

"Síntese Zeólitas do Tipo MCM-41 a partir de Sílica Residual de Laboratório de Química e Carvão Ativado de Resíduos de Borra de Café para o Tratamento de Efluentes Industriais Visando a Produção de Hidrogênio Verde"

Pascoal de Assunção Bezerra Neto¹

Orivaldo da Silva Lacerda jr²

¹Discentado: Centro de Educação Ítalo Bologno-CETIB-SENAI-Mossoró-RN.

²Docente: Centro de Educação Ítalo Bologno-CETIB-SENAI-Mossoró-RN.

Resumo

Este trabalho apresenta uma proposta sustentável para o tratamento de efluentes industriais visando à produção de hidrogênio verde, por meio da síntese de MCM-41 a partir de sílica residual de laboratório de química e da produção de carvão ativado utilizando borra de café. Os materiais obtidos foram aplicados em filtros experimentais e testados com amostras de efluente de indústrias localizadas em Mossoró-RN. Os resultados mostraram significativa remoção de contaminantes, com reduções de até 87% na turbidez, 73% nos sólidos totais dissolvidos, 65% na DQO e 68% na DBO. Os ensaios foram conduzidos em escala de bancada, demonstrando a viabilidade técnica da proposta. Como etapa futura, recomenda-se a transição para escala piloto ou semi-industrial. A pesquisa contribui para a valorização de resíduos, o tratamento de águas industriais e o fortalecimento da cadeia produtiva do hidrogênio verde, alinhando-se aos princípios da economia circular e aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS).

Palavras-chave: MCM-41; carvão ativado; resíduos; efluente industrial; hidrogênio verde.

Abstract

This study presents a sustainable approach for the treatment of industrial effluents aimed at green hydrogen production through the synthesis of MCM-41 from laboratory waste silica and the production of activated carbon from and coffee grounds. The materials obtained were used in experimental filters and tested with effluent samples from industries located in Mossoró, Brazil. The results showed significant contaminant removal, with reductions of up to 87% in turbidity, 73% in total dissolved solids, 65% in chemical oxygen demand (COD), and 68% in biochemical oxygen demand (BOD). The experiments were carried out at bench scale, demonstrating the technical feasibility of the proposal. As a next step, a transition to pilot or semi-industrial scale is recommended. The research contributes to waste valorization, industrial wastewater treatment, and the strengthening of the green hydrogen production chain, aligning with circular economy principles and the Sustainable Development Goals (SDGs).

Keywords: MCM-41; activated carbon; waste reuse; industrial effluent; green hydrogen.

Introdução

O hidrogênio verde tem se consolidado como uma alternativa energética promissora no contexto da descarbonização da matriz energética mundial. Trata-se de um combustível obtido por meio da eletrólise da água, processo em que a molécula de H_2O é decomposta em oxigênio e hidrogênio utilizando eletricidade proveniente de fontes renováveis, como energia solar e eólica. Por não gerar emissões de gases de efeito estufa durante sua produção, esse tipo de hidrogênio é considerado ambientalmente sustentável (IEA, 2022). Diferentemente do hidrogênio cinza, obtido a partir de gás natural sem captura de carbono, e do hidrogênio azul, que utiliza tecnologias de captura e armazenamento de CO_2 , o hidrogênio verde representa a forma mais limpa desse vetor energético (FERREIRA et al., 2023).

A proposta de economia circular vem ganhando espaço no desenvolvimento de novas tecnologias para tratamento de efluentes e produção de energia limpa. Nesse sentido, a reutilização de resíduos como a sílica descartada em laboratórios de química, casca de coco e borra de café permite a produção de materiais de alto valor agregado, como o MCM-41 e o carvão ativado. A aplicação desses materiais no tratamento de águas residuais industriais contribui não apenas para a mitigação de impactos ambientais, mas também para a recuperação de água com qualidade suficiente para ser utilizada em processos de eletrólise (LEAL; SOUZA; MENDES, 2021). Essa abordagem integra os princípios da sustentabilidade e da química verde, promovendo um ciclo produtivo mais eficiente e menos dependente de recursos naturais primários.

