

Estudo do Óxido de Nióbio como Catalisador na Degradação do Polímero de Alta Densidade (PEAD)

Marcio R. O. de Souza¹; Aruzza M. M. de Araujo²; Antonio A. Souza²; Amanda D. Gondim²; Ana P. A. Guedes¹.

¹Universidade Federal da Paraíba, Núcleo de Pesquisa e Extensão Laboratório de Combustíveis e Materiais, 58051-900, João Pessoa, PB, Brasil. ²Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Instituto de Química, 59078-970, Natal, RN, Brasil.

Palavras-Chave: Degradação termocatalítica, pentóxido de nióbio e energia de ativação.

Introdução

Os polietilenos de alta densidade (PEAD) são amplamente utilizados na sociedade atual, principalmente na fabricação de embalagens de alimentos, produtos de higiene pessoal, produtos de limpeza doméstica e industrial, bem como sacolas plásticas, tornando-se um dos principais responsáveis pela contaminação ambiental. De modo geral, sabe-se que cerca de 50 a 70% do lixo urbano é composto por plásticos (Akubo, Nahil, and Williams 2019), o que confirma a necessidade de tecnologias voltadas para a reciclagem desses materiais.

A Associação Brasileira de Indústrias Plásticas (ABIPLAST) (ABIPLAST, 2020) informa que, no ano de 2020, houve um crescimento superior a 2% na produção da indústria de transformação de plásticos em comparação a 2019. Uma das alternativas para reduzir o acúmulo de lixo plástico é a reciclagem mecânica desses materiais, que podem ser reaproveitados. No entanto, a taxa de reciclagem por meio dessas tecnologias ainda é baixa. Uma alternativa viável é a reciclagem química, que envolve diversas reações químicas, incluindo a despolimerização do plástico (Gama et al. 2020). Esse processo gera líquidos e sólidos que podem ser utilizados como combustíveis e produtos químicos (Kunwar et al. 2016; Miandad et al. 2016).

Em vista disso, a degradação catalítica apresenta-se como uma alternativa viável, no qual possui algumas vantagens em relação à térmica, apresentando mais seletividade dos produtos obtidos, temperaturas mais baixas e com menor gasto de energia para efetuar a pirólise (Silva et al. 2017). Isto porque, quando é utilizado um catalisador, a reação é acelerada, a energia de ativação diminui e o produto é obtido em menor tempo.

Entre vários catalisadores, materiais que utilizam nióbio, como o pentóxido de nióbio (Nb_2O_5), têm ganhado cada vez mais atenção em suas aplicações (Kong et al. 2020; Leal et al. 2019; Xin et al. 2019). Em relação ao Nb_2O_5 , suas propriedades estruturais e ácidas variam conforme os diferentes métodos de preparação, agentes direcionadores de estrutura, temperaturas de calcinação, entre outros (Tagusagawa et al. 2011).

Posto isso, a escolha do sistema catalítico é de fundamental importância durante a degradação química, pois as propriedades texturais, morfológicas e estruturais do catalisador desempenham um papel significativo na produção do produto (Lovás et al. 2017).

Santos et al. (2021) realizaram um estudo termogravimétrico sobre a conversão do polipropileno (PP) na presença de catalisadores mesoporosos AIMCM-48 (com razões Si/Al de 50 e 100), utilizando o método cinético de isoconversão de Vyazovkin. O estudo resultou em energias de ativação médias de 89, 66 e 59 kJ mol⁻¹ para a degradação do PP puro, do PP com AIMCM-48(50) e do PP com AIMCM-48(100), respectivamente, indicando que o AIMCM-48(x) é um catalisador promissor para a degradação do PP e de outros resíduos plásticos. Da mesma forma, Celestino et al. (2022) investigaram uma abordagem tecnológica para a degradação catalítica do polietileno de alta densidade (PEAD) utilizando a zeólita ferrierita na forma ácida (H-FER), que apresenta estrutura ortorrômbica e porosidade bidimensional, dopando-a com óxido de lantânio em diferentes proporções. Os resultados mostraram que a dopagem com 10% de óxido de lantânio foi eficaz, resultando em uma menor energia de ativação e temperaturas máximas semelhantes às observadas com a zeólita H-FER pura. No entanto, a utilização de óxido de nióbio em processos de degradação termocatalítica de polímeros ainda é pouco estudada.

Portanto, neste trabalho será sintetizado óxido de nióbio (OXINb) para a degradação térmica e catalítica do polímero de alta densidade (PEAD), avaliando a cinética dessas degradações utilizando o método OFW e KAS através da análise termogravimétrica (TG), com a finalidade de estimar qualitativamente a energia de ativação, com objetivo de obter catalisadores mais ativos e com menores gastos energéticos para o processo de degradação catalítica do PEAD.

