

## SÍNTESE DE ALUMINA POR COMBUSTÃO PARA UTILIZAÇÃO COMO SUPORTE CATALÍTICO DO NÍQUEL

Genival Júnior Leoncio Vieira<sup>1</sup>  
Deisy Teles de Araújo<sup>2</sup>  
Normanda Lino de Freitas<sup>3</sup>

### RESUMO

Os catalisadores são utilizados na maioria dos processos industriais de transformação química. Por essa razão, vários grupos de pesquisa se concentram no desenvolvimento e aperfeiçoamento destes materiais, com foco na seletividade, eficiência e potencial de reutilização. Nesse contexto, catalisadores heterogêneos (sólidos) se destacam, devido à facilidade de separá-los do meio reacional ao fim do processo. O objetivo deste trabalho é obter o catalisador Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, utilizando alumina sintetizada por reação de combustão, que servirá como suporte catalítico para o níquel, este incorporado à alumina por impregnação por dispersão física via úmido. Antes e após a impregnação os catalisadores foram caracterizados por DRX, distribuição granulométrica e EDX. Os resultados indicam a presença da fase cristalina Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nas amostras estudadas e, após a impregnação, a segunda fase secundária formada de NiO, evidenciando a eficiência da síntese por combustão e da impregnação, respectivamente. Os catalisadores Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> resultaram em aglomerados com diâmetro mediano de 39,2 e 41,4 nm, nesta ordem. A natureza nanométrica dos catalisadores pode sugerir uma boa área específica superficial, na qual espécies reagentes poderão ser adsorvidas e convertidas em produtos mais facilmente, sendo estimulados trabalhos para a avaliação da atividade catalítica do Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> em reações de interesse industrial que utilizem o níquel como fase ativa, a exemplo da metanação.

**Palavras-chave:** Catalisadores sólidos, alumina, suporte catalítico, níquel.

### INTRODUÇÃO

A catálise é um processo no qual a velocidade de uma reação é influenciada pela adição de uma espécie química, denominada catalisador, fornecendo um caminho alternativo de reação, com energia de ativação menor que o caminho convencional (DIAS et al., 2012). Por essa razão, os catalisadores são utilizados na maioria dos processos industriais de transformação química, uma vez que possibilitam melhores condições operacionais, com maior velocidade e temperaturas mais baixas.

<sup>1</sup> Graduando do Curso de **Engenharia de Materiais** da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, [leongiogenival@gmail.com](mailto:leongiogenival@gmail.com);

<sup>2</sup> Graduanda pelo Curso de **Engenharia Química** da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, [deisyteles@hotmail.com](mailto:deisyteles@hotmail.com);

<sup>3</sup> Professora orientadora: Doutora, Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, [normanda@ufcg.edu.br](mailto:normanda@ufcg.edu.br), (83) 3322.3222

Os dois tipos principais de catálise, homogênea e heterogênea, são classificados de acordo com as fases envolvidas no processo. Na catálise homogênea, tem-se um sistema monofásico, no qual os reagentes, produtos e catalisadores estão dispostos em uma mesma fase, geralmente líquida. Os catalisadores, neste caso, podem ser ácidos, bases, sais e compostos organometálicos solúveis. Por sua vez, na catálise heterogênea, catalisadores, reagentes e produtos compõem um sistema polifásico. Enquanto que os reagentes e produtos estão na fase líquida ou gasosa, os catalisadores são sólidos inorgânicos, como óxidos metálicos, sulfetos ou cloretos, ou ainda, sólidos orgânicos, como polímeros modificados (OLIVEIRA, 2013).

A utilização de processos catalíticos homogêneos, contudo, apresenta como principal desvantagem a dificuldade de recuperação dos catalisadores para posterior reutilização. Assim, com o objetivo de minimizar os problemas dos processos homogêneos, vários estudos têm sido realizados com o propósito de identificar e aperfeiçoar os melhores catalisadores heterogêneos possíveis de serem aplicados em processos industriais (RAMOS et al., 2011).

