



ConBRepro

XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

I CIGELUBRA

Congresso Internacional de Gestão e Engenharia Luso-Brasileiro

04 a 06 de dezembro de 2024

Energias Limpas nas Engenharias

Pirólise do Polietileno de Alta Densidade: Estratégias para Reciclagem e Recuperação de Recursos

Lyara Maria Morais Andrade

Engenharia - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciências e Engenharia, Itapeva/SP

Ana Helena de Campos Pereira

Programa de Pós-graduação em Engenharia - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharias e Ciências, Guaratinguetá/SP

Lirylene Maria Morais Andrade

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP-PG) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Ponta Grossa/PR

Gretta Larisa Aurora Arce Ferrufino

Engenharia - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciências e Engenharia, Itapeva/SP

Carlos Manuel Romero Luna

Engenharia - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciências e Engenharia, Itapeva/SP

Resumo: Nos últimos dez anos, o uso de plásticos tem aumentado de forma expressiva. Dados de 2022 indicam que o mundo produz cerca de 2 bilhões de toneladas de resíduos anualmente, dos quais cerca de 12% são plásticos. Estima-se que, até 2022, apenas 10,3% dos aproximadamente 5,5 bilhões de quilogramas de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) tenham sido reciclados. O acúmulo de resíduos plásticos no meio ambiente se tornou um grande desafio, devido à sua lenta decomposição. Esse acúmulo tem contribuído para a formação de microplásticos e a contaminação de águas subterrâneas e do solo. Nesse contexto, a reciclagem química dos resíduos pode representar uma solução para a crise na gestão de resíduos e para a crescente demanda energética impulsionada pelo avanço tecnológico. Este estudo analisou a pirólise térmica de resíduos de PEAD a aproximadamente 350°C por 30 minutos em um reator de leito fixo. Os ensaios resultaram na obtenção de três tipos de produtos: uma fração cerosa cinza (char), uma fração gasosa inflamável (gás pirolítico) e uma fração líquida (óleo pirolítico), com mais de 20% em massa de óleo pirolítico. A caracterização do óleo pirolítico revelou que ele pode ser uma alternativa viável aos combustíveis convencionais, apresentando um poder calorífico superior (PCS) muito semelhante quando comparado com o diesel comercial, além de ser um líquido inflamável.

Palavras-chave: Óleo pirolítico, gestão de resíduos sólidos, microplásticos; PEAD, termoplásticos.

Pyrolysis of High Density Polyethylene: Strategies for Recycling and Resource Recovery

Abstract: In the last ten years, the use of plastics has increased significantly. Data from 2022 indicates that the world produces around 2 billion tons of waste annually, of which around 12% is plastic. It is estimated that, by 2022, only 10.3% of the approximately 5.5 billion kilograms of High Density Polyethylene (HDPE) will have been recycled. The accumulation of plastic waste in the environment has become a major challenge due to its slow decomposition. This accumulation has contributed to the formation of microplastics and the contamination of groundwater and soil. In this context, chemical recycling of waste can represent a solution to the crisis in waste management and to the growing energy demand driven by technological advances. This study analyzed the thermal pyrolysis of HDPE waste at approximately 350°C for 30 minutes in a fixed bed reactor. The tests resulted in the obtaining of three types of products: a gray waxy fraction (char), a flammable gaseous fraction (pyrolytic gas) and a liquid fraction (pyrolytic oil), with more than 20% by mass of pyrolytic oil. The characterization of pyrolytic oil revealed that it can be a viable alternative to conventional fuels, presenting a higher calorific value (PCS) greater than that of commercial diesel, in addition to being a flammable liquid.

Keywords: pyrolytic oil, solid waste management, microplastics; HDPE, thermoplastics.

