

**Síntese de Catalisador Heterogêneo a Base de Vidro Verde e Cascas de ovo
Residual para aplicação na Reação de Transesterificação**DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/conresol.8.25.IV-019>

Leonardo Galuppo Dalazem(*), Carlos Eduardo Borba, Caroline Ribeiro, Cassiano Musial, Thales Uchoa Sobrinho

* Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE. leonardo.dalazem@unioeste.br.**RESUMO**

Diante da crescente demanda por fontes renováveis de energia e da necessidade de valorização de resíduos sólidos, torna-se essencial o desenvolvimento de catalisadores sustentáveis e economicamente viáveis para a produção de biocombustíveis. No presente estudo, foi desenvolvido um catalisador heterogêneo à base de vidro residual verde e hidróxido de sódio para a utilização na reação de transesterificação do óleo de soja. A obtenção do catalisador envolveu o estudo das condições de síntese da fase suporte, do agente modificador e das condições de ativação do catalisador. O estudo da fase suporte demonstrou maior absorção de água e, consequentemente, maior área superficial nas condições de granulometria do vidro e casca de ovo entre 325-400 mesh, com 20% em massa de casca de ovo. Apesar dos resultados de ésteres na reação de transesterificação obtidos serem semelhantes aos do catalisador tratado com KF, o NaOH foi escolhido como agente modificador para o tratamento químico das esferas devido ao seu menor valor de mercado e sua maior estabilidade química. A fase suporte foi tratada quimicamente pelo método de impregnação com solução de NaOH 1,5 M e calcinada a 620 °C. A presença da fase ativa NaSiO₃ foi confirmada pelas análises de DRX. Na reação de transesterificação do óleo de soja, foi utilizado o catalisador obtido nas condições ideais de síntese, e, a 225 °C, 10 MPa, tempo de residência adequado e razão mássica óleo (DMC + etanol) de 1:27 em leito fixo, em que se obteve 95,15% de teor de ésteres etílicos de ácidos graxos. O catalisador demonstrou ser promissor na reação de transesterificação do óleo de soja, podendo alcançar o teor mínimo de ésteres exigido pela legislação do biodiesel com a otimização das condições da reação.

PALAVRAS-CHAVE: Catalisador heterogêneo, residual, óleo de soja, biodiesel, leito fixo.**ABSTRACT**

Given the growing demand for renewable energy sources and the need to valorize solid waste, the development of sustainable and economically viable catalysts for biofuel production becomes essential. In the present study, a heterogeneous catalyst based on green waste glass and sodium hydroxide was developed for use in the transesterification reaction of soybean oil. The catalyst preparation involved studying the synthesis conditions of the support phase, the modifying agent, and the catalyst activation conditions. The support phase study demonstrated greater water absorption and, consequently, a higher surface area under the conditions of glass and eggshell particle size between 325–400 mesh, with 20 wt.% eggshell. Despite the ester yield in the transesterification reaction being similar to that of the catalyst treated with KF, NaOH was chosen as the modifying agent for the chemical treatment of the spheres due to its lower market value and greater chemical stability. The support phase was chemically treated by the impregnation method using a 1.5 M NaOH solution and calcined at 620 °C. The presence of the active phase NaSiO₃ was confirmed by XRD analysis. In the transesterification reaction of soybean oil, the catalyst obtained under optimal synthesis conditions was used at 225 °C, 10 MPa, an adequate residence time, and an oil (DMC + ethanol) mass ratio of 1:27 in a fixed bed reactor, achieving a 95.15% yield of ethyl fatty acid esters. The catalyst proved to be promising for the transesterification reaction of soybean oil, potentially reaching the minimum ester content required by biodiesel regulations with reaction condition optimization.

KEY WORDS: Heterogeneous catalyst, waste, soybean oil, biodiesel, fixed bed.**INTRODUÇÃO**

O uso de combustíveis fósseis foi fundamental para o desenvolvimento humano, mas o esgotamento desses recursos é inevitável. Nesse cenário, a produção do biodiesel via transesterificação catalítica surge como alternativa, utilizando triglicerídeos, álcoois e catalisadores para a produção de ésteres e glicerol. A rota de produção de biodiesel

mais comum no Brasil utiliza a reação de transesterificação com catálise alcalina homogênea em batelada. Um catalisador homogêneo é um tipo de catalisador que está na mesma fase que os reagentes na reação química que ele promove. Esta rota proporciona elevados rendimentos em biodiesel em temperaturas amenas (60 a 80 °C dependendo do álcool utilizado), pressão atmosférica e menor tempo de reação (ZEMPULSKI et al., 2020). Entretanto, os catalisadores homogêneos apresentam desvantagens em seu uso, como a complexo processo de recuperação e reutilização (ENDALEW et al., 2011), e a necessidade de purificação da mistura de ésteres a partir de etapas de lavagem em série que geram grandes quantidades de água residuária.