Geralmente, os catalisadores sólidos podem ser classificados, de acordo com o procedimento de preparação, em catalisadores mássicos e suportados. Nos catalisadores mássicos, o próprio material já é a fase ativa, como acontece com os catalisadores metálicos. Por outro lado, nos catalisadores suportados, a fase ativa é introduzida em um sólido (menos ativo) já desenvolvido por um processo específico. Um catalisador suportado pode, por exemplo, ser constituído por um metal depositado sobre a superfície de um suporte, normalmente, um óxido (PONCELET et al., 1983, p. 523 apud. SILVA, et al., 2008; GATES, 2019). A união entre eficiência e eficácia dos catalisadores suportados motivou o desenvolvimento de inúmeras pesquisas com foco nesse tipo de sistema catalítico, visando à aplicação em diferentes áreas, como evidenciado pelos estudos de HUANG et al., 2020; ZHANG M. et al., 2020; YU et al., 2020; ZHAO et al., 2020; WANG et al., 2020; XIAO et al., 2019; LIU et al., 2019.

Um aspecto fundamental para o uso de um catalisador sólido consiste em uma boa dispersão do componente ativo, o que possibilita maior acesso das moléculas reagentes aos centros catalíticos ativos, sendo, portanto, necessários sólidos porosos com elevada área superficial (CORDEIRO, 2015). Nesse contexto, o óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ou alumina é amplamente utilizado em catálise por promover estabilidade térmica e maior dispersão das fases ativas, podendo atuar tanto como catalisador mássico, quanto suportado.

Este trabalho, portanto, tem como objetivo sintetizar o catalisador heterogêneo Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pelo método de impregnação por dispersão física via úmido e caracterizar por difração de raios X (DRX), espectroscopia por energia dispersiva de raios X (EDX) e distribuição granulométrica. O metal níquel foi escolhido como fase ativa, levando em consideração sua utilização em processos industriais de larga escala, como é o caso da reação de metanação e da reforma a vapor de metano para produção de hidrogênio (ZHANG et al., 2019; ALI et al., 2016), e em pesquisas envolvendo catalisadores a base de níquel para obtenção de biodiesel, como evidenciado por Silva (2011), catalisadores de Ni suportado em alumina (Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) para a produção de hidrogênio (HARUN et al., 2019), para a co-produção de hidrogênio e nanotubos de carbono (HE et al., 2017) entre muitas outras .

## METODOLOGIA (OU MATERIAIS E MÉTODOS)

A síntese e os ensaios de caracterização das amostras dos pós de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> foram realizados no Laboratório de Síntese de Materiais Cerâmicos (LabSMaC) e no Laboratório de Caracterização de Materiais, ambos pertencentes a Unidade Acadêmica de Engenharia Materiais (UAEMa) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). A metodologia foi dividida em três etapas: a) síntese por combustão do suporte catalítico (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>); b) impregnação da alumina com níquel para obtenção do catalisador Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; c) caracterização dos catalisadores obtidos por difração de raios X, distribuição granulométrica e análise química por EDX.

A alumina foi sintetizada por meio da reação de combustão, tendo como reagentes o nitrato de alumínio nonahidratado (Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·9H<sub>2</sub>O) e a ureia ((NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>CO), de acordo com a metodologia adotada por Freitas et al. (2006) e Silva, et al. (2015).

O processo de impregnação por via úmida (XIE et al., 2006) consistiu, inicialmente, no preparo de uma solução de nitrato de níquel hexahidratado (Ni (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O), de modo a gerar o catalisador Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> com concentração em massa de 30% de níquel. Para tanto, a massa da fonte precursora de níquel foi calculada segundo as Equações 1 e 2, respectivamente.

$$P = \frac{m_{Ni}}{m_{Ni} + m_{Al_2O_3}} \quad (1)$$

$$m_{sal} = \frac{m_{Ni}}{P_{Ni}} \quad (2)$$

Onde: m<sub>Ni</sub> e m<sub>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></sub> são a massa do níquel (g) e a massa da alumina (g), respectivamente, e P é o percentual do metal a ser impregnado, neste caso, de 0,3 ou 30%.

