaranhamento e serem até consumidas por animais marinhos. As partículas categorizadas de micro causam a ingestão pelos animais marinhos e aves e a acumulação no fundo do mar, além de flutuar nas superfícies (Gerritse *et al.*, 2020).

Esses números mostram a importância de adoções de políticas públicas que visem um melhor gerenciamento desses resíduos poliméricos, visto que suas consequências impactam não só o ambiente terrestre e marinho, mas diretamente ao bem-estar do ser humano, uma vez que pode ocorrer a inalação de microplásticos através do consumo de frutos do mar contaminados pelos resíduos, bem como a sua absorção pela pele gerando acumulação nos órgãos (Unep, 2021).

Para reduzir o índice de acúmulo desses materiais, existem métodos de reciclagem que variam de acordo com a peculiaridade de cada polímero, como a reciclagem mecânica. Entretanto, apesar de contribuir com a diminuição da poluição e ter o poder de recriar novos produtos de alto valor a partir dela, a reciclagem de plásticos ainda é pouco empregada em escala global. Uma dificuldade da reciclagem mecânica é a necessidade de ter resíduos do mesmo tipo de plástico, não misturados, e que não estejam muito sujos. De acordo com a Ellen MacArthur Foundation (2016), as taxas de reciclagem dos plásticos estão muito abaixo da reciclagem de papel, ferro e aço.

A pirólise (ou craqueamento térmico) é um método de reciclagem termoquímica em atmosfera inerte usada principalmente para fins energéticos, onde ocorre a degradação do material em altas temperaturas, que podem variar entre 400 °C e 700 °C. O procedimento é constituído pela quebra dos polímeros de cadeia longa em frações de gás e óleo, resultando em matérias-primas valiosas (Kunwar *et al.*, 2016). Diante da problemática em relação ao acúmulo de resíduos plásticos no meio ambiente ligado à procura de alternativas na produção de combustíveis e produtos petroquímicos, a pirólise torna-se uma solução com grande potencial econômico e ambiental, principalmente para os plásticos não apropriados para reciclagem mecânica.

Estudos recentes acerca da pirólise de plásticos residuais retirados à beira mar e nos oceanos mostram resultados favoráveis quanto à produção de combustíveis e matérias primas.

Os resíduos poliméricos mais encontrados no ambiente marinho são em grande parte de poliolefinas, poliésteres (PES), poliamidas (PA), poliestireno (PS) e borrachas (Faussone; Krzan; Grilc, 2021). Antes de realizar pirólise desses plásticos, é necessária a separação do PET e PA devido à presença de oxigênio em sua composição, que libera compostos oxigenados indesejáveis nos produtos (Veksha *et al.*, 2022). Os plásticos que não contêm oxigênio, tais como PP, PE e PS, rendem uma maior fração de óleo capazes de serem usados como substitutos da gasolina e, principalmente, diesel, após serem refinados com processo de hidrogenação (Maqsood *et al.*, 2021), (Kunwar *et al.*, 2016), (Veksha *et al.*, 2022).

Os catalisadores desempenham um papel importante quanto à minimização de parâmetros, como a diminuição do tempo de pirólise e o aumento de rendimento do produto. Na literatura, catalisadores com alta porosidade e propriedades ácidas são os mais requisitados, apresentando resultados bastante positivos na conversão. Os catalisadores zeólitas são os mais usados pelos autores no processo de pirólise, por serem portadores destas características (Fadillah *et al.*, 2021) (Miandad *et al.*, 2017) (Ding *et al.*, 2019) (Kunwar *et al.*, 2016).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é estudar a pirólise de resíduos plásticos de polipropileno em forma de filmes multicamadas em condições de atmosfera inerte e em presença de hidrogênio, visando obter hidrocarbonetos similares aos encontrados nos combustíveis convencionais. A pirólise térmica será comparada com a pirólise catalítica em presença de catalisador de Ni/Ferrierita.

2.2. Objetivos específicos

- Coletar resíduos de plásticos na praia;
- Separar e caracterizar os materiais poliméricos coletados via espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), análise termogravimétrica (TG-DSC) e análise imediata;
- Avaliar a pirólise térmica dos resíduos coletados que produzem hidrocarbonetos (PP);
- Realizar a comparação das características dos produtos obtidos com os combustíveis tradicionais do mercado;

- Selecionar catalisadores bifuncionais com característica ácida e metálica;
- Realizar pirólise catalítica de resíduos plásticos coletados;
- Avaliar o efeito da pirólise em presença de hidrogênio sobre os produtos de reação.

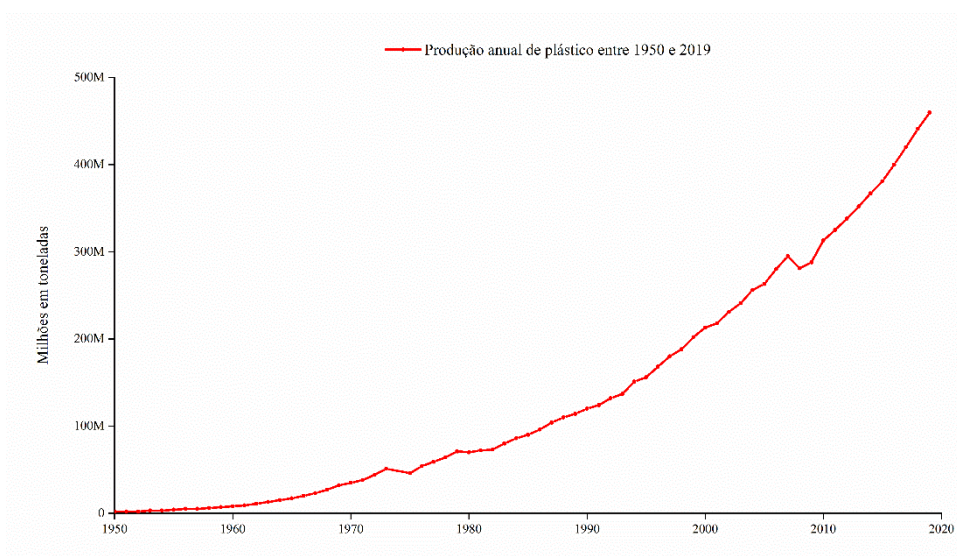
3. REVISÃO DE LITERATURA

Nesta seção, será apresentada uma breve e importante fundamentação teórica acerca dos assuntos abordados neste trabalho, a fim de que haja uma maior e melhor compreensão da problemática e das possíveis soluções propostas.

3.1. Polímeros no mundo

A polimerização é uma reação química em que monômeros (moléculas pequenas) se unem através de ligações covalentes, resultando em macromoléculas denominadas de polímeros. Os materiais plásticos podem ser provenientes de polímeros naturais e sintéticos, sendo esses produzidos a partir de petróleo, gás natural e carvão (Lakhiar *et al.*, 2024). Em geral, são materiais que possuem um papel preponderante nas indústrias do mundo todo, isso porque suas características proporcionam uma vasta variabilidade de formas e versatilidade de uso, sendo empregados em setores como automobilismo, médico-hospitalar, alimentos e bebidas, eletrônicos, higiene e limpeza, entre outros. Devido a isso, a sua produção ganhou um crescimento expressivo de aproximadamente 9% ao ano desde 1950 (Geyer; Jambeck; Law, 2017), como mostra a figura 1.

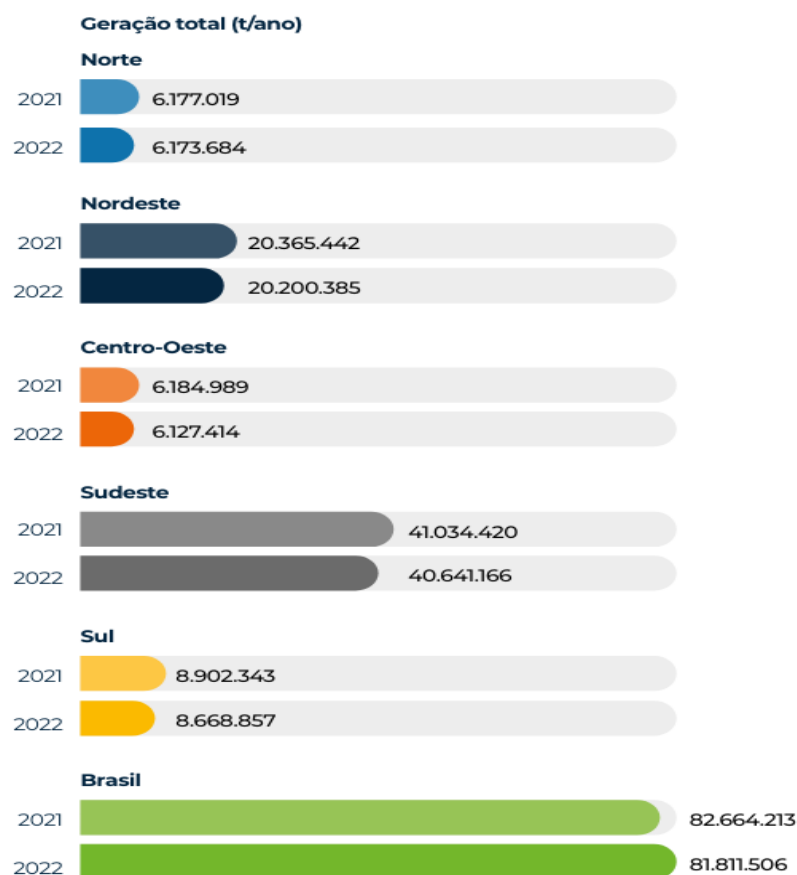
Figura 1 – Produção anual de plástico entre 1950 e 2019.



Fonte: Adaptado de Geyer *et al.* (2017); OCDE (2022).

Dentre os principais tipos de plásticos produzidos estão o polipropileno (PP), polietileno de baixa densidade (LDPE), polietileno de alta densidade (HDPE), tereftalato de polietileno (PET), policloreto de vinila (PVC), poliestireno (PS) e o poliuretano (PU), pois correspondem à maior parte dos materiais nos setores comerciais e industriais (Kwon *et al.*, 2023). Esse crescimento e dependência de materiais poliméricos no mundo é totalmente proporcional ao lixo gerado e presente no ambiente terrestre e marinho. Estudos mostram que a maioria dos plásticos mal gerenciados estão presentes principalmente em países subdesenvolvidos (Jambeck *et al.*, 2015 e Joshi; Seay; Banadda, 2018 apud Browning *et al.*, 2021). Em 2022, segundo dados do Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil da Abrelpe (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais), foi estimado que houve uma geração de aproximadamente 80 milhões de toneladas de lixo nas áreas urbanas, dos quais 13 milhões de toneladas foram de lixo plástico. A figura 2 apresenta uma relação comparativa da produção de resíduos sólidos urbanos nas regiões do Brasil, entre os anos de 2021 e 2022.

Figura 2 – Geração de RSU nas regiões do Brasil em 2021 e 2022.



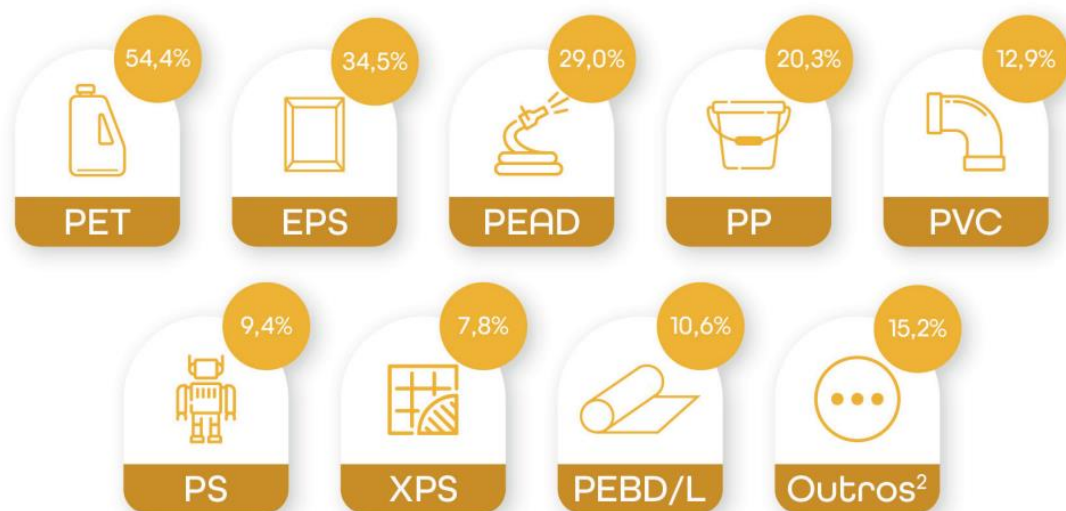
Fonte: Abrelpe (2022).