Material e Métodos

Síntese do catalisador

A síntese do ácido nióbico foi realizada inicialmente com a preparação de uma solução de 0,26 mol L⁻¹ de oxalato amoniacal de nióbio (NH₄[NbO(C₂O₄)₂(H₂O)]·3H₂O), à qual foi adicionada, por gotejamento, uma solução de NaOH a 1 mol L⁻¹ (utilizando uma bureta), sob agitação mecânica constante (300 rpm) e a uma temperatura de 65 °C. A adição da solução de NaOH 1 mol L⁻¹ foi realizada até que a mistura atingisse o pH = 7, momento em que ocorreu a formação de um precipitado branco. Em seguida, a mistura foi colocada em uma estufa a 70 °C, onde permaneceu por 72 horas para maturação. Após essa etapa, o sólido foi filtrado, lavado

com água destilada e seco durante 24 horas a 70 °C. Concluída essa etapa, o material obtido foi denominado HNb. Em seguida, foi submetido a um processo de calcinação a uma temperatura de 650 °C durante 24 horas, com base na metodologia de síntese de Kamimura et al. (2018). O material calcinado recebeu a nova denominação de OXINb.

Caracterização do catalisador

A difração de raio-X foi realizada em um difratômetro Bruker (D2 Phaser). Os espectros de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), obtidos na região de 400-4000 cm⁻¹ com resolução de 4 cm⁻¹. A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), foram obtidas utilizando-se uma distância focal (WD) de 14,5 mm, uma tensão entre 10keV e barra de escala 5µm, e capacidade de ampliação de 10.0kx.

Análise termogravimétrica (TG) e estudo cinético

A atividade catalítica dos materiais foi examinada pelo estudo cinético, sendo possível avaliar sua capacidade de conversão nas reações. Para os ensaios, foram utilizados 10% em massa do catalisador misturados ao polímero PEAD, que foram submetidas à análise termogravimétrica utilizando o equipamento da NETZSCH, modelo TG 209 F1 Libra, aplicando as 4 razões de aquecimento de 10, 20, 30 e 40°C/min, variando da temperatura ambiente a 900°C sob o fluxo de nitrogênio (N) a 60 ml/min.

O estudo cinético foi realizando aplicando a metodologia do OFW e KAS, no qual envolve as medições de temperaturas correspondentes a valores fixos em grau de conversão (α) e diferentes taxas de aquecimento (β). O método de OFW e KAS não necessita de informação sobre o mecanismo de reação para calcular a energia de ativação. Desse modo, o modelo OFW (Ozawa 1965) faz uso de uma aproximação matemática (Doyle 1962) que pode ser descrita pela Equação (1).

$$\log(\beta) = -\left(\frac{0,4567Ea}{RT}\right) + \left[\log\left(\frac{AEa}{g(\alpha)R}\right) - 2,315\right] \quad (1)$$

Já o modelo de KAS, também faz o uso de aproximação, sendo apresentada pela Equação (2)(Kissinger 1956).

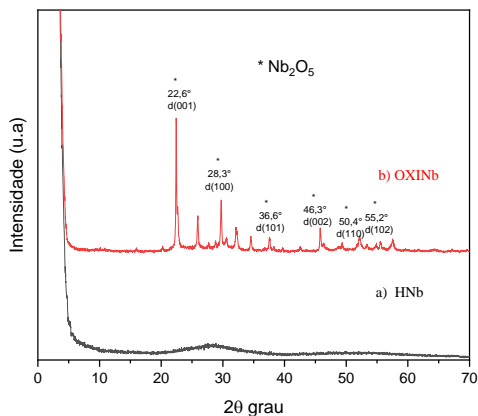
$$\ln \frac{\beta}{T^2} = \ln \frac{AR}{E_a g(\alpha)} \left[1 - \frac{2RT}{E_a}\right] e^{\left[-\frac{E_a}{RT}\right]} \quad (2)$$

Resultados e Discussão

Difratometria de raio-X (DRX), análise química e morfologia.

Os difratogramas de raios-X do HNb e OXINb estão apresentados na Figura 1.