Uma vez determinada a massa de nitrato de níquel ( $m_{\text{sal}}$ ), levando em consideração o percentual do níquel presente no sal ( $P_{\text{Ni}}$ ), esta foi dissolvida em água para a obtenção de uma solução, a qual foi misturada a alumina na proporção de 1:30. A mistura, então, foi colocada em um becker e agitada por 1h a temperatura ambiente, sendo, em seguida, a fase líquida evaporada em estufa com circulação de ar a 70°C. Após a evaporação da fase líquida, o material foi mantido por 3 horas a 110°C. Preparado o catalisador, este será calcinado a 500°C por 5 horas sob ar atmosférico, seguindo a sequência de aquecimento de 100°C/0,5h; 200°C/1h; 350°C/3h e 500°C/5h, com taxa de aquecimento de 10°C/min e, de resfriamento de 20°C/min até alcançar a temperatura ambiente.

## **DESENVOLVIMENTO**

A determinação das fases presentes, cristalinidade e o tamanho de cristalito dos catalisadores foram determinados a partir dos dados de DRX, utilizando um difratômetro de raios X BRUKER (modelo D2 PHASER, radiação Cu-K $\alpha$ ), operando com tubo de alvo de cobre a uma tensão de 30,0 kV e 10,0 mA de corrente, com detector de 55D160. A cristalinidade e o tamanho médio de cristalito foram obtidas utilizando o software DIFFRAC.EVA. Estes procedimentos foram realizados no LabSMaC/UFCG.

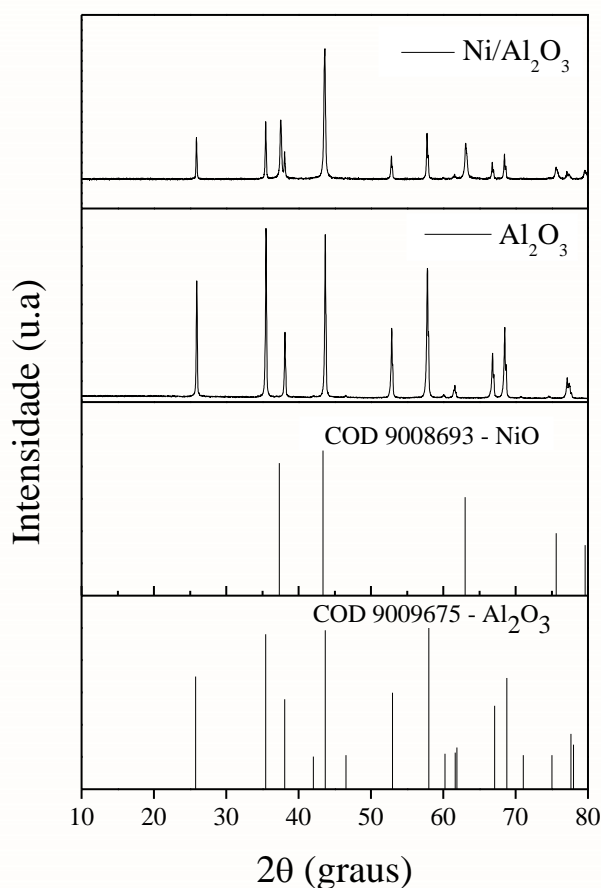
A espectrometria de fluorescência de raios X é uma técnica que determina semi-quantitativamente os elementos presentes em uma determinada amostra. Isto é possível através da aplicação de raios X na superfície da amostra e a posterior análise dos fluorescentes raios X emitidos. A técnica de fluorescência de raios X é não-destrutiva para todos os tipos de amostras, incluindo sólidos, líquidos, pós, discos, entre outros. Desta forma, essa técnica é utilizada para pesquisa e controle de qualidade em uma ampla área de atuação. O equipamento utilizado para a determinação do EDX foi o Espectrômetro de Raios X por Energia Dispersiva – EDX-720 Shimadzu do Laboratório de Caracterização de Materiais da UAEMa/UFCG.