Apesar de possuir grandes vantagens em suas características, os plásticos podem trazer muitos problemas se forem descartados de forma inadequada. A falta de reciclagem desses

materiais fomenta uma grande acumulação no ambiente terrestre e marinho. Os processos de tratamento de resíduos poliméricos mais convencionais são a recuperação primária (circuito fechado), secundária (mecânica), terciária (química) e de energia (incineração) (Rahimi; García, 2017). Entretanto, alguns desses métodos enfrentam dificuldade em garantir eficácia no processo. As recuperações primária e secundária apresentam certa limitação devido à quantidade de degradação dos polímeros, deixando-os impossibilitados de serem reciclados novamente (Rahimi; Garcia, 2017), e só podem ser feitos com plásticos não contaminados e descartáveis, gerando produtos com propriedades inferiores aos materiais originais (Dai *et al.*, 2022).

Segundo dados da ABIPLAST (2022), de 4,3 milhões de toneladas de resíduos plásticos gerados, apenas 1 milhão de toneladas são realmente reciclados via reciclagem mecânica no Brasil. Por outro lado, o método de incineração, que visa a recuperação de energia na forma de calor, pode liberar toxinas derivados da queima de polímeros que apresentam cloro, oxigênio ou aromáticos em sua composição (Verma *et al.*, 2016). Entre os tipos de plásticos mais reciclados no Brasil em 2021, estão o PET, PEAD e PP, conforme mostra a figura 3.

Figura 3 - Índice de reciclagem de plástico, em 2021, por tipo de material.



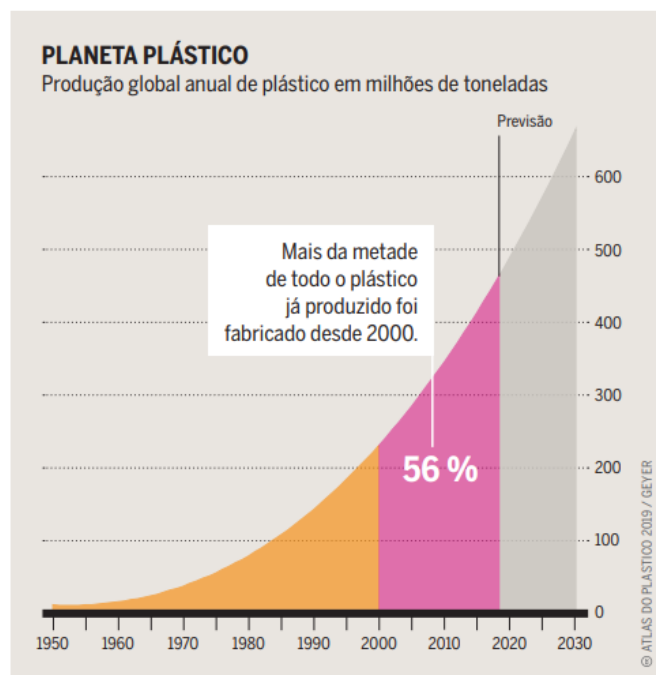
Fonte: ABIPLAST (2022).

3.2 Plásticos nos oceanos

Os primeiros registros de resíduos plásticos no Oceano Atlântico vieram a partir do ano de 1970, sendo mundialmente reconhecido como um potencial problema somente no ano de 1997 devido a uma grande acumulação no Oceano Pacífico Norte (Sobral, 2022). Devido as

suas várias vantagens, como durabilidade elevada, versatilidade de uso, baixo custo e facilidade de moldagem, o uso expressivo de plásticos se tornou quase inevitável, e isso reflete especialmente nos oceanos. Isso porque essa situação muitas vezes ameaça tanto vidas quanto bens materiais. A poluição por plásticos nos oceanos interfere nas atividades de navegação, prejudica a produção marinha e provoca a morte abrupta de certos mamíferos marinhos vulneráveis, resultando em uma degradação do ecossistema (Awuchi; Awuchi, 2019). Segundo o Fórum Econômico Mundial de 2019, é estimado que a poluição plástica superará a quantidade de peixes nos mares até 2050 se não for controlada (Schwab, 2019). A figura 4 mostra a crescente produção de plástico até 2020 e a sua tendência nos próximos anos, estimando que essa produção pode ultrapassar 600 milhões de toneladas em 2030.

Figura 4 – Produção global anual de plástico em milhões de toneladas.



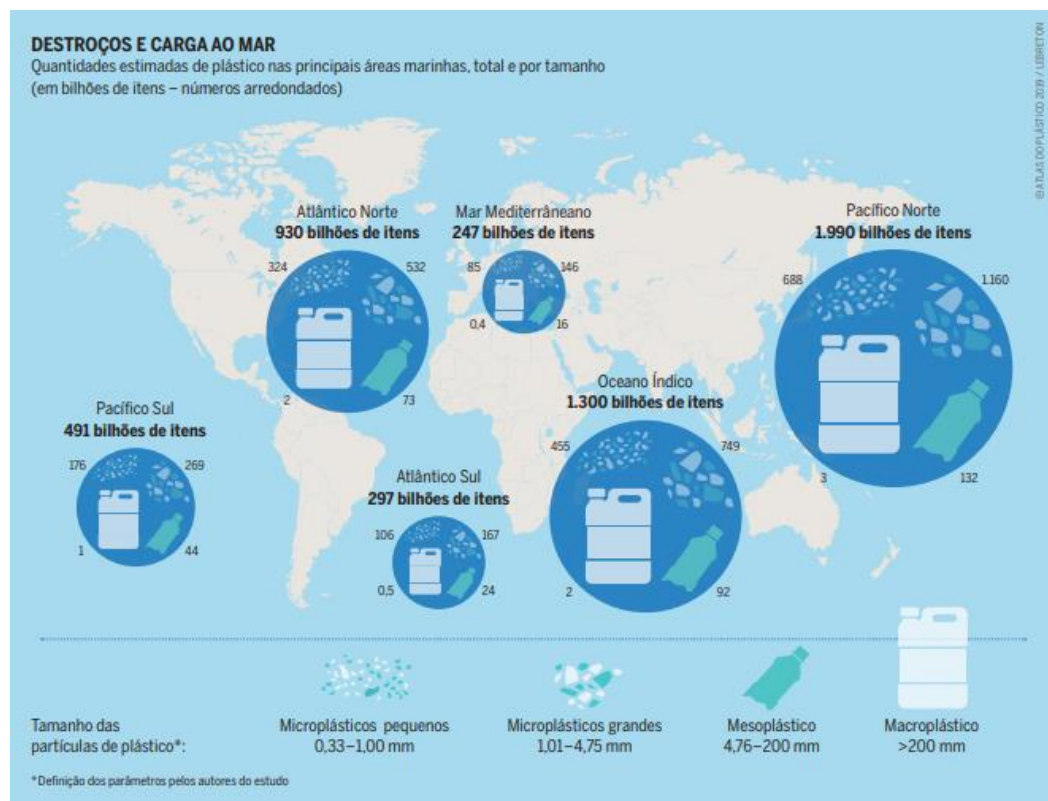
Fonte: Atlas do Plástico (2020).

No Brasil, segundos dados da SELURB (Sindicato Nacional das Empresas de Limpeza Urbana), cerca de 13% das 79 milhões de toneladas de RSU gerados por ano são de lixo plástico, contribuindo em aproximadamente 11 milhões de toneladas do material anualmente (Atlas do Plástico, 2020). Esse dado não apenas aponta para a magnitude do problema, mas também sugere que a situação está se tornando cada vez mais difícil de reverter, à medida que a produção de resíduos plásticos continua a aumentar. O Brasil, como grande produtor de plástico, enfrenta

o desafio de encontrar soluções sustentáveis para mitigar os impactos ambientais dessa produção crescente.

Os microplásticos, que são consideradas as partículas de tamanho de até 5mm, podem ser divididas em até duas categorias: primários e secundários. Os microplásticos primários são aqueles cujo a produção é feita propositalmente em seu tamanho. Os secundários, por sua vez, são os microplásticos derivados do desgaste e fragmentação natural de plásticos maiores, através de processos como degradação mecânica (ondas e ventos), química e biológica (Stenger et al., 2021). Um estudo recente do Instituto Avançado de Tecnologia e Inovação (IATI), que foi realizado nas praias e zonas costeiras de Recife – Pernambuco, mostrou a preocupante presença de microplásticos nos litorais do estado. Os resultados da pesquisa estimaram a presença significativa de microplásticos nas praias analisadas, com uma média de mais de 300 fragmentos encontrados em cada amostra de 200 mL de sedimento (Lucena, 2024). Na figura 5 está apresentado a quantidade de plásticos nas principais áreas marinhas, de acordo com o tamanho das partículas.

Figura 5 – Quantidades estimadas de plástico nos mares.



Fonte: Atlas do Plástico (2020).

3.3 Polipropileno

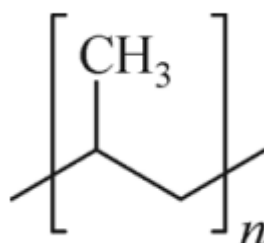
Os polímeros podem ser divididos em duas categorias principais: termoplásticos e termofixos. Os termoplásticos constituem a maioria dos plásticos comerciais e têm a vantagem de serem reversíveis. Isso significa que eles podem ser aquecidos, fundidos e moldados repetidamente, sem perder suas propriedades. Essa característica facilita muito o processo de reciclagem, tornando-os uma escolha popular em aplicações que exigem reutilização e reciclagem (Fiorelli, 2020).

Por outro lado, termofixos não têm a capacidade de reversibilidade. Após serem moldados e curados (processo que envolve aquecimento), eles não podem ser fundidos novamente sem se decompor. Isso ocorre porque, ao serem aquecidos, os termofixos formam redes tridimensionais muito fortes, que conferem rigidez e resistência ao material, mas tornam a reciclagem praticamente impossível (Massy, 2017).

Essa divisão entre termoplásticos e termofixos é fundamental para entender as propriedades e o comportamento de diferentes tipos de plásticos, bem como as oportunidades e desafios relacionados à sua reciclagem e uso sustentável.

Desenvolvido pelo químico Giulio Natta, o plástico de polipropileno (PP) compartilha de características parecidas com as do polietileno (PE) (Atlas do Plástico, 2020). Por fazer parte do grupo de polímeros termoplásticos, o PP possui grandes propriedades que o faz ser utilizado em uma variedade de produtos no dia a dia, como resistência mecânica, alta estabilidade química, durabilidade e sua capacidade de ser impermeabilizante (Ginjupalli *et al.*, 2017; Butt *et al.*, 2018). Com o carbono ligado ao grupo metila (CH_3), como apresentado na figura 6, o PP se trata de um polímero vinílico (Lago, 2022) muito utilizado em embalagens, fibras têxteis e componentes automotivos.

Figura 6 – Estrutura do polipropileno.



Fonte: Wu; Yang; Criddle (2017).

3.4 Pirólise

A reciclagem química é uma alternativa muito eficiente para a obtenção de produtos que apresentem propriedades similares ou iguais ao material polimérico virgem, uma vez que a reciclagem mecânica é restringida apenas aos termoplásticos, por estes possuírem a característica de reversibilidade (Fiorelli, 2020). Na figura 7 estão apresentados alguns exemplos de reciclagem química, como: pirólise térmica e catalítica, gaseificação e hidrocrackeamento. O tratamento de resíduos poliméricos por meio da pirólise vem sendo discutido e analisado no mundo todo, isso porque o seu processo proporciona diversas vantagens ambientais, visto que atualmente há uma grande procura universal por energia atrelado à escassez de combustível, além do processo ser realizado, geralmente, na ausência de oxigênio para minimizar a formação de CO₂. A pirólise é um tratamento térmico muito favorável em relação aos plásticos, devido às características que esses resíduos poliméricos possuem. Além do fato de possuírem um alto teor de carbono, a maioria dos plásticos possui uma alta quantidade de material volátil em sua composição, o que é um grande fator de influência para a obtenção de combustíveis líquidos, uma vez que a produção de óleo líquido é proporcional à quantidade de material volátil presente nos resíduos que se deseja pirolisar (Al-Salem *et al.*, 2017).

Figura 7 – Parâmetros de processos da reciclagem química.

