



PRODUÇÃO DE BIOCHAR DERIVADO DO TABACO ATIVADO COM KOH

Abner Santos de Oliveira¹, Ana Júlia O. dos Santos¹; Lídia Kunz Lazzari¹, Patrícia Rocio Durañona Aznar¹, Marielen Longhi¹; Ademir J. Zattera¹

1Programa de Pós Graduação em Engenharia de Processos e Tecnologias (PGEPROTEC), Universidade de Caxias do Sul (UCS), Caxias do Sul, RS – Brasil

*E-mail: lidia_lazzari@yahoo.com.br

Palavras-Chave: resíduos agroindustriais, carvão ativado, ativação química.

Introdução

O crescimento populacional e a intensificação das atividades agrícolas têm ampliado a geração de resíduos de biomassa, reforçando a necessidade de estratégias para seu manejo e valorização. Entre esses resíduos, destacam-se os provenientes da cadeia produtiva do tabaco, que pode gerar aproximadamente 25% de resíduos durante o processamento. Sua disposição inadequada pode causar impactos ambientais e sanitários, além de representar o desperdício de recursos renováveis [25, 26].

China, Índia e Brasil estão entre os principais produtores mundiais de tabaco. Em 2024, a China apresentou aproximadamente 1,03 milhão de hectares cultivados, enquanto o Brasil destinou cerca de 331,7 mil hectares à produção. A expressiva produção evidencia o potencial de geração de resíduos e reforça a necessidade de alternativas sustentáveis para seu aproveitamento.

Nesse contexto, a conversão de biomassas residuais em materiais carbonáceos tem recebido crescente atenção para aplicações em armazenamento de energia, devido à disponibilidade, baixo custo, caráter renovável e diversidade dessas matérias-primas. Essa abordagem possibilita simultaneamente a redução de impactos ambientais e a obtenção de materiais funcionais de maior valor agregado [25, 27, 28].

A pirólise constitui uma alternativa para a valorização desses resíduos, promovendo a decomposição termoquímica da biomassa em condições de baixa ou ausência de oxigênio e gerando um material sólido rico em carbono, denominado biochar. Suas propriedades, como teor de carbono, área superficial e estrutura porosa, são influenciadas pela composição da biomassa e pelas condições de processamento, especialmente pela temperatura de pirólise [25, 27].

Entretanto, o biochar obtido diretamente por pirólise pode apresentar área superficial e desenvolvimento de poros insuficientes para aplicações eletroquímicas. Nesse sentido, processos de ativação física ou química podem ser empregados para modificar a estrutura do material, promovendo o desenvolvimento da porosidade, o aumento da área superficial específica e a melhoria da acessibilidade dos íons aos sítios ativos [29].

A composição mineral dos resíduos de tabaco também merece destaque, especialmente pela presença de espécies como o potássio, que pode favorecer processos de autoativação



durante o tratamento térmico e contribuir para o desenvolvimento de estruturas microporosas, características relevantes para aplicações em dispositivos de armazenamento de energia [27].

Apesar do crescente interesse na produção de materiais carbonáceos a partir de biomassas residuais, ainda são limitados os estudos que relacionam sistematicamente a composição dos resíduos de tabaco, as condições de pirólise e ativação, as propriedades texturais e o desempenho eletroquímico. Dessa forma, este trabalho tem como objetivo avaliar a influência de diferentes métodos de ativação sobre as propriedades texturais e eletroquímicas de biochar obtido a partir de resíduos de tabaco, com ênfase na área superficial e na estrutura porosa, visando sua valorização como material potencial para eletrodos de dispositivos de armazenamento de energia.

Material e Métodos

O tabaco foi doado pelo Campus de Agronomia da UNESP (Botucatu, SP). Para a ativação química do biochar foi utilizado hidróxido de sódio (KOH).