Os catalisadores heterogêneos consistem em um tipo de catalisador que está em uma fase distinta daquela dos reagentes e produtos da reação química que catalisam, sendo usualmente constituídos por materiais sólidos. Nesse contexto, a utilização de catalisadores heterogêneos pode ser empregada para favorecer rotas reacionais com maior seletividade e atividade catalítica, promovendo elevadas conversões em reações de transesterificação para síntese de biodiesel, além de facilitar a separação pós-reação e reduzir etapas subsequentes de purificação. Essa característica também viabiliza a operação em sistemas contínuos, como reatores de leito fixo ou leito empacotado, que apresentam vantagens em termos de escalabilidade, controle de processo e estabilidade operacional ao longo do tempo. Dessa forma, catalisadores heterogêneos mostram-se vantajosos quanto à redução de custos operacionais, ao mesmo tempo em que atendem aos requisitos normativos (EN 14103) relacionados ao teor mínimo de ésteres de ácidos graxos (96,5%) no biodiesel.

Os catalisadores heterogêneos são compostos por materiais sólidos que atuam como suporte para uma fase ativa, responsável pela catálise. O suporte do catalisador deve apresentar estabilidade mecânica, alta área superficial e estrutura porosa, permitindo a dispersão da fase ativa e, conseqüentemente, melhorando a eficiência catalítica. O vidro residual destaca-se como um suporte promissor para catalisadores e tem sido amplamente utilizado em diversas indústrias. Estudos recentes, como os de Porcel et al. (2023) e Foroutan et al. (2021), demonstraram sua eficácia como suporte em catalisadores heterogêneos para transesterificação, alcançando rendimentos de aproximadamente 99% na conversão em ésteres etílicos e metílicos. Apesar dos bons resultados, melhorias na área superficial e na porosidade da fase suporte do catalisador podem otimizar as condições da reação. Nesse contexto, este estudo busca aprimorar catalisadores à base de vidro residual, incorporando casca de ovo residual para otimizar o suporte em esferas porosas e avaliando o uso de NaOH e KF como agentes ativantes.

OBJETIVOS

Esse trabalho teve como objetivo determinar condições ideais de síntese de um catalisador heterogêneo, na forma de esferas, a base de sílica (vidro residual verde) e agente ativante (fluoreto de potássio ou hidróxido de sódio) para aplicação na reação de transesterificação do óleo de soja. De modo específico, este trabalho visou: (i) Identificar condições ideais de síntese de esferas porosas de vidro residual; (ii) Avaliar qual o agente ativante mais vantajoso (NaOH ou KF) e; (iii) Identificar condições ideais de ativação (tratamento químico) das esferas.

METODOLOGIA

Foram utilizados vidro residual de garrafas verdes, cascas de ovo, ácido clorídrico, alginato de sódio, cloreto de cálcio, etanol, fluoreto de potássio, hidróxido de sódio, óleo de soja comercial refinado, etanol e dimetil carbonato (DMC). O vidro e a casca de ovo foram triturados, peneirados e lavados com ácido clorídrico (1M). A obtenção das esferas de vidro residual foi avaliada por um planejamento experimental 2^3 (planejamento fatorial) e realizada pelo método de gotejamento, misturando soluções compostas por alginato de sódio (1%), vidro residual e casca de ovo em granulometrias 325-400 (+1) e 400-500 (-1) mesh, com proporções 10% (-1) e 20(+1) de casca de ovo. Essas soluções foram gotejadas com uma seringa em uma solução de cloreto de cálcio (100 mM) sob agitação, formando as esferas de gel de tamanho uniforme. As esferas foram lavadas, secas à 90°C por 2 horas, calcinadas à 750°C por 1 hora, tratadas com HCl (1M) por 2 horas e novamente lavadas e secas à 90°C, resultando na fase suporte dos catalisadores. A metodologia completa de síntese dos catalisadores é apresentada na figura 1.

