

12º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Produção de combustível sustentável a partir da pirólise catalítica de filme laminado de polietileno utilizando uma argila pilarizada

AUTORES:

Emily Chayane Costa dos Santos^{1,2}, Edyjanleide Rodrigues da Silva^{2,3}, José Luiz Francisco Alves^{2,3}, Júlio de Andrade Oliveira Marques^{2,4}, Dulce Maria de Araújo Melo^{2,5}, Renata Martins Braga^{2,3,4,6},

INSTITUIÇÃO:

¹DEQ, UFRN; ²LABTAM, NUPPRAR, UFRN; ³PPGEQ, UFRN; ⁴PPGCFL, UFRN; ⁵IQ, UFRN; ⁶EAJ, UFRN

PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEL SUSTENTÁVEL A PARTIR DA PIRÓLISE CATALÍTICA DE FILME LAMINADO DE POLIETILENO UTILIZANDO UMA ARGILA PILARIZADA

Resumo

A versatilidade e o baixo custo do plástico são fundamentais em várias aplicações. No entanto, sua durabilidade estende seu tempo de decomposição. A conversão de resíduos plásticos em combustível alternativo integra-se ao conceito de economia circular e promove a sustentabilidade, oferecendo uma solução eficiente para a gestão de resíduos e transformando um passivo ambiental em uma fonte de energia acessível. Dentre os métodos inovadores para reciclagem de resíduos plásticos, a pirólise catalítica destaca-se pela capacidade de converter resíduos plásticos em um combustível alternativo. Este estudo teve como objetivo investigar o potencial de produção de um combustível sustentável na faixa do diesel, utilizando uma argila pilarizada como catalisador na pirólise flash. Um micro-pirolisador acoplado a um cromatógrafo gasoso e a um espectrômetro de massas, operando a 500 °C, foi utilizado para conduzir experimentos de pirólise, tanto na ausência quanto na presença de argila pilarizada, a fim de avaliar sua atividade catalítica. Os resultados obtidos com o uso da argila Bentonita pilarizada com ferro (PILL-BENT) mostram uma melhoria significativa em comparação com a pirólise com a Bentonita natural (NAT-BENT). A produção de hidrocarbonetos na faixa da gasolina (C_5 - C_{12}) atingiu 23,26%, enquanto na pirólise com a NAT-BENT, a produção foi de 16,75%. Isso representa um aumento de aproximadamente 6,51% na produção de hidrocarbonetos com o uso da PILL-BENT. Além disso, a produção de compostos aromáticos com a PILL-BENT foi de 21,43%, em comparação com apenas 0,93% na pirólise com a NAT-BENT. Isso é um aumento expressivo de aproximadamente 20,5% na produção de compostos aromáticos. Esses resultados destacam o potencial da PILL-BENT em melhorar a eficiência da produção de hidrocarbonetos e compostos aromáticos. Portanto, esses resultados não apenas reforçam a viabilidade da pirólise catalítica como uma solução sustentável para a gestão de resíduos plásticos, mas também sublinham seu potencial para integrar-se à economia circular, promovendo o desenvolvimento sustentável. Essa abordagem apoia o ODS 7, que visa garantir acesso sustentável e moderno à energia. A conversão de resíduos plásticos em combustível alternativo reduz o impacto ambiental e utiliza recursos disponíveis, promovendo um futuro mais sustentável.

Palavras-chave: combustível alternativo, argila pilarizada, reciclagem de resíduos, pirólise flash.

Abstract

The versatility and low cost of plastics are fundamental in various applications. However, their durability extends their decomposition time. The conversion of plastic waste into alternative fuel aligns with the concept of a circular economy and promotes sustainability, offering an efficient solution for waste management and transforming an environmental liability into an accessible energy source. Among innovative methods for plastic waste recycling, catalytic pyrolysis stands out for its ability to convert plastic waste into alternative fuel. This study aimed to investigate the potential for producing a sustainable fuel within the diesel range using pillared clay as a catalyst in flash pyrolysis. A micro-pyrolyzer coupled with a gas chromatograph and a mass spectrometer, operating at 500 °C, was used to conduct pyrolysis experiments both in the absence and presence of pillared clay to assess its catalytic activity. The results obtained with the use of pillared Bentonite clay with iron (PILL-BENT) show a significant improvement compared to pyrolysis with natural Bentonite (NAT-BENT). Hydrocarbon production in the gasoline range (C_5 - C_{12}) reached 23.26%, while with

