

NANOCATALISADORES NO ENSINO DE QUÍMICA: UMA ABORDAGEM PARA DEGRADAÇÃO SUSTENTAVEL DO PEAD

Sulene A. Araújo¹; Marcelo E. Rocha¹; Geovane S. Oliveira¹; Brunielle S. Jesus¹; Ediene Ferreira Melo¹; Wallace Torres e Silva¹

¹Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia – UESB – Campus de Jequié/Ba – Av. José Moreira Sobrinho S/N

Palavras-Chave: Sustentabilidade, redução de resíduos, polímeros

Introdução

O ensino de Química desempenha um papel crucial na formação de futuros profissionais e na conscientização sobre questões ambientais, especialmente em tempos de crescente preocupação com a sustentabilidade. Uma das áreas promissoras dentro desse contexto é o estudo dos nanocatalisadores e sua aplicação na degradação catalítica do Polietileno de Alta Densidade (PEAD), um polímero amplamente utilizado e de difícil decomposição. Os nanocatalisadores, devido às suas propriedades únicas, como alta área superficial e maior reatividade, têm se mostrado eficazes na aceleração de reações químicas que envolvem a quebra de polímeros como o PEAD. Esse processo de degradação catalítica pode ser uma solução inovadora para o problema do acúmulo de plásticos no meio ambiente, um dos grandes desafios da atualidade. Integrar o estudo de nanocatalisadores ao currículo de Química não apenas enriquece o conhecimento dos alunos em áreas como catálise, química de materiais e nanotecnologia, mas também os sensibiliza sobre a importância da pesquisa e desenvolvimento de tecnologias sustentáveis. Ao abordar esse tema, é possível associar conteúdos teóricos com práticas laboratoriais, onde os estudantes poderiam realizar experimentos para observar o impacto de diferentes nanocatalisadores na degradação do PEAD.

Além disso, essa abordagem permite a discussão de temas interdisciplinares, como a química ambiental, a engenharia de materiais e as políticas públicas voltadas para a sustentabilidade. Os alunos podem ser incentivados a desenvolver projetos de pesquisa que explorem novas maneiras de utilizar nanocatalisadores, contribuindo para a redução do impacto ambiental causado pelos plásticos. Portanto, ao associar o ensino de Química com a aplicação de nanocatalisadores na degradação do PEAD, abre-se uma nova perspectiva para a sustentabilidade, preparando os estudantes para enfrentar os desafios ambientais do futuro e incentivando o desenvolvimento de soluções inovadoras.

O objetivo principal deste estudo foi investigar a degradação catalítica do Polietileno de Alta Densidade (PEAD) utilizando o catalisador nanoestruturado AIMCM-41, empregando as técnicas de termogravimetria e pirólise acoplada à cromatografia gasosa. O AIMCM-41 foi sintetizado a partir de um hidrogel formulado com brometo de cetiltrimetilamônio (CTMABr) como agente estruturante. A síntese envolveu ainda o uso de pseudoboemita, sílica, silicato de sódio e água destilada como solvente, sendo a composição molar ajustada para 1 mol de CTMABr, 4 mols de SiO₂, 0,04 mol de Al₂O₃, 1 mol de Na₂O e 200 mols de H₂O. A escolha do AIMCM-41 deve-se às suas propriedades únicas de estrutura porosa e alta área superficial, características essenciais para a interação eficaz com o PEAD durante o processo de

degradação. O AIMCM-41 possui canais bem definidos e elevada capacidade de adsorção, facilitando a penetração do PEAD em seus poros, o que, por sua vez, potencializa a catalise da degradação do polímero. Essas características fazem do AIMCM-41 um material promissor para aplicações em processos de degradação de plásticos, uma vez que a eficiência e a rapidez do processo catalítico são diretamente influenciadas pela estrutura do catalisador [1-2].

A degradação catalítica de plásticos como o PEAD é uma questão de crescente importância ambiental, considerando a persistência e os impactos ecológicos causados pelo acúmulo de resíduos plásticos. O desenvolvimento de métodos eficazes para a decomposição desses polímeros é fundamental para a redução do impacto ambiental e para a promoção de práticas de gestão de resíduos mais sustentáveis. A utilização de catalisadores nanoestruturados surge como uma abordagem inovadora e eficiente, permitindo uma degradação mais rápida e completa dos resíduos plásticos. Neste estudo, a eficiência do AIMCM-41 foi avaliada por meio de termogravimetria, técnica que permitiu monitorar a perda de massa do PEAD ao longo do tempo, bem como analisar os produtos de degradação formados. A pirólise acoplada à cromatografia gasosa foi empregada para identificar e quantificar os produtos gasosos gerados durante o processo de degradação, proporcionando uma visão detalhada sobre os mecanismos de decomposição e as principais espécies químicas envolvidas [3] .