As esferas de vidro, nas melhores condições avaliadas da fase suporte, foram tratadas com os agentes ativantes NaOH e KF por meio do método de impregnação úmida. As esferas ficaram em solução de NaOH (1M) ou KF (15% m/v) por 2 horas, seguidas de aquecimento, agitação até evaporação da água, e secagem à 90°C por 2 horas. Posteriormente, os catalisadores de NaOH e KF foram calcinados a 650°C/3h e 500°C/3h, respectivamente. As condições de tratamento químico (concentração do agente ativante e temperatura de calcinação) utilizando o agente ativante mais vantajoso foram avaliadas por um planejamento experimental 2^2 (planejamento fatorial). A aparência física dos materiais utilizados e da fase suporte do catalisador em diferentes etapas da metodologia de síntese é demonstrada pela figura 2, assim como o catalisador pronto tratado com NaOH.

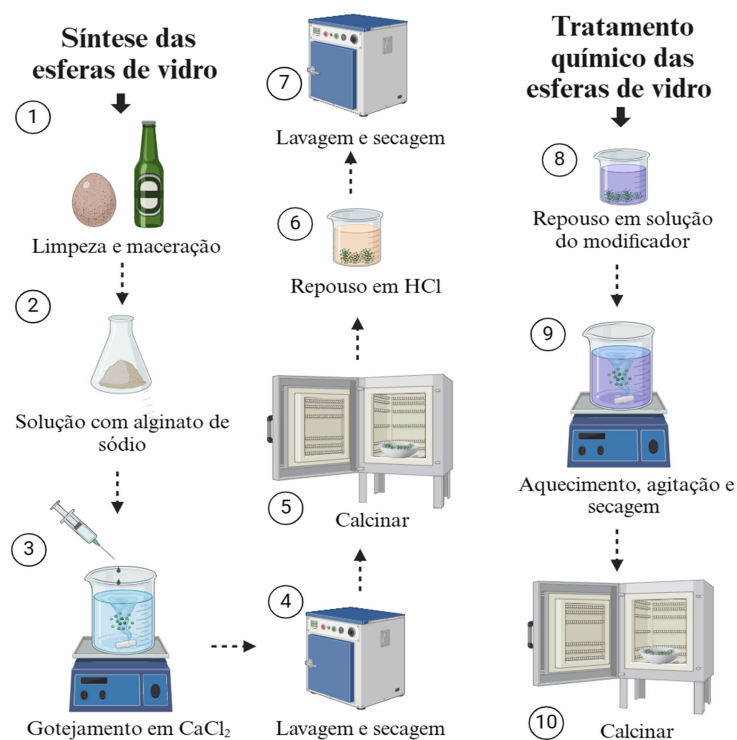


Figura 1: Esquema geral da metodologia utilizada. Fonte: Autor do Trabalho.



Figura 2: Catalisador em diferentes etapas da síntese. Fonte: Autor do Trabalho.

As reações de transesterificação ocorreram em sistema contínuo conforme a metodologia descrita por Zempulski et al. (2020), que consiste em um reator de leito fixo com controle de temperatura, pressão e vazão. Os reagentes foram óleo de soja e solventes (DMC+Etanol) na razão mássica 1:27. As condições de reação foram 10 MPa e 225 °C e 2 g de catalisador. Análise do teor de ésteres nos produtos da reação foi realizada por cromatografia gasosa, seguindo a metodologia descrita no trabalho de Porcel et al. (2023).

O catalisador nas melhores condições foi caracterizado pelas técnicas de DRX e FTIR. A difração de raios X em pó (DRX) foi realizada utilizando fonte de radiação Cu K α ($\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$), e os padrões de difração foram obtidos em ângulos entre 35° e 80° ($\theta - 2\theta$). O objetivo desta análise foi estudar o desenvolvimento da síntese do catalisador, abordando das etapas de síntese da fase suporte até a utilização do catalisador na reação de transesterificação. A técnica de Espectroscopia por Transformada de Fourier no Infravermelho (FTIR) foi realizada na região 400-4000 cm^{-1} , com objetivo de estudar a formação das fases cristalinas no catalisador.

RESULTADOS

A fase suporte de um catalisador heterogêneo tem como objetivo suportar a fase ativa e maximizar a quantidade de sítios ativos em sua superfície (FERREIRA *et al.* 2022). A porosidade é um fator determinante na maximização da área específica e da quantidade de sítios ativos do catalisador. Nesse sentido, foi proposto um projeto experimental 2^3 (DOE) para avaliar as melhores condições de proporção e granulometria de casca de ovo e de vidro residual verde na porosidade da fase suporte. A absorção de água das esferas foi utilizada como um parâmetro indireto para uma análise qualitativa de sua porosidade. Os resultados obtidos estão expostos na figura 3.