NAT-BENT, the production was 16.75%. This represents an approximate increase of 6.51% in hydrocarbon production with the use of PILL-BENT. Additionally, the production of aromatic compounds with PILL-BENT was 21.43%, compared to only 0.93% with NAT-BENT. This is a significant increase of approximately 20.5% in aromatic compound production. These results highlight the potential of PILL-BENT to improve the efficiency of hydrocarbon and aromatic compound production. Therefore, these results not only reinforce the feasibility of catalytic pyrolysis as a sustainable solution for plastic waste management but also underscore its potential to integrate into the circular economy, promoting sustainable development. This approach supports SDG 7, which aims to ensure sustainable and modern energy access. The conversion of plastic waste into alternative fuel reduces environmental impact and utilizes available resources, promoting a more sustainable future.

Keywords: alternative fuel, pillared clay, plastic waste recycling, flash pyrolysis.

1. Introdução

O consumo de plásticos é uma questão de grande complexidade, devido à sua ampla utilização e aos impactos ambientais associados. Embora os plásticos tenham revolucionado o mundo moderno por sua versatilidade e custo-benefício, sua durabilidade representa um desafio ambiental significativo. O plástico pode levar centenas de anos para se decompor, acumulando-se em oceanos, rios e paisagens naturais, degradando ambientes e ameaçando a vida marinha e os ecossistemas (Montagner et al., 2021; Gonçalves-Dias et al., 2023; Hespanholo, 2023). A produção de plásticos também está intimamente ligada à indústria de combustíveis fósseis, contribuindo para as emissões de gases de efeito estufa e o aquecimento global (Geyer et al., 2017). O descarte inadequado e a falta de infraestrutura para reciclagem intensificam a crise de resíduos, que é global em sua magnitude (Atlas do Plástico, 2020).

Desde o início da fabricação em massa de plásticos na década de 1950, a produção mundial desses materiais representa cerca de 60% do plástico fabricado, com o Brasil, um dos principais produtores da América Latina, atingindo 11,4 milhões de toneladas em 2019 (CIEL et al., 2019; Geyer et al., 2017). Dentre os plásticos, o polietileno (PE) é amplamente utilizado e classificado em diferentes densidades: Polietileno de baixa densidade (LDPE), Polietileno de alta densidade (HDPE) e Polietileno linear de baixa densidade (LLDPE) (Macedo et al., 2020). Nesse contexto, a pirólise catalítica se destaca como uma técnica promissora para o tratamento desses resíduos, oferecendo vantagens em termos de eficiência energética e menor poluição em comparação com a reciclagem mecânica (Fivga & Dimitriou, 2020). A decomposição térmica do PE em um ambiente anaeróbico pode gerar hidrocarbonetos leves, que podem ser utilizados como fonte de energia (Peng et al., 2022).

O uso de catalisadores, como as argilas, tem ganhado destaque na pirólise catalítica. A argila bentonita, devido ao seu baixo custo e propriedades favoráveis, é um exemplo de catalisador eficiente. Modificações, como a pilarização com ferro, aumentam a área superficial e a estabilidade térmica das argilas, melhorando sua eficácia na produção de hidrocarbonetos alifáticos (Bricero et al., 2020; Carniel et al., 2018; Serra et al., 2023; Martínez et al., 2021).

Em razão disto, este estudo visa investigar a aplicação da pirólise catalítica a resíduos de filmes laminados de polietileno, com o objetivo de gerar biocombustíveis sustentáveis e de alto valor agregado. Os objetivos incluem sintetizar e caracterizar catalisadores, realizar a pirólise dos resíduos plásticos e estudar o efeito da temperatura no desempenho do catalisador.