1. Introdução

O plástico é um polímero sintético de origem orgânica, conhecido por sua alta resistência e durabilidade. Composto principalmente por ligações de carbono e hidrogênio, pode também incluir elementos como cloro e nitrogênio. Entre os principais tipos de plástico, destacam-se o polietileno tereftalato (PET), polietileno de alta densidade (PEAD), policloreto de vinila (PVC), polietileno de baixa densidade (PEBD), polipropileno (PP) e poliestireno (PS). A versatilidade dos plásticos os torna amplamente utilizados em diversas aplicações; no entanto, sua durabilidade extrema resulta em uma decomposição extremamente lenta, contribuindo significativamente para a poluição ambiental em escala global. O crescimento populacional e econômico tem levado a um aumento expressivo na produção e descarte de resíduos plásticos. Embora os plásticos sejam preferidos por seu baixo custo de fabricação, flexibilidade e praticidade, menos de 20% desses resíduos são reciclados anualmente. Como resultado, grandes quantidades de plástico acabam acumuladas em aterros, lixões ou dispersas no meio ambiente, exacerbando os problemas ambientais associados. No Brasil, que ocupa a quarta posição mundial na produção de resíduos plásticos, são geradas cerca de 11 milhões de toneladas anualmente. Estima-se que, dos aproximadamente 5,5 bilhões de quilogramas de polietileno de alta densidade (PEAD) produzidos até 2022, apenas 10,3% tenham sido reciclados. O PEAD é um plástico hidrocarboneto, caracterizado por longas cadeias de carbono e hidrogênio, e se decompõe termicamente a partir de cerca de 290 °C. Sua estrutura apresenta alta cristalinidade e menor quantidade de cadeias laterais ou ramificações em comparação a outros plásticos, o que lhe confere maior resistência. A pirólise é um processo de degradação térmica que tem o potencial de auxiliar na reciclagem do plástico, reduzindo o resíduo no meio ambiente e gerando produtos com valor energético. Este trabalho investiga um método para reciclar e gerar energia a partir do resíduo de PEAD, avaliando também o rendimento e a qualidade do óleo pirolítico obtido através da pirólise térmica desse material.

2. Materiais e Métodos

2.1 Material

2.1.1 Polietileno de alta densidade

Neste estudo foi utilizado PEAD (Figura 1), todos os frascos de PEAD foram previamente lavados com água comum para retirar o conteúdo residual de qualquer produto, e as etiquetas e adesivos foram removidos para não interferir no processo. Após a lavagem, todos os frascos foram secados na estufa a 105°C por 12 horas.

Figura 1. Polietileno de alta densidade a) Coleta de plásticos; b) Identificação do plástico.



Fonte: Autoria própria.

2.1.2 Diesel comercial S10

Nesse estudo foi utilizado diesel comercial S10 (Figura 2) com o intuito de fazer uma análise comparativa do poder calorífico do óleo pirolítico obtido durante a pirólise do PEAD com um combustível comercial.

Figura 2. Diesel comercial S10.



Fonte: Autoria própria.