A distribuição do tamanho de partículas das amostras foi realizada utilizando a técnica de difração Laser em analisador de nanopartículas SZ-100 series (HORIBA Scientific), que mede a granulometria na faixa de 0,3 nm a 8 $\mu$ m. O SZ-100 utiliza a técnica de dispersão dinâmica da luz para determinar o tamanho das partículas. Espalhamento de luz dinâmica é a medição de flutuações na intensidade de luz dispersa com o tempo. A leitura ocorre através do movimento Browniano das partículas em um dispersante adequado.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1, estão ilustrados os difratogramas de raios X dos catalisadores de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , obtido a partir da reação de combustão, e  $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$ , resultante da impregação por via úmida do nitrato de níquel no suporte alumina.

**Figura 1** – Difratogramas de raios X dos catalisadores  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$



Fonte: Autores (2019)

A partir dos dados de difração de raios X, foi possível identificar a presença da fase cristalina estável  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (ficha padrão COD 9009675) e, além disso, a formação de uma fase secundária após o processo de impregnação, a qual foi identificada como sendo óxido de níquel (NiO) (ficha padrão COD 9008693). Comparando os difratogramas dos catalisadores  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$ , verificou-se uma redução na intensidade de alguns dos picos característicos



da alumina, bem como uma sobreposição de picos no ângulo de difração ( $2\theta$ ) comum ao NiO e ao  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , que se justificam devido às alterações na estrutura da alumina ocorridas durante a etapa de impregnação.

A fase identificada como NiO também foi observada nos estudos de Cheng et al., (2011), utilizando o catalisador de níquel suportado por alumina empregado à reação de reforma a vapor do glicerol.

A Tabela 1 apresenta os valores de tamanho de cristalito e de cristalinidade para as amostras dos catalisadores.

Os valores indicam que, após a impregnação, houve um aumento no tamanho de cristalito, devido à adsorção do níquel na superfície das partículas do suporte e uma redução da cristalinidade, em virtude da etapa de calcinação do catalisador.

Suppino (2014) ao estudar a impregnação de metais em alumina por via úmida, reportou a presença da mesma fase, NiO e também da fase  $\text{NiAl}_2\text{O}_4$ . Observações semelhantes sobre a presença dessas duas fases foram também reportadas em trabalhos de Boukha et al., (2014).

**Tabela 1** – Valores de tamanho de cristalito (Tc) e cristalinidade (%) para os catalisadores  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$ .