2. Materiais e Metodologia

2.1 Materiais

Amostras padronizadas de embalagens flexíveis de polietileno laminado foram coletadas, apresentando dimensões de 40 x 40 mm em formato circular, com aproximadamente 0,6 cm de diâmetro. O filme laminado de polietileno incluía diversas categorias de densidade: polietileno de baixa densidade (LDPE), polietileno de alta densidade (HDPE) e polietileno linear de baixa densidade (LLDPE). As amostras foram obtidas diretamente de uma indústria especializada em produtos laminados, localizada em Parnamirim, RN. Durante a fase de pirólise catalítica, utilizou-se a argila bentonita (Sigma) como catalisador, tanto em seu estado natural quanto pilarizada com ferro.

2.2 Caracterização do Filme Laminado de Polietileno

Inicialmente, foram pesados aproximadamente 10 mg da amostra do filme laminado de polietileno em uma balança analítica de precisão. Esse material foi colocado em um cadinho de alumina, previamente limpo e selecionado. A amostra foi então analisada em um analisador termogravimétrico modelo SDT 650 (TA Instruments, New Castle, EUA), calibrado segundo as especificações do fabricante. O aquecimento ocorreu sob uma atmosfera de nitrogênio de alta pureza (99,997%) a uma taxa de 10 °C min⁻¹, com fluxo constante de 50 mL min⁻¹, até atingir 900 °C para observar a perda de massa em função da temperatura. As variações de massa foram registradas e analisadas para identificar pontos de perda de massa significativos e possíveis transições de fase ou eventos térmicos relevantes. Os experimentos foram realizados uma vez e os valores médios calculados para a análise imediata, mantendo as condições experimentais constantes para reduzir variabilidades externas.

Além disso, foram realizadas análises dos teores de cinzas e voláteis utilizando um forno tipo mufla, seguindo as normas ASTM E871-82, ASTM E872-82 e ASTM E870-82. O conteúdo mineral foi avaliado a 600 °C por 3 h, e os vapores liberados foram analisados a 750 °C por 7 min. O teor de carbono fixo foi calculado com base nos resultados das análises de cinzas e voláteis, por diferença centesimal. Foi analisado o poder calorífico utilizando uma bomba calorimétrica modelo 6400 (Parr). Já na análise elementar (Carbono, Hidrogênio, Nitrogênio e Enxofre) da amostra, ocorreu utilizado o analisador da marca Elementar modelo Vario Macro Cube.

A pirólise rápida da amostra foi conduzida no pirolisador 5200 HPR da CDS Analytical, acoplado a um cromatógrafo a gás GC-MS (CP 3900 VARIAN) com detecção por espectrometria de massa (Saturn 2100T VARIAN). A amostra foi aquecida a 550 °C e 650 °C para estudar a degradação do material laminado e os produtos resultantes. A temperatura ideal foi selecionada e os voláteis produzidos foram transportados por nitrogênio e analisados em uma coluna de cromatografia VS de 30m x 0,25 mm x 0,25 µm, com temperatura inicial de 40 °C por 2 min. (SILVA, L. N. R, 2023)

2.3 Processo de Pilarização da Argila

A preparação da solução pilarizante de ferro seguiu os procedimentos descritos por Yuan et al. (2006). Inicialmente, carbonato de sódio (Na₂CO₃) foi adicionado de forma gradual a uma solução aquosa de nitrato de ferro (III) Fe(NO₃)₃ 0,2 M, sob agitação vigorosa a aproximadamente 1100 rotações por minuto. A quantidade de base adicionada foi ajustada para alcançar uma razão molar OH/Fe de 0,5. A solução translúcida resultante foi então envelhecida sob agitação por 24 horas à temperatura ambiente antes de ser incorporada à dispersão de bentonita.

Para o processo de pilarização da argila, 2 g de bentonita purificada foram dispersos em 100 ml de água destilada, sob agitação contínua, por 2 h. Em seguida, a solução pilarizante de ferro foi adicionada gota a gota à suspensão de argila vigorosamente agitada, mantida em banho-maria a 60 °C. Após a adição da solução pilarizante, a mistura reacional foi agitada e amadurecida por 20 h à temperatura ambiente. Posteriormente, a mistura foi submetida a centrifugação e lavada 12 vezes por meio de sucessivas agitações e centrifugação com água deionizada. O produto obtido foi seco em estufa a 105 °C por 16 h e posteriormente macerado para futuras caracterizações.

