



Produção de carvão ativado a partir da lignina residual de biorrefinarias de etanol como solução sustentável para remoção de arsênio e cádmio em soluções aquosas

Alice C. Rodrigues (PG)^{1*}, Brenner Gomes (PQ)¹, Leandro V. A. Gurgel (PQ)¹

¹ Grupo de Físico-Química Orgânica, Departamento de Química, Instituto de Ciências Exatas e Biológicas, Universidade Federal de Ouro Preto, Campus Morro do Cruzeiro, Rua Quatro, 786, Bauxita, 35402-136 Ouro Preto, Minas Gerais, Brazil

¹ legurgel@ufop.edu.br

RESUMO

RESUMO - Este estudo visa sintetizar carvão ativado a partir de lignina residual de uma planta brasileira de etanol de segunda geração (E2G), como material adsorvente para a remoção de As(V) e Cd(II) em fase líquida. A lignina residual foi processada por ativação, resultando em um carvão de elevada porosidade e superfície funcionalizada. A caracterização do material foi realizada utilizando técnicas de FTIR para identificar grupos funcionais, CHNSO para análise elementar e DRX para avaliar a estrutura cristalina. Os resultados indicam que o carvão ativado apresenta potencial promissor como material adsorvente em processos de remediação ambiental, contribuindo para a valorização de resíduos lignocelulósicos e o desenvolvimento de soluções sustentáveis de tratamento de contaminantes metálicos.

Palavras-chave: carvão ativado, lignina residual, adsorção, metais tóxicos, caracterização.

Introdução

A crescente preocupação com a contaminação de recursos hídricos por espécies tóxicas, como o arsenieto (As(V)) e o cádmio (Cd(II)), destaca a necessidade de desenvolver materiais adsorventes eficientes e sustentáveis (1). A utilização de resíduos lignocelulósicos, como a lignina residual de plantas de etanol de segunda geração (E2G), representa uma estratégia promissora para a produção de carvão ativado de baixo custo, contribuindo para a economia circular e a valorização de resíduos industriais (2,3). A ativação térmica e química da lignina possibilita a obtenção de materiais com elevada área superficial, ideal para processos de remoção de contaminantes inorgânicos tóxicos em fase líquida (4,5). Técnicas como FTIR, CHNSO e DRX auxiliam na caracterização estrutural e funcional do carvão, essenciais para entender sua eficiência na adsorção de espécies inorgânicas tóxicas (6,7). Assim, este estudo visa sintetizar e caracterizar carvão ativado a partir de lignina residual, com potencial para remoção de As(V) e Cd(II), promovendo uma abordagem sustentável para o tratamento de águas contaminadas (8,9).

Experimental

Impregnação com tioureia:

- Biomassa (LT) misturada com tioureia (CSNH₂).
- Aquecida a 99 °C por 10 h e classificada granulometricamente (10 mesh).

Tratamento com FeCl₃:

- Impregnação com FeCl₃, seguida de novo aquecimento a 99 °C por 10 h.

- Nova classificação granulométrica (10 mesh).

Ativação com KOH e Pirólise:

- Mistura com KOH (razão KOH:L2).
- Pirólise sob atmosfera de N₂ (150 mL·min⁻¹).

Lavagem e Secagem:

- Lavado com HCl 0,1 mol·L⁻¹ e água até pH neutro.
- Secado a 99 °C por 2 h.

Resultados e Discussão

A análise por difração de raios-X (Figura 1) indicou que o material carbonáceo apresenta uma estrutura predominantemente amorfa, como evidenciado pela ausência de picos bem definidos no difratograma. Observa-se uma banda larga e difusa entre 20° e 30° (2θ), típica do plano (002) da grafita desordenada, o que confirma a baixa cristalinidade e a presença de uma estrutura turbostrática comum em carvões ativados. Além disso, foram identificados picos discretos e de baixa intensidade em torno de 43° e 50°, que sugerem a presença de resíduos inorgânicos cristalinos, como óxidos de ferro (Fe₂O₃ ou Fe₃O₄), possivelmente remanescentes do processo de ativação com cloreto férrico (FeCl₃). A presença desses resíduos pode ser vantajosa em aplicações catalíticas ou adsorptivas, especialmente na remoção de íons metálicos, onde centros metálicos ativos favorecem interações específicas por mecanismos de troca iônica ou complexação. A estrutura amorfa e desordenada é desejável em materiais porosos, pois contribui para o desenvolvimento de uma morfologia rica em micro- e mesoporos e com elevada área superficial, o que torna o material particularmente eficiente



em aplicações ambientais, como a adsorção de contaminantes orgânicos e inorgânicos em meio aquoso.

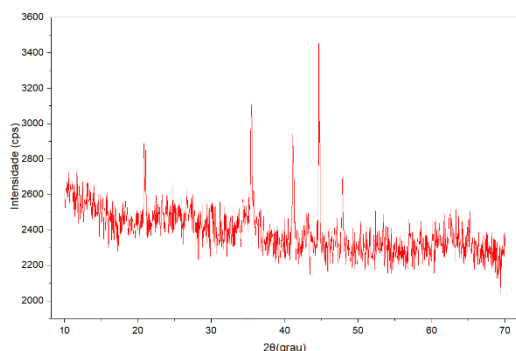


Figura 1. Espectro de DRX do carvão ativado.