2.2 Métodos

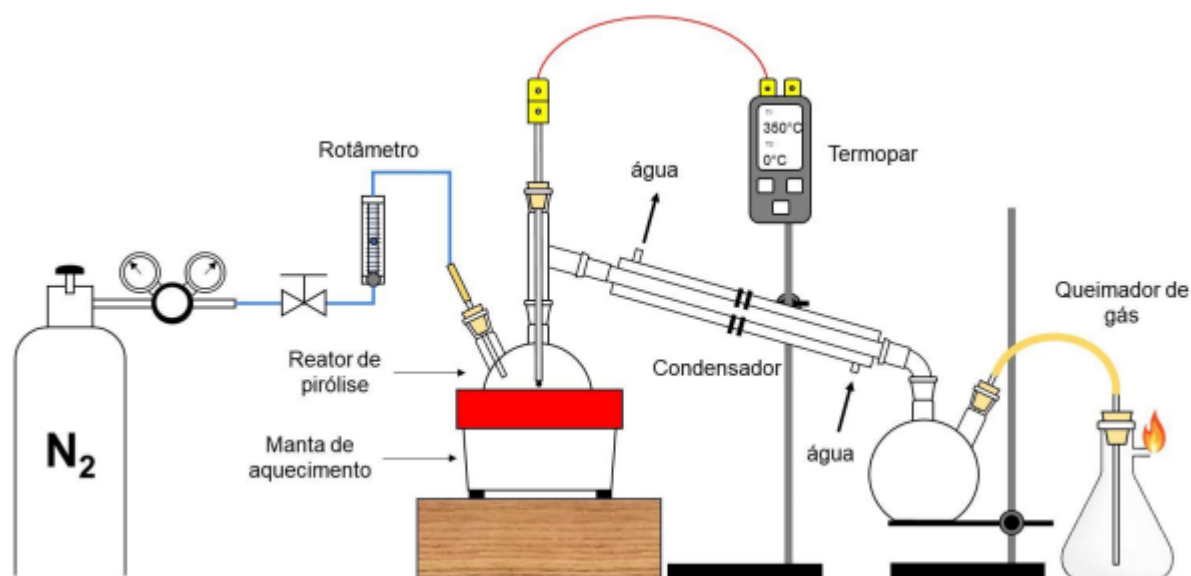
2.2.1 Planejamento experimental

Neste estudo foi realizada a pirólise do PEAD considerando uma massa constante de PEAD sendo de 30,0 g. As partículas de PEAD apresentam uma granulometria inferior a 20 mm. A temperatura da pirólise ficou em uma média de 350°C. Uma vez atingida a temperatura do processo se manteve a pirólise por 30 minutos.

2.2.2 Bancada experimental de pirólise

A Figura 3 exibe a bancada experimental da bancada de pirólise utilizada neste trabalho. A bancada se compõe de um balão de duas bocas, o qual foi usado como reator de pirólise. Uma manta aquecedora foi usada para fornecer o calor necessário durante a pirólise do plástico. Os experimentos foram realizados considerando uma temperatura de aproximadamente 350°C por 30 minutos. Uma vazão de 100 mL/min de gás nitrogênio foi injetada dentro do reator para criar uma atmosfera inerte. A vazão do gás foi regulada através de um rotômetro. A fração de material volátil formada dentro do reator passa a um condensador, onde uma fração acaba condensando e a outra composta por substâncias gasosas passa a um queimador.

Figura 3. Bancada experimental de pirólise de plástico.



Fonte: Autoria própria.

O balanço de massa do processo da pirólise do PEAD foi realizado através da equação 1, onde conhecendo a massa inicial do PEAD (m_{PEAD}) e determinando a massa resultante de cera (m_{CERA}) e óleo pirolítico (m_{OP}) respectivamente, foi determinada, por diferença, a massa de gás pirolítico (m_{GP}) produzida durante o experimento. Os rendimentos dos produtos da pirólise do PEAD foram determinados de acordo com as equações 2,3 e 4 respectivamente.

$$m_{PEAD} = m_{CERA} + m_{OP} + m_{GP} \quad (1)$$

$$RM_{CERA} = \frac{m_{CERA}}{m_{PEAD}} \quad (2)$$

$$RM_{OP} = \frac{m_{OP}}{m_{PEAD}} \quad (3)$$

$$RM_{GP} = \frac{m_{GP}}{m_{PEAD}} \quad (4)$$

2.2.3 Picagem do PEAD

Para obtenção de partículas de PEAD, primeiro os frascos foram cortados em fragmentos menores (Figura 4a) em um tamanho que permitisse a alimentação de um picador da marca Marconi (Figura 4b).

O picador em que se realizou a picagem secundária, usado para deixar as partículas no tamanho necessário para realizar a pirólise, fica localizado no Laboratório de Propriedades dos Materiais do Instituto de Ciências e Engenharia de Itapeva/SP.

Figura 4. (a) Fragmentos de PEAD após corte primário (b) Picador Marconi



Fonte: Autoria própria.

2.2.4 Técnicas de caracterização

Nesta seção estão apresentados os métodos e técnicas utilizados para a caracterização do PEAD densidade e os produtos derivados da sua pirólise.

2.2.4.1 Poder calorífico superior (PCS)

Este parâmetro foi determinado usando um calorímetro IKA C5000. Os resultados de PCS permitiram avaliar o conteúdo energético da fração líquida produzida pela pirólise do PEAD.