2.4 Caracterização da argila Bentonita

A análise foi realizada utilizando três técnicas principais: Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Difração de Raios X (DRX) e Fluorescência de Raios X (FRX). Para o MEV, utilizou-se um microscópio eletrônico de varredura modelo Quanta 200F da FEI Company. Este equipamento emprega um feixe de elétrons altamente focalizado para interagir com a superfície das amostras, permitindo a análise comparativa entre argila natural e argila pilarizada. No DRX a análise foi conduzida com um difratômetro modelo D8 Advance da Bruker, tanto em temperatura ambiente quanto em estufa a aproximadamente 60°C. A fonte de raios X foi um ânodo de cobre (Cu-K α), emitindo radiação com comprimento de onda de 1,54 Å. A análise revelou uma estrutura lamelar da bentonita, evidenciada pelos picos de difração. Através do FRX, a composição química da bentonita foi analisada utilizando 200 mg da amostra no espectrômetro EDX-820 da (Shimadzu). Este método permitiu a determinação dos elementos químicos presentes na bentonita. Juntas, essas técnicas forneceram uma compreensão abrangente das características estruturais e composição química da bentonita e suas variantes.

2.5 Procedimento para Pirólise Analítica – Cromatografia Gasosa Acoplada à Espectrometria de Massas (Py-GC/MS)

Foi realizada a pirólise *flash* de amostras de laminado de polietileno utilizando o pirolisador 5200 HPR da CDS Analytical, acoplado a um sistema de cromatografia a gás com espectrometria de massa (GC-MS) modelo CP 3900 VARIAN e detector Saturn 2100T VARIAN. A amostra, composta por aproximadamente 2 mg de laminado de polietileno, foi aquecida a 500 °C em um tubo de quartzo para investigar sua degradação e os produtos gerados.

Os compostos voláteis foram transportados por nitrogênio e separados usando uma coluna de cromatografia VS (30 m x 0,25 mm x 0,25 μ m), inicialmente mantida a 40 °C por 2 minutos. Na pirólise catalítica, os produtos voláteis foram direcionados a um leito catalítico aquecido a 500 °C, contendo 10 mg de argila. Estes produtos foram coletados em uma armadilha Tenax para análise.

A análise por GC-MS permitiu a identificação e quantificação dos compostos, caracterizando a estrutura e composição dos materiais e produtos da pirólise. Investigou-se o uso de argilas como catalisadores, comparando a Bentonita pilarizada com ferro à Bentonita natural, destacando a superioridade da pilarizada na conversão de compostos orgânicos em produtos de valor agregado. A metodologia adotada foi fundamental para compreender a eficiência dos catalisadores na pirólise de polietileno laminado EVOH.

Resultados e Discussão

3.1 Filme Laminado de Polietileno

A análise do polietileno laminado apresentou um teor de cinzas de $2,35 \pm 0,05\%$. Essa característica contribui para uma conversão mais eficiente em vapores líquidos durante o processo térmico, com a combustão. Menos cinzas resultam em menos resíduos sólidos e um impacto ambiental reduzido. O teor de voláteis foi de $97,45 \pm 0,05\%$, indicando uma eficiente conversão do material em vapores e produtos líquidos. Com apenas 0,19% de carbono fixo, sugere-se uma alta eficiência na produção de combustíveis. (SILVA, L. N. R., 2023)

O Poder Calorífico Inferior (PCI) do polietileno laminado foi estimado em 42,5 MJ/kg, confirmando sua eficiência como combustível. Os valores do PCI do polietileno laminado são competitivos com combustíveis líquidos como gasolina (43,5 MJ/kg) e óleo diesel (42,3 MJ/kg), sendo superior ao etanol (26,4 MJ/kg) e ao gás natural. (36,8 MJ/kg) A pirólise do polietileno laminado a 650 °C produz predominantemente hidrocarbonetos, componentes essenciais de combustíveis como diesel, gasolina e