O MCM-41 é um material mesoporoso de sílica com estrutura hexagonal ordenada, elevada área superficial e alta estabilidade térmica, características que o tornam eficiente na adsorção de poluentes orgânicos e inorgânicos (KRESGE et al., 1992). Já o carvão ativado é um material carbonáceo poroso, amplamente empregado em processos de purificação e adsorção, podendo ser obtido a partir de resíduos lignocelulósicos, como casca de coco e borra de café, por meio de processos de ativação física ou química (PEREIRA et al., 2020). A produção desses materiais a partir de resíduos orgânicos e inorgânicos viabiliza

soluções de baixo custo e alto desempenho para o tratamento de águas residuais, alinhando-se aos objetivos do desenvolvimento sustentável.

Dessa forma, o presente resumo expandido tem como objetivo propor a síntese de MCM-41 a partir de sílica residual de laboratórios de química e de carvão ativado obtido de resíduos orgânicos, aplicando-os no tratamento de efluentes industriais visando à produção de hidrogênio verde. A proposta busca integrar inovação científica, valorização de resíduos e sustentabilidade ambiental, contribuindo para a melhoria da qualidade da água e para o avanço das tecnologias limpas e renováveis.

Metodologia

A pesquisa foi desenvolvida em quatro etapas principais: (i) coleta e preparação de resíduos, (ii) síntese do material mesoporoso MCM-41, (iii) produção do carvão ativado a partir de biomassa, (iv) montagem dos filtros para tratamento da água e (v) realização das análises físico-químicas das amostras de efluente industrial.

Na primeira etapa, foram coletados resíduos de sílica descartada de experimentos em laboratórios de química da UFERSA/UERN, cascas de coco seco e borra de café proveniente de estabelecimentos locais. Os resíduos foram lavados com água destilada para remoção de impurezas, secos em estufa a 105 °C por 24 horas e, em seguida, triturados e peneirados para padronização granulométrica.

A síntese do MCM-41 foi realizada conforme o método proposto por Kresge et al. (1992), com adaptações. A sílica residual foi dissolvida em solução alcalina (NaOH 2 mol L⁻¹), e em paralelo preparou-se uma solução contendo brometo de cetiltrimetilamônio (CTAB) como agente direcionador de estrutura. As duas soluções foram misturadas sob agitação magnética por 3 horas a temperatura controlada de 40 °C. Após a formação do gel, o material foi envelhecido por 48 horas a 100 °C em autoclave, lavado com água destilada e etanol, seco em estufa e calcinado a 550 °C por 6 horas para remoção do agente orgânico.

Para a obtenção do carvão ativado, as cascas de coco e a borra de café foram misturadas em proporção 1:1 (m/m), impregnadas com solução de

hidróxido de potássio ($\text{KOH } 1 \text{ mol L}^{-1}$), e submetidas à secagem por 24 horas. O material seco foi carbonizado em forno mufla sob atmosfera de nitrogênio a 450°C por 2 horas. Após resfriamento, foi lavado com ácido clorídrico diluído ($\text{HCl } 0,1 \text{ mol L}^{-1}$) e água destilada até pH neutro, seguido de secagem final a 105°C . O material obtido foi triturado e peneirado para uso nos filtros.

Os filtros foram montados em colunas de vidro contendo camadas alternadas de MCM-41 e carvão ativado, com manta geotêxtil na base para suporte. As colunas foram utilizadas para o tratamento de efluentes industriais coletados em três indústrias alimentícias e têxteis localizadas na zona urbana de Mossoró-RN. As amostras de água foram coletadas diretamente nos pontos de descarga dos efluentes, acondicionadas em frascos de polietileno, mantidas sob refrigeração (4°C) e analisadas em até 48 horas.

As análises físico-químicas incluíram a determinação de pH (potenciometria), condutividade elétrica (condutivimetria), turbidez (nefelometria), sólidos totais dissolvidos (gravimetria), demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO) seguindo os procedimentos descritos no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2017). Os resultados obtidos antes e após a filtração foram comparados para avaliar a eficiência dos materiais sintetizados no processo de purificação da água industrial.