Figura 1: DRX dos materiais: a) HNb ; b) OXINb

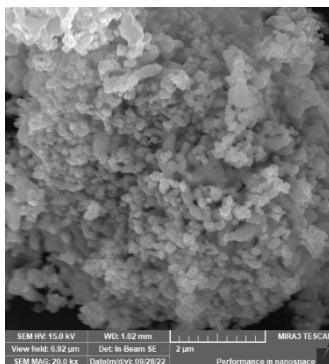


Fonte: Próprio autor

Os resultados mostram picos característicos dos sinais de difração da estrutura cristalina do pentóxido de nióbio (Nb_2O_5), relatados também por alguns autores (Santos et al., 2019; Pai & Fang, 2013; Schaffner et al., 2021; Zakaria et al., 2020). A estrutura do material formado, Figuras 1-b, tem predominância ortorrômbica. Isso ocorre, porque a calcinação realizada a 650°C favorece essa estrutura, conforme descrito na literatura (Ody et al. 2021; Oliveira et al. 2019). Também na Figura 1-a, observa-se que o ácido níobico sintetizado apresentou características amorfas, em concordância com os resultados de Souza et al. (2012).

A imagem da micrografia do OXINb, mostrada na Figuras 2 observa-se um aglomerado de partículas, que pode estar relacionado ao procedimento de síntese a calcinação realizada.

Figura 2: Imagem da micrografia do OXINb

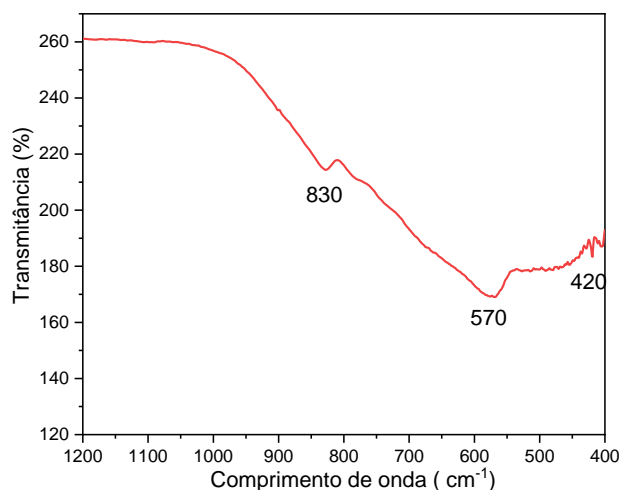


Fonte: Próprio autor.

Espectroscopia na região do Infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

Os espectros de infravermelho na faixa de 4000 a 400 cm^{-1} , correspondente à amostra de OXINb apresentada na Figura 3.

Figura 3: Espectroscopia na região do Infravermelho para os materiais



Fonte: Próprio autor

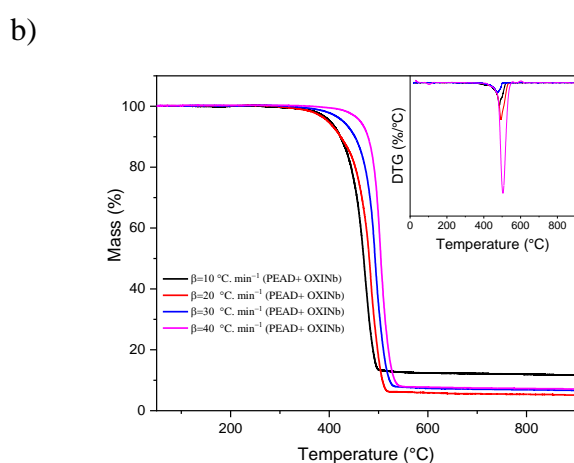
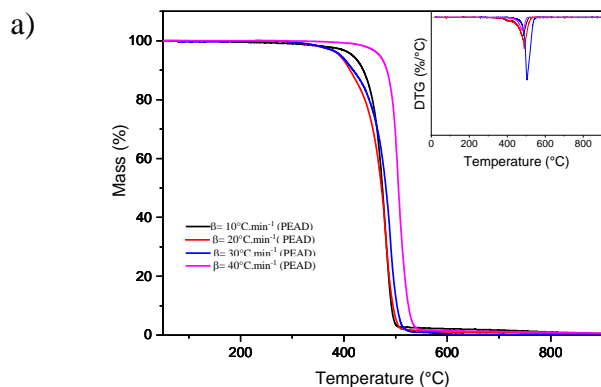
Observa-se a absorção em 570 e 610 cm^{-1} , relacionadas às vibrações angulares do Nb-O-Nb. Entre 800 e 860 cm^{-1} , os picos que aparecem estão associados à estrutura cristalina na forma ortorrômbica, ocasionada pelo óxido de nióbio. As absorções entre 790 e 670 cm^{-1} são alusivas à vibração do grupo M-O, onde M representa o Nb (Esteves et al., 2008). As vibrações angulares de ligação Nb-O estão presentes no espectro entre 460 e 420 cm^{-1} .

As vibrações 460, 453 e 570 cm^{-1} observadas na Figura 3-3 podem também estar relacionadas à interação entre as espécies de Nb na superfície, provavelmente ocorrendo através da formação de ligações Nb-O-Nb (Braga et al., 2007).