2.2.4.2 Ensaio de inflamabilidade

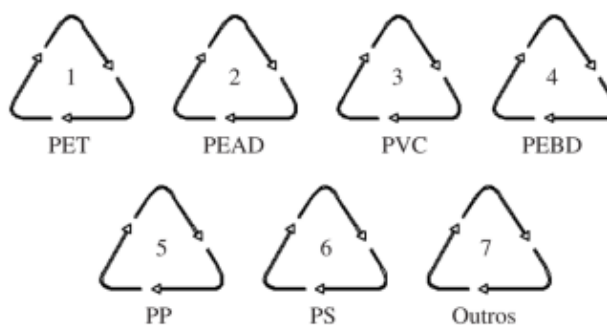
Durante a pirólise do PEAD foi avaliada a inflamabilidade da fração líquida e gasosa. Para determinar a inflamabilidade do líquido, foram colocadas 10 gotas de óleo pirolítico sobre uma colher. O óleo foi submetido a uma fonte de calor até que houvesse ignição. O mesmo procedimento se repetiu utilizando o diesel comercial. Neste ensaio foi avaliado o tempo de queima e analisadas algumas características da chama formada.

3. Referencial Teórico

3.1 Termoplásticos

Com origem na palavra grega “plastikos”, que significa “capaz de ser moldado”, o termoplástico é um polímero sintético não biodegradável naturalmente. Ele possui natureza orgânica, é gerado pelo processo de polimerização e composto majoritariamente por carbono e hidrogênio e outros elementos, como cloro e nitrogênio, o que resulta em um produto durável e resiliente, porém sua degradação extremamente lenta está causando uma grave poluição ambiental em escala global (Chen et al, 2023; Kyaw e Hmwe, 2015; Oliveira Junior, 2016). Os termoplásticos representam um dos materiais mais versáteis já criados pela humanidade, existindo muitos tipos de plásticos disponíveis, dentre os mais utilizados estão o polietileno tereftalato (PET), polietileno de alta densidade (PEAD), Policloreto de vinila (PVC), polietileno de baixa densidade (PEBD), polipropileno (PP) e poliestireno (PS), identificados por uma numeração de 1 a 6, respectivamente, conforme mostrado na figura 4 (Chang, 2023).

Figura 4: Símbolos de identificação dos materiais plásticos para reciclagem.



- 1 - PET - Polietileno tereftalato
- 2 - PEAD - Polietileno de alta densidade
- 3 - PVC - Policloreto de vinila
- 4 - PEBD - Polietileno de baixa densidade
- 5 - PP - Polipropileno
- 6 - PS - Poliestireno
- 7 - Outros

Fonte: Coltro e Duarte (2013)

3.1.1 Parâmetros estatísticos

O estudo de Chen et al (2023) afirma que a produção e aplicação de produtos plásticos crescem paralelamente aos avanços tecnológicos e a modernização social, levantando questões sobre a poluição ambiental, pois a contaminação do solo e dos ecossistemas terrestres causada pela poluição plástica tem um potencial grande de efeitos prejudiciais sobre a ecologia do solo e da água. Segundo Christopher et al (2023), até o ano de 2015, foram produzidas 8,3 bilhões de toneladas de plásticos no mundo, porém somente cerca de 9,6% passaram por reciclagem e incineração, sendo que este último libera gases prejudiciais na atmosfera. Os plásticos restantes foram descartados em terras, rios e oceanos.

Conforme dados apresentados por Kartik et al (2022), desde o seu início de produção em massa, em 1950, a produção global de plásticos cresce em média 9% a cada ano e as projeções indicam que, até 2050, a demanda por plásticos triplicará os níveis atuais. Além disso, destaca que, em média, o mundo gera anualmente 2,01 bilhões de toneladas de resíduos, dos quais aproximadamente 12% são plásticos, sendo cerca de 8 milhões de toneladas de plásticos despejados no oceano. Relatos de Monteiro (2018) mostraram que, em 2014, no Brasil, os resíduos sólidos urbanos continham aproximadamente 13,5% de plásticos. O estudo de Vargas et al. (2022) afirma que o Brasil é o 4o maior produtor de resíduo plástico no mundo, produzindo em média 11 milhões de toneladas por ano e que se estima que dos cerca de 5,5 bilhões de quilogramas de PEAD produzidos até 2022, somente 10,3% passaram por algum tipo de reciclagem.