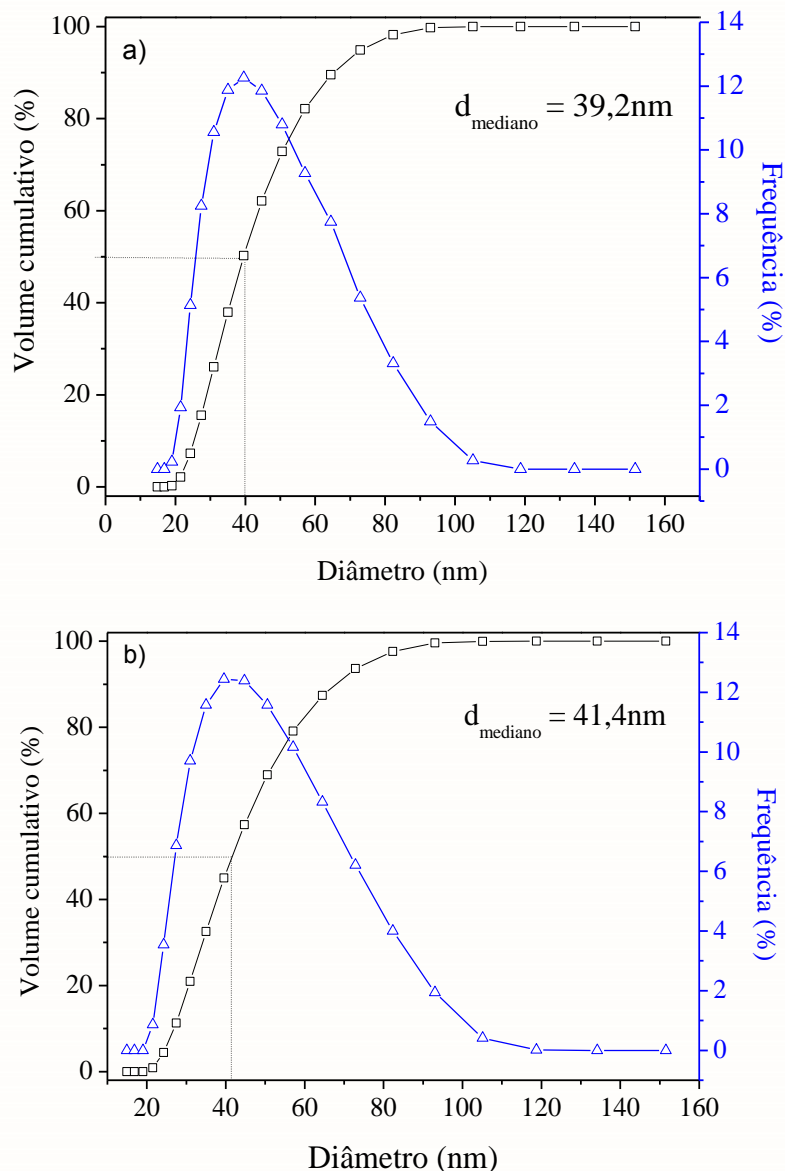
Amostra	Tc (nm)	Cristalinidade (%)
$\text{Al}_2\text{O}_3$	43,8	90,5
$\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$	50,3	85,6

Fonte: Autores (2019)

A distribuição granulométrica das amostras  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$  estão apresentadas na Figura 2. Para cada amostra, estão expressas a curva acumulativa da faixa de distribuição dos aglomerados (curva preta) e a frequência de distribuição dos aglomerados com mesmo diâmetro (curva azul).

Observa-se uma distribuição monomodal de tamanho de aglomerados tanto para o  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , quanto para o  $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$ , mesmo após a impregnação. Ambas as amostras apresentam uma faixa com tamanho de diâmetro de partícula de 10 a 150 nm.

**Figura 2** - Distribuição granulométrica dos catalisadores: a)  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e b)  $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$ .



Fonte: Autores (2019)

Quanto ao diâmetro mediano,  $D(50\%)$ , os catalisadores  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$  apresentaram diâmetros iguais a 39,2 e 41,4 nm, respectivamente. Quando comparamos o tamanho mediano dos aglomerados do catalisador impregnado  $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$  com o suporte  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , observa-se um aumento de 5,6%. Esse aumento, possivelmente, ocorreu devido ao tempo de mistura durante a impregnação, suficiente para que a agitação magnética gerasse partículas menores, passíveis de reaglomeração.

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos a partir da análise química por fluorescência de raios X por energia dispersiva.

**Tabela 2** – Valores percentuais dos óxidos presentes nas amostras de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$ .

<b>Amostra</b>	<b><math>\text{Al}_2\text{O}_3</math> (%)</b>	<b>NiO (%)</b>	<b>Impurezas (%)</b>
$\text{Al}_2\text{O}_3$	99,7	–	0,33
$\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$	62,1	36,9	0,96

Fonte: Autores (2019)

Os dados da tabela 2 corroboram os dados obtidos por meio da difração de raios X, evidenciando que, inicialmente, a fase cristalina majoritária era a  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Após a impregnação, houve a formação da fase secundária de NiO, mas  $\text{Al}_2\text{O}_3$  continuou sendo a fase principal, como indicado pelo maior valor percentual (62,1 9%), indicando que, de fato, a alumina está atuando como suporte catalítico.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos revelam a eficiência da reação de combustão na síntese do suporte alumina, evidenciado pela presença da fase cristalina estável  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , e do método de impregnação por via úmida na obtenção do catalisador  $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$ , tendo em vista a presença da fase secundária de NiO, confirmando a incorporação do metal níquel no suporte.