A relevância deste trabalho está profundamente alinhada com a necessidade global de desenvolver soluções tecnológicas para enfrentar os desafios ambientais relacionados ao descarte inadequado de plásticos. As implicações práticas dos resultados obtidos podem influenciar de maneira significativa a engenharia de materiais e o desenvolvimento de novas tecnologias voltadas à reciclagem e ao tratamento de plásticos. A aplicação de métodos avançados de catalise para a degradação de polímeros representa um campo de pesquisa vital, que promete contribuir para a construção de um futuro mais sustentável e ecologicamente equilibrado.

Material e Métodos

Os produtos químicos utilizados na síntese do AIMCM-41 incluíram sílica regular (Aldrich Chemical Co.), solução de silicato de sódio com 27% de SiO₂ e 14% de NaOH (Aldrich Chemical Co.), pseudoboemita como fonte de alumínio, e brometo de cetiltrimetilamônio (CTMABr). A forma ácida do material foi obtida por troca iônica do AIMCM-41 com uma solução 0,1 mol L⁻¹ de cloreto de amônio, realizada a 80 °C sob refluxo por 6 horas. Após a troca, o material foi filtrado, seco e calcinado a 550 °C sob fluxo de nitrogênio a 100 mL min⁻¹ por 2 horas. A atividade catalítica do AIMCM-41 na pirólise do PEAD está relacionada aos sítios ácidos presentes na superfície do material [4].

O PEAD, adquirido da empresa Palmann, foi utilizado na forma de pó, previamente homogeneizado em moinho de bolas. O catalisador AIMCM-41 foi misturado ao PEAD em uma concentração de 50% em peso. A degradação térmica do PEAD puro e do AIMCM-41/PEAD foi realizada em uma termobalança TA Instruments 2960, na faixa de temperatura de 30 a 800 °C, sob fluxo de nitrogênio a 60 mL min⁻¹, com taxas de aquecimento de 5, 10 e 20 °C min⁻¹. A amostra de AIMCM-41/PEAD foi então transferida para um microrreator tubular de quartzo, equipado com uma válvula de 3 vias, e aquecida a 600 °C sob atmosfera estática de argônio. O reator foi conectado a um cromatógrafo a gás Shimadzu GC17-A, acoplado a um

espectrômetro de massa QP-5000, e os produtos foram analisados usando uma coluna capilar do tipo Petrocol DH-50.

A síntese do AIMCM-41 foi realizada misturando os reagentes para formar um gel com a seguinte composição molar: 4 SiO₂: 0,04 Al₂O₃: 1,0 Na₂O: 1,0 CTMABr: 200 H₂O (Si/Al = 50). O pH foi ajustado com 1% de ácido acético em solução de etanol. O hidrogel resultante foi colocado em autoclave e submetido a tratamento hidrotérmico a 100 °C por 3 dias, com ajustes diários do pH para 10, utilizando solução de ácido acético a 30%. Para estabilizar a estrutura, acetato de sódio (Carlo Erba) foi adicionado ao produto (relação sal/CTMABr = 3), e o material foi aquecido por mais um dia. O material final foi lavado com uma solução HCl/EtOH a 2% em volume, recuperado por filtração, seco a 100 °C por 2 horas e calcinado a 550 °C sob fluxo de nitrogênio por 1 hora e mais 1 hora em ar, com uma taxa de aquecimento de 2,5 °C/min [4-5].