3.1.2 Resíduos plásticos

A crescente ameaça ao meio ambiente e à saúde pública, decorrente do aumento da produção de resíduos plásticos, que frequentemente são pouco ou não biodegradáveis, ressalta a necessidade de aprimorar a gestão desses resíduos. Estima-se que, anualmente, cerca de 280 milhões de toneladas de plástico sejam produzidas em todo o mundo. Deste total, mais da metade não é reciclada ou destinada a aterros, resultando em mais de 100 milhões de toneladas de resíduos sendo despejadas em lixões a céu aberto e nos oceanos (Artetxe et al., 2013; Auxílio et al., 2017; Hendrawati et al., 2023). O descarte inadequado desses materiais provoca uma série de problemas ambientais, incluindo a contaminação de águas subterrâneas, a ingestão de resíduos por organismos marinhos e a formação de microplásticos. Pesquisas recentes indicam que produtos químicos perigosos lixiviados do microplástico podem se acumular no solo e até mesmo penetrar em organismos vivos. Um exemplo do percurso que os microplásticos podem seguir até se acumularem no organismo humano é ilustrado na figura 5 (Chen et al., 2023; Christopher et al., 2023; Kartik et al., 2022).

Figura 5: Trajetória do microplástico: exemplo de acumulação em humanos.

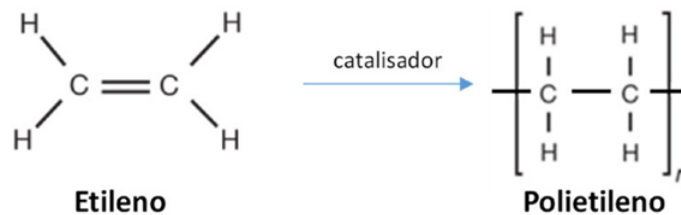


Fonte: Vargas et al (2022).

2.1.3 Polietileno de alta densidade

O PEAD, assim como o PEBD, é um polímero que pertence à família dos polímeros de etileno (figura 6). Suas cadeias são pouco ramificadas, aumentando assim suas forças intermoleculares. Essa característica o torna relativamente mais rígido e durável, fazendo com que seja aplicado na fabricação de garrafas, tambores, embalagens de produtos químicos, brinquedos, móveis, dutos, sacos plásticos, dentre diversas outras aplicações (Chang, 2023).

Figura 6: Estrutura molecular do polietileno.



Fonte: Vargas et al (2022).

A principal diferença entre o PEAD e o PEBD está na densidade, porém há outros fatores que os distinguem, tal como temperatura de fusão relativamente mais alta para o PEAD, aplicação e diferenças nas propriedades mecânicas, como a maior flexibilidade do PEBD, por exemplo (Chang, 2023).

2.2.1 Pirólise

A pirólise, também conhecida como termólise, é um processo de reciclagem química que envolve a decomposição térmica e química de materiais em uma atmosfera inerte sob altas temperaturas. Esse processo pode ocorrer na presença ou não de um catalisador, classificando-se em térmica ou catalítica (Auxílio et al., 2017; Chang, 2023; Monteiro, 2018). Na pirólise de plásticos, são gerados três produtos principais: uma fração gasosa (gás pirolítico), composta principalmente por produtos não condensáveis, como metano, gás hidrogênio e dióxido de carbono; uma fração líquida ou cerosa, que pode ser utilizada

como combustível ou matéria-prima para a produção de outros produtos químicos; e uma fração sólida rica em carbono, conhecida como char. As vantagens da pirólise de resíduos plásticos incluem a significativa redução do volume dos resíduos, baixos custos de investimento, a capacidade de processar misturas de materiais, incluindo plásticos não higienizados ou laminados, além de gerar fontes alternativas de energia e renda, contribuindo para a diminuição de materiais contaminantes no meio ambiente (Aisien e Aisien, 2023; Kartik et al., 2022; Monteiro, 2018).

