

Carbono Magnético Sustentável: Uma Solução Verde para Transformar CO₂ em Metano.

Rubens L. F. Filho^{1,2*}, Igor B. Gomes^{1,2}, Rayane C.F. Silva^{1,2}, Joyce R. de Oliveira³, Larissa G. de Souza³, Sara S. Vieira³, Ana Paula. C. Teixeira^{1,2}

¹Departamento de Química/ICEx. Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte - MG, Brasil.

²Centro de Tecnologias em Nanomateriais e Grafeno – CTNano/UFMG, Belo Horizonte - MG, Brasil.

³Instituto de Química - Departamento de Química inorgânica/ Universidade Federal Fluminense - Grupo de Catálise e Química Ambiental. Niterói – RJ, Brasil.

rubensfreitas@ufmg.br/rubens.freitas@ctnano.org

Resumo/Abstract

RESUMO - Este trabalho apresenta a síntese de um catalisador magnético de carbono mesoporoso sustentável obtida via rota mecanoquímica, utilizando tanino como fonte de carbono, surfactante F127 e Ni(OAc)₂. A metodologia integra em um único passo a formação do suporte e do metal ativo. A caracterização revelou estrutura mesoporosa ordenada e presença de níquel metálico bem distribuído. O material foi aplicado na hidrogenação de CO₂ a metano, visando à produção de combustíveis sintéticos de forma eficiente e ambientalmente amigável. Ensaios catalíticos estão em andamento para avaliação do desempenho. *Palavras-chave: carbono mesoporoso, biomassa, catalisador magnético, CO₂, metanação*

ABSTRACT - This work presents the synthesis of a magnetic and sustainable mesoporous carbon catalyst via a mechanochemical route, using tannin as the carbon source, F127 surfactant, and Ni(OAc)₂. The method integrates the formation of both the support and the active metal in a single step. Characterization revealed an ordered mesoporous structure and well-distributed metallic nickel. The material was applied in the hydrogenation of CO₂ to methane, aiming at the efficient and environmentally friendly production of synthetic fuels. Catalytic tests are underway to evaluate performance.

Keywords: mesoporous carbon, biomass, magnetic catalyst, CO₂, methanation

Introdução

Carbonos mesoporosos, com poros entre 2 e 50 nm, têm despertado interesse desde sua descoberta por Ryoo *et al.*¹ (1999), devido às propriedades únicas e múltiplas aplicações, como captura de CO₂, armazenamento de energia e catálise.^{2,3} Estratégias mais sustentáveis para sua síntese incluem o uso de biomassas e rotas solvent-free, como a mecanoquímica.³

Na catálise, esses materiais servem como suportes eficientes para a hidrogenação de CO₂, especialmente na reação de metanação (Sabatier),⁴ que converte CO₂ em metano – precursor de combustíveis via tecnologia gas-to-liquid (GTL). Metais do grupo VIIIB, como Ni, Ru e Rh, suportados em óxidos, zeólitas e carbonos mesoporosos têm sido amplamente utilizados, com o níquel se destacando por seu baixo custo e disponibilidade.⁵⁻⁸

Este trabalho propõe a síntese de um carbono mesoporoso magnético e sustentável com sal de níquel, integrando suporte e catalisador em um único passo, visando à aplicação na hidrogenação de CO₂ a metano de forma eficiente, econômica e ambientalmente viável.

Experimental

Síntese dos carbonos mesoporosos magnéticos sustentáveis a partir de biomassa de tanino.

Carbono mesoporoso magnético sustentável foi sintetizado por rota mecanoquímica, utilizando tanino (fonte de carbono), surfactante F127 (direcionador de poros) e Ni(OAc)₂ (reticulante). A mistura foi moída em moinho planetário (PM-100) e calcinada em atmosfera de Ar (100 mL/min), com aquecimento a 400 °C e 800 °C (1h cada, 5 °C/min), para remoção do surfactante e carbonização.

Reações de hidrogenação de CO₂ empregando o catalisador de carbono mesoporoso magnético.

Para hidrogenação de CO₂, 0,1 g do catalisador foi misturado a 0,2 g de carvão de silício, reduzido em H₂ a 500 °C por 1h e purgado com N₂ (30 min, 500–400 °C). As reações ocorreram entre 200 e 400 °C, com vazão de 100 mL/min e razão H₂:CO₂ de 4:1. A análise dos produtos foi feita por cromatografia gasosa após 2 min de reação.

Resultados e Discussão

A isoterma de fisissorção de N₂ do catalisador descrita na Figura 1 consiste numa isoterma do tipo IV, característica de materiais mesoporosos. A histerese descrita na isoterma apresenta o perfil do tipo H1 característica de materiais com faixa de mesoporoso mais uniformes, como por exemplos materiais mesoporosos ordenados. A partir da isoterma foram obtidos os parâmetros texturais como a área

específica (S_{BET}), volume total de poros, área de mesoporos. Já a distribuição de poros foi obtida a partir do modelo BJH.