Análise Termogravimétrica (TGA) para o PEAD puro e PEAD com catalisadores.

Por meio da análise termogravimétrica (TGA/DTG), foi realizada a avaliação da degradação térmica e catalítica dos seguintes materiais: PEAD e PEAD-OXINb.

Figura 4: a) Curvas TGA/DTG do PEAD, b) Curvas TGA/DTG do PEAD +OXINb



Fonte: Próprio autor.

Observa-se que a degradação termogravimétrica do PEAD, na razão de aquecimento de $10^{\circ}\text{C min}^{-1}$, apresenta temperaturas iniciais e finais de degradação de 446°C e 495°C , respectivamente, conforme ilustrado na Figura 4a. Na Figura 4b, as curvas TGA e DTG do PEAD-OXINb são apresentadas. A análise dos gráficos revela alterações na temperatura inicial e finais de degradação, assim como na decomposição em massa em comparação com o PEAD.

Segundo Caldeira et al. (2017), as curvas termogravimétricas indicam eventos de perda de massa correspondentes ao craqueamento do polímero. A adição do catalisador, de acordo com suas propriedades, pode reduzir a temperatura de degradação do polímero, possibilitando a identificação de mais de um evento de perda de massa. No caso do PEAD-OXINb, observa-se uma única perda de massa, equivalente à do PEAD.

As curvas TGA/DTG de todas as amostras apresentam a mesma tendência, devido às ligações químicas semelhantes em suas estruturas moleculares e ao mecanismo de degradação (Anene et al. 2018). Outros trabalhos demonstraram a influência positiva de catalisadores na degradação do PEAD, com a perda de massa em menores temperatura, como exemplificado no trabalho de Kebritchi et al. (2018). Na Tabela 1, são apresentadas as temperaturas inicial e final

da decomposição dos materiais analisados, à taxa de aquecimento de $10^{\circ}\text{C min}^{-1}$, bem como as temperaturas de pico máximo e as perdas de massa.

Tabela 1: Temperaturas iniciais e finais, para degradação do PEAD puro e com catalisadores nas diferentes razões de aquecimento.

β ($^{\circ}\text{C. min}^{-1}$)	Amostra	Temperatura Inicial ($^{\circ}\text{C}$)	Temperatura Final ($^{\circ}\text{C}$)	Coque Residual (%)	Pico Máximo DTG (%)
10	PEAD PURO	455,2	499,73	3,7	481,5
	PEAD-OXINb	444,8	501,65	13,4	484,9
20	PEAD PURO	439,9	503,4	3,9	490,5
	PEAD-OXINb	453,3	510,6	6,3	493,7
30	PEAD PURO	448,8	511,1	3,8	504,9
	PEAD-OXINb	472,7	526,2	6,3	473,1
40	PEAD PURO	494,1	534,5	3,5	481,7
	PEAD-OXINb	490,9	543,1	8,2	504

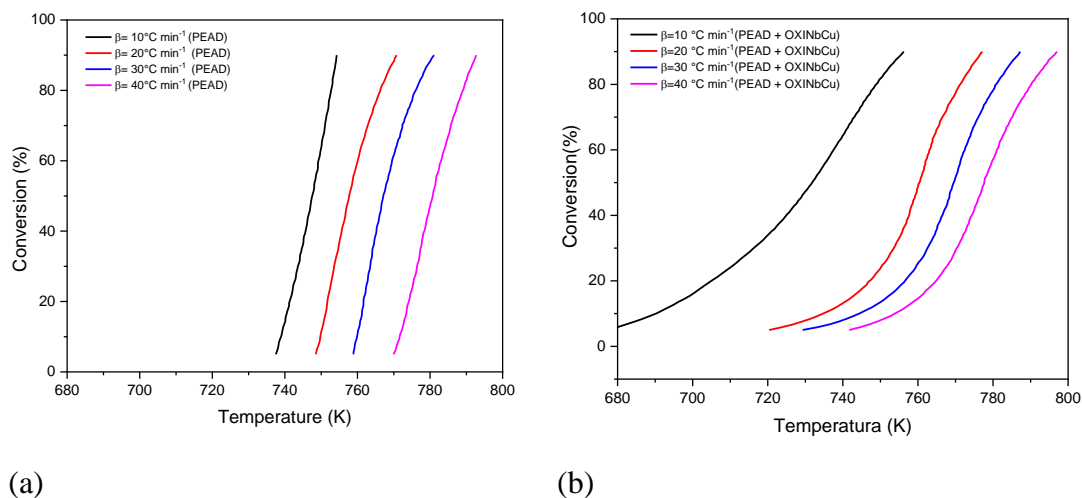
Fonte: Próprio autor.