2.2.1.1 Óleo pirolítico

O óleo pirolítico, uma fração líquida resultante da pirólise de termoplásticos, possui várias aplicações, sendo uma delas sua utilização como combustível derivado de resíduo (CDR). Para otimizar seu rendimento, pode ser necessário submetê-lo a etapas de preparo, como a destilação. Além disso, esse óleo pode ser comercializado para empresas do setor energético e químico, podendo ser utilizado imediatamente ou armazenado conforme a demanda (Ghodrat et al., 2019; Kartik et al., 2022). Pesquisas indicam que o óleo pirolítico obtido a partir de plásticos pode servir como um substituto viável para o diesel e a gasolina. De acordo com Chang (2023), a octanagem do óleo pirolítico é compatível ou até superior à da gasolina, enquanto seu poder calorífico superior se revelou maior que o do diesel comercial. Christopher (2023) enfatiza que a densidade é uma propriedade essencial para combustíveis, pois, se muito baixa, pode levar a um alto consumo de combustível pelo motor, comprometendo seu funcionamento. No entanto, Christopher (2023) também observou que a densidade do óleo pirolítico derivado de resíduos de PEAD é semelhante à do diesel comercial, sugerindo que sua utilização como substituto do diesel pode ser viável.

4. Resultados

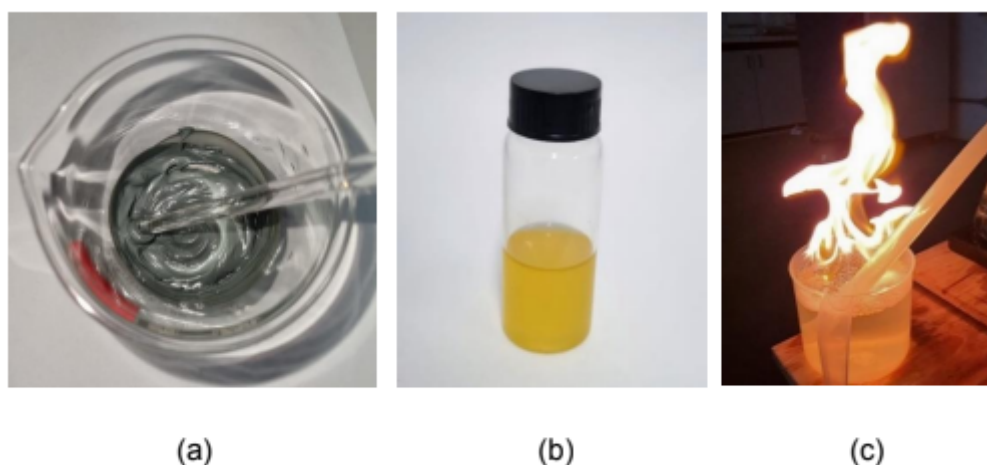
4.1 Caracterização do PEAD

Após a picagem, as partículas de PEAD apresentaram um tamanho menor e uma forma irregular. Para determinar o tamanho das partículas, foram medidas 20 amostras selecionadas aleatoriamente. Os resultados da picagem mostraram que as partículas variam entre 45 mm (maior dimensão) e 7 mm (menor dimensão), com uma área média de 300 mm².

4.2 Rendimentos da pirólise

A Figura 7 apresenta os produtos da pirólise do PEAD. A Figura 7a. mostra a cera residual, que permanece no reator ao final do experimento. Essa cera tem uma coloração cinza, possivelmente devido à presença de substâncias inorgânicas que conferem uma cor ou propriedades específicas ao plástico. Na Figura 7b., é possível observar o óleo pirolítico obtido, que apresenta uma coloração amarelada. Em virtude da complexidade da análise do gás pirolítico, foram realizados testes de inflamabilidade, utilizando um método de borbulhamento do gás em uma solução de sabão líquido. Ao borbulhar, o gás forma bolhas na superfície do recipiente. Com a ajuda de um isqueiro, foi realizado o teste de inflamabilidade das bolhas, o que demonstrou que o gás pirolítico contém componentes combustíveis (Figura 7c.).

Figura 7. Produtos da pirólise do PEAD (a) cera residual; (b) óleo pirolítico; (c) gás pirolítico.