Inicialmente, os talos de tabaco foram cortados, lavados e secos em estufa, para depois serem moídos em moinho de facas para obtenção de pó. Foram realizadas duas rotas de obtenção do biochar (a) realizou-se uma pirólise a 550 °C, por 2 h, com taxa de aquecimento de 5 °C/min e atmosfera de nitrogênio. O biochar foi ativado quimicamente com KOH na proporção de 1:3 (biochar:KOH) dissolvido em uma pequena quantidade de água e seco em estufa a vácuo por 12 h a 120°C. Após a ativação química, foi realizada uma segunda pirólise a 850 °C, por 2 h, com taxa de aquecimento de 5 °C/min e atmosfera de nitrogênio. Após a pirólise o biochar ativado foi lavado com água DI até atingir o pH neutro (TBC_KOH); (b) realizou-se uma pirólise a 850 °C, por 2 h, com taxa de aquecimento de 5 °C/min e atmosfera de nitrogênio (TBC).



Figura 1 – Fluxograma de produção dos biochars.

As amostras foram comparadas antes e após o tratamento e ativação. Para compreender as transformações estruturais, químicas e morfológicas realizou-se a caracterização dos biochars por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura por Emissão de Campo (MEV-FEG) e Área Superficial e Análise textural (Método de Brunauer, Emmett, Teller – BET).

Resultados e Discussão

Resultados e Discussão

A produção dos biochars a partir dos resíduos de tabaco resultou em materiais com características texturais significativamente distintas, evidenciando a influência das condições de processamento e, principalmente, da ativação química sobre o desenvolvimento da estrutura porosa. A Tabela 1 apresenta os valores de área superficial específica e volume de poros obtidos para as diferentes amostras.

Tabela 1 – Área superficial e volume de poros dos biochars.

Amostra	Área superficial específica (m ² /g)	Volume de poros (cm ³ /g)
TB	0,512	-
TBC_KOH	1.565,02	0,230
TBC	5,21	0,015



A biomassa de tabaco in natura (TB) apresentou área superficial específica de apenas 0,512 m²/g, enquanto o biochar obtido diretamente por pirólise a 850 °C (TBC) apresentou valor de 5,21 m²/g. Esse aumento, embora relativamente pequeno, indica que o tratamento térmico promoveu alterações na estrutura da biomassa, associadas à decomposição dos componentes orgânicos e à formação de uma matriz carbonácea. Durante a pirólise, a eliminação de compostos voláteis pode gerar cavidades e poros inicialmente presentes na estrutura carbonizada. Entretanto, a baixa área superficial observada para o TBC demonstra que a pirólise isoladamente não foi suficiente para desenvolver uma estrutura porosa significativa.

Esse comportamento é consistente com estudos que apontam que a carbonização direta de biomassas pode resultar em materiais carbonáceos com desenvolvimento limitado de porosidade, sendo frequentemente necessária uma etapa adicional de ativação para ampliar a área superficial e melhorar as características texturais do material [13, 4].

Em contraste, o TBC_KOH apresentou área superficial específica de 1.565,02 m²/g e volume de poros de 0,230 cm³/g, valores consideravelmente superiores aos observados para o TBC. Em relação ao biochar obtido apenas por pirólise, a ativação promoveu um aumento de aproximadamente 300 vezes na área superficial específica. Esse resultado evidencia a elevada eficiência do KOH no desenvolvimento da estrutura porosa do biochar de tabaco.

O efeito da ativação química pode ser associado às reações que ocorrem entre o agente ativante e a matriz carbonácea durante o tratamento em elevada temperatura. O KOH favorece a remoção de espécies carbonáceas e a formação de novos vazios na matriz, promovendo a abertura e o desenvolvimento de microporos e, em determinadas condições, de mesoporos. Como consequência, ocorre aumento significativo da área superficial disponível e da capacidade de interação do material com espécies presentes na fase líquida ou gasosa. Processos dessa natureza são amplamente empregados na produção de carbonos ativados derivados de biomassas destinados a aplicações de adsorção e armazenamento eletroquímico de energia [12, 14].