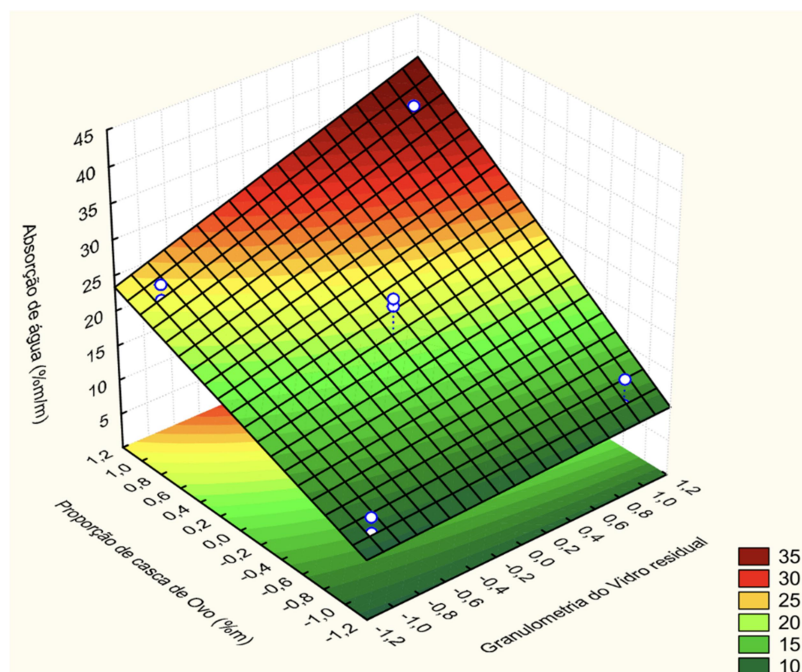


Figura 3: Superfície resposta do planejamento experimentais das condições de síntese das esferas de vidro. Fonte: Autor do Trabalho.

O tratamento estatístico com $R^2 = 0,96225$ e $F_{\text{crítico}} = 7,71$ indicou que as variáveis significativas são a proporção de casca de ovo ($F=99,17$) e a granulometria do vidro residual ($F=14,93$), e que as condições ideais dentro do intervalo avaliado para síntese são: 325-400 mesh de granulometria e 20% de casca de ovo. Na Figura 2, observa-se uma correlação positiva entre a absorção de água, a granulometria do vidro e a proporção de casca de ovo. A relação entre a absorção de água e a proporção de casca de ovo utilizada na síntese se deve ao fato da total remoção da casca de ovo das esferas no processo de síntese (calcinação e repouso em ácido), que resulta na formação de poros nas esferas. Os poros aumentam a área superficial da fase suporte, fator que está relacionado indiretamente a absorção de água, devido relação da área de contato entre a esfera e o líquido e o espaço

disponível para o líquido ocupar. Entretanto, a proporção de casca de ovo é um fator que afeta a resistência mecânica das esferas. Por uma análise qualitativa da síntese das esferas de vidro, em que o teste consistiu em pressionar as esferas com uma pinça, notou-se que percentuais de casca de ovo superiores a 20% implicam em menor resistência mecânica das esferas. A redução da resistência mecânica das esferas ocasiona um maior arraste das fases cristalinas que são presentes em suas superfícies após o tratamento químico, provocando para a desconstrução física do catalisador. Se a fase suporte do catalisador não for mecanicamente resistente o suficiente para suportar as condições da reação, isso pode resultar em problemas como a redução da atividade catalítica ao longo do tempo, e a formação de partículas finas ou aglomerados que podem causar obstruções no reator, ou ainda a redução na eficiência do catalisador. Além disso, a fragilidade da fase suporte do catalisador pode aumentar o teor de lixiviação das fases cristalinas presentes em sua superfície, resultando na necessidade de maior número de etapas de purificação dos produtos da reação de transesterificação (XIE & WAN, 2018). Quanto a relação entre as granulometria de vidro e casca de ovo utilizadas e a área superficial, tem-se um comportamento que pode ser associado ao processo de sinterização realizado na calcinação a 750°C/1h. Esse comportamento se deve ao fato de que partículas de vidro residual de maior tamanho possuem maiores áreas superficiais, resultando em maior área de contato entre as partículas, facilitando a difusão e a formação de ligações entre elas durante a sinterização.