Fonte: Autoria própria.

A Tabela 1 demonstra os rendimentos dos produtos da pirólise do PEAD. A pirólise do PEAD produz uma quantidade significativa de óleo pirolítico e gás pirolítico com características combustíveis, bem como, uma quantidade de cera. Os resultados de rendimento de óleo pirolítico obtidos neste trabalho são semelhantes aos apresentados no trabalho de Tursunov et al. (2014).

Tabela 1. Rendimentos dos produtos da pirólise do PEAD.

Rendimento (%)	Neste Trabalho	Tursunov et al. (2014)
Cera	63,5	39,9
Óleo pirolítico	21,8	21,7
Gás pirolítico	14,7	38,4

Fonte: Autoria própria.

Um detalhe particular da pirólise do PEAD é que a grande maioria de trabalhos destacam a obtenção de uma cera e somente alguns a produção de um óleo pirolítico. Nesse estudo foi obtido um óleo pirolítico devido principalmente ao intervalo de temperatura do processo e o comportamento do material volátil dentro do reator.

4.3 Caracterização do óleo pirolítico

4.3.1 Poder calorífico superior

A Tabela 2 apresenta os valores dos poderes caloríficos superiores (PCS) obtidos. O PCS do óleo pirolítico extraído foi semelhante, embora um pouco superior, ao do diesel comercial, que é de 42,51 MJ/kg, conforme indicado por Aisien (2023). Além disso, o PCS do diesel determinado por calorimetria foi de 44,6 MJ/kg, e os valores do óleo pirolítico obtido de amostras de PEAD, conforme reportado na literatura (Chang et al. (2023) e Christopher et al. (2023)), também foram considerados. Essa análise demonstra que o

óleo produzido apresentou um desempenho satisfatório em termos de fornecimento de energia.

Tabela 2. Comparação do poder calorífico superior.

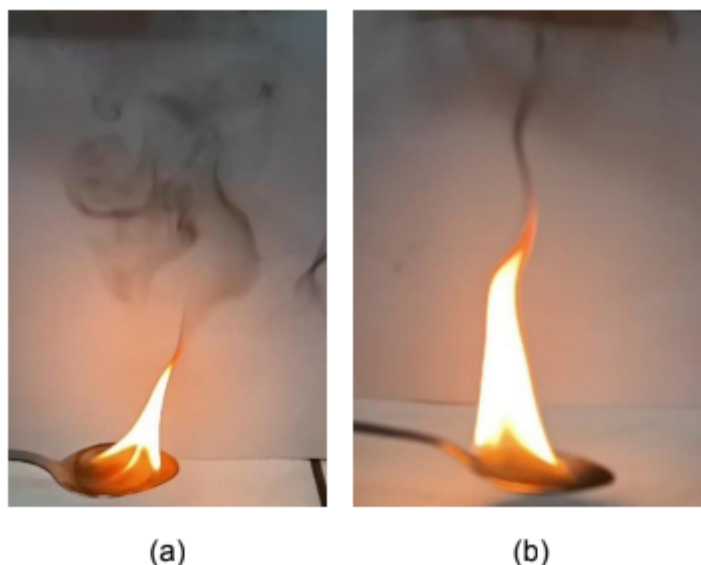
Propriedade	Óleo pirolítico (Neste trabalho)	Christopher et al. (2023)	Chang et al. (2023)	Diesel Comercial Aisien (2023)	Diesel Comercial (Neste trabalho)
PCS (MJ/Kg)	45,5	44,2	45	42,51	44,6

Fonte: Autoria própria.

4.3.3 Inflamabilidade

A inflamabilidade do óleo pirolítico foi avaliada (Figura 8). Durante a queima de ambos os combustíveis, observou-se a formação de fuligem, o que pode ser atribuído à combustão de substâncias orgânicas de cadeia longa. No teste de inflamabilidade, o diesel (Figura 8a) levou cerca de 30 segundos de contato direto com a chama para iniciar a queima, enquanto o óleo pirolítico (Figura 8b) começou a combustão imediatamente ao entrar em contato com o fogo, indicando que requer menos energia de ignição quando exposto a uma fonte de calor. A queima do diesel durou aproximadamente 1 minuto e 10 segundos, enquanto o óleo pirolítico queimou por cerca de 40 segundos. Apesar da duração menor, as chamas apresentaram características semelhantes.