querosene, indicando um elevado potencial energético. A análise dos elementos CHNS revelou que o Carbono (C) 85% a 87% Hidrogênio. Os percentuais de carbono e hidrogênio na pirólise do polietileno laminado são essenciais para determinar a qualidade e o potencial energético dos combustíveis, contribuindo para a eficiência na produção e a redução de resíduos plásticos. (H)14% a 15%, Nitrogênio (N) menos de 0,1%, Enxofre (S) Menos de 0,01%. Os percentuais baixos de nitrogênio (N) e enxofre (S) evidenciam que a pirólise não apenas gera combustíveis de qualidade, mas também contribui para a sustentabilidade ao minimizar a liberação de compostos nocivos. Os resultados demonstram que a pirólise de resíduos de filmes laminados de polietileno é eficaz para a produção de biocombustíveis sustentáveis, convertendo resíduos em uma fonte potencial de energia.

A análise termogravimétrica de um filme laminado de polietileno foi realizada para estudar suas características de decomposição térmica em atmosfera inerte, simulando condições de pirólise. O gráfico apresentado na Figura 1 mostra os resultados da análise TG e DTG da amostra. A curva TG indica que o material permanece estável térmica até cerca de 350 °C, sem perda significativa de massa. Entre 350 °C e 450 °C, ocorre uma perda gradual de massa, nesse intervalo de temperatura, a amostra não apresenta uma perda significativa de massa até atingir cerca de 350 °C, onde se inicia uma decomposição mais lenta e gradual. O principal evento de decomposição é abrupto entre 450 °C e 500 °C, evidenciado por uma queda acentuada na curva TG e um pico correspondente na curva DTG, com a taxa máxima de decomposição em torno de 480 °C. Após 500 °C, a amostra apresenta nova estabilidade térmica.

A análise imediata reporta um teor de cinzas de 2,35%, enquanto a curva TG sugere um teor de cinzas menor, próximo de 1,87%. Essa discrepância indica que os dois métodos produziram resultados diferentes, possivelmente devido a variações no material ou nas condições experimentais. Essas informações são importantes para aplicações industriais envolvendo a transformação térmica de polímeros como o polietileno laminado EVOH.

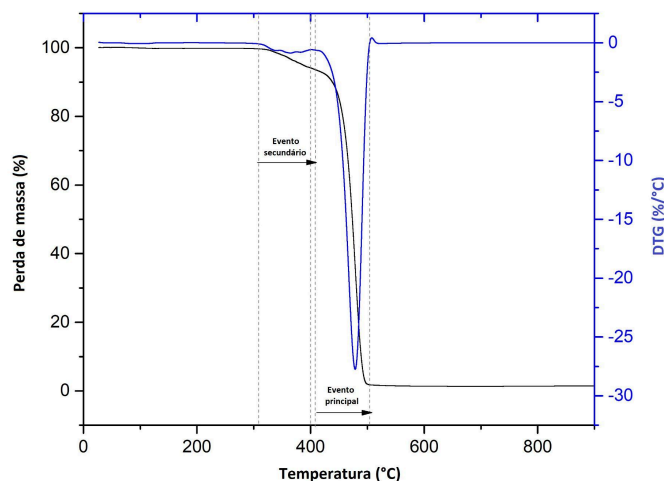


Figura 1. Curvas de perda de massa (TG) e derivada de primeira ordem de perda de massa (DTG) em função da temperatura para filme laminado de polietileno.

3.2 MEV da argila Bentonita

A análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das imagens da bentonita Sigma e da bentonita pilarizada com ferro revela diferenças notáveis. Na Figura 2, observamos partículas irregulares e aglomeradas, com uma superfície rugosa, indicando uma alta área de superfície específica, embora com uma estrutura menos definida. Em contraste, a Figura 3 mostra partículas mais definidas e uma maior aglomeração. A superfície destas partículas é ainda mais rugosa, sugerindo uma

área de superfície maior e uma estrutura mais complexa.

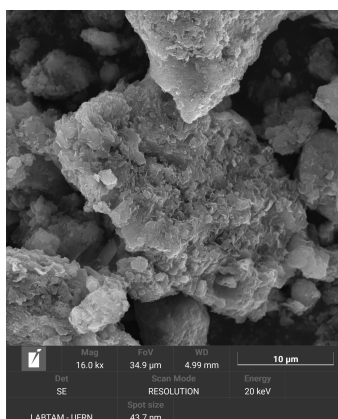


Figura 2. Análise por MEV da bentonita Sigma.