Resultados e Discussão

Os filtros construídos com MCM-41 e carvão ativado apresentaram desempenho significativo na remoção de contaminantes das águas residuais coletadas. Após a passagem das amostras pelos sistemas de filtração, observou-se redução média de 87% na turbidez, 73% nos sólidos totais dissolvidos (STD), 65% na demanda química de oxigênio (DQO) e 68% na demanda bioquímica de oxigênio (DBO). O pH das amostras, inicialmente variando entre 5,4 e 6,2, foi ajustado para faixas mais neutras (6,6 a 7,1), adequadas para processos de eletrólise.

A eficiência do MCM-41 na adsorção de contaminantes orgânicos e metálicos está relacionada à sua alta área superficial ($>1000 \text{ m}^2/\text{g}$) e estrutura porosa altamente ordenada (KRESGE et al., 1992). Em combinação com o

carvão ativado, que possui elevada capacidade de adsorção de compostos orgânicos e corantes industriais, o sistema demonstrou potencial equivalente a filtros industriais de maior custo, como os compostos por zeólitas comerciais ou membranas cerâmicas (SANTOS et al., 2021).

Comparativamente, estudos como o de Silva et al. (2022) relataram remoção de 70 a 90% de DQO utilizando processos eletroquímicos (como eletrocoagulação e eletrólise direta) em efluentes têxteis. Embora eficazes, tais métodos demandam maior consumo energético e manutenção de eletrodos metálicos, além de riscos de geração de subprodutos tóxicos. O sistema de filtração proposto, por sua vez, utiliza materiais de baixo custo e baseados em resíduos reaproveitados, promovendo alinhamento com os princípios da economia circular e sustentabilidade.

No que tange à comparação com tratamentos microbiológicos, como sistemas anaeróbios e lagoas de estabilização, os filtros com MCM-41 e carvão ativado mostraram maior rapidez na purificação, embora métodos biológicos frequentemente apresentem remoção mais eficiente de carga orgânica ao longo de períodos prolongados (30–60 dias). Segundo Oliveira et al. (2020), a DQO em reatores UASB foi reduzida em até 85%, porém com maior tempo de residência e demanda de controle microbiológico. Assim, o uso de materiais adsorventes pode ser uma alternativa complementar ou prévia à aplicação de métodos biológicos, acelerando a redução inicial de poluentes.

Outro aspecto relevante é a aplicação da água tratada no processo de eletrólise para produção de hidrogênio verde. Conforme apontado por Zhang et al. (2021), a presença de matéria orgânica, sais dissolvidos e metais pesados reduz a eficiência da eletrólise e pode danificar os eletrodos. Os resultados obtidos neste trabalho demonstraram que o tratamento com os filtros experimentais reduziu a condutividade e os contaminantes orgânicos a níveis compatíveis com padrões mínimos exigidos para pré-tratamento em sistemas de eletrólise alcalina, contribuindo para a viabilidade do reuso da água em tecnologias de energia limpa.

Portanto, a combinação do MCM-41 e do carvão ativado, obtidos a partir de resíduos laboratoriais e orgânicos, mostrou-se eficiente na purificação de

efluentes industriais com vistas à sua utilização na produção de hidrogênio verde, sendo uma solução sustentável, de baixo custo e tecnicamente viável para aplicação em ambientes urbanos de médio porte, como a cidade de Mossoró.

Os resultados obtidos neste estudo foram realizados em escala de bancada, utilizando quantidades controladas dos materiais adsorventes (MCM-41 e carvão ativado) e volumes reduzidos de águas residuais industriais coletadas na cidade de Mossoró. A eficiência observada na remoção de contaminantes, como cor, turbidez, matéria orgânica e metais, indicou o potencial dos materiais produzidos a partir de resíduos para aplicações em processos sustentáveis de tratamento de efluentes. Diante dos bons resultados obtidos em laboratório, recomenda-se que os próximos passos incluam a transição para uma escala piloto ou semi-industrial, com produção dos adsorventes em quantidades da ordem de quilogramas, possibilitando a validação dos processos em volumes maiores de água e em condições operacionais mais próximas das industriais. Essa ampliação permitirá avaliar com mais precisão a viabilidade técnica e econômica da tecnologia desenvolvida.