O catalisador OXINb, à taxa de aquecimento de $10^{\circ}\text{C min}^{-1}$, apresentou teor de coque superior a 10%. Esse fato pode estar relacionado à não degradação do catalisador não consumido no processo reacional, bem como à presença de moléculas de polímeros aprisionadas nos microporos do catalisador, o que leva ao aumento do coque residual. Esse tipo de fenômeno também foi observado no craqueamento catalítico do óleo de girassol na presença de catalisadores suportados com zircônio, conforme pesquisa de Medeiros et al., (2022).

Estudo cinético

Na Figura 5, apresentam-se os dados obtidos a partir da análise térmica para o estudo cinético do PEAD e PEAD com catalisador, bem como as curvas termogravimétricas de conversão em função da temperatura para $\beta= 10, 20, 30$ e $40^{\circ}\text{C min}^{-1}$.

Figura 5: Curvas de conversão em função da temperatura para degradação termocatalítica do PEAD: a) PEAD e b) PEAD-OXINb



Fonte: Próprio autor.

As conversões apresentadas nas diferentes taxas de aquecimento, com destaque para a taxa de $10^\circ\text{C min}^{-1}$, que mostra um grau de conversão superior às demais, indicam que quanto maior a taxa de aquecimento, maiores são as temperaturas necessárias para a degradação do PEAD. Neste estudo, também se observa que a adição de catalisadores diminui a temperatura de conversão, comprovando a atividade desses catalisadores.

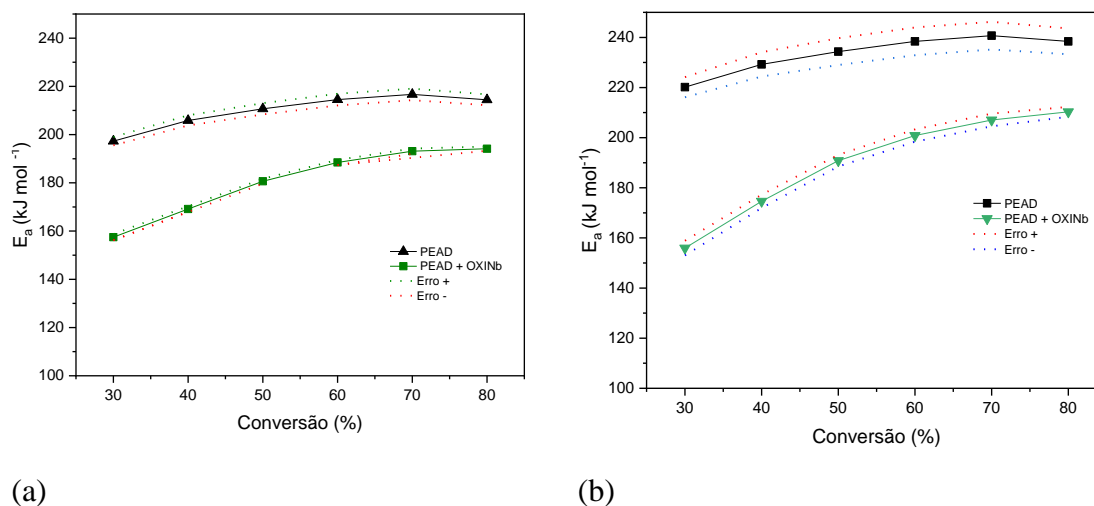
Os modelos de *Ozawa-Flynn-Wall* (OFW) E *Kissinger-Akahira-Sun* (KAS) realizados através da Termogravimetria, apresentaram coeficientes de correlação acima de 0,93689 para o método OFW e 0,86437 para o método KAS. Por esses métodos, valores de R^2 mais próximos de 1 indicam maior adequação na avaliação da energia de ativação do processo térmico e catalítico do produto estudado.

Com base nos dados do logaritmo da razão de aquecimento ($\log \beta$ e $\log \beta/T^2$) versus o inverso da temperatura (K) para a decomposição térmica do PEAD, com e sem catalisadores, foi possível calcular a energia de ativação da decomposição térmica e catalítica do PEAD pelos valores da inclinação das retas. As energias de ativação em função da conversão estão apresentadas nas Figuras 6.

A análise apropriada do modelo OFW e KAS, considerando a E_a e a conversão, se dá em um intervalo entre $30\% \leq \alpha \leq 70\%$, com desvios de aproximadamente 10% nos valores de E_a (Coriolano et al. 2016; Prasad, Kanungo, and Ray 1992). Desse modo, observa-se que a adição do catalisador apresentou redução nos valores de E_a em relação ao PEAD puro, demonstrando a influência do catalisador na reação de degradação.