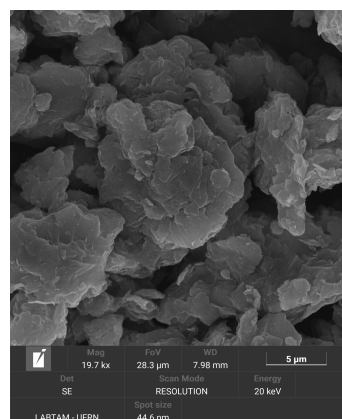


Figura 3. Análise por MEV da bentonita Pilarizada.

3.3 Dados de DRX das amostras de bentonita

A análise dos difratogramas de raios-X (DRX) apresentados na Figura 4 revela informações importantes sobre a pilarização da bentonita. Observamos inicialmente os picos basais (d001) em ambos os difratogramas. No difratograma superior (linha azul), o pico basal aparece a 15,04 Å, enquanto no difratograma inferior (linha preta), o pico basal está a 14,09 Å. Esse deslocamento do pico basal indica uma expansão do espaçamento interplanar, característica da pilarização.

A pilarização é confirmada pela mudança no espaçamento interplanar de 14,09 Å para 15,04 Å, evidenciando que a estrutura foi expandida devido à introdução de pilares. A comparação dos perfis dos picos nos dois difratogramas mostra que os picos no difratograma superior são mais amplos e menos definidos, sugerindo uma nova organização estrutural causada pela pilarização. Picos mais amplos e de menor intensidade indicam que a inserção dos pilares resultou em uma estrutura intercalada.

Portanto, a análise dos difratogramas na imagem confirma que a amostra correspondente ao difratograma superior foi pilarizada, evidenciado pelo aumento do espaçamento interplanar e pelas mudanças na forma e intensidade dos picos. Esses sinais são indicativos claros da modificação estrutural decorrente da introdução de pilares na bentonita.

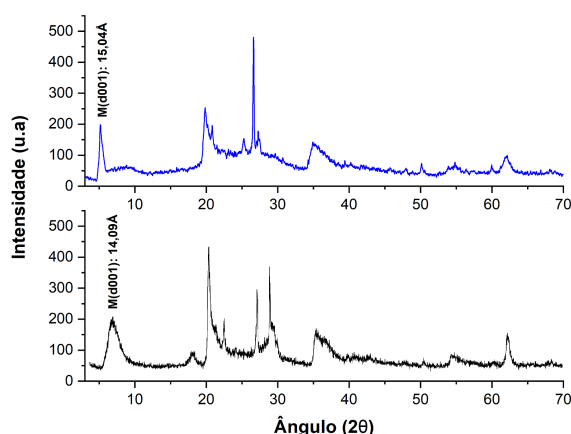


Figura 4. dados de DRX da argila pilarizada (azul) e bentonita natural (preto)

3.3 Dados do FRX das Amostras de Bentonita.

Os resultados da análise FRX da amostra Bentonita sigma são apresentados na Tabela 1. Esta amostra exibe uma elevada concentração de SiO₂ (51,744%) e Al₂O₃ (34,980%), elementos típicos de argilas bentoníticas (Ferreira et al., 2021). A presença de Fe₂O₃ (9,071%) indica a existência de óxidos de ferro que podem influenciar as propriedades adsorventes e catalíticas da argila (Pereira et al., 2018). A concentração de outros óxidos como K₂O, CaO e TiO₂, em proporções menores, sugere a presença de minerais adicionais que podem afetar positivamente as propriedades físicas e químicas da amostra (Costa & Lima, 2022). Os resultados da amostra Bentonita pilarizada, apresentados na Tabela 2, revelam uma predominância de Fe₂O₃ (81,784%). A concentração de SiO₂ é significativamente inferior (16,707%) em comparação com a amostra "Bentonita sigma", evidenciando uma composição mineralógica substancialmente diferente (Silva et al., 2020).