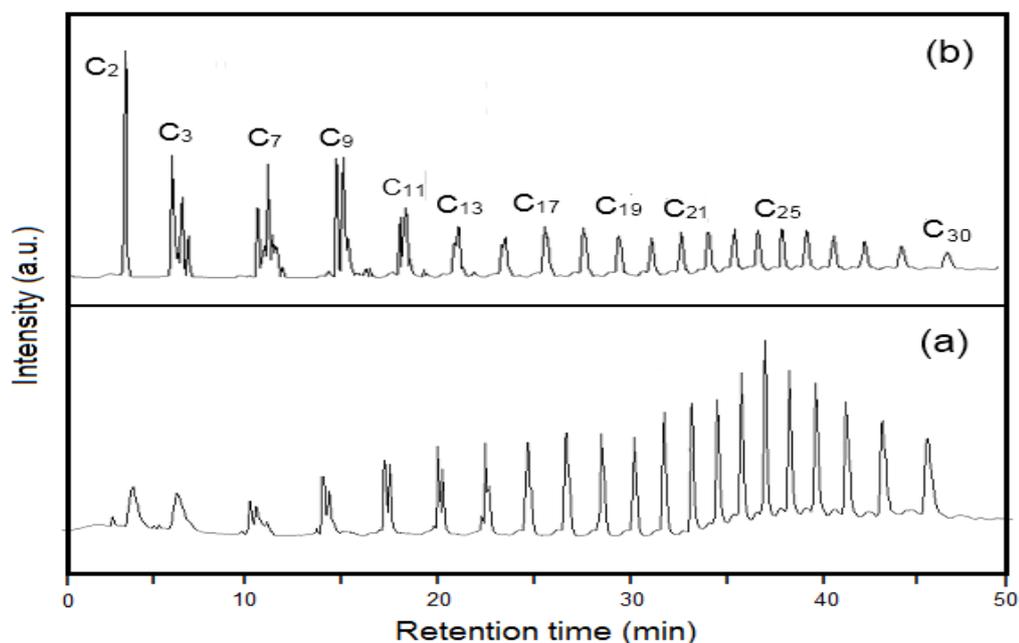
A estrutura típica do MCM-41 foi caracterizada por difração de raios X, espectroscopia no infravermelho, análise de área superficial BET e termogravimetria. A análise TG foi realizada em um equipamento Mettler TGA 851, utilizando nitrogênio como gás carreador, fluindo a 30 mL min⁻¹. A amostra foi aquecida da temperatura ambiente até 800 °C, com uma taxa de aquecimento de 10 °C min⁻¹. Para a amostra de MCM-41 mais bem sintetizada, foram determinados parâmetros relativos à dessorção de água, decomposição do surfactante e decomposição de grupos silanol.

Resultados e Discussão

As propriedades térmicas e a degradação de polímeros, como o Polietileno de Alta Densidade (PEAD), são relativamente bem estabelecidas na literatura. O processo de degradação térmica do PEAD envolve dois tipos principais de reações: combustão polimérica e craqueamento térmico. A combustão, em condições normais, resulta na formação de CO₂ e água, enquanto o craqueamento térmico gera uma variedade de hidrocarbonetos, variando de C₂ a C₃₀.

A aplicação de uma atmosfera inerte, como o argônio, tanto para o PEAD quanto para a mistura MCM-41/PEAD, elimina a presença de oxigênio e, conseqüentemente, inibe as reações de combustão, favorecendo unicamente o craqueamento térmico. A análise por pirólise acoplada à cromatografia gasosa e espectrometria de massas (Py-GC/MS) revelou uma seletividade distinta na produção de hidrocarbonetos: C₃-C₁₃ para a degradação da mistura AIMCM-41/PEAD e C₁₁-C₃₀ para o polímero puro, sem a presença do catalisador. Cromatogramas representativos dessas análises estão apresentados na Figura 1.

Figura 1 – Cromatogramas dos produtos de reação da pirólise do PEAD: (a) sem catalisador; (b) misturado com AIMCM-41.1.



De acordo com os cromatogramas apresentados na Figura 1, a pirólise do Polietileno de Alta Densidade (Figura 1a) resulta na formação de hidrocarbonetos em uma ampla faixa de números de carbono, variando tipicamente de C7 a C30. No entanto, ao adicionar o catalisador AIMCM-41 ao polímero (Figura 1b), observa-se uma produção significativa de hidrocarbonetos nas faixas de C2 e C3 (gás de petróleo liquefeito), C6 a C9 (gasolina) e C11 a C17 (óleo diesel). De maneira geral, os compostos gerados pela pirólise do PEAD incluem parafinas, olefinas e aromáticos, os quais são classificados como C_n, onde "n" corresponde ao número de átomos de carbono.