		Pirólise térmica	Pirólise catalítica	Gaseificação	Hidrocrackeamento	Solvólise	Polymerização in situ
Objetivo do processo		Maximizar a decomposição térmica de resíduos sólidos em gases e condensados.	Maximizar a decomposição por adição de catalisador fornecendo produtos de melhor qualidade	Maximizar a conversão de resíduos a gases combustíveis de elevado poder calorífico, principalmente H ₂ , CO e CH ₄ .	Maximizar a decomposição por adição de hidrogênio fornecendo produtos livres de heteroátomos	Recuperação do solvente por adição do monômero	Incorporação do polímero na reação de polimerização com o intuito de reciclar este material, mantendo as propriedades próximas àquelas de um polímero virgem, e assim, agregar valor ao material reciclado.
Condições de Operação	Gás reagente	Nenhum	Catalisador	Ar, oxigênio puro, água supercrítica, CO ₂ ou vapor.	H ₂ (pode usar catalisador)	Nenhum (solventes utilizados: metanol supercrítico, etileno glicol)	Mesmo da reação de polimerização utilizada
	Temperatura	400 a 800 °C	350 a 470°C	Entre 550 e 900 °C (utilizando ar) e 1000 e 1600 °C	400 a 450°C	200 – 350 °C (pode ocorrer a 450°C: glicólise supercrítica)	Mesma da reação de polimerização original
	Pressão	Levemente pressurizada	Geralmente atmosférica	Geralmente atmosférica ou levemente pressurizada	~100 bar ou maiores (300-400 bar)	30 a 150 bar	Mesma da reação de polimerização original
Produtos	Gás	CO, H ₂ , CH ₄ e outros hidrocarbonetos ¹	CO, H ₂ , CH ₄ e outros hidrocarbonetos ¹	Gás de síntese (CO, H ₂ , CO ₂ , H ₂ O, CH ₄)	Gás leve fora de especificação	Nenhum	Depende da carga incorporada no polímero
	Líquidos	Olefinas pesadas, graxas	Olefinas leves (C3-C5) ou destilados intermediários (gasóleo e gasolina), dependendo da força ácida do catalisador*	Nenhum	Óleo cru sintético livre de cloro, contendo nafta, gasóleo e destilados pesados	BHET, terephthalate disodic, dimetil terephthalate and ethylene glycol	Depende da carga incorporada no polímero
	Poluentes	H ₂ S, HCl, NH ₃ , HCN, alcatrão, particulados.	H ₂ S, HCl, NH ₃ , HCN, alcatrão, particulados.	H ₂ S, HCl, NH ₃ , HCN, COS, alcatrão, alcalinos, particulados	HCl	A depender do processo de solvólise utilizado	Depende da carga incorporada no polímero (ex: pó inorgânico)
	Sólidos	As vezes possui quantidade desprezível de carvão. As cinzas são tratadas e dispostas como resíduo industrial especial.	Coque e cinzas, que são tratadas e dispostas como resíduo industrial especial	As cinzas de fundo são geralmente produzidas pela escória vitrificada, que pode ser utilizada como material para construção de rodovias.	Resíduo sólido hidrogenado contendo cinzas, metais e sais inertes. Pode ser misturado com carvão para produção de coque	A caracterização dos resíduos sólidos vai depender do tipo d processo de solvólise aplicado	Depende da carga incorporada no polímero
Limpeza do gás		Pode-se limpar o gás produzido para atender a padrões de processos químicos.	Pode-se limpar o gás produzido para atender a padrões de processos químicos.	Pode-se limpar o gás de síntese produzido para atender a padrões de processos químicos.	Gás fora de especificação é enviado à limpeza para remoção de H ₂ S e amônia	NI	NI
Ativo		272 libras/ton ** (processo BP)	160 euro/ton (planta BASF de capacidade de 300.000 ton/ano)	90 a 135 euro/ton ** (processo Texaco)	250 euro/ton ** (processo da Veba Öl, excluindo coleta e pré-tratamento do resíduo)	225 dólares/ton ** (processo Fuji)	NI

Fonte: Monteiro (2018).

A pirólise, como reciclagem química, torna-se uma alternativa positiva e eficaz, uma vez que o seu processo não tem impactos negativos ao meio ambiente (Kunwar *et al.*, 2016) (Qureshi *et al.*, 2020), tem a capacidade de tratar misturas de diferentes polímeros (Qureshi *et al.*, 2020) e resíduos não triados e contaminados (Dai *et al.*, 2022). Além das vantagens citadas, o método da pirólise de plásticos gera matérias primas valiosas ao mercado de combustíveis, podendo economizar cerca de 3,5 milhões de barris de petróleo, resultando em uma economia anual de aproximadamente US\$176 bilhões (Rahimi; García, 2017).

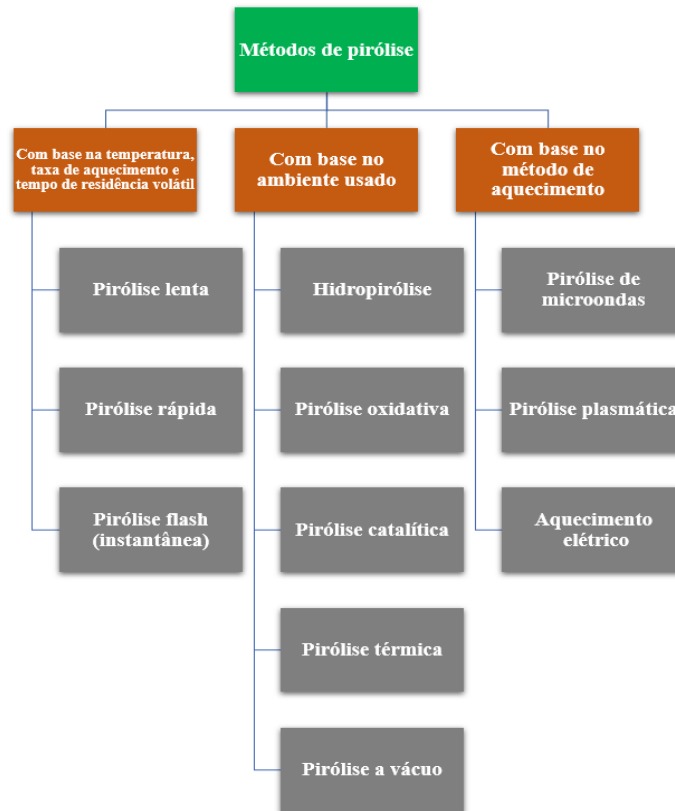
As pirólises podem ser categorizadas de acordo com algumas condições de processo, como temperatura, tempo de residência e taxas de aquecimento. De modo geral, essas reações podem ser classificadas de três formas: lenta, rápida e flash (tabela 1).

Tabela 1 – Tipos de pirólise

Parâmetros	Pirólise lenta	Pirólise rápida	Pirólise Flash
Temperatura (°C)	300 - 400	500 - 700	900 - 1300
Taxa de aquecimento (°C/s)	0,1 - 1	10 - 200	>1000
Tamanho de partícula (mm)	5 - 50	< 1	< 0,2
Sólido residência (s)	300 - 3600	0,5 - 10	< 0,5

Fonte: Adaptado de Maqsood *et al.*, 2021.

Além dessas classificações, existe ainda a classificação de pirólise de acordo com o ambiente em que a reação acontece: pirólise térmica, pirólise catalítica, pirólise oxidativa e hidropirólise, mostrado na figura 8. Entre as categorias de pirólise mais usadas para a obtenção de combustíveis está a pirólise térmica, que produz hidrocarbonetos na faixa de gases, olefinas e ceras (Dai *et al.*, 2020), e a catalítica que se utiliza da otimização de parâmetros através de um catalisador, no qual desempenha um papel importante na velocidade da reação e na seletividade a produtos de maior valor, como gasolina, querosene de aviação e diesel (Kunwar *et al.*, 2016).

Figura 8 – Métodos de pirólise de acordo com várias categorias.

Fonte: Adaptado de Maqsood *et al.*, 2021.

3.4.1 Pirólise Térmica

A pirólise térmica é caracterizada por utilizar apenas a influência da temperatura para realizar o craqueamento das cadeias. O processo de decomposição térmica dos materiais poliméricos gera produtos gasosos e líquidos, sendo esse último utilizado como combustíveis no mercado (Monteiro, 2018). O esquema geral abaixo demonstra como acontece todo o processo.

Resíduos plásticos → *Preparação dos resíduos* → *Pirólise* → *Condensador* $\left\{ \begin{array}{l} \bullet \text{ Gases} \\ \bullet \text{ Óleos} \\ \bullet \text{ Resíduos sólidos} \end{array} \right.$

Em trabalhos recentes, é possível constatar a eficiência da técnica devido à geração de produtos valiosos ao mercado de combustível. Com o objetivo de trazer uma alternativa para a reciclagem de embalagem de alimentos plásticos metalizados, Yousef *et al.* (2021) realizaram um tratamento térmico via pirólise, no qual também foi feito um processo mecânico para a separação de flocos de Al. Na pesquisa, os autores utilizaram de uma planta de mini pirólise para o tratamento térmico de plásticos residuais metalizados, para a obtenção de bio-óleo,

biogás e carvão misturados com flocos de Al. Foi mostrado que nas temperaturas de 600 e 700 °C houve uma conversão de, aproximadamente, 20% em bio-óleo, 63% em biogás e 18% em Al/carvão.

Em outro trabalho, Quesada *et al.* (2019) usaram filmes de polietileno (PE), obtidos de resíduos sólidos urbanos, para fazer a pirólise térmica sob diferentes condições de operação: temperaturas (450 °C, 500 °C e 550 °C), tempo de residência (40 min, 80 min e 120 min) e taxa de aquecimento (20 °C/min, 35 °C/min e 50 °C/min). O óleo obtido evidenciou características semelhantes às dos combustíveis comerciais do mercado, como diesel e gasolina.

Veksha *et al.* (2022) realizaram um estudo sobre a produção de petróleo e gás a partir da pirólise de lixo marinho (onde o óleo da pirólise foi condensado) que incluía plásticos à beira mar e subaquáticos, no qual todos os resíduos de caráter PET foi separado para que não houvesse formação de compostos indesejáveis no processamento. Além disso, foi feito um pré-tratamento com água deionizada de alguns plásticos pirolisados, para descartar quaisquer vestígios de matéria inorgânica (como areia de praia). Sem a presença de catalisadores durante o processo, foi concluído que o plástico coletado à beira mar produziu mais hidrocarbonetos na faixa do diesel que os plásticos coletados no fundo do mar. Por outro lado, ambos obtiveram resultados semelhantes na faixa da gasolina, apesar do resultado ter sido menos favorável comparado à gama de outras faixas de óleo. A lavagem realizada antes do processo de pirólise não garantiu nenhuma vantagem acerca da produção e rendimento dos produtos, apenas foi constatado um aumento no poder calorífico dos materiais plásticos.

A hidropirólise, que é a pirólise sob atmosfera de H₂, é um método muito utilizado para a conversão de moléculas de cadeia longa em moléculas de cadeia curta em condições de altas temperaturas e alta pressão (Zheng *et al.*, 2023). O método de hidropirólise é comumente realizado para reduzir a presença de olefinas nos produtos através do processo de hidrogenação, aumentando os alcanos e, conseqüentemente, gerando mais hidrocarbonetos na faixa da gasolina (Munir; Usman, 2018).

3.4.2 Pirólise Catalítica

A pirólise catalítica, mostrada na figura 9, pode ser alcançada em temperaturas menores e com menor tempo de reação, diferente da pirólise térmica (Thiounn; Smith, 2020 apud Jiang *et al.*, 2022). Na literatura, há diversos trabalhos que comprovam a eficácia do uso de catalisadores com propriedades ácidas e alta porosidade, pois possibilita uma maior taxa de conversão em combustíveis líquidos e não gasosos. Os catalisadores de zeólitas são os mais

usados pelos autores no processo de pirólise, por serem portadores destas características (Fadillah *et al.*, 2021) (Miandad *et al.*, 2017) (Ding *et al.*, 2019) (Kunwar *et al.*, 2016).

Figura 9 - Fluxograma do processo de pirólise catalítica de plásticos.



Fonte: Adaptado de Maqsood *et al.* (2021).

Kassargy *et al.* (2018) usaram polietileno e polipropileno (PE e PP) para produzir hidrocarbonetos na faixa da gasolina e diesel, onde zeólitas USY foi usado como catalisador. Com uma temperatura de 500°C, foi obtido uma conversão de até 80% de combustível líquido na faixa de C5-C7 e C-3. Em 2019, Ding *et al.* realizaram um estudo sobre a pirólise catalítica na obtenção de hidrocarbonetos na faixa de gasolina. Foi constatado que a zeólita HY promoveu um maior desempenho ao rendimento de componentes da gasolina, chegando a uma porcentagem de até 56% de óleo. A temperatura usada no processo de degradação térmica também possui grande influência no rendimento do produto desejado. É válido ressaltar também que, de acordo com pesquisas relacionadas à pirólise de plásticos realizadas ao longo dos anos, os melhores materiais poliméricos que rendem frações líquidas de combustíveis são o polietileno e o polipropileno (PE e PP) (Qureshi *et al.*, 2020) (Veksha *et al.*, 2022) (Maqsood *et al.*, 2021).