A diferença entre TBC_KOH e TBC também demonstra que a temperatura elevada, por si só, não é o principal fator responsável pelo desenvolvimento da elevada área superficial observada no material ativado. Ambas as amostras foram submetidas a tratamento térmico a 850 °C, porém o TBC_KOH apresentou área superficial de 1.565,02 m²/g, enquanto o TBC apresentou apenas 5,21 m²/g. Dessa forma, os resultados indicam que a presença do KOH durante a etapa de ativação foi determinante para o desenvolvimento da porosidade.

Além do aumento da área superficial, o TBC_KOH apresentou volume de poros de 0,230 cm³/g, indicando a formação de uma estrutura interna significativamente mais desenvolvida. A elevada área superficial associada à presença de poros é particularmente relevante para aplicações em supercapacitores, uma vez que a estrutura porosa pode favorecer a área de contato entre o material carbonáceo e o eletrólito, proporcionando maior disponibilidade de regiões para armazenamento de carga. Entretanto, a elevada área superficial, isoladamente, não determina o desempenho eletroquímico do eletrodo, sendo também importantes a distribuição de tamanho dos poros, a condutividade elétrica, a composição superficial e a acessibilidade dos íons ao interior da estrutura porosa [16, 17].

A diferença observada entre as amostras também pode estar relacionada à rota de processamento empregada. Na rota de obtenção do TBC_KOH, o material foi inicialmente pré-carbonizado a 550 °C, posteriormente impregnado com KOH na razão de 1:3 e submetido a uma segunda etapa de pirólise a 850 °C. Essa sequência favorece o contato do agente ativante

com uma matriz previamente carbonizada, possibilitando que as reações de ativação ocorram de maneira mais efetiva durante o tratamento em alta temperatura. A utilização de uma etapa de pré-carbonização seguida de ativação química é uma estratégia frequentemente empregada para controlar e ampliar o desenvolvimento da porosidade em materiais carbonáceos derivados de biomassa [13, 4].

A elevada área superficial obtida para o TBC_KOH é especialmente relevante quando comparada a materiais carbonáceos derivados de diferentes resíduos lignocelulósicos destinados a aplicações eletroquímicas. A literatura demonstra que a ativação química pode produzir materiais com áreas superficiais superiores às obtidas pela carbonização direta, sendo o controle da razão biomassa/agente ativante e das condições de temperatura fatores determinantes para o equilíbrio entre desenvolvimento da porosidade e preservação da matriz carbonácea [12, 21].

As imagens obtidas por MEV-FEG também foram utilizadas para avaliar as modificações morfológicas decorrentes dos tratamentos térmicos e da ativação. A comparação entre a biomassa in natura, o biochar e o material ativado permite avaliar visualmente as alterações promovidas pelo processo de carbonização e pelo tratamento com KOH. De modo geral, a carbonização tende a provocar a ruptura e a contração da estrutura original da biomassa, enquanto a ativação química pode promover maior desenvolvimento e exposição de estruturas porosas. Assim, a análise morfológica complementa os resultados de BET, permitindo relacionar as alterações observadas na superfície dos materiais com o aumento da área superficial específica.