A fase suporte do catalisador desenvolvida anteriormente foi sujeita ao tratamento químico com os agentes modificadores de KF e NaOH. Na Figura 4 é apresentado o teor de ésteres etílicos ao longo do tempo da reação de transesterificação realizada em duplicata nas condições de temperatura e pressão de 10 Mpa e 225 °C, utilizando os catalisadores Vidro/KF e Vidro/NaOH. Os resultados de teores de ésteres etílicos de ácidos graxos obtidos na transesterificação com as esferas tratadas com KF e com NaOH apresentam comportamentos semelhantes (≈81%). Diante disso, foram considerados outros aspectos desses catalisadores, como o custo e a estabilidade química. O NaOH possui menor valor de mercado, R\$ 121,00 (500g pureza ≥98%), enquanto o KF é vendido por R\$ 655,00 (250g, pureza ≥99%), conforme informações da empresa Merk (Sigma-Aldrich) em 19/09/2024. Além disso, observou-se experimentalmente que o NaOH absorve até 20% menos umidade, garantindo maior estabilidade química. Assim, o NaOH foi definido como agente ativante para estudo do tratamento químico da fase suporte do catalisador.

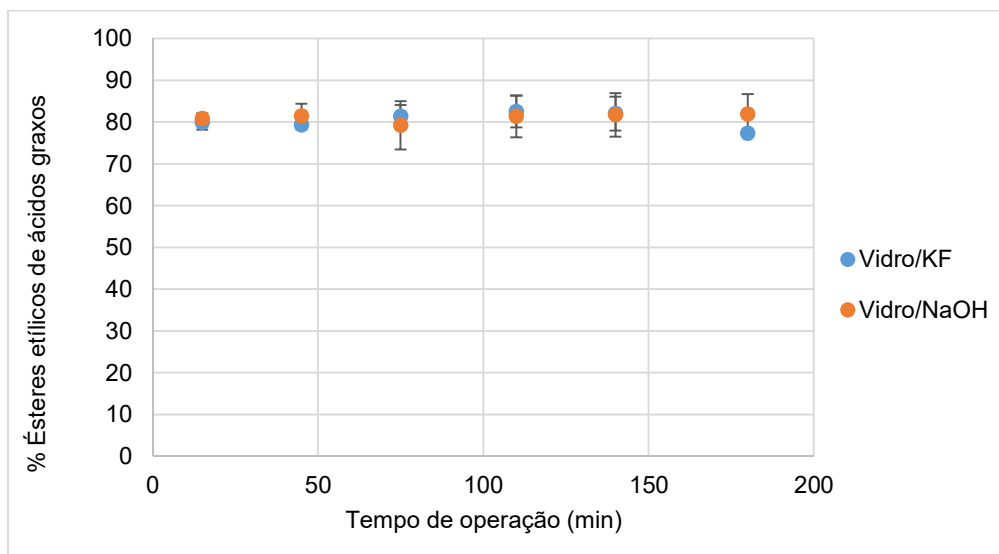


Figura 4: Gráfico do percentual de ésteres resultante da reação de transesterificação com catalisadores Vidro/KF e Vidro/NaOH. Fonte: Autor do Trabalho.

A investigação da influência das condições de tratamento químico da fase suporte (concentração de NaOH e temperatura de calcinação) no teor de ésteres etílicos foi realizada a partir de um planejamento experimental ^{2°}. Neste planejamento experimental, foram avaliadas as temperaturas de 620°C/3h e 680°C/3h, denotadas como níveis (-1) e (+1) respectivamente, e as concentrações de NaOH de 0,5 M (-1) e 1,5 M (+1). Os níveis centrais (0) foram 650°C e 1M. A figura 5 apresenta a superfície resposta dos resultados obtidos. O maior teor de ésteres etílicos de ácidos graxos (95,15±1,23%) foi obtido na transesterificação utilizando o catalisador nas condições de tratamento químico de 1,5 M e 620°C, identificadas como as condições ótimas dentro do intervalo avaliado. A análise estatística ($R^2=0,80393$ e $F_{\text{crítico}}=10,13$) denotou que a temperatura de calcinação é a variável mais significativa ($F=10,32$). O efeito da