Em 2021, Faussone, Kržan e Grilc analisaram a produção de combustível marítimo pirolisando plásticos retirados do lago e do fundo do mar de Veneza. Os materiais poliméricos foram coletados manualmente e não obtiveram pré-tratamento (como lavagem) antes do processamento. De acordo com os autores, a maior parte dos polímeros era constituída por resíduos derivados da pesca, poliolefinas, poliésteres, poliamida, poliestireno e borracha. Usando aditivos inorgânicos à base de CaO para controlar o processo e conseguir o melhor rendimento possível, o óleo de pirólise obtido foi destilado em 3 produtos: gasóleo marítimo, óleo combustível intermediário e nafta. Os resultados obtidos mostraram-se favoráveis quanto ao rendimento produzido, chegando a aproximadamente 51% de combustível marítimo. Deve-

se levar em consideração que essa porcentagem de rendimento obtida se deu pela mistura de polímeros pirolisados. Contudo, sempre que for economicamente viável, deve-se remover plásticos contendo oxigênio visando uma melhor conversão. Os plásticos que não contêm oxigênio, tais como PP, PE e PS, rendem uma maior fração de óleo capazes de serem usados como substitutos da gasolina e, principalmente, diesel, após serem refinados com processo de hidrogenação (Maqsood et al., 2021), (Kunwar et al., 2016), (Veksha et al., 2022).

De maneira análoga, Kusenberget al. (2022) realizaram um trabalho baseado na metodologia de Faussone, Kržan e Grilc (2021), cujo objetivo foi produzir combustível na faixa do diesel a partir da pirólise de plásticos municipais e marinhos. O óleo de pirólise de ambos os materiais foi condensado para a obtenção de olefinas mais leves (naftas). Devido à mesma metodologia de Faussone, Kržan e Grilc, os resultados obtidos apresentaram certa semelhança. Foi constatado um mau rendimento de olefinas leves derivados dos plásticos municipais, mas, em contrapartida, a produção de olefinas leves obteve um bom desempenho da pirólise realizada com plásticos marinhos. Essa diferença de rendimento pode ser explicada pela concentração de aromáticos presentes nos plásticos municipais, que devem ser separados antes do processo de degradação térmica.

3.4.3 Pirólise de filmes metalizados

Os plásticos metalizados são difíceis de reciclar principalmente por causa de sua estrutura complexa, que envolve múltiplas camadas de materiais diferentes, incluindo filmes poliméricos e uma fina camada de alumínio (Ayeleru et al., 2020). A presença dessas camadas distintas, unidas por ligações mecânicas e químicas, torna o processo de separação dos materiais extremamente complicado.

Além disso, a espessura muito fina dessas camadas torna ainda mais desafiador o processo de recuperação dos materiais durante a reciclagem. Essa combinação de fatores resulta em uma baixa probabilidade de reciclagem (Mastellone et al., 2020; Faraca et al., 2019). Os filmes multicamadas alimentícios, apresentados na figura 10, estão entre as principais aplicações dos plásticos metalizados, com o intuito de garantir ainda mais a conservação dos alimentos (Xie et al., 2016; Garofalo et al., 2018).

Figura 10 – Embalagens alimentícias de filmes plásticos metalizados.



Fonte: O autor.

Diante da alta demanda e baixo potencial de reciclabilidade, os plásticos laminados necessitam de alternativas que visem o seu reaproveitamento em novos produtos. Em estudos recentes, esses materiais foram submetidos em processos de pirólise térmica e catalítica. Quesada *et al.* (2019) usaram filmes de polietileno (PE), obtidos de resíduos sólidos urbanos, para fazer a pirólise térmica sob diferentes condições de operação. O óleo obtido resultou em características semelhantes às dos combustíveis comerciais do mercado, como diesel e gasolina. Por outro lado, Kremer *et al.* (2022) utilizaram catalisador de zeólito modificado com ferro para a realização da pirólise catalítica. Foi concluído que o uso do catalisador diminuiu a energia de ativação dos filmes plásticos. Além disso, a composição do óleo pirolítico revelou qualidade satisfatória e bom potencial para uso posterior como um vetor de energia devido ao alto valor de aquecimento.

4. Metodologia

4.1. Coleta dos resíduos plásticos

Os plásticos utilizados neste estudo foram coletados em áreas costeiras da praia do Pina, Recife, em parceria com o departamento de oceanografia da UFPE (figura 11).

Figura 11 - Coleta de lixo na praia do Pina, no Recife.



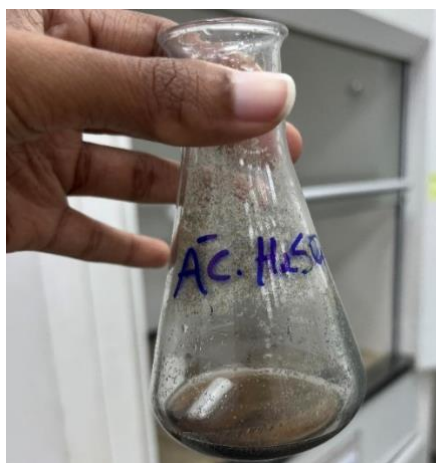
Fonte: O autor.

4.2. Preparação das amostras

Os plásticos residuais foram submetidos a um processo de triagem no qual somente os materiais de polipropileno seguiram para as análises, os quais foram lavados e secados à temperatura ambiente. Para a realização das pirólises, os plásticos foram triturados no equipamento Micro Moinho tipo Willye (TE – 648) a uma granulometria menor que 180 μm .

Para as pirólises térmicas de 450°C e 500°C das amostras de plásticos sem alumínio, a camada do metal foi retirado manualmente, descolando-se a parte laminada da camada do plástico puro. Nas pirólises catalíticas e hidropirólises, a camada de alumínio foi removida por meio de um tratamento ácido utilizando uma solução 2M de H_2SO_4 , onde as amostras já trituradas ficaram mergulhadas durante aproximadamente 10h, resultando em uma coloração escura mostrada na figura 12.

Figura 12 – Solução de H_2SO_4 após a dissolução do alumínio.



Fonte: O autor.

4.3 Caracterização dos filmes plásticos

4.3.1 Espectrometria de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

A espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier é um método utilizado para evidenciar a presença de grupos funcionais em determinado analito de estudo. Através de radiações eletromagnéticas na região do infravermelho, essa técnica permite não só a identificação de compostos das substâncias como também investiga sua composição química. As análises de espectroscopia de infravermelho dos resíduos plásticos foram realizadas no Laboratório de Combustíveis do Instituto de Pesquisa em Petróleo e Energia (i-Litpeg) da UFPE, no equipamento Perkin Elmer Spectrum 400.

4.3.2 Análise Termogravimétrica (TGA/DTG)

A termogravimetria é uma análise que permite acompanhar o ganho ou a perda de massa em função do tempo e temperatura do material desejado. As análises termogravimétricas dos filmes plásticos foram realizadas no Laboratório de Tecnologias Limpas do Instituto de Pesquisa em Petróleo e Energia (i-Litpeg) da UFPE, no equipamento STA 449 F3 Jupiter da NETZSCH de 25°C a 900°C a 20°C.min⁻¹, sob fluxo de ar sintético (80% N₂, 20% O₂) a 50 mL.min⁻¹, de 25 a 900 °C na taxa de 20 °C.min⁻¹ com fluxo de 20 mL.min⁻¹ de N₂ como gás protetivo.

4.3.3 Análise Imediata

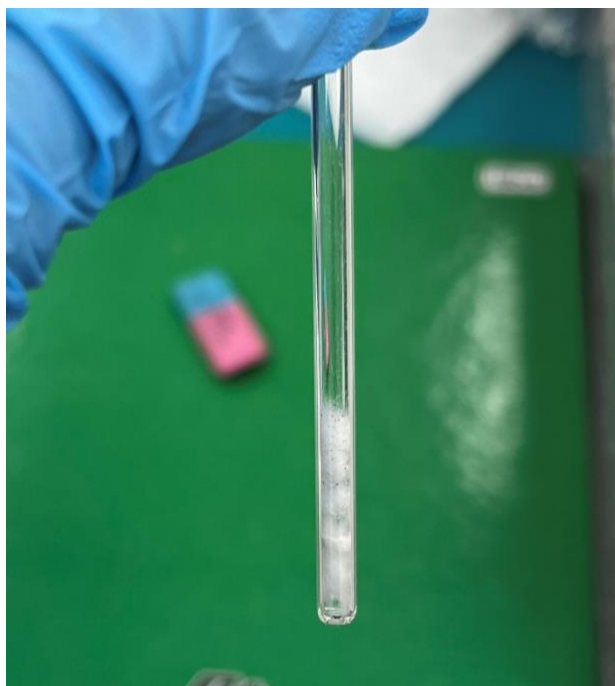
A técnica de análise imediata consiste na determinação do teor de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas presentes na amostra. A análise imediata dos filmes plásticos foi realizada no Laboratório de Tecnologias Limpas do Instituto de Pesquisa em Petróleo e Energia (i-Litpeg) da UFPE, no equipamento STA 449 F3 Jupiter da NETZSCH, com base na norma técnica E1131 – 20 da ASTM. As condições composicionais da análise consistiram de aquecimento de 25 a 600 °C na taxa de 10 °C.min⁻¹ sob fluxo de N₂ (50 mL.min⁻¹) e aquecimento de 600 a 750 °C na taxa de 10 °C.min⁻¹ sob fluxo de ar sintético (80% N₂, 20% O₂) a 50 mL.min⁻¹. A análise foi realizada com fluxo de 20 mL.min⁻¹ de N₂ como gás protetivo.

4.4. Pirólises e hidropirólises

Todas as pirólises foram realizadas em duplicatas no micro reator Frontier Tandem μ Reactor, modelo Rx-3050TR, acoplado a um cromatógrafo gasoso que também se acoplava a um espectrômetro de massas Shimadzu GC/MS QP2020.

As pirólises térmicas e hidropirólises foram executadas com 200 μ g de amostras, sendo as térmicas realizadas em cadinho metálico. As pirólises catalíticas e hidropirólises foram realizadas em um sistema de leito utilizando tubos de quartzo, conforme apresentado na figura 13, com dimensões de 3mm de diâmetro interno, 4mm de diâmetro externo e 78mm de comprimento. A quantidade de catalisador utilizada nas pirólises catalíticas foi de 600 μ g para o preenchimento total da área transversal do tubo de quartzo, com proporção catalisador/massa de 3:1. A identificação dos produtos no cromatograma foi obtida por meio de comparação com a biblioteca NIST, sendo identificados aqueles que apresentaram similaridade igual ou superior a 80%.

Figura 13 – Simulação de leito com tubo de quartzo.



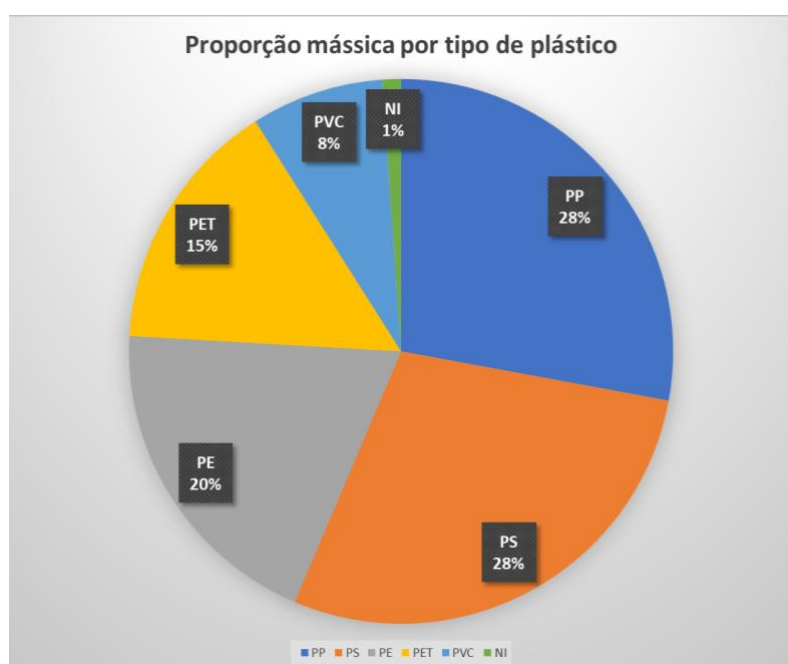
Fonte: O autor.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Coleta dos resíduos plásticos

Analisando os dados da coleta dos resíduos plásticos, mostrados na figura 14, observa-se que o plástico do tipo polipropileno (PP) apresentou uma das maiores porcentagens. Baseado nesses resultados e sabendo que não serve para reciclagem mecânica convencional, o plástico filme de PP foi escolhido para o presente estudo.