Através da Figura 6, podemos interpretar que as razões de aquecimento inferiores a 50% demandam uma menor energia de ativação. Isso se deve ao fato de que, em baixas conversões, os compostos mais leves são prioritariamente produzidos, enquanto conversões acima de 50% apresentam maior energia de ativação, em decorrência da degradação de compostos médios e pesados do PEAD (Colantonio et al. 2020; Gonçalves et al. 2008, 2010). De acordo com Wang et al., (2021), valores maiores de energia de ativação indicam maior dificuldade de degradação e, conseqüentemente, maior gasto de energia.

Figura 6: Energia de ativação aparente de decomposição térmica e catalítica do Óleo de Cártamo, através do modelo: a) OFW e b) KAS.



Fonte: Próprio autor

A degradação térmica e termocatalítica do PEAD demonstra a inviabilidade de uma reação em etapa única. Os resultados demonstram a eficiência da degradação com o catalisador OXINb pois permitem menores temperaturas de degradação e redução no consumo de energia reacional.

Conclusões

O comportamento do craqueamento térmico e termocatalítico, assim como a energia de ativação (E_a), foram avaliados por meio do método de isoconversão, especificamente os métodos FWO e KAS. Os resultados mostraram que, ao comparar o estudo térmico do polietileno de alta densidade (PEAD) com o estudo termocatalítico utilizando OXINb, houve uma diminuição da energia de ativação, evidenciando a eficiência do catalisador. Dessa forma, o uso de catalisadores nas reações resultou em uma diminuição do tempo de reação, facilitando a ocorrência das reações de degradação em comparação com o processo térmico.

Dessa forma, a utilização do óxido de nióbio se apresenta como uma alternativa promissora para a degradação do polietileno de alta densidade, constituindo uma estratégia eficaz para transformar esse material em subprodutos de alto valor agregado.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e ao Laboratório de Análises Ambientais, Processamento Primário e Biocombustíveis (LABPROBIO).

Referências

- A Indústria de Transformação e Reciclagem de Plástico No Brasil. http://www.simpesc.org.br/wp-content/uploads/2021/08/Perfil2020_abiplast.pdf (January 1, 2023). 2020.
- AKUBO, KALTUME, MOHAMAD ANAS NAHIL, AND PAUL T. WILLIAMS. “Aromatic Fuel Oils Produced from the Pyrolysis-Catalysis of Polyethylene Plastic with Metal-Impregnated Zeolite Catalysts.” *Journal of the Energy Institute* 92(1): 195–202. 2019.
- ANENE, AZUBUIKE FRANCIS, SIW BODIL FREDRIKSEN, KAI ARNE SÆTRE, AND LARS ANDRE TOKHEIM. “Experimental Study of Thermal and Catalytic Pyrolysis of Plastic Waste Components.” *Sustainability* 2018, Vol. 10, Page 3979 10(11): 3979. 2018.
- BRAGA, VALDEILSON S., FILLIPE A.C. GARCIA, JOSÉ A. DIAS, AND SÍLVIA C.L. DIAS. Copper Oxide and Niobium Pentoxide Supported on Silica-Alumina: Synthesis, Characterization, and Application on Diesel Soot Oxidation. *Journal of Catalysis* 247(1): 68–77. 2007.
- CALDEIRA, VINÍCIUS P.S., ANNE G.D. SANTOS, DANIELE S. OLIVEIRA, RAFAEL B. LIMA, LUIZ D. SOUZA, AND SIBELE B.C. PERGHER. Polyethylene Catalytic Cracking by Thermogravimetric Analysis: Effects of Zeolitic Properties and Homogenization Process. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 130(3): 1939–51. 2017
- COLANTONIO, SIMONA, LORENZO CAFIERO, DOINA DE ANGELIS, NICOLÒ M. IPPOLITO, RICCARDO TUFFI, AND STEFANO VECCHIO CIPRIOTI. Thermal and Catalytic Pyrolysis of a Synthetic Mixture Representative of Packaging Plastics Residue. *Frontiers of Chemical Science and Engineering* 14(2): 288–303. 2020.
- CORIOLOANO, ANA C.F., GABRIEL F.S. BARBOSA, CLEYTON K.D. ALBERTO, REGINA C.O.B. DELGADO, KESIA K.V. CASTRO, AND ANTONIO S. ARAUJO. Catalytic Processing of Atmospheric Residue of Petroleum over AISBA-15 Nanomaterials with Different Acidity.34(7): 627–32. 2016.
- DOYLE, C. D. Estimating Isothermal Life from Thermogravimetric Data. *Journal of Applied Polymer Science* 6(24): 639–42. 1962
- ESTEVEZ, ANDRE, C A OLIVEIRA, TEODORICO C RAMALHO, MARAISA GONCALVES, ALEXANDRE S ANASTACIO, AND HUDSON W P CARVALHO. New Materials Based on Modified Synthetic Nb₂O₅ as Photocatalyst for Oxidation of Organic Contaminants. *Catalysis Communications* 10: 330–32. 2008.
- GAMA, N., B. GODINHO, G. MARQUES, R. SILVA, A. BARROS-TIMMONS, AND A. FERREIRA. Recycling of Polyurethane Scraps via Acidolysis. *Chemical Engineering Journal* 395: 125102. 2020.
- GONÇALVES, MARIA LUISA A., DEUSA ANGÉLICA P. MOTA, WILDSON V. CERQUEIRA, DANIEL ANDRÉ, LARISSA MARTINS SARAIVA, MARIA ISABEL FIGUEIRA COELHO, ANA MARIA TEIXEIRA, AND MARCO ANTONIO G. Teixeira. Knowledge of Petroleum Heavy Residue Potential as Feedstock in Refining Process Using Thermogravimetry. *Fuel Processing Technology* 91(9): 983–87. 2010.