temperatura é relacionado a modificação da estrutura cristalina no catalisador, bem como na formação da fase ativa Na_2SiO_3 , dada pela interação entre o hidróxido de sódio e o óxido de silício (SiO_2). No caso da formação da fase ativa, a interação entre o material transportador (Si), proveniente da fase suporte do catalisador (vidro residual), e o componente ativo (Na), proveniente do tratamento químico, é atribuída ao processo de calcinação (WEN et al., 2010). Para o catalisador Vidro/NaOH, a fase ativa Na_2SiO_3 atua como base forte na desprotonação do etanol, formando o íon etóxido, um dos nucleófilos responsáveis pela catálise. Além disso, o íon sódio atua como contra-íon na reação estabilizando o equilíbrio de carga. Dessa forma, diferentes temperaturas podem influenciar na quantidade de fase ativa no catalisador. Além disso, mesmo que a concentração de NaOH e a interação entre os fatores não sejam estatisticamente significativas, isso não elimina a possibilidade de efeitos relevantes em faixas diferentes de concentração ou com combinações adicionais de fatores. O aumento da concentração de agente ativante, e consequentemente aumento da razão mássica NaOH/Vidro é associado ao aumento da basicidade do catalisador, possivelmente devido a formação de grupos básicos durante o processo de síntese. Com base na literatura (ALVES et al., 2013; BOZ et al., 2009), a basicidade de um catalisador heterogêneo utilizado para a reação de transesterificação é um fator que possui correlação positiva com o percentual de ésteres, devido a formação da fase ativa na superfície do catalisador. Entretanto, altas concentrações do agente ativante podem resultar em aglomeração da fase ativa no catalisador, obstruindo os sítios ativos e diminuindo a área específica, podendo influenciar negativamente no teor de ésteres resultante da reação de transesterificação (BOZ et al., 2009). Dessa forma, o comportamento do teor de ésteres utilizando concentrações de agente ativante acima de 1,5 M pode não apresentar o mesmo comportamento crescente observado no intervalo 0,5-1,5 M na figura 4. Além disso, o trabalho de Porcel et al. (2023) demonstrou o impacto da relação mássica entre o agente ativante (KF) e a fase suporte nos resultados da lixiviação da fase ativa do catalisador, onde observa-se que essa lixiviação nas reações de transesterificação é um fator que interfere na quantidade de etapas necessárias para a purificação dos produtos.

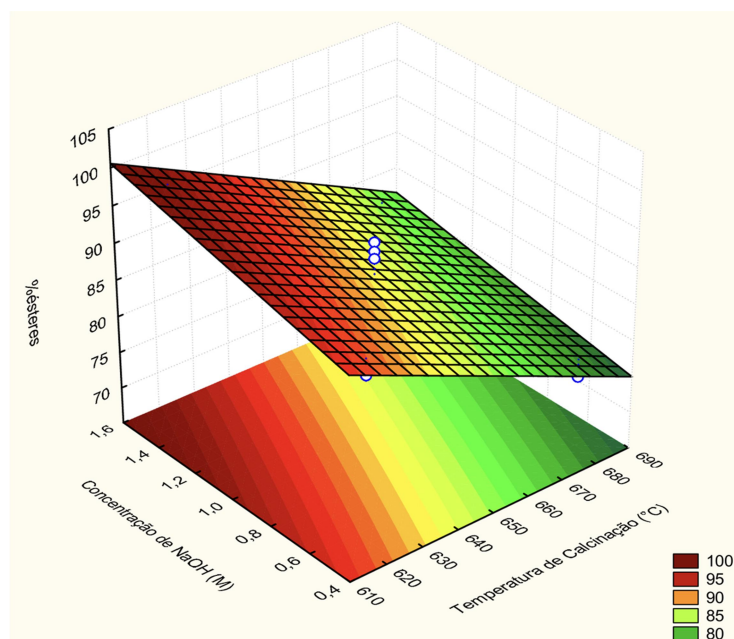


Figura 5: Superfície de resposta do planejamento experimental das condições de tratamento químico das esferas.

Fonte: Autor do Trabalho.

O catalisador em suas melhores condições e síntese, 325-400 mesh de granulometria e 20% de casca de ovo com tratamento químico de NaOH 1,5 M e 620°C, foi caracterizado pelas técnicas de DRX e FTIR. A análise de DRX foi realizada em diferentes etapas da síntese do catalisador, como denotado na figura 6. As análises das amostras (a) e (d) demonstraram o comportamento amorfo do vidro, demonstrando a total remoção da casca de ovo após o processo de calcinação e repouso em ácido. Para a amostra (b), observa-se o pico característico de carbonato de cálcio (CaCO_3) presente na casca de ovo em aproximadamente 29°, que após a calcinação se decompõe em CaO, como demonstra o pico em aproximadamente 37° na amostra (c). As caracterizações (e) e (f) demonstram picos em 25°, 35°, 37° e 48° que

indicam presença Na_2SiO_3 formado na superfície do catalisador (FOROUTAN *et al.*, 2021), antes e depois da reação de transesterificação, indicando que não ocorreu completa lixiviação do catalisador.