Figura 14 – Proporção mássica dos plásticos coletados na praia do Pina.



Fonte: O autor.

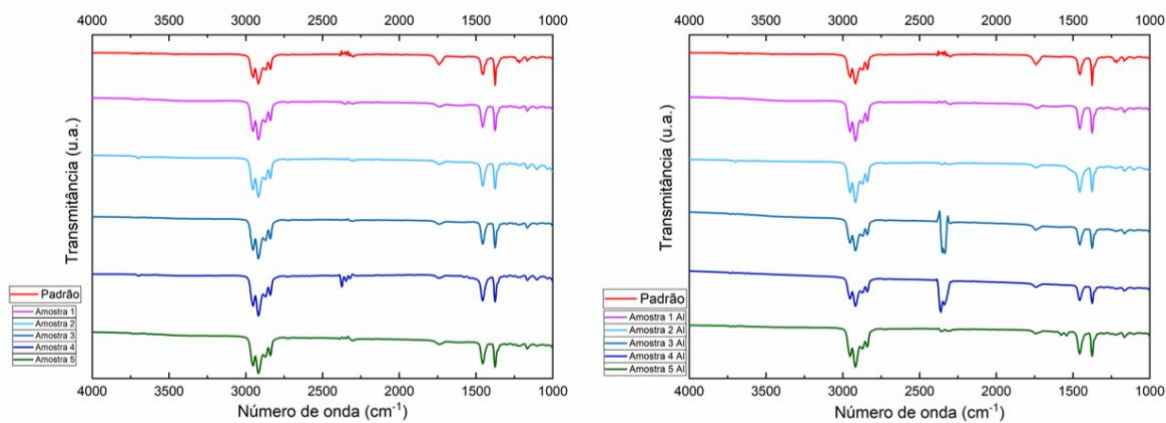
5.2. Caracterização dos filmes plásticos

5.2.1. Espectrometria de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

Os espectros de FTIR das amostras de plásticos PP com e sem Al estão apresentados na figura 15. Analisando-os, observa-se a presença de estiramento de bandas bastante similares à amostra padrão de um plástico PP puro. As principais regiões características do PP na literatura se encontram em $2950\text{--}2867\text{ cm}^{-1}$, que indicam a presença de grupos CH_3 , e 1455 cm^{-1} indicando o grupo CH_2 . É possível perceber também que duas amostras de plástico com Al apresentaram picos próximos da região de 2500 cm^{-1} que não foram identificados, mas que há grande possibilidade de ser

indícios de aditivos ou contaminantes. Em geral, os espectros confirmaram que os plásticos eram compostos apenas de PP.

Figura 15 – FTIR das amostras de plásticos: a) sem Al e b) com Al.

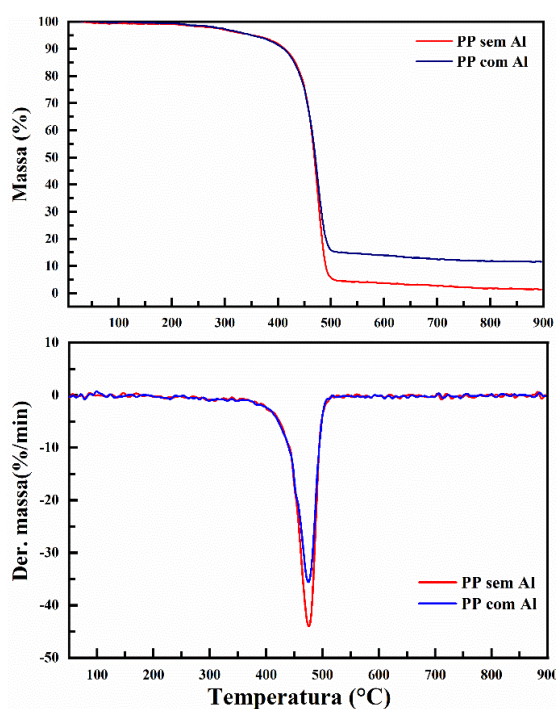


Fonte: O autor.

5.2.2. Análise Termogravimétrica (TGA/DTG)

A figura 16 mostra as curvas (TGA) e as taxas (DTG) da perda de massa das amostras de resíduos plásticos de PP com e sem alumínio, em taxas de aquecimento de 20°C.min⁻¹.

Figura 16 – TG e TDG das amostras de plásticos.



Fonte: O autor.

Enquanto a perda de massa da amostra de plástico sem alumínio foi estimada em 99%, a perda de massa da amostra com alumínio apresentou aproximadamente 85% devido à presença do metal em sua camada que não se decompõe termicamente. Além disso, é possível perceber a remoção do teor de umidade nas faixas de temperaturas de 30-210°C. A presença de apenas um pico na DTG afirma que o processo de decomposição de ambos os plásticos (com e sem Al) acontece em apenas uma etapa, que se inicia em 380°C e está quase completa em 511°C.

Apesar de ser um metal incapaz de se decompor mesmo submetido a altas temperaturas, o alumínio pode reagir com os gases gerados e agir como uma espécie de catalisador na reação, alterando os produtos da conversão.

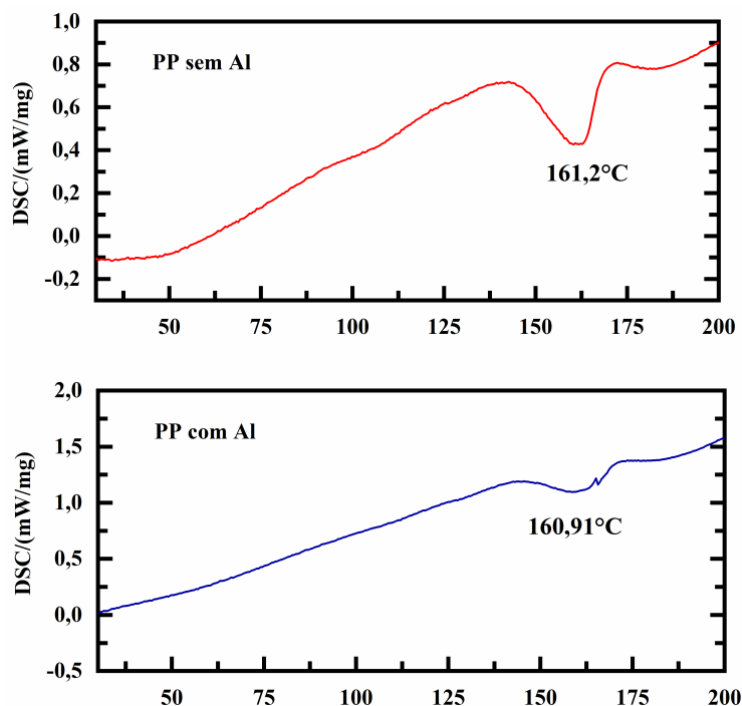
5.2.3. Análise Imediata

A análise imediata foi realizada para avaliar a composição dos plásticos com e sem Al, com o intuito principal de comprovar a eficácia do método de remoção do metal através da dissolução em meio ácido. Foi possível determinar os seguintes componentes, segundo a nomenclatura da norma ASTM E1131 – 20: mais voláteis (30 a 200°C), médios voláteis (200 a 600°C), carbono fixo (600 a 750°C) e cinzas, sendo esse último considerado como o teor de alumínio. A tabela 2 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 2 – Composição das amostras de PP com e sem Al.

	Mais voláteis	Médios voláteis	Carbono fixo	Cinzas
PP sem Al	1,40%	96,08%	1,43%	1,09%
PP com Al	0,07%	87,90%	0,41%	11,62%

Conforme apresentado na tabela, nota-se que a remoção do alumínio pela solução de ácido sulfúrico foi bem executada, uma vez que o teor das cinzas restantes foi mínimo comparado ao teor dos plásticos com Al, que foi acima de 11%. As curvas de DSC obtidos da análise imediata podem ser vistas na figura 17. A transição de fase sólido-líquido aparece como evento endotérmico, com temperatura de fusão similares em torno de 160°C.

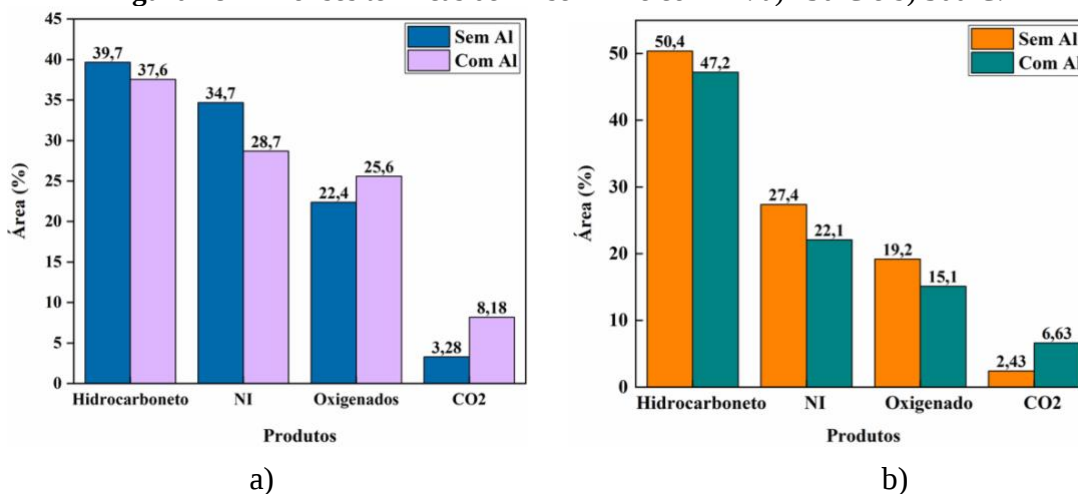
Figura 17 – DSC das amostras de PP com e sem Al.

Fonte: O autor.

5.3. Pirólises

5.3.1 Pirólise Térmicas

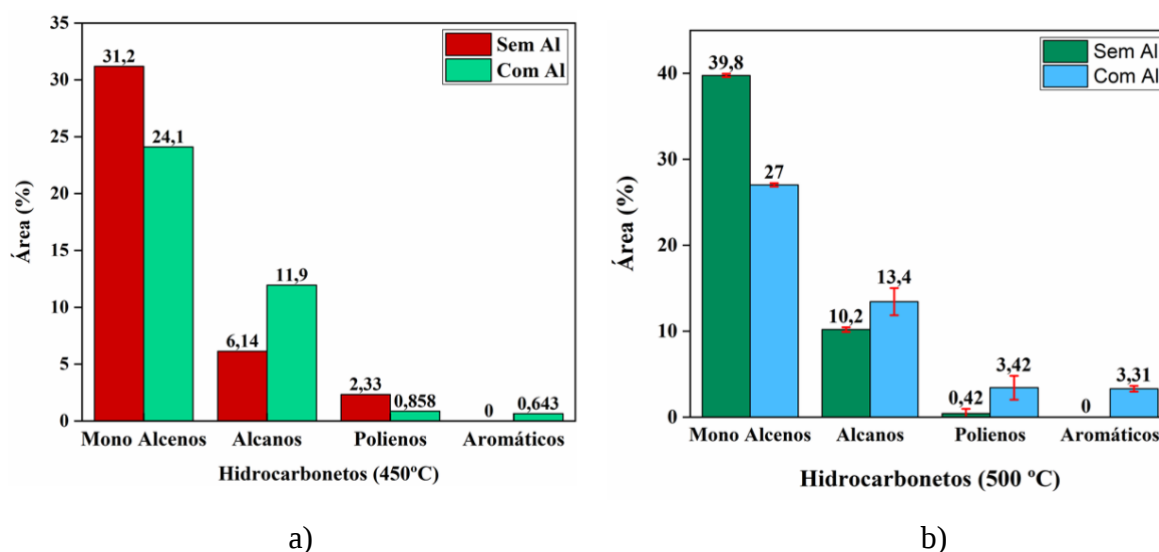
Ao observar as pirólises térmicas realizadas nas temperaturas de 450°C e 500°C, que estão apresentadas na figura 18, nota-se uma maior geração de hidrocarbonetos na temperatura de 500, na qual a presença de não identificados, oxigenados e CO₂ foram menores comparada também as pirólises de 450°C, fato que evidencia a maior capacidade de craqueamento em temperaturas mais altas.

Figura 18 – Pirólises térmicas de PP sem Al e com Al: a) 450°C e b) 500°C.

Fonte: O autor.

Apesar do evidente melhor desempenho das pirólises a 500°C, é possível perceber uma semelhança entre ambas as temperaturas. Na figura 19 está apresentado, de forma mais detalhada, os produtos obtidos das pirólises de acordo com a sua classificação de hidrocarbonetos. Nela é possível observar a ação do alumínio como potencial catalisador nas reações.