- GONÇALVES, MARIA LUISA A., DEUSA ANGÉLICA DA MOTA PINTO, ANA MARIA R.F. TEIXEIRA, AND M. A.G. TEIXEIRA. Pyrolysis of Petroleum Fractions: Kinetic Investigation by Thermogravimetry. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 91(2): 341–46. 2008.
- KEBRITCHI, ABBAS, MEHDI NEKOOMANSH, FEREDOON MOHAMMADI, AND HOSSEIN ALI KHONAKDAR. Effect of Microstructure of High Density Polyethylene on Catalytic Degradation: A Comparison Between Nano Clay and FCC. *Journal of Polymers and the Environment* 26(4): 1540–49. 2018.
- KISSINGER, HOMER E. VARIATION OF PEAK TEMPERATURE WITH HEATING RATE IN DIFFERENTIAL THERMAL Analysis. *Journal of Research of the National Bureau of Standards* 57(4). 1956.
- KONG, LIPING, LILIN ZHANG, JUNLIN GU, LE GOU, LONGFEI XIE, YUANYUAN WANG, AND LIYI DAI. Catalytic Hydrotreatment of Kraft Lignin into Aromatic Alcohols over Nickel-Rhenium Supported on Niobium Oxide Catalyst. *Bioresource Technology* 299: 122582. 2020.
- KUNWAR, BIDHYA, H. N. CHENG, SRIRAM R. CHANDRASHEKARAN, AND BRAJENDRA K. SHARMA. Plastics to Fuel: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 54: 421–28. 2016.
- LEAL, GLAUCO F., SÉRGIO LIMA, INÊS GRAÇA, HELOISE CARRER, DEAN H. BARRETT, ERICO TEIXEIRA-NETO, ANTONIO APRIGIO S. CURVELO, CRISTIANE B. RODELLA, AND ROBERTO RINALDI. Design of Nickel Supported on Water-Tolerant Nb₂O₅ Catalysts for the Hydrotreating of Lignin Streams Obtained from Lignin-First Biorefining. *iScience* 15: 467–88. 2019..
- LOVÁS, PETER, PAVOL HUDEC, BORIS JAMBOR, ELENA HÁJEKOVÁ, AND MICHAL HORNÁČEK. Catalytic Cracking of Heavy Fractions from the Pyrolysis of Waste HDPE and PP. *Fuel* 203: 244–52. 2017.
- MIANDAD, R., M. A. BARAKAT, ASAD S. ABURIAZAIZA, M. REHAN, AND A. S. NIZAMI. Catalytic Pyrolysis of Plastic Waste: A Review. *Process Safety and Environmental Protection* 102: 822–38. 2016.
- MIRO DE MEDEIROS, ALDO, KAROLINE DE SOUSA CASTRO, MAYARA LOPES GUNDIM DE MACÊDO, ARUZZA MABEL DE MORAIS ARAÚJO, DJALMA RIBEIRO DA SILVA, AND AMANDA DUARTE GONDIM. Catalytic Pyrolysis of Coconut Oil with Ni/SBA-15 for the Production of Bio Jet Fuel. *RSC Advances* 12(16): 10163–76. 2022.
- ODY, KAMILA S., JOÃO P.A. DE JESUS, CARLOS E. CAVA, ANDERSON R. ALBUQUERQUE, ARY S. MAIA, JULIO R. SAMBRANO, AND FELIPE A. la Porta. “AVALIAÇÃO DA ESTRUTURA ELETRÔNICA DA FASE MONOCLÍNICA DO ÓXIDO DE NÍOBIO COM BASE NO USO DE DIFERENTES FUNCIONAIS DE DENSIDADE.” *Química Nova* 44(9): 1124–31. 2021.
- OLIVEIRA, JÉSSICA A, MARIANA O REIS, MAÍRA S PIRES, LUÍS A M RUOTOLO, TEODORICO C RAMALHO, CAUÊ R OLIVEIRA, LÍVIA C T LACERDA, AND FRANCISCO G E NOGUEIRA. Zn-Doped Nb₂O₅ Photocatalysts Driven by Visible-Light: An Experimental and Theoretical Study. 2019.
- OZAWA, TAKEO. A New Method of Analyzing Thermogravimetric Data. *Bulletin of the Chemical Society of Japan* 38(11): 1881–86. 1965.
- PAI, YI HAO, AND SU YUN FANG. Preparation and Characterization of Porous Nb₂O₅ Photocatalysts with CuO, NiO and Pt Cocatalyst for Hydrogen Production by Light-Induced Water Splitting. *Journal of Power Sources* 230: 321–26. 2013.
- PRASAD, T. P., S. B. KANUNGO, AND H. S. RAY. Non-Isothermal Kinetics: Some Merits and Limitations. *Thermochimica Acta* 203(C): 503–14. 1992.