A difração de Raios X, Figura 2, apresentou fases referentes a carbono grafítico (JCPDS 89-8487) em $2\theta = 26^\circ$ e 44° correspondendo aos planos cristalinos (002) e (101) respectivamente. Foi observado picos de difração em $2\theta = 44^\circ$ e 52° referente a Níquel metálico (JCPDS 89-7128) com indexação dos planos cristalinos (111) e (200). A partir das microscopias eletrônicas de transmissão, Figura 3 foi possível observar a formação de uma estrutura mesoporosa ordenada do tipo honeycomb com as partículas de níquel metálico depositadas sobre as estruturas, sugerindo que durante a síntese do catalisador, o níquel (II) foi reduzido a níquel (0). A partir da análise termogravimétrica em atmosfera de ar, foi calculado a porcentagem de Ni presente no catalisador em torno de 21%.

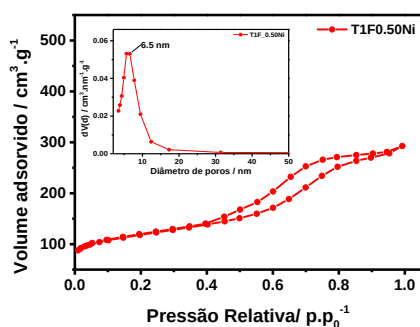


Figura 1. Isoterma de fisissorção de N_2 do carbono mesoporoso magnético

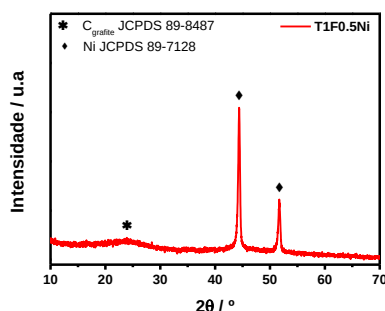


Figura 2. Difratoograma de Raios X do catalisador.

Tabela 1. Parâmetros Texturais do carbono mesoporoso magnético a partir das isotermas de fisissorção de N_2 .

Amostra	$S_{\text{BET}} / \text{m}^2.\text{g}^{-1}$	$S_{\text{meso}} / \text{m}^2.\text{g}^{-1}$	$V_{\text{Total}} / \text{cm}^3.\text{g}^{-1}$	Dp/nm
T1F0.50Ni	416	246	0,453	5,6

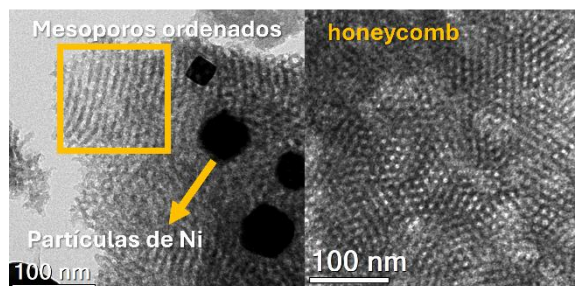


Figura 3. Microscopia eletrônica de transmissão do catalisador de carbono mesoporoso.

Conclusões

A caracterização confirmou a formação in situ de níquel metálico e a presença de uma estrutura porosa ordenada, que atua como suporte para as partículas de níquel. Ensaios de hidrogenação de CO_2 estão em andamento para avaliar a atividade catalítica do material à base de carbono mesoporoso sustentável.

Agradecimentos

Os autores agradecem as agências de fomento CNPQ, CAPES, FAPEMIG, FAPERJ, FUNDEP, e aos grupos parceiros como LABPEMOL, LEMMA, GRUTAM.

Referências

- 1 R. Ryoo, S. H. Joo and S. Jun, *Journal of Physical Chemistry B*, **1999**, 103, 7743–7746.
- 2 R. L. de Freitas Filho, K. S. Santos, R. C. Ferreira Silva, L. C. Oliveira, I. B. Gomes, F. G. Gandra, L. T. Cardoso, D. D. Justino, P. S. Pinto, A. P.C.Teixeira, J. P. Campos Trigueiro, P. F. Ribeiro Ortega, R. L. Lavall and G. G. Silva, *Microporous and Mesoporous Materials*, **2025**, 387, 113530.
- 3 P. S. Pinto, R. C. F. Silva, R. L. de Freitas Filho, L. O. Santos, S. D. Pereira and A. P. C. Teixeira, *J Braz Chem Soc*, **2025**, 36, 1–31.
- 4 C. Vogt, M. Monai, G. J. Kramer and B. M. Weckhuysen, *Nature Catalysis* **2019**, 2, 188–197.
- 5 P. Panagiotopoulou, *Appl Catal A Gen*, **2017**, 542, 63–70.
- 6 G. D. Weatherbee and C. H. Bartholomew, *J Catal*, **1984**, 87, 352–362.
- 7 J. R. Khusnutdinova, J. A. Garg and D. Milstein, *ACS Catal*, **2015**, 5, 2416–2422.
- 8 P. Frontera, A. Macario, M. Ferraro, P. Antonucci, B. Louis, Q. Wang and M. M. Pereira, *Catalysts* **2017**, 7, 59.