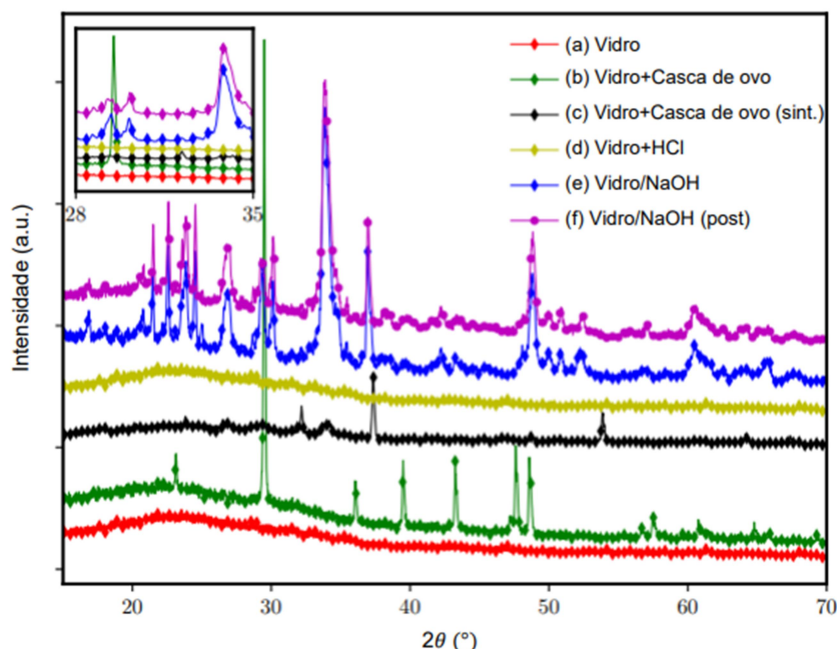


Figura 6: Caracterização DRX do catalisador em diferentes etapas da síntese. Fonte: Autor do Trabalho.

O espectro resultante da análise FTIR, apresentado pela figura 7, revelou um pico amplo em aproximadamente 3400 cm^{-1} relacionado às vibrações do grupo funcional OH da molécula de H_2O ou Si-OH presente no catalisador (FOROUTAN *et al.*, 2018). Além disso, observa-se diferentes picos de absorção em 1039 cm^{-1} , 966 cm^{-1} e 714 cm^{-1} , que corresponderam às vibrações de Si-O-Si, Si-O-H e Si-O-Si, respectivamente (VADERY *et al.*, 2019). O pico que indica a formação de silicatos de sódio (Si-O-Na) é observado em 886 cm^{-1} . Dessa forma, tem-se que a formação da fase cristalina Na_2SiO_3 foi confirmada pelas análises de caracterização.

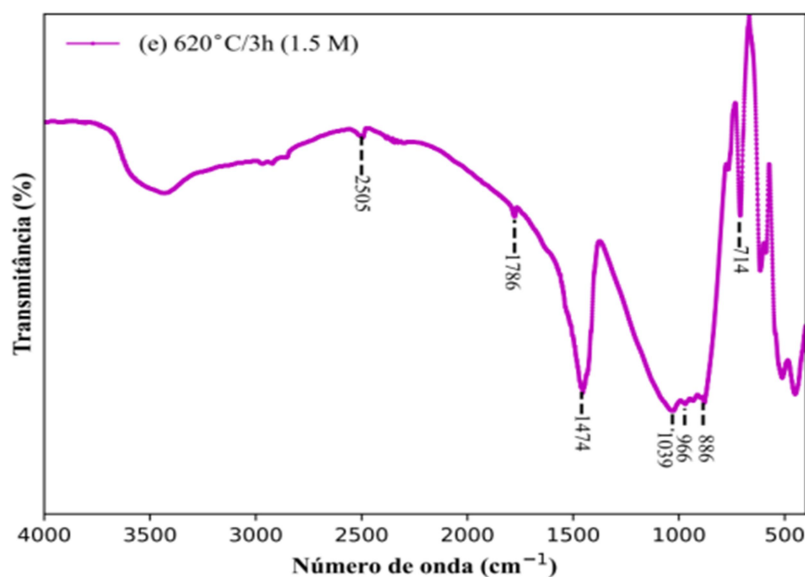


Figura 7: Caracterização FTIR do catalisador Vidro/NaOH tratado a 1,5 M e 620°C . Fonte: Autor do Trabalho.