Figura 8. Ensaio de inflamabilidade (a) Diesel S10, (b) Óleo pirolítico.



Fonte: Autoria própria.

5. Conclusão

A pirólise do PEAD, realizada nas condições estudadas, resultou em três produtos: uma cera cinza, um líquido amarelo claro e um gás combustível. A fração líquida, conhecida como óleo pirolítico, apresentou um rendimento médio de 21,8% em massa, valor que se aproxima do esperado na literatura. O poder calorífico superior (PCS) do óleo pirolítico foi

ligeiramente superior ao do diesel comercial, e tanto o gás quanto o líquido pirolítico mostraram-se inflamáveis. Dessa forma, conclui-se que o óleo pirolítico possui características promissoras para ser utilizado como combustível alternativo. Além disso, a pirólise do resíduo de PEAD representa um processo que pode gerar benefícios ambientais, ao reduzir a quantidade de resíduos plásticos, e econômicos, ao criar empregos e fornecer uma nova fonte de insumo químico para fins energéticos.

Referências

AGUADO, Roberto. et al. Wax Formation in the Pyrolysis of Polyolefins in a conical spouted bed reactor. *Energy & Fuels*, v.16, n. 6, 2002, p.1429-1437. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/ef020043w>. Acesso em: 25 out. 2023.

AISIEN, Felix Aibuedefe; AISIEN, Eki Tina. Production and characterization of liquid oil from the pyrolysis of waste high-density polyethylene plastics using spent fluid catalytic cracking catalyst. *Sustainable Chemistry for Climate Action*, v.2 (2023).

ARTETXE, Maite. et al. Cracking of High Density Polyethylene Pyrolysis Waxes on HZSM-5 Catalysts of Different Acidity. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2013, v.52, p.10637–10645. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/ie4014869>. Acesso em 25 out 2023.

AUXILIO, Anthony R. et al. An experimental study on thermo-catalytic pyrolysis of plastic waste using a continuous pyrolyser. *Waste Management*, v.67 (2017), p.143– 154. Disponível em: <<http://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.011>>. Acesso em: 25 out. 2023.

Chao. et al. Co-pyrolysis of biomass and plastic - Circularity of wastes and comprehensive review of synergistic mechanism. *Results in Engineering*, v.17 (2023). Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.100989>. Acesso em: 08 jun. 2023.

CHEN, W. et al. Optimization of the process parameters of catalytic pyrolysis for oil production usign design of experiments approaches - A REVIEW. *Chemical Engineering Journal* 471, Taiwan, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144695>. Acesso em: out. 2024

DUARTE, Leda C. Reciclagem de Embalagens Plásticas Flexíveis: Contribuição da Identificação Correta. *Polímeros*, vol. 23, n. 1, p. 128-134, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282013005000008>. Acesso em 03 dez. 2023.

ELDAHSHORY, A. I. et al. Catalytic pyrolysis of waste polypropylene using low-cost natural catalysts. *Scientific Reports* (2023). Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-37769-8>. Acesso em: 26 out. 2023.

GEBRE, S.H.; SENDEKU, M. G.; BAHRI, M. Recent trends in the pyrolysis of non degradable waste plastics. *ChemistryOpen* 2021, v.10, p.1202–1226. Disponível em: doi.org/10.1002/open.202100184. Acesso em: 26 out. 2023.

GONÇALVES, C. K. Pirólise e combustão de resíduos plásticos. Dissertação de Mestrado (Engenharia de Materiais) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo/SP, 2007.

MONTEIRO, Alessandra da Rocha D. Contribuição da reciclagem química de resíduos plásticos. Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em 40 Engenharia Química na Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro/RJ, 2018.

VARGAS, Julia G M.et al. Microplásticos: uso na indústria cosmética e impactos no ambiente aquático. *Quim. Nova*, Vol. 45, No. 6, 705-711, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170870>. Acesso em: 09 dez. 2023.