Houve um aumento no tamanho dos aglomerados após a impregnação, devido ao tempo dessa etapa, que possibilitou o surgimento de partículas menores passíveis de reaglomeração.

A etapa seguinte é, sem dúvida, a utilização desses catalisadores em reações de interesse industrial, como é o caso da transesterificação para obtenção de biodiesel, considerando o cenário atual de demanda energética e de preocupação com as questões ambientais.

## REFERÊNCIAS



ALI, S.; AL-MARRI, M. J.; ABDELMONEIM, A. G.; KUMAR, A.; KHADER, M. M. Catalytic evaluation of nickel nanoparticles in methane steam reforming. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 41, p. 22876-22885, 2016.

BOUKHA, Z.; JIMÉNEZ-GONZÁLEZ, C.; DE RIVAS, B.; GONZÁLEZ-VELASCO, J.R.; GUTIÉRREZ-ORTIZ, J.I.; LÓPEZ-FONSECA, R., Synthesis, characterization and performance evaluation of spinel derived Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts for various methane reforming reactions. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 158-159, p. 190-201, 2014.

CHENG, C. K.; FOO, S. Y.; ADESINA, A. A. Steam reforming of glycerol over Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst. **Catalysis Today**, v. 178, n. 1, p. 25-33, 2011.

CORDEIRO, G. L. **Estudo da síntese de catalisadores de níquel suportados em alumina-lantânica para aplicação na produção de hidrogênio a partir da reforma a vapor do etanol**. São Paulo, SP: IPEN, 2015. Dissertação de Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Materiais.

DIAS, F. R. F.; FERREIRA, V. F.; CUNHA, A. C. Uma visão geral dos diferentes tipos de catálise em síntese orgânica, **Revista Virtual de Química**, v. 4, p. 840-871, 2012.

FREITAS, N. L.; FAGURY-NETO, E.; LIRA, H. L.; GAMA, L.; KIMINAMI, R. H. G. A.; COSTA, A. C. F. M. Combustion synthesis of  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powders. **Materials Science Forum**, v. 530-531, p. 631-636, 2006.

GATES, B. C. Atomically Dispersed Supported Metal Catalysts: Seeing Is Believing. **Trends in Chemistry**. v. 1, p. 99-110, 2019.

HARUN, N. ; ABIDIN, S. Z.; OSAZUWA O. U., TAUFIQ-YAP, Y. H.; AZIZAN, M. T. Hydrogen production from glycerol dry reforming over Ag-promoted Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 44, n. 1, p. 213-225, 2019.

HE, L.; HU, S. JIANG, L.; LIAO, G.; ZHANG, L. HAN, H.; CHEN, X.; WANG, Y.; XU, K.; SU, S.; Xiang, J. Co-production of hydrogen and carbon nanotubes from the decomposition/reforming of biomass-derived organics over Ni/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst: Performance of different compounds. **Fuel**, v. 210, p. 307-314, 2017.

HUANG, G.; YAN, Z.; LIU, S.; LUO, T.; NA, L.; XU, Z. Bimetallic nickel molybdate supported Pt catalyst for efficient removal of formaldehyde at low temperature. **Journal of Environmental Sciences**, v. 87, p. 173-183, 2020.

LIU, M.; SHI, Y.; WU, K.; LIANG, J.; WU, Y.; HUANG, S.; YANG, M. Upgrading of palmitic acid and hexadecanamide over Co-based catalysts: Effect of support (SiO<sub>2</sub>,  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and H-ZSM-22). **Catalysis Communications**, v. 129, p. 105726, 2019.