SANTOS, ALEXSANDRO JHONES, LUANA MÁRCIA BEZERRA BATISTA, CARLOS ALBERTO MARTÍNEZ-HUITLE, ANA PAULA DE MELO ALVES, AND SERGI GARCIA-SEGURA.. Niobium Oxide Catalysts as Emerging Material for Textile Wastewater Reuse: Photocatalytic Decolorization of Azo Dyes. *Catalysts* 2019, Vol. 9, Page 1070 9(12): 1070. 2019

SANTOS, TIAGO GOMES, ANTONIO OSIMAR SOUSA DA SILVA, ANTONIO SOUZA DE ARAUJO, AND MARCELO JOSÉ BARROS DE SOUZA. Estudo Cinético Da Degradação Térmica e Catalítica de Polipropileno Sob Catalisadores Mesoporosos Tipo AIMCM-48. *Scientia Plena* 17(9). 2021.

SCHAFFNER, RODOLFO DE ANDRADE, ALAN MARCHESI FORTES, SERGIO VITOR CAVALCANTI TREVISAN, ROBERTA CAROLINA PELISSARI RIZZO DOMINGUES, LEANDRO DA CONCEIÇÃO, AND HELTON JOSÉ ALVES. Produção de Álcoois de Cadeia Curta Por Hidrogenação de CO Utilizando Catalisadores Cu/Nb₂O₅/Al₂O₃. *Matéria (Rio de Janeiro)* 26(2). 2021.

SILVA, ANTONIO O.S., MARCELO J.B. SOUZA, ANNE M.G. PEDROSA, ANA C.F. CORIOLANO, VALTER J. FERNANDES, AND ANTONIO S. ARAUJO. Development of HZSM-12 Zeolite for Catalytic Degradation of High-Density Polyethylene. *Microporous and Mesoporous Materials* 244: 1–6. 2017.

SOUZA, JUBER P., THAÍS MELO, MARCONE A.L. DE OLIVEIRA, ROBERTO M. PANIAGO, PATTERSON P. DE SOUZA, AND LUIZ C.A. OLIVEIRA. V- or Mo-Modified Niobium Catalysts for Glycerin Conversion Reactions in the Presence of H₂O₂. *Applied Catalysis A: General* 443–444: 153–60. 2012.

TAGUSAGAWA, CAIO, ATSUSHI TAKAGAKI, AI IGUCHI, KAZUHIRO TAKANABE, JUNKO N. KONDO, KOHKI EBITANI, TAKASHI TATSUMI, AND KAZUNARI DOMEN. Synthesis and Catalytic Properties of Porous Nb–Mo Oxide Solid Acid. *Catalysis Today* 164(1): 358–63. 2011.

WANG, WEIDUO, HUAYI LI, QIAN LI, AND ZHI LUO. A Novel Grafted Polyethylene with Diphenyl Phosphoryl Group: Improved Flame Retardancy and Favorable Compatibility. *Journal of Applied Polymer Science* 138(42): 51242. 2021.

XIN, YU, LIN DONG, YONG GUO, XIAOHUI LIU, YONGFENG HU, AND YANQIN WANG. Correlation of the Catalytic Performance with Nb₂O₅ Surface Properties in the Hydrodeoxygenation of Lignin Model Compound. *Journal of Catalysis* 375: 202–12. 2019.

ZAKARIA, W. F.W., A. A. JALIL, N. S. HASSAN, M. IBRAHIM, AND M. S. AZAMi. Visible-Light Driven Photodegradation of Phenol over Niobium Oxide-Loaded Fibrous Silica Titania Composite Catalyst. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 95(10): 2638–47. 2020.