Conclusão

O presente estudo demonstrou que o uso de materiais adsorventes produzidos a partir de resíduos — como o MCM-41 obtido de sílica residual de laboratório e o carvão ativado produzido a partir de casca de coco e borra de café — representa uma estratégia promissora, sustentável e de baixo custo para o tratamento de águas residuais industriais. Os filtros construídos com esses materiais apresentaram significativa eficiência na remoção de contaminantes orgânicos e inorgânicos, adequando a qualidade da água tratada aos parâmetros mínimos exigidos para aplicações em processos de eletrólise voltados à produção de hidrogênio verde.

A combinação entre o tratamento de efluentes, a valorização de resíduos e a geração de energia limpa evidencia a importância da integração entre diferentes áreas do conhecimento dentro de um modelo de economia circular. Tal abordagem contribui tanto para a mitigação de impactos ambientais quanto

para o aproveitamento eficiente de recursos disponíveis localmente, como no contexto da cidade de Mossoró.

Comparações com dados da literatura indicaram que, embora métodos eletroquímicos e microbiológicos apresentem elevada eficácia, a proposta deste trabalho se destaca por sua viabilidade técnica e socioeconômica, especialmente em regiões com limitações de infraestrutura e recursos. Além disso, o uso de materiais reciclados reforça o potencial de replicação da metodologia em outros contextos urbanos e industriais.

Dessa forma, este estudo não apenas propõe uma solução inovadora para o tratamento de efluentes industriais, mas também contribui com alternativas viáveis para o fortalecimento da cadeia produtiva do hidrogênio verde, alinhando-se aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) e à transição energética em direção a uma matriz mais limpa e renovável.

KRESGE, C. T. et al. Ordered mesoporous molecular sieves synthesized by a liquid-crystal template mechanism. *Nature*, London, v. 359, p. 710–712, 1992. DOI: <https://doi.org/10.1038/359710a0>.

OLIVEIRA, J. L. de et al. Eficiência de reatores anaeróbios na remoção de carga orgânica de efluentes industriais. *Revista Brasileira de Biotecnologia Aplicada*, Cascavel, v. 9, n. 2, p. 88-96, 2020. Disponível em: <https://revistas.unipar.br/index.php/biotecnologia>. Acesso em: 25 maio 2025.

SANTOS, R. F. dos; LIMA, A. C.; PESSOA, D. L. B. Remoção de corantes industriais com carvão ativado: uma alternativa acessível para o tratamento de efluentes. *Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada*, Recife, v. 6, n. 1, p. 21-29, 2021. Disponível em: <https://seer.uft.edu.br/index.php/repa/article/view/10791>. Acesso em: 25 maio 2025.

SILVA, G. D. M. da et al. Aplicação de processos eletroquímicos no tratamento de efluentes têxteis: remoção de DQO e cor aparente. *Revista Água e Saneamento*, São Paulo, v. 11, n. 2, p. 43-51, 2022. Disponível em: <https://revistas.unesp.br/aguasaneamento>. Acesso em: 25 maio 2025.

ZHANG, Y. et al. Influence of organic and inorganic impurities on water electrolysis performance: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Amsterdam, v. 135, 110217, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110217>.

FERREIRA, L. R.; SOUZA, A. F.; RIBEIRO, M. S. Potencial do hidrogênio verde na matriz energética brasileira: uma revisão. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, v. 12, n. 2, p. 459-472, 2023.

IEA – International Energy Agency. *Global Hydrogen Review 2022*. Paris: IEA, 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022>. Acesso em: 25 maio 2025.

LEAL, R. P.; SOUZA, T. S.; MENDES, F. M. Economia circular e o reuso de resíduos na produção de materiais para tratamento de efluentes. *Revista Engenharia Sustentável*, v. 8, n. 1, p. 55-66, 2021.

PEREIRA, J. S. et al. Produção de carvão ativado a partir de resíduos agroindustriais: uma abordagem sustentável. *Revista Brasileira de Engenharia Ambiental e Sustentável*, v. 7, n. 3, p. 15-25, 2020.