CONCLUSÃO

O catalisador sintetizado a partir de vidro residual, casca de ovo e NaOH obteve o teor de ésteres de 95,15% na reação de transesterificação do óleo de soja, nas condições de 225 °C/10 MPa/1,2g de catalisador e uma razão óleo: solventes de 1:27. Dentre as condições avaliadas, a fase suporte obteve maior área superficial utilizando 20% de casca de ovo e granulometrias de 325-400, enquanto o maior teor de ésteres foi alcançado utilizando 1,5M de NaOH e 620°C/3h no tratamento químico. O catalisador demonstrou ser promissor para a obtenção de biodiesel utilizando a reação transesterificação nas condições de operação da reação ideais, que podem ser obtidas por um estudo posterior.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Alves, H. J., da Rocha, M. R., Monteiro, M. R., Moretti, C., Cabrelon, M. D., Milinski, M. C. **Treatment of clay with KF: New solid catalyst for biodiesel production.** *Applied Clay Science*, 91–92, p. 98–104, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169131714000374>. Acesso em: 10 de agosto de 2024.
2. Boz, N.; Degirmenbasi, N.; Kalyon, D. M. **Conversion of biomass to fuel: Transesterification of vegetable oil to biodiesel using KF loaded nano- γ - Al_2O_3 as catalyst.** *Applied Catalysis B: Environmental*, 89, n. 3–4, p. 590–596, 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926337309000319>. Acesso em: 5 de agosto de 2024.
3. Endalew, A. K.; Kiros, Y.; Zanzi, R. **Inorganic heterogeneous catalysts for biodiesel production from vegetable oils.** *Biomass and Bioenergy*, 35, p. 3787–3809, 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0961953411003357>. Acesso em: 26 de julho de 2024.
4. Ferreira, L. E. M., Ribeiro, S. A. R., Madriaga, V. G. C., Vasconcelos, S. C., Shimabukuro, E. T. T., Rossa, V., Vieira, S. S., Passos, F. B., & Lima, T. M. **A brief overview on single-atom catalysis: concepts and applications.** *Química Nova*, 45, Sociedade Brasileira de Química, p. 194-206, 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/9hrm7t4TfFrBfgXb9wqw7VL/>. Acesso em: 14 de junho de 2024.
5. Foroutan, R.; Mohammadi, R.; Ramavandi, B. **Waste glass catalyst for biodiesel production from waste chicken fat: Optimization by RSM and ANNs and toxicity assessment.** *Fuel*, v. 291, 120151, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236121000272>. Acesso em: 10 de junho de 2024.
6. Foroutan, R., Zareipour, R., & Mohammadi, R. **Fast adsorption of chromium (VI) ions from synthetic sewage using bentonite and bentonite/bio-coal composite: A comparative study.** *Materials Research Express*, 6(2), 025508, 2018.
7. Porcel, M. G.; Mello, B. T. F.; Alves, H. J.; Schneider, R.; Silva, C.; Borba, C. E. **Synthesis and characterization of KF/waste glass catalyst for use in the transesterification process under pressurized conditions.** *Renewable Energy*, v. 203, p. 56-67, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148122018043>. Acesso em: 17 de fevereiro de 2024.
8. Vadery, V., Cherikkallinmel, S. K., Ramakrishnan, R. M., Sugunan, S., & Narayanan, B. N. **Green production of biodiesel over waste borosilicate glass derived catalyst and the process up-gradation in pilot scale.** *Renewable Energy*, 141, p. 1042–1053, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148119305373>. Acesso em: 26 de agosto de 2024.
9. Wen, L., Wang, Y., Lu, D., Hu, S., Han, H. **Preparation of KF/CaO nanocatalyst and its application in biodiesel production from Chinese tallow seed oil.** *Fuel*, 89, n. 9, p. 2267–2271, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236110000360>. Acesso em: 20 de junho de 2024.
10. Xie, W., Wam, F. **Basic ionic liquid functionalized magnetically responsive Fe_3O_4 @HKUST-1 composites used for biodiesel production.** *Fuel*, 220, p. 248–256, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S001623611830173X>. Acesso em: 12 de agosto de 2024.
11. Zempulski, D. A., Trentini, C. P., Milinsk, M. C., Alves, H. J., & da Silva, C. **Continuous transesterification reaction of residual frying oil with pressurized ethanol using KF/Clay as catalyst.** *European Journal of Lipid Science and Technology*, 122, 1900315, 2020. Disponível em:

8º CONRESOL

8º Congresso Sul-Americano
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade



FOZ DO IGUAÇU

• 06 a 08 de Maio de 2025 •

<https://grasasyaceites.revistas.csic.es/index.php/grasasyaceites/article/view/1930>. Acesso em: 17 de fevereiro de 2024.