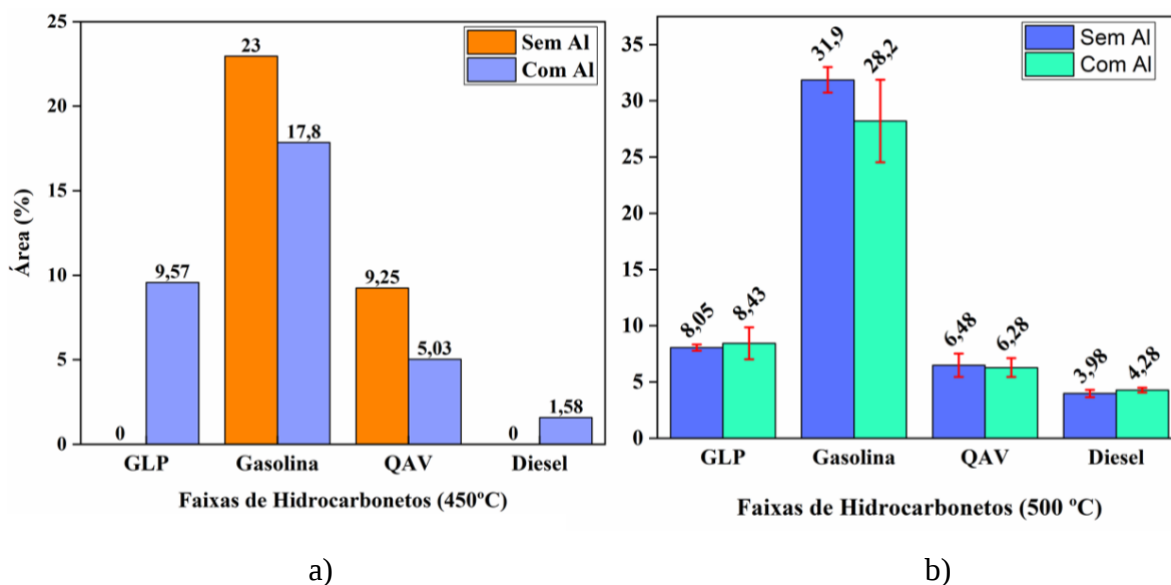
Figura 19 – Classificação dos hidrocarbonetos nas pirólises térmicas: a) 450°C e b) 500°C.



Fonte: O autor.

Conforme apresentado na figura, as pirólises de filme plástico com alumínio produziram compostos aromáticos e geraram um aumento em alcanos em ambas as temperaturas, com maior geração nas pirólises de 500°C. Diante disso, nota-se que houve uma combinação de efeitos catalíticos, térmicos e de decomposição diferencial introduzidos pela presença do alumínio.

A figura 20 apresenta a distribuição das faixas de hidrocarbonetos produzidas comparando ambas as temperaturas, considerando GLP (C3-C4), gasolina (C5-C9), QAV (C10-C14) e diesel (C15-C20). Os hidrocarbonetos obtidos acima de C20 não foram contabilizados nos gráficos das faixas. Nela, é possível perceber que houve a produção de hidrocarbonetos na faixa do gás liquefeito de petróleo (GLP) e diesel apenas em presença de alumínio na temperatura de 450°C, enquanto a 500°C esses produtos foram gerados em ambos os casos.

Figura 20 – Faixas de hidrocarbonetos nas pirólises: a) 450°C e b) 500°C.

Fonte: O autor.

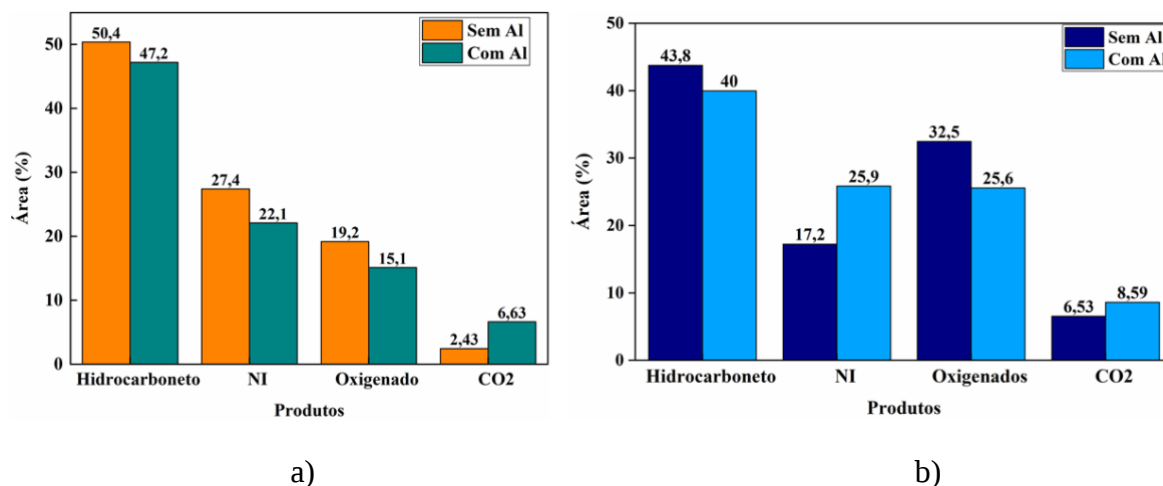
Nota-se também uma maior produção dos hidrocarbonetos na faixa da gasolina e querosene de aviação (QAV) com o aumento da temperatura, o que mais uma vez evidencia uma maior quebra das cadeias em presença de altas temperaturas.

5.3.2. Pirólise Catalítica

As pirólises catalíticas foram realizadas utilizando dois catalisadores distintos e bifuncionais com característica ácida e metálica: zeólita ferrierita (Z-Fe) e níquel a 5% suportado em zeólita ferrierita (5Ni/Z-Fe). A ferrierita é pouco ácida do que outras zeólitas (como a ZSM-5 e Y) e tende a formar menos coque, por isso ela foi escolhida para o estudo catalítico. Mediante os resultados obtidos das pirólises térmicas, que mostraram uma maior eficiência na temperatura de 500°C, as pirólises catalíticas foram realizadas apenas nessa temperatura.

Considerando que as pirólises térmicas anteriores foram realizadas em cadinho metálico e as pirólises catalíticas e hidropirólises foram realizadas em tubo de quartzo, foi necessário a realização de pirólises térmicas no novo sistema (em tubo) para validar o novo método. Com isso, na figura 21 é possível visualizar os produtos gerados em cadinho e em tubo de quartzo à temperatura de 500°C.

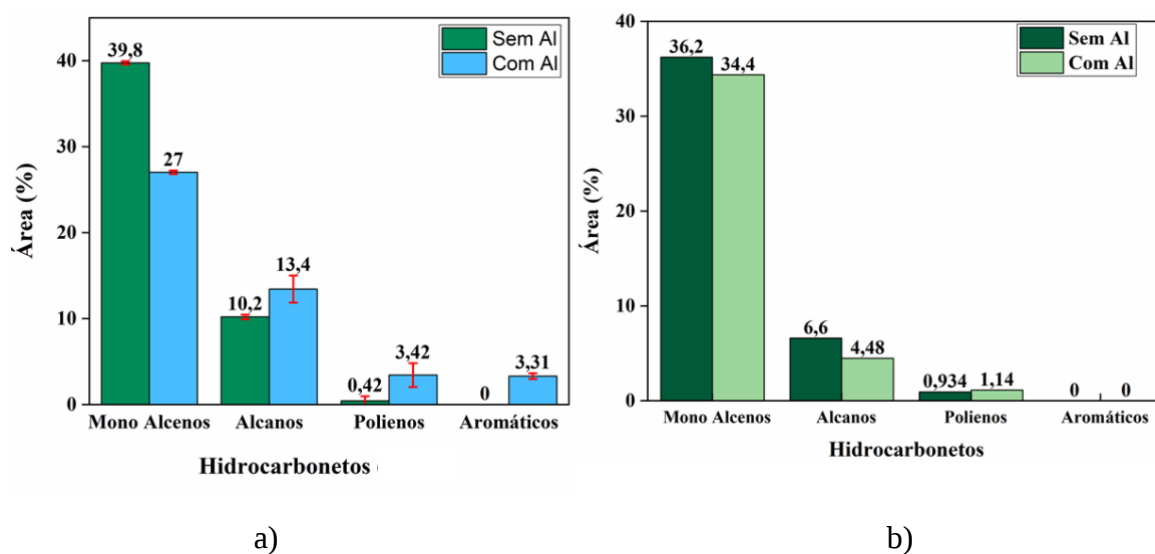
Figura 21 – Pirólises térmicas a 500°C em: a) cadinho metálico e b) tubo de quartzo.



Fonte: O autor.

Analisando a figura em geral, observa-se uma alta semelhança nas tendências dos produtos em presença de alumínio: menos hidrocarboneto, menos oxigenados e mais CO₂. As diferentes quantidades de produtos gerados podem estar relacionadas ao tipo de material do reator empregado. O cadinho metálico, por exemplo, possui uma melhor condutibilidade térmica do que o tubo de quartzo, o que elevou um pouco a temperatura da amostra e gerou uma quantidade maior de hidrocarbonetos nas pirólises com e sem Al. A figura 22 apresenta mais detalhadamente os produtos gerados nos dois sistemas.

Figura 22 – Classificação dos hidrocarbonetos nas pirólises térmicas a 500°C: a) cadinho e b) tubo de quartzo.



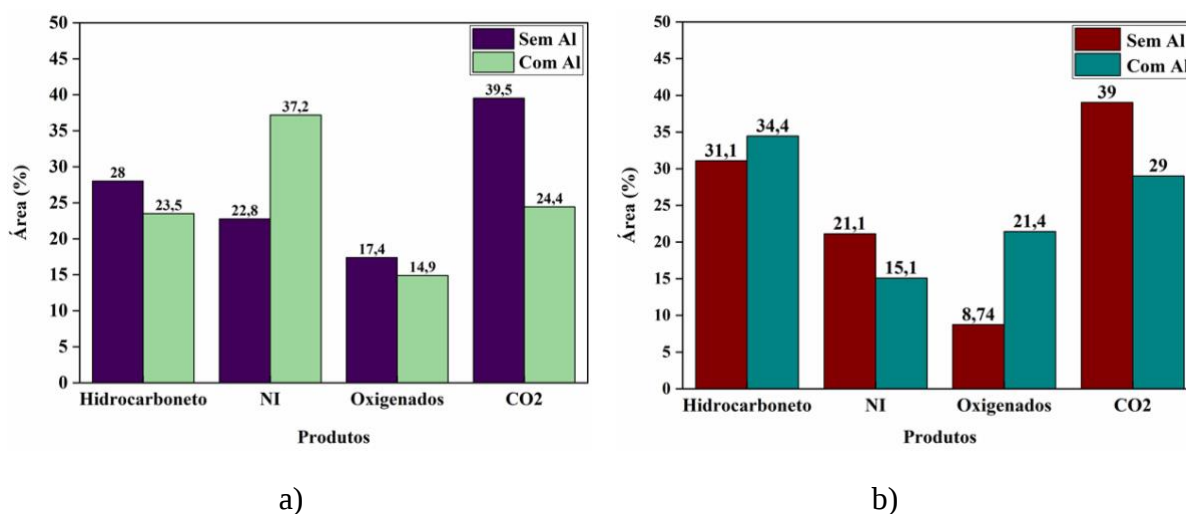
Fonte: O autor.

Conforme a figura, a similaridade entre os dois métodos ainda permanece quanto à produção de mono alcenos sendo gerados em maiores quantidades nas pirólises sem Al, e polienos sendo gerados em maiores quantidades nas pirólises com Al. É possível observar também que no cadinho houve mais reações secundárias levando ao aumento de polienos, aromáticos e alcanos, o que prova que a geração desses produtos depende do reator utilizado.

Portanto, não é possível afirmar que os dois sistemas utilizados resultaram em uma boa semelhança e reprodutibilidade entre si, devido a diferença de transferência de massa e calor existente entre ambos os reatores. Porém, em linhas gerais, houve algumas similaridades que evidenciaram o mesmo produto principal, possibilitando a aplicação do tubo de quartzo nas reações de pirólises posteriores.

Sabendo disso, a figura 23 apresenta os produtos gerais obtidos das pirólises em ambos os catalisadores.

Figura 23 – Pirólises catalíticas a 500°C de PP sem Al e com Al: a) 5Ni/Z-Fe e b) Z-Fe.