composição química	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Outros
porcentagem (%)	51.744	34.980	9.071	2.311	1.604	0.111	0,15

Tabela 1. dados FRX da argila Bentonita sigma

composição química	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	K ₂ O	SrO	Outros
porcentagem (%)	81.784	16.707	0.882	0.564	0,29	0,034

Tabela 2. dados FRX da argila Bentonita Pilarizada

3.5 Pirólise Analítica – Cromatografia Gasosa Acoplada à Espectrometria de Massas (Py-GC/MS)

A pirólise conduzida com bentonita pilarizada com ferro (PILL-BENT) mostrou uma produção significativamente maior de hidrocarbonetos na faixa da gasolina (C₅-C₁₂), conforme ilustrado na Figura 6. Comparativamente, PILL-BENT alcançou 23,26% de produção de hidrocarbonetos, contra 16,75% com bentonita natural (NAT-BENT). Esse aumento pode ser atribuído à eficácia da pilarização, que melhora a superfície específica e a dispersão dos sítios ativos, facilitando a quebra de cadeias carbônicas. A pilarização com ferro aumenta a estabilidade térmica e química e adiciona propriedades catalíticas à bentonita. Isso torna a bentonita pilarizada mais eficaz para aplicações em catálise, enquanto a bentonita Sigma é adequada para usos gerais que não requerem esses aprimoramentos.

Ademais, a Figura 5 também destaca que a PILL-BENT elevou a produção de compostos aromáticos para 21,43%, um salto significativo em relação aos 0,93% observados com NAT-BENT. Esse resultado evidencia a capacidade da bentonita modificada de favorecer a formação de compostos com alto valor energético, importantes para a performance de motores. Contudo, é crucial gerenciar a presença de compostos oxigenados gerados no processo, que são menos desejáveis devido aos problemas de estabilidade e corrosão que podem causar em motores de combustão interna.

A Figura 5 e os resultados experimentais demonstram que a PILL-BENT não apenas otimiza a produção de hidrocarbonetos e compostos aromáticos, mas também realça seu potencial para aplicações que requerem produtos químicos finos e combustíveis avançados. Este catalisador, ao melhorar a eficiência e a seletividade, pode contribuir para a otimização de processos industriais, reduzindo custos e ampliando a sustentabilidade.

Além disso, a comparação entre pirólises realizadas a 550 °C e 650 °C revelou que a temperatura mais alta produz melhores rendimentos. Portanto, a pilarização da bentonita com ferro emerge claramente como uma estratégia eficaz para melhorar a produção de hidrocarbonetos e compostos aromáticos, como visualizado nas barras comparativas da Figura 5, solidificando seu valor como catalisador na pirólise.

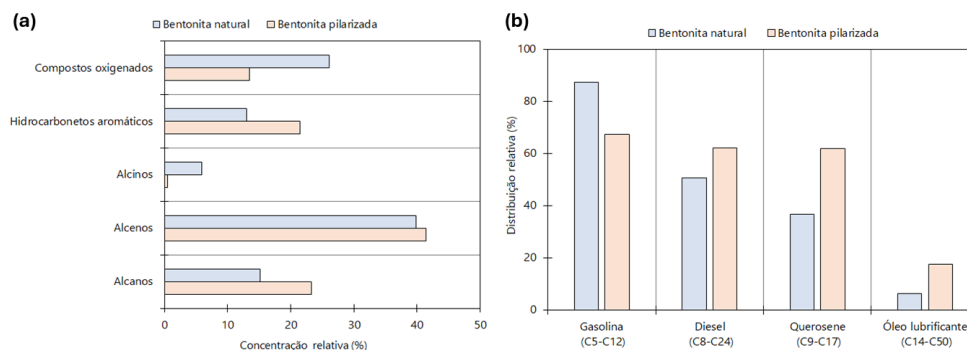


Figura 5. - (a) Produtos obtidos na pirólise e (b) porcentagem das faixas de carbono dos obtidas na pirólise