A caracterização elementar do carvão ativado (Tabela 1) revelou teores médios de 34,99% de carbono (C), 0,861% de nitrogênio (N), 0,446% de hidrogênio (H) e 2,818% de enxofre (S). O elevado teor de carbono é característico de materiais carbonizados e indica a eficiência da pirólise e ativação química, que promovem a remoção de voláteis e o enriquecimento da fração carbonácea. A presença de nitrogênio e enxofre confirma a funcionalização bem-sucedida com tioureia (CSNH₂), responsável pela incorporação simultânea desses heteroátomos. O nitrogênio pode estar presente em formas piridínicas, pirrôlicas, aminas ou imidas, que elevam a basicidade da superfície e favorecem a adsorção de ânions por interações eletrostáticas. O enxofre, por sua vez, pode ser incorporado como grupos tiol (-SH), sulfonas (-SO₂) ou em estruturas aromáticas, conferindo propriedades redox e potencial de complexação.

O baixo teor de hidrogênio (<0,5%) é esperado após a pirólise, refletindo a degradação térmica de cadeias alifáticas e a eliminação de grupos voláteis como água e compostos oxigenados.

Réplica	%C	%N	%H	%S
1	35,588	0,876	0,492	2,770
2	34,395	0,846	0,399	2,865
Média	34,991	0,861	0,446	2,818

Tabela 1. Resultados da análise elementar (% m/m)

A espectroscopia FTIR (Figura 2) evidenciou diversos grupos funcionais na superfície do carvão ativado. A banda larga em ~3400 cm⁻¹ está associada a grupos hidroxilas (O-H) e água adsorvida, enquanto as bandas entre 2920 e 2850 cm⁻¹ indicam a presença de cadeias alifáticas (ligações C-H). A absorção em ~1700 cm⁻¹ corresponde a grupos carbonílicos (C=O), como ácidos carboxílicos e quinonas, importantes para interações com íons metálicos. O pico em ~1600 cm⁻¹ sugere estruturas aromáticas parcialmente oxidadas (C=C), e a região entre 1100 e 1000 cm⁻¹ revela ligações C-O, comuns em fenóis, éteres e ésteres. Bandas abaixo de 800 cm⁻¹ foram atribuídas a deformações fora do plano em anéis aromáticos e possíveis resíduos metálicos do FeCl₃. Esses



grupos funcionais aumentam a reatividade superficial, favorecendo a adsorção de contaminantes por mecanismos como complexação, trocas iônicas e ligações de hidrogênio.

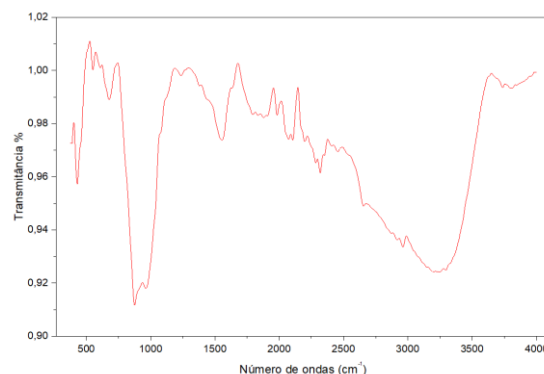


Figura 2. Espectro de FTIR do carvão ativado

Conclusões

A funcionalização do carvão ativado com tioureia resultou em um material com grupos contendo nitrogênio e enxofre, estrutura amorfa e porosidade adequada. Essas características favorecem a adsorção de contaminantes por interações eletrostáticas, complexação e ligações de hidrogênio. O material mostra potencial para aplicações ambientais, especialmente na remoção de poluentes em meio aquoso.

Agradecimentos

Os autores agradecem a UFOP, FAPEMIG, CNPq, UFMG, CAPES.

Referências

1. Y. Liu, H. Zhang, J. Chen, Valorization of Lignocellulosic Residues for Production of Activated Carbons: A Review, *Chem. Eng. J.* 2019, 370, 1224-1233.
2. Q. Yao, L. Li, L. Zhang, Synthesis and Application of Biochar Derived from Agricultural Waste for Water Treatment: A Review, *Bioresour. Technol.* 2018, 261, 231-245.
3. M. Ahmed, S. S. Islam, T. Islam, Structural and Adsorption Properties of Activated Carbon Prepared from Agricultural Waste, *Appl. Surf. Sci.* 2020, 502, 144153.
4. H. Zhang, K. Li, F. Wang, Functionalization of Biochar for Enhanced Metal Removal: A Review, *Environ. Sci. Technol.* 2021, 55, 6293-6306.
5. S. P. Singh, R. K. Gupta, P. K. Sinha, Characterization Techniques for Activated Carbon: FTIR, XRD, and Elemental Analysis, *Mater. Charact.* 2017, 129, 174-182.
6. S. Kumar, P. K. Sinha, M. M. Singh, Application of FTIR, XRD, and SEM for Characterization of Activated Carbons for Water Treatment, *J. Clean. Prod.* 2016, 135, 1-10.
7. A. M. Costa, R. N. Silva, L. F. Pereira, Environmentally Sustainable Adsorbents for Heavy Metal Removal from Water: Recent Advances, *Environ. Pollut.* 2022, 290, 118077.
8. C. M. Silva, P. L. Oliveira, R. R. Santos, Valorization of Residual Lignin for the Development of Efficient Adsorbents for Contaminant Removal, *J. Environ. Chem. Eng.* 2020, 8(3), 104157.
9. F. H. Dutra, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2023.