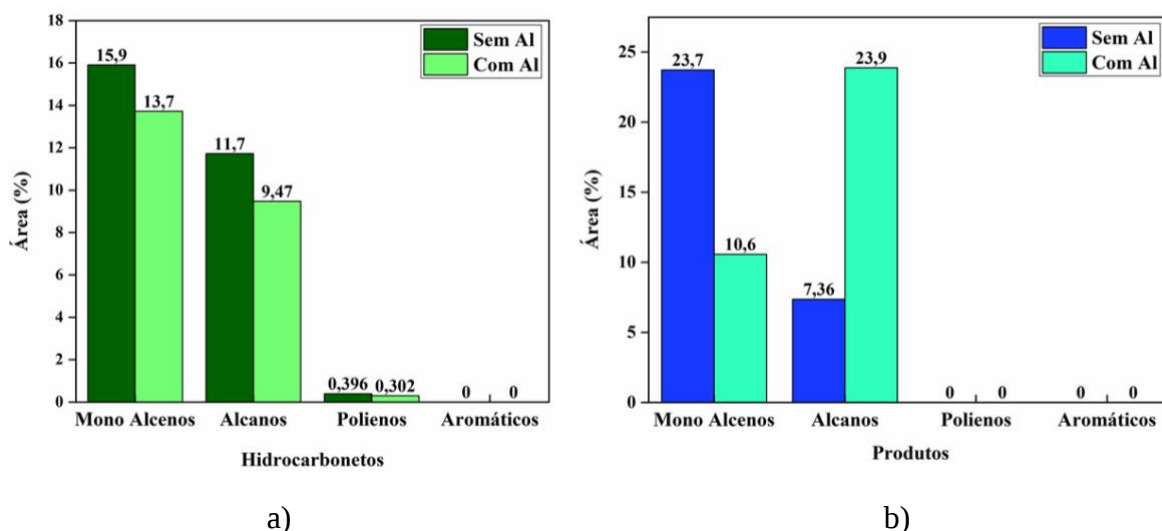
Fonte: O autor.

De acordo com a figura, as pirólises de filmes PP laminado em presença do catalisador de Z-Fe produziram mais hidrocarbonetos comparado com o catalisador 5Ni/Z-Fe. A quantidade de CO₂ aumentou em ambas as reações quase que de forma idêntica. Por outro lado, nota-se maior geração de hidrocarbonetos e menos compostos não identificados nas pirólises catalisadas pela ferrierita (Z-Fe), enquanto que em presença do catalisador 5Ni/Z-Fe aconteceu o contrário. Em ambos os casos a alta taxa

de não identificados já era esperado devido ao aumento do craqueamento das cadeias, gerando produtos mais complexos de serem identificados pela biblioteca.

A figura 24 apresenta a classificação dos hidrocarbonetos obtidos nas reações de pirólise com cada catalisador.

Figura 24 – Classificação dos hidrocarbonetos nas pirólises catalíticas a 500°C: a) 5Ni/Z-Fe e b) Z-Fe.



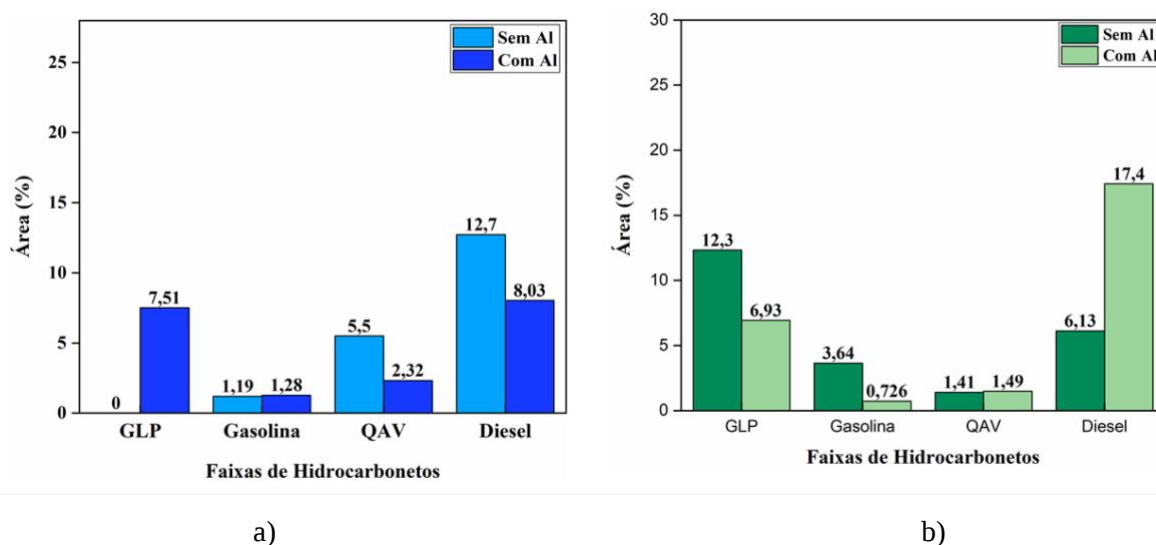
Fonte: O autor.

Observa-se pela figura que ambas as pirólises não produziram polienos nem aromáticos, mas geraram mais mono alcenos na ausência de Al. Em contrapartida, os alcanos foram mais predominantes nas pirólises de filmes com Al utilizando o catalisador de Z-Fe, acontecendo o contrário nas pirólises com o catalisador de 5Ni/Z-Fe. Isso pode ser explicado pela presença da acidez inerente à zeólita ferrierita somada à acidez advinda da presença do Al, possibilitando maior craqueamento de cadeias.

O menor rendimento de hidrocarbonetos no catalisador contendo níquel pode estar associado ao aumento das reações de hidrogenólise, produzindo hidrocarbonetos leves que não são detectados no sistema de análise cromatográfica utilizado neste estudo.

A figura 25 apresenta as faixas de hidrocarbonetos obtidas nos diferentes catalisadores. Nela, observa-se que as faixas obtidas com o uso dos catalisadores divergiram. Enquanto o catalisador de zeólitas de Fe produziram mais hidrocarbonetos na faixa de diesel em pirólises de plásticos com Al, o catalisador de 5Ni/Z-Fe produziu essa faixa em maior quantidade na ausência do Al.

Figura 25 – Faixas de hidrocarbonetos nas pirólises catalíticas a 500°C: a) 5Ni/Z-Fe e b) Z-Fe.



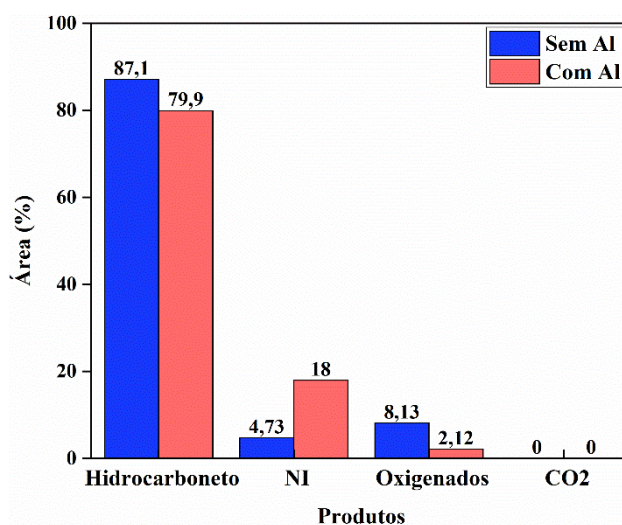
Fonte: O autor.

Além disso, a figura mostra que não houve geração de hidrocarbonetos na faixa de GLP em pirólises de plásticos sem Al com o catalisador 5Ni/Z-Fe, enquanto nas pirólises com o catalisador de Z-Fe não só teve produção nessa faixa, como também teve sua maior produção comparado naquelas em presença de Al.

De forma geral, as pirólises catalíticas realizadas com o catalisador de Z-Fe demonstraram melhores resultados em comparação com as pirólises feitas com o catalisador de 5Ni/Z-Fe. A presença do níquel pode ter diminuído a característica ácida da ferrierita e promovido reações de hidrogenólise produzindo hidrocarbonetos leves e reduzindo os hidrocarbonetos condensáveis de maior massa molar.

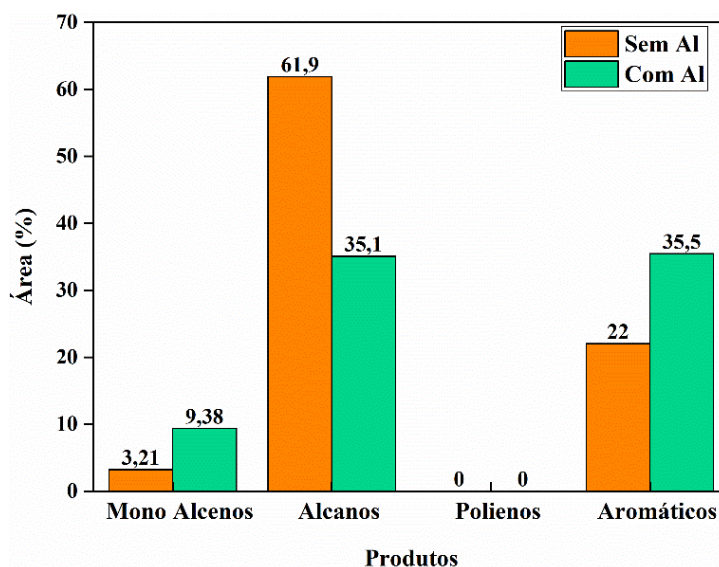
5.3.3. Hidropirólises

Os produtos gerais obtidos das hidropirólises podem ser observados na figura 26. Os hidrocarbonetos foram produzidos em maior quantidade do que na pirólise em atmosfera inerte de hélio, tanto nas reações com presença de Al quanto na ausência, possuindo uma diferença de aproximadamente 10% entre as duas. A taxa de compostos não identificados foi maior nas pirólises de amostras com Al, possivelmente devido à complexidade que o metal atribui à reação por quebrar ainda mais as cadeias longas.

Figura 26 – Hidropirólises a 500°C das amostras de PP com e sem Al.

Fonte: O autor.

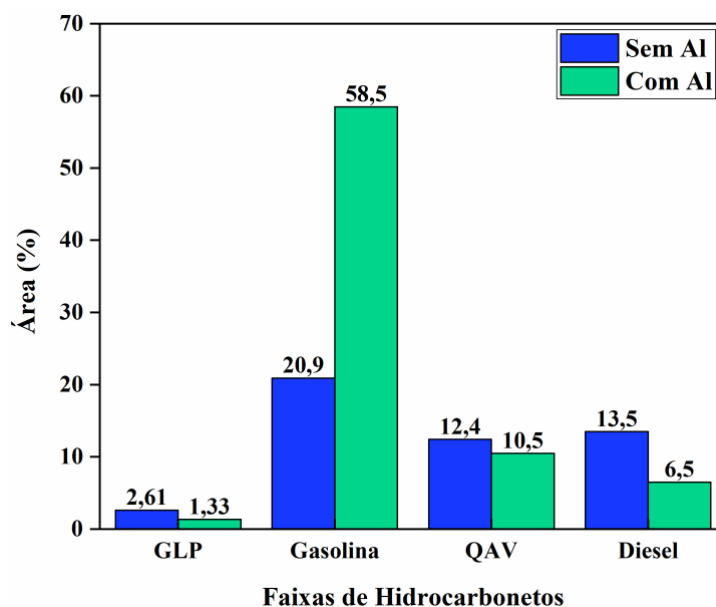
Observa-se também que não houve geração de CO₂ em ambas as amostras, o que pode ser explicado pela alta seletividade da atmosfera em H₂ a hidrocarbonetos, que contribuiu para a qualidade dos produtos. A classificação dos produtos gerados nas hidropirólises, conforme mostra a figura 27, comprova o poder de hidrogenação do método, uma vez que os alcanos foram produzidos em maior quantidade, assim como a produção de aromáticos. Na presença do Al, observa-se que houve uma ação catalítica devido maior produção de aromáticos.

Figura 27 – Classificação dos produtos da hidropirólise.

Fonte: O autor.

A figura 28 apresenta as faixas dos hidrocarbonetos obtidas, que revela a maior produção de gasolina em presença de Al, evidenciando a influência do Al no maior craqueamento do polímero.

Figura 28 – Faixa de hidrocarbonetos dos produtos obtidos da hidropirólise.



Fonte: O autor.

Em termos de comparação às pirólises anteriores, a hidropirólise demonstrou um desempenho superior em comparação com as pirólises térmicas e catalíticas realizadas em atmosfera de hélio (He). Esse desempenho aprimorado pode ser atribuído à capacidade do hidrogênio de promover reações mais seletivas, resultando em maior rendimento de produtos líquidos, com menos formação de subprodutos indesejados, como CO₂. A eficiência da hidropirólise na produção de compostos desejáveis, como alcanos, sugere que esse processo é uma alternativa mais eficaz para a transformação de matérias-primas em combustíveis e produtos químicos de alto valor.