Conclusão

A pirólise de filmes laminados de polietileno utilizando bentonita pilarizada com ferro (PILL-BENT) se mostrou eficiente na produção de combustíveis sustentáveis, especialmente na faixa da gasolina (C₅-C₁₂), conforme ilustrado na Figura 5. A alta conversão do polietileno laminado, com 97,45% de voláteis e 2,35% de cinzas, destaca seu potencial como matéria-prima para biocombustíveis. A PILL-BENT produziu 23,26% de hidrocarbonetos na faixa da gasolina e 21,43% de compostos aromáticos, superando a bentonita natural. Além de melhorar a eficiência do processo, a PILL-BENT oferece uma solução viável e de baixo custo para o problema ambiental do descarte de filmes plásticos, transformando resíduos em uma fonte valiosa de energia. O estudo confirmou a eficiência do polietileno laminado na pirólise, com melhor rendimento a 650 °C. Em síntese, essa abordagem apresenta-se como uma solução econômica, eficiente e sustentável para a produção de combustíveis a partir de resíduos plásticos, contribuindo para a sustentabilidade e a economia circular.

Agradecimentos

Agradeço ao CNPq, ao Labtam e à UFRN pelo apoio fundamental na pesquisa, que foi essencial para o avanço do conhecimento e o desenvolvimento de projetos inovadores.

Referências

1. SILVA, L. N. R.; SILVA, E. R.; BRAGA, R. M.; MELO, D. M. A. Produção de biocombustíveis a partir da pirólise de resíduos de filmes laminados. In: **IV SIMPÓSIO DE PETRÓLEO E GÁS DO ONSHORE BRASILEIRO**, 2023, Mossoró: UFERSA, 2023.
2. ATLAS DO PLÁSTICO. Plastic Atlas. 2020.
3. BRICERO, R.; CARNIEL, A.; MARTÍNEZ, F. Catalysts for pyrolysis of plastics decomposition. 2020.
4. CARNIEL, A.; SERRA, A.; MARTÍNEZ, F. Modification of clays for catalytic pyrolysis. 2018.
5. CIEL et al. Production of plastics and their environmental impact. 2019.

6. FIVGA, A.; DIMITRIOU, I. Catalytic pyrolysis: energy efficiency and environmental impact. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2020.
7. GEYER, R.; JAMBECK, J. R.; LAW, K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, v. 3, n. 7, p. e1700782, 2017.
8. GONÇALVES-DIAS, M.; HESPANHOLO, S. Impact of plastics on the environment. 2023.
9. HESPANHOLO, S. Environmental challenges of plastics. 2023.
10. MACEDO, J.; ALVES, P.; OLIVEIRA, M. Types of polyethylene and their applications. 2020.
11. MONTAGNER, C. et al. Consumption and environmental impact of plastics. 2021.
12. PENG, L.; LIU, Y.; WANG, Z. Thermal decomposition of polyethylene: Generation of light hydrocarbons. *Energy Conversion and Management*, 2022.
13. SERRA, A.; MARTÍNEZ, F.; BRICERO, R. Pillarization of clays with iron. 2023.
14. MARTÍNEZ, F.; BRICERO, R.; SERRA, A. Use of catalysts in the pyrolysis of plastics. 2021.
15. YUAN, P.; THOMAS, S. P.; RAY, M. A.; YANG, D.; YU, J. Preparation of iron pillared clay and its application for catalytic decomposition of plastics. *Journal of Environmental Management*, v. 81, n. 1, p. 93-101, 2006.
16. FERREIRA, A. B. et al. Chemical composition of sigma bentonite determined by X-ray fluorescence. *Química Nova*, São Paulo, v. 44, n. 5, p. 789-795, 2021.
17. PEREIRA, C. D. et al. Iron oxides in bentonite clays: influence on adsorptive and catalytic properties. *Revista Brasileira de Ciências da Terra*, Rio de Janeiro, v. 48, n. 3, p. 421-434, 2018.
18. COSTA, E. M.; LIMA, J. A. Presence of other oxides in bentonites: impacts on physical and chemical properties. *Revista de Química Aplicada*, São Paulo, v. 37, n. 2, p. 215-228, 2022.
19. SILVA, R. A. et al. Mineralogical composition of pillared bentonite: study by X-ray fluorescence. *Química & Meio Ambiente*, Salvador, v. 29, n. 3, p. 315-328, 2020.