OLIVEIRA, N. A. **Síntese e caracterização de catalisadores de Co-Mo e Ni-Mo para hidrodessulfurização suportados em sílica mesoporosa ordenada (SBA-15 e FDU-1)**. Doutorado em Química, Universidade de São Paulo – USP, p. 161, 2013.

RAMOS, L. P.; SILVA, F. R.; MANGRICH, A. S.; CORDEIRO, A. S., Tecnologias de Produção de Biodiesel, **Revista Virtual de Química**, v. 3, p. 385-405, 2011.

SILVA, A. S. **Avaliação de catalisadores aplicação de NiO e MoO<sub>3</sub>, suportados em MMC-41, na obtenção de biodiesel de óleo de algodão**. Campina Grande, PB: UFCG, 2011. Tese de Doutorado em Engenharia de Processos.

SILVA, J. B.; RODRIGUES, J. A. J.; NONO, M. C. A, **Caracterização de materiais catalíticos**. São José dos Campos, RJ: INPE, 2008. Tese de Doutorado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciências e Tecnologia de Materiais e Sensores.

SILVA, M. C., COSTA, N. C. O., LIRA, D. S., DANTAS, J., COSTA, A. C. F. M., FREITAS, N. L., High energy milling of alumina synthesized by combustion reaction using a vertical shaft attritor mill: influence of the milling time length. **Materials Science Forum**, n. 820, p. 155-160, 2015.

SUPPINO, R.S. **Hidrogenação de compostos aromáticos em fase líquida com catalisadores à base de metais do grupo VII suportados em alumina via impregnação úmida**. 2014, 132p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas, FEQ Campinas, SP.

WANG, W.; QU, Z.; SONG, L.; FU, Q. CO<sub>2</sub> hydrogenation to methanol over Cu/CeO<sub>2</sub> and Cu/ZrO<sub>2</sub> catalysts: Tuning methanol selectivity via metal-*support* interaction. **Journal of Energy Chemistry**, v. 40, p. 22-30, 2020.

XIE, W.; PENG, H. CHEN, L. Transesterification of soybean oil catalyzed potassium loaded on alumina as a solid-base catalyst. **Applied Catalysis A: General**, v. 300, p. 67-74, 2006.

XIAO, M.; LU, Z.; SANG, Y.; GAO, Z. Effects of supports and combined process on hydrogen purification over nickel supported catalysts. **Journal of Rare Earths**, In press, accepted manuscript, Available online 10 July 2019.

YU, H.; YANG, X.; WU, Y.; GUO, Y.; LI, S.; LIN, W.; LI, X.; ZHENG, J. Bimetallic Ru-Ni/TiO<sub>2</sub> catalysts for hydrogenation of N-ethylcarbazole: Role of TiO<sub>2</sub> crystal structure. **Journal of Energy Chemistry**, v. 40, p. 188-195, 2020.

YU, Q.; YU, T.; CHEN, H.; FANG, G.; PAN, X.; BAO, X. The effect of Al<sup>3+</sup> coordination structure on the propane dehydrogenation activity of Pt/Ga/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts. **Journal of Energy Chemistry**, v. 41, p. 93-99, 2020.

ZHANG, M.; WANG, T.; CAO, H.; CUI, S.; DU, P. Self-supported Ni<sub>2</sub>P nanosheets on low-cost three-dimensional Fe from as a novel electrocatalyst for efficient water oxidation. **Journal of Energy Chemistry**, v. 42, p. 71-76, 2020.

ZHANG, Z.; WEI, T.; CHEN, G.; LI, C.; DONG, D.; WU, W.; HU, X. Understanding correlation of the interaction between nickel and alumina with the catalytic behaviors in steam reforming and methanation. **Fuel**, v. 250, p.176-193, 2019

ZHAO, Q.; LI, H.; ZHANG, X.; YU, S.; WANG, S.; SUN, G. Platinum in-situ catalytic oleylamine combustion removal process for carbon supported platinum nanoparticles. **Journal of Energy Chemistry**, v. 41, p. 120-125, 2020.