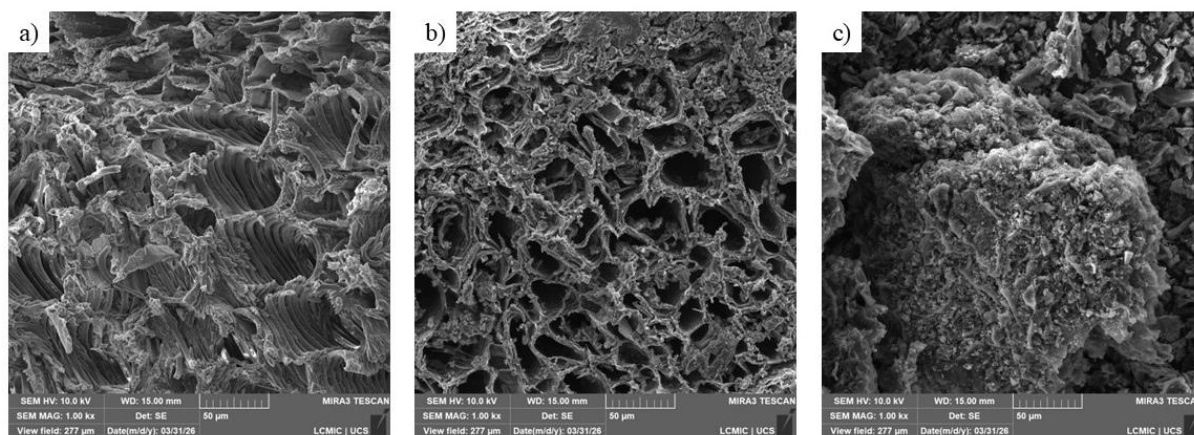


Figura 2 – Micrografias: (a) TB, (b) TBC após primeira pirólise e (c) TBC_KOH.

De maneira geral, os resultados demonstram que a estratégia de pré-carbonização seguida de ativação química com KOH e posterior tratamento térmico foi muito mais eficiente para o desenvolvimento da estrutura porosa do biochar de tabaco do que a pirólise direta. O aumento de 5,21 m²/g para 1.565,02 m²/g evidencia o potencial dessa rota para a obtenção de materiais carbonáceos altamente porosos. Esse resultado é particularmente promissor para aplicações em armazenamento eletroquímico de energia, embora a confirmação de sua adequação como material de eletrodo dependa de análises complementares, como condutividade elétrica, distribuição de tamanho de poros, composição superficial e caracterização eletroquímica por voltametria cíclica, carga/descarga galvanostática e espectroscopia de impedância eletroquímica.



Conclusões

Os resultados demonstraram que a ativação química com KOH foi fundamental para o desenvolvimento da estrutura porosa do biochar produzido a partir de resíduos de tabaco. O material obtido por pirólise direta a 850 °C (TBC) apresentou área superficial específica de apenas 5,21 m²/g, enquanto o biochar submetido à pré-carbonização, impregnação com KOH e posterior tratamento térmico (TBC_KOH) atingiu 1.565,02 m²/g e volume de poros de 0,230 cm³/g.

O aumento expressivo da área superficial evidencia a eficiência da rota de ativação empregada na formação e ampliação da estrutura porosa do material. Dessa forma, o tratamento com KOH mostrou-se uma estratégia promissora para transformar resíduos de tabaco em materiais carbonáceos de maior valor agregado.

Considerando a elevada área superficial obtida, o TBC_KOH apresenta potencial para aplicações em materiais de eletrodo destinados ao armazenamento eletroquímico de energia. Entretanto, são necessárias caracterizações complementares, especialmente análises eletroquímicas, para confirmar seu desempenho e estabelecer sua aplicabilidade em dispositivos como supercapacitores.

Assim, os resultados obtidos reforçam o potencial de valorização dos resíduos de tabaco por meio da conversão termoquímica e ativação química, contribuindo para o desenvolvimento de materiais carbonáceos porosos e para o aproveitamento sustentável de resíduos agroindustriais.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

Referências

- [1] Sankaranarayanan, S., Hariram, M., Vivekanandhan, S., & Navia, R. (2021). Sustainable biocarbon materials derived from *Lessonia Trabeculata* macroalgae biomass residue for supercapacitor applications. *Energy storage*, 3(2), e222. DOI: 10.1002/est2.222
- [2] Adam, Rashed Ali Mohamed; Maphiri, Vusani Muswa; Otun, Kabir Opeyemi; Fasakin, Oladepo; Rutavi, Gift; Thior, Souleymane; Manyala, Ncholu. Electropolymerization of polyaniline on coated activated carbon derived from human hair as a bilayer electrode for supercapacitor applications, *Journal of Energy Storage*, vol. 129, pp. 117356, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.117356>
- [3] Mandal, Sujata; Hu, Jiyao; Shi, Sheldon Q. A comprehensive review of hybrid supercapacitor from transition metal and industrial crop based activated carbon for energy storage applications. *Materials Today Communications*, vol. 34, pp. 105207, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.105207>



[4] Zhang, Xiaohua et al. Porous and graphitic structure optimization of biomass-based carbon materials from 0D to 3D for supercapacitors: A review. *Chemical Engineering Journal*, v. 460, p. 141607, 2023.