O catalisador AIMCM-41 demonstrou ser ativo na pirólise do polietileno, sendo considerado um catalisador promissor para esse processo. Propõe-se que, durante a degradação térmica do polímero, as frações de hidrocarbonetos penetrem nos mesoporos do AIMCM-41, onde interagem com os seus sítios ácidos, promovendo o craqueamento de cadeias longas de hidrocarbonetos em hidrocarbonetos de menor peso molecular, tipicamente na faixa de combustíveis leves e destilados médios.

A degradação térmica de polímeros ocorre predominantemente por meio de cisão da cadeia, onde a quebra das ligações de carbono resulta na formação de segmentos contendo radicais livres e em reações de cisão sem cadeia, que envolvem a eliminação de pequenas moléculas e a formação de ligações duplas [5-6]. O mecanismo subjacente é uma cadeia radicalar iniciada por uma cisão aleatória na estrutura do polímero. A reação de β -cisão desses radicais gera olefinas tanto na fase gasosa quanto líquida. A reação de terminação dos radicais ocorre principalmente por meio da combinação, sendo essa reação de 5 a 10 vezes mais provável do que a desproporção [7]

Conclusões

A pirólise do polietileno de alta densidade (HDPE) na presença do catalisador AIMCM-41 resulta na produção de uma variedade de hidrocarbonetos distribuídos em faixas específicas de carbono: C₂-C₄, C₅-C₁₀ e C₁₁-C₁₇, que correspondem, respectivamente, a GLP, gasolina e óleo diesel. Essa distribuição evidencia a ação eficaz do AIMCM-41, onde o processo de pirólise é fortemente influenciado pela combinação do sistema de poros do catalisador com suas propriedades ácidas. O AIMCM-41, sendo um material mesoporoso com uma estrutura altamente ordenada e contendo sítios ácidos proporcionados pela incorporação de alumínio, facilita a quebra das cadeias poliméricas do HDPE, promovendo a formação de produtos mais leves e comercialmente valiosos.

A eficácia do AIMCM-41 como catalisador é ainda corroborada pela significativa redução na energia de ativação necessária para a degradação do HDPE. Estudos realizados utilizando curvas de termogravimetria (TG) em diferentes taxas de aquecimento mostraram que a energia de ativação diminuiu de 270 kJ mol⁻¹ para o HDPE sem catalisador, para 163 kJ mol⁻¹ quando o AIMCM-41 foi introduzido. Essa redução substancial na energia de ativação é um indicativo claro de que o AIMCM-41 não apenas acelera o processo de pirólise, mas também torna a reação mais eficiente energeticamente, permitindo que a degradação do polímero ocorra em condições menos severas e com maior rendimento.

Os sítios ácidos presentes na superfície do AIMCM-41 desempenham um papel crucial nesse processo, atuando como centros ativos que facilitam a quebra das ligações C-C nas cadeias do HDPE. Além disso, a estrutura mesoporosa do AIMCM-41, com seus canais uniformes, garante um contato íntimo entre o polímero e o catalisador, maximizando a interação e, conseqüentemente, a eficiência do processo catalítico. Portanto, o AIMCM-41 se destaca como um excelente catalisador para a pirólise do HDPE, com potencial para aplicações em larga escala na conversão de resíduos plásticos em produtos de maior valor agregado.

Agradecimentos

Agradeço à UESB, ao PROFQUI e à CAPES pelo suporte e contribuições fundamentais para a realização deste trabalho.

Referências

- [1] J. Aguado; D.P. Serrano; M. Escola Ind. Eng. Chem. Res. 2000, 39, 1177-84.
- [2] W.J. Kaminski. Anal. Appl. Pyrol. 1985, 8, 439-48.
- [3] H. Bockhorn; A. Hornung; Hornung U. Combust. Sci. Tech. 1996, 116-117, 129-51.
- [4] J. Brandrup. Macromol. Symp. 1998, 135, 223-35.
- [5] R.J. Ehrig, editor. Plastic recycling. Products and processes. Hanser Publishers; 1992.
- [6] G. Audisio; F. Bertimi; P.L. Beltrame; A. Castelli. Macromol. Symp. 1998, 135, 175-82.
- [7] A.S. Araújo; V.J. Fernandes Jr; G.J.T. Fernandes. Stud. Surf. Sci. Catal. 105, 1997, 194