CONCLUSÕES

Os resultados das diferentes pirólises mostraram que tanto a temperatura quanto o uso de catalisadores desempenham um papel crucial na composição dos produtos gerados. A pirólise realizada a 500°C foi mais eficaz na produção de hidrocarbonetos, especialmente quando o alumínio estava presente, atuando como um catalisador e favorecendo reações que resultam na quebra mais eficiente das cadeias moleculares.

As pirólises catalíticas com Z-Fe foram mais produtivas em termos de hidrocarbonetos do que aquelas com o catalisador 5Ni/Z-Fe, provavelmente devido ao efeito do níquel em diminuir a acidez da zeólita e promover reações que geram hidrocarbonetos leves.

Em comparação, a hidropirólise superou as outras técnicas ao produzir uma maior quantidade de hidrocarbonetos e reduzir a formação de subprodutos indesejados, como CO₂. O uso de hidrogênio como atmosfera reacional favoreceu reações mais seletivas, resultando em um maior rendimento de líquidos, especialmente alcanos. Isso sugere que a hidropirólise pode ser uma alternativa mais eficiente para converter materiais plásticos em combustíveis valiosos e produtos químicos.

Para trabalhos futuros sugere-se refinar a análise dos produtos obtidos e melhorar a discussão dos resultados, bem como caracterizar os catalisadores utilizados e correlacionar suas propriedades com os resultados de seletividade observada dos produtos de pirólise. Também será feita uma comparação detalhada com os resultados da literatura para suportar as explicações sugeridas no texto.

REFERÊNCIAS

ABIPLAST. PERFIL 2022. [s.l: s.n.].

Disponível em: < <https://www.abiplast.org.br/publicacoes/perfil-2022abiplast/>> .

ABRELPE. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE, v. 1, p. 19, 2022

AL-SALEM, S. M. et al. A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste (PSW). *Journal of environmental management*, v. 197, p. 177-198, 2017.

ATLAS, D. O. PLÁSTICO: fatos e números sobre o mundo dos polímeros sintéticos. Rio de Janeiro: Fundação Heinrich Böll, Rio de Janeiro, 2020.

AWUCHI, Chinaza Godswill; AWUCHI, Chibueze Gospel. Impacts of plastic pollution on the sustainability of seafood value chain and human health. **International Journal of Advanced Academic Research**, v. 5, n. 11, p. 46-138, 2019.

AYELERU, Olusola Olaitan et al. Challenges of plastic waste generation and management in sub-Saharan Africa: A review. **Waste Management**, v. 110, p. 24-42, 2020.

BOUCHER, Julien; FRIOT, Damien. Primary microplastics in the oceans: a global evaluation of sources. Gland, Switzerland: Iucn, 2017.

BOYLE, Kellie; ÖRMECI, Banu. Microplastics and nanoplastics in the freshwater and terrestrial environment: A review. **Water**, v. 12, n. 9, p. 2633, 2020.

BUTT, Fatima Imran et al. Recent progress in the utilization of biosynthesized polyhydroxyalkanoates for biomedical applications—review. **International journal of biological macromolecules**, v. 120, p. 1294-1305, 2018.

BROWNING, Shelby; BEYMER-FARRIS, Betsy; SEAY, Jeffrey R. Addressing the challenges associated with plastic waste disposal and management in developing countries. *Current Opinion in Chemical Engineering*, v. 32, p. 100682, 2021.

CHRISTOPHER, Fecia Jackulin et al. Assessment of product distribution of plastic waste from catalytic pyrolysis process. *Fuel*, v. 332, p. 126168, 2023.

DAI, Leilei et al. Pyrolysis technology for plastic waste recycling: A state-of-the-art review. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 93, p. 101021, 2022.

DING, Kuan et al. Catalytic microwave-assisted pyrolysis of plastic waste over NiO and HY for gasoline-range hydrocarbons production. *Energy Conversion and Management*, v. 196, p. 1316-1325, 2019.

ELORDI, Gorka et al. Product yields and compositions in the continuous pyrolysis of high-density polyethylene in a conical spouted bed reactor. *Industrial & engineering chemistry research*, v. 50, n. 11, p. 6650-6659, 2011.

FADILLAH, Ganjar et al. Recent progress in low-cost catalysts for pyrolysis of plastic waste to fuels. *Catalysts*, v. 11, n. 7, p. 837, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/catal11070837>.

FAUSSONE, Gian Claudio; KRŽAN, Andrej; GRILC, Miha. Conversion of Marine Litter from Venice Lagoon into Marine Fuels via Thermochemical Route: The Overview of Products, Their Yield, Quality and Environmental Impact. *Sustainability*, v. 13, n. 16, p. 9481, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13169481>

FARACA, Giorgia; ASTRUP, Thomas. Plastic waste from recycling centres: Characterisation and evaluation of plastic recyclability. **Waste Management**, v. 95, p. 388-398, 2019.
 FIORELLI, Francisco Carlos Cardoso. Pirólise de resíduos plásticos: revisão e perspectivas futuras. 2020. 87f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2020.

GAROFALO, E. et al. Reactive compatibilization and melt compounding with nanosilicates of post-consumer flexible plastic packagings. **Polymer Degradation and Stability**, v. 152, p. 52-63, 2018.

GERRITSE, Jan et al. Fragmentation of plastic objects in a laboratory seawater microcosm. *Scientific reports*, v. 10, n. 1, p. 1-16, 2020.

GEYER, Roland; JAMBECK, Jenna R.; LAW, Kara Lavender. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science advances*, v. 3, n. 7, p. e1700782, 2017. DOI: 10.1126/sciadv.1700782.

GINJUPALLI, Kishore et al. Poly (α -hydroxy acid) based polymers: A review on material and degradation aspects. **Polymer Degradation and Stability**, v. 144, p. 520-535, 2017.

HOHN, Sönke et al. The long-term legacy of plastic mass production. *Science of the Total Environment*, v. 746, p. 141115, 2020.

IROEGBU, Austine OC et al. Plastics in municipal drinking water and wastewater treatment plant effluents: Challenges and opportunities for South Africa—A review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, p. 12953-12966, 2020.

JAMBECK, Jenna R. et al. Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, v. 347, n.6223, p. 768-771, 2015. DOI: 10.1126/science.1260352.

JIANG, Jie et al. From plastic waste to wealth using chemical recycling: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 10, n. 1, p. 106867, 2022.

JOSHI, Chandni; SEAY, Jeffrey; BANADDA, Noble. A perspective on a locally managed decentralized circular economy for waste plastic in developing countries. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, v. 38, n. 1, p. 3-11, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1002/ep.13086>

KASSARGY, Chantal et al. Gasoline and diesel-like fuel production by continuous catalytic pyrolysis of waste polyethylene and polypropylene mixtures over USY zeolite. *Fuel*, v. 224, p.764-773, 2018.

KAZA, Silpa et al. What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050. World Bank Publications, 2018.

KUSENBERG, Marvin et al. Maximizing olefin production via steam cracking of distilled pyrolysis oils from difficult-to-recycle municipal plastic waste and marine litter. *Science of The Total Environment*, p. 156092, 2022.

KREMER, Irma et al. Effect of zeolite catalyst on the pyrolysis kinetics of multi-layered plastic food packaging. *Symmetry*, v. 14, n. 7, p. 1362, 2022.

LAGO, Guilherme Leite. Avaliação da qualidade do polipropileno pós-consumo provenientes de empresas de reciclagem. 2022.

LAKHIAR, Imran Ali et al. Plastic pollution in agriculture as a threat to food security, the ecosystem, and the environment: an overview. *Agronomy*, v. 14, n. 3, p. 548, 2024.

Lucena, Adelmo. Presença de microplásticos no litoral pernambucano é “alarmante”, diz Instituto. **Diário de Pernambuco**, Recife, 28 de junho de 2024. Disponível em: <<https://www.diariodepernambuco.com.br/noticia/vidaurbana/2024/06/presenca-de-microplasticos-no-litoral-pernambucano-e-alarmante.html>>.

MACARTHUR, Dame Ellen; WAUGHROY, Dominic; STUCHTEY, Martin R. The new plastics economy, rethinking the future of plastics. In: World Economic Forum. London, UK: Ellen MacArthur Foundation and McKinsey & Company, 2016.

MASSY, Jim. **A little book about BIG chemistry: The story of man-made polymers**. Springer, 2017.

MASTELLONE, Maria Laura. Technical description and performance evaluation of different packaging plastic waste management's systems in a circular economy perspective. **Science of the total environment**, v. 718, p. 137233, 2020.

MAQSOOD, Tariq et al. Pyrolysis of plastic species: A review of resources and products. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 159, p. 105295, 2021.

MIANDAD, R. et al. Plastic waste to liquid oil through catalytic pyrolysis using natural and synthetic zeolite catalysts. *Waste Management*, v. 69, p. 66-78, 2017.

MONTEIRO, Alessandra da Rocha Duailibe. Contribuição da reciclagem química de resíduos plásticos para o desenvolvimento sustentável. 2018.

MUNIR, D.; USMAN, M. R. Catalytic hydropyrolysis of a model municipal waste plastic mixture over composite USY/SBA-16 catalysts. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 135, p. 44-53, 2018.

QUESADA, L. et al. Characterization of fuel produced by pyrolysis of plastic film obtained of municipal solid waste. **Energy**, v. 186, p. 115874, 2019.

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

RAHIMI, AliReza; GARCÍA, Jeannette M. Chemical recycling of waste plastics for new materials production. *Nature Reviews Chemistry*, v. 1, n. 6, p. 1-11, 2017.

SINGH, Rohit Kumar et al. Impact of fast and slow pyrolysis on the degradation of mixed plastic waste: Product yield analysis and their characterization. *Journal of the Energy Institute*, v.92, n. 6, p. 1647-1657, 2019.

SOBRAL, Paula. Oceano de plástico. Fundação Francisco Manuel dos Santos, 2022.

STENGER, K. S. et al. Microplastics pollution in the ocean: Potential carrier of resistant bacteria and resistance genes. **Environmental Pollution**, v. 291, p. 118130, 2021.

Schwab, K. (2019). The Global Competitiveness Report: World Economic Forum. http://www3.weforum.org/docs/WEF_TheGlobalCompetitivenessReport2019.pdf

THIOUNN, Timmy; SMITH, Rhett C. Advances and approaches for chemical recycling of plastic waste. *Journal of Polymer Science*, v. 58, n. 10, p. 1347-1364, 2020.

UNEP. From Pollution to Solution: A global assessment of marine litter and plastic pollution. United Nations Environment Programme, Synthesis, ISBN 978-92-807-3881-0, Nairobi, 2021. Disponível em: <https://www.unep.org/resources/pollution-solution-global-assessment-marine-litter-and-plastic-pollution>

VEKSHA, Andrei et al. Technical and environmental assessment of laboratory scale approach for sustainable management of marine plastic litter. *Journal of Hazardous Materials*, v. 421, p. 126717, 2022.

VERMA, Rinku et al. Toxic pollutants from plastic waste-a review. *Procedia Environmental Sciences*, v. 35, p. 701-708, 2016.

XIE, Minghui et al. Life cycle assessment of the recycling of Al-PE (a laminated foil made from polyethylene and aluminum foil) composite packaging waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 4430-4434, 2016.

WATT, Ethan et al. Ocean plastics: environmental implications and potential routes for mitigation—a perspective. *RSC advances*, v. 11, n. 35, p. 21447-21462, 2021. DOI: 10.1039/D1RA00353D.

WIT, Wijnand et al. Solucionar a poluição plástica: transparência e responsabilização. Gland: WWF, 2019.

World Wide Fund for Nature. (s.d.). Brasil é o 4º país do mundo que mais gera lixo plástico. Disponível em: <https://www.wwf.org.br/participe/horadoplaneta/?70222/Brasil-e-o-4-pais-do-mundo-que-mais-gera-lixo-plastico>.

WU, Wei-Min; YANG, Jun; CRIDDLE, Craig S. Microplastics pollution and reduction strategies. **Frontiers of Environmental Science & Engineering**, v. 11, p. 1-4, 2017.

YOUSEF, Samy et al. Microcrystalline paraffin wax, biogas, carbon particles and aluminum recovery from metallised food packaging plastics using pyrolysis, mechanical and chemical treatments. *Journal of cleaner production*, v. 290, p. 125878, 2021.

ZHENG, Kai et al. Progress and perspective for conversion of plastic wastes into valuable chemicals. **Chemical Society Reviews**, v. 52, n. 1, p. 8-29, 2023.