[5] Hillier, Nicholas; Yong, Sheng; Beeby, Stephen. The good, the bad and the porous: A review of carbonaceous materials for flexible supercapacitor applications. *Energy Reports*, v. 6, p. 148-156, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.03.019>

[6] Le Fevre, Lewis W. Et Al. Systematic comparison of graphene materials for supercapacitor electrodes. *Chemistry Open*, v. 8, n. 4, p. 418-428, 2019. <https://doi.org/10.1002/open.201900004>

[7] Brandão, A. T., State, S., Costa, R., Potorac, P., Vázquez, J. A., Valcarcel, J., ... & Pereira, C. M. (2023). Renewable carbon materials as electrodes for high-performance supercapacitors: from marine biowaste to high specific surface area porous biocarbons. *ACS omega*, 8(21), 18782-18798. doi/10.1021/acsomega.3c00816

[8] Malhotra, J. S., Valiollahi, R., & Wiinikka, H. (2023). From wood to supercapacitor electrode material via fastpyrolysis. *Journal of Energy Storage*, 57, 106179. DOI:10.1016/j.est.2022.106179

[9] Xiao, S., Huang, J., Lin, C., Xie, A., Lin, B., He, L., & Sun, D. (2020). Porous carbon derived from rice husks as sustainable bioresources: Insights into the role of micro/mesoporous hierarchy in Co₃O₄/C composite for asymmetric supercapacitors. *Microporous and mesoporous materials*, 291, 109709. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2019.109709>

[10] Liou, T. H., Tseng, Y. K., Zhang, T. Y., Liu, Z. S., & Chen, J. Y. (2023). Rice husk char as a sustainable material for the preparation of graphene oxide-supported biocarbons with mesoporous structure: A characterization and adsorption study. *Fuel*, 344, 128042. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128042>

[11] Borghetti, M., de Almeida Neuwald, O., Hillig, É., & Godinho, M. (2022). Evaluation of CO₂ gasification performance process using wood and wood pellets of *Pinus elliottii*. *Biomass Conversion and Biorefinery*, vol. 15, p. 29667-29680. DOI: 10.1007/s13399-022-03487-w

[12] Quan, C., Su, R., & Gao, N. (2020). Preparation of activated biomass carbon from pine sawdust for supercapacitor and CO₂ capture. *International Journal of Energy Research*, 44(6), 4335-4351. <https://doi.org/10.1002/er.5206>

[13] Mehdi, R., Khoja, A. H., Naqvi, S. R., Gao, N., & Amin, N. A. S. (2022). A review on production and surface modifications of biochar materials via biomass pyrolysis process for supercapacitor applications. *Catalysts*, 12(7), 798. <https://doi.org/10.3390/catal12070798>



- [14] Rawat, Shivam et al. Sustainable biochar for advanced electrochemical/energy storage applications. *Journal of Energy Storage*, v. 63, p. 107115, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107115>
- [15] Weldekidan, H., Vivekanandhan, S., Tripathi, N., Mohanty, A., & Misra, M. (2024). Highly conductive biocarbon nanostructures from burlap waste as sustainable additives for supercapacitor electrodes. *Materials Advances*, 5(3), 1240-1250. 10.1039/d3ma00491k
- [16] Zhai, Z., Zhang, L., Du, T., Ren, B., Xu, Y., Wang, S., & Liu, Z. (2022). A review of carbon materials for supercapacitors. *Materials & Design*, 221, 111017. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111017>
- [17] Olabi, A. G., Abbas, Q., Abdelkareem, M. A., Alami, A. H., Mirzaeian, M., & Sayed, E. T. (2022). Carbon-based materials for supercapacitors: recent progress, challenges and barriers. *Batteries*, 9(1), 19. <https://doi.org/10.3390/batteries9010019>
- [18] Hamidu, I., Afotey, B., Kwakye-Awuah, B., & Anang, D. A. (2025). Synthesis of silica and silicon from rice husk feedstock: A review. *Heliyon*, 11(4). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42491>
- [19] Liu, D., Zhang, W., & Huang, W. (2019). Effect of removing silica in rice husk for the preparation of activated carbon for supercapacitor applications. *Chinese Chemical Letters*, 30(6), 1315-1319. <https://doi.org/10.1016/j.ccllet.2019.02.031>
- [20] Sun, J., Yan, W., Liu, X., Hu, T., Xiong, Y., Tian, S., ... & Zhao, Z. (2024). Rice husk waste-derived super-biochar with the max surface area and Philic-CO₂ textural structure: Boosting effect and mechanism of post-desilication. *Chemical Engineering Journal*, 490, 151583.
- [21] Zhang, X., Han, R., Liu, Y., Li, H., Shi, W., Yan, X., ... & Liu, B. (2023). Porous and graphitic structure optimization of biomass-based carbon materials from 0D to 3D for supercapacitors: A review. *Chemical Engineering Journal*, 460, 141607. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.141607>
- [22] Li, Y., Li, Q., Zhang, S., Cao, N., Qiao, Y., Niu, W., ... & Liang, P. (2026). Application-Oriented Design of Microporous Carbons for Advanced Supercapacitors: From Fundamental Mechanisms to Rational Material Engineering. *Advanced Functional Materials*, 36(18), e21004. <https://doi.org/10.1002/adfm.202521004>
- [23] Zhang, W., Lin, N., Liu, D., Xu, J., Sha, J., Yin, J., ... & Lin, H. (2017). Direct carbonization of rice husk to prepare porous carbon for supercapacitor applications. *Energy*, 128, 618-625. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.065>
- [24] Qu, Y., Liu, L., Li, L., Wen, S., Wei, D., Xiao, N., ... & Wang, L. (2020). Synthesis of nitrogen and phosphorus co-doped carbon with tunable hierarchical porous structure from



rice husk for high performance supercapacitors. *International Journal of Electrochemical Science*, 15(3), 2399-2413. <https://doi.org/10.20964/2020.03.43>

[25] Huang, Z., Qin, C., Wang, J., Cao, L., Ma, Z., .. & Zhang, P. (2021). Research on High-Value Utilization of Carbon Derived from Tobacco Waste in Supercapacitors. *Materials Journal*, 14(7), 1714. <https://doi.org/10.3390/ma14071714>

[26] Wu, W., Mei, Y., Zhang, L., Liu, R., Cai, J. (2015). Kinetics and reaction chemistry of pyrolysis and combustion of tobacco waste. *Fuel Journal*, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.04.016>.

[27] Zhang, W., Zou, Y., Yu, C., Zhong, W., Nitrogen-enriched compact biochar-based electrode materials for supercapacitors with ultrahigh volumetric performance. *Journal of Power Sources*. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227067>

[28] Jiang, B., Cao, L., Yan, Q., Ma, Z., ... & Zhang, P. (2022). Biomass Straw-Derived Porous Carbon Synthesized for Supercapacitor by Ball Milling. *Materials Journal*, 15(3), 924; <https://doi.org/10.3390/ma15030924>

[29] Chen, W., Shi, X., Peng, Y., Wang, Y., Li, J., Wang, Y., ... & Yang, H. (2026). Biomass pyrolysis for N-doped biochar: Relationship among preparation process, N-doped biochar properties, and supercapacitors. *Fuel Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.136372>

VIVAS-REYES, R.; NAVARRO, D.; CORTES, L. E. Exploring Emergent Properties in Chemistry Education: A Philosophical Perspective on the Molecular Revolution. *J. Chem. Educ.* 101(10), 4173–4181, 2024.

BÖCK, F. C.; HELFER, G. A.; COSTA, A. B.; DESSUY, M. B.; FERRÃO, M. F. Rapid Determination of Ethanol in Sugarcane Spirit Using Partial Least Squares Regression Embedded in Smartphone. *Food Analytical Methods*, 11(4), 1951-1957, 2018.