

PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO UTILIZANDO BAGAÇO DE MALTE ORIUNDO DE CERVEJARIA

Katielle J. Soares[1]; Mateus P. F. Santos[1,2]; Mirian S. P. Lima[1]; Cristiane M. Veloso[1];

1Universidade Estadual do Sudoeste de Bahia - UESB, Itapetinga-BA, Brasil.
2Universidade Federal de Sergipe – UFS, Nossa Senhora da Glória-SE, Brasil.

Palavras-Chave: Economia circular, Resíduos agroindustriais, Matriz carbonácea

Introdução

A intensificação dos sistemas produtivos agrícolas e agroindustriais, impulsionada pela demanda mundial por alimentos, tem gerado volumes crescentes de resíduos como subproduto inevitável desse processo (Li et al., 2026). Assim, o aumento da produtividade nesses setores vem acompanhado pela geração de resíduos agroindustriais, o que representa no Brasil uma quantidade expressiva de cerca de 1 bilhão de toneladas de biomassa residual passível de ser alcançada até 2030 (Moraes et al., 2017; Arun et al., 2020). Em razão disso, o aproveitamento da biomassa residual surge como alternativa para agregar valor e minimizar os danos ocasionados pelo descarte inadequado, uma vez que a disposição incorreta desses resíduos está associada a impactos ambientais como emissão de gases de efeito estufa e contaminação de solo e água (Borges et al., 2024). Assim, métodos de conversão físicos, biológicos, químicos ou térmicos são capazes de modificar a estrutura desses materiais residuais dando origem a produtos sólidos, líquidos ou gasosos, como biocombustíveis e biocarvões (Biswas et al., 2017). O carvão ativado, derivado dos biocarvões, é originado a partir da carbonização e ativação da matéria orgânica, cujas propriedades características e qualidade do suporte depende diretamente do precursor utilizado, bem como dos agentes ativantes, tempo, condições de impregnação, temperatura de carbonização, entre outros (Santos et al., 2019). A ativação física, geralmente realizada com vapor d'água ou CO2, e a ativação química, com agentes como H3PO4, ZnCl2 ou KOH, resultam em materiais com diferentes distribuições de poros e grupos funcionais superficiais, o que direciona sua aplicação final (Heidarinejad et al., 2020).

O carvão ativado é um material carbonoso de alta resistência mecânica e estabilidade química, caracterizado por uma estrutura porosa altamente desenvolvida e uma elevada área superficial específica (Borges et al., 2024; Santos et al., 2020). A presença de heteroátomos (oxigênio, nitrogênio e hidrogênio) e grupos funcionais superficiais (carboxilas, carbonilas, fenóis e quinonas), aliada à distribuição heterogênea de poros, confere ao material capacidade de adsorção tanto por interações físicas (via porosidade) quanto químicas (via grupos funcionais), o que amplia seu espectro de aplicações em processos de purificação e remoção de contaminantes (Brito et al 2018; Santos et al., 2024).

As propriedades estruturais do carvão ativado dependem diretamente das etapas de processamento (carbonização e ativação física ou química) e da natureza do precursor utilizado (Abuelnoor et al., 2021; Fischer et al., 2017). A utilização de subprodutos agroindustriais como resíduos do processamento de frutas e cascas de grãos como precursores para a síntese do CA representa uma estratégia duplamente vantajosa. Além de reduzir custos de produção e agregar valor a resíduos orgânicos, promove a economia circular e a sustentabilidade ambiental (Santos et al., 2019; Santos et al., 2020). Precursores lignocelulósicos, como os subprodutos da indústria cervejeira, apresentam composição rica em celulose, hemicelulose e lignina, componentes que

favorecem a formação de estrutura porosa durante a carbonização (Santos et al., 2020). Diante disso, este estudo propõe o desenvolvimento de carvão ativado obtido de subproduto de malte, integrando inovação tecnológica e valorização de resíduos agroindustriais.

Material e Métodos

Os resíduos foram secos em estufa a 105 ºC por 24 h e após este período foram triturados em moinho de faca, peneirados até a granulometria desejada (20 mesh), obtendo desta forma partículas mais homogêneas.

Ativação química com Ácido Fosfórico (H3PO4)

Os carvões ativados foram preparados utilizando a metodologia de ativação química utilizando ácido fosfórico como agente ativante (Santos et al., 2019). Os materiais precursores foram impregnados com ácido fosfórico (VETEC 85% P.A.) na razão de impregnação de 1,5:1 (massa de ativante/massa do precursor) e secos em estufa a 105 °C por 48 h. Após este período os mesmos foram carbonizados a 500 ºC (taxa de aquecimento de 5°C.min-1), sob fluxo de nitrogênio (50 mL.min-1) durante 1 h. Após a carbonização os carvões ativos foram lavados com água, à temperatura aproximada de 60ºC, até à neutralização. As amostras lavadas foram secas a 105 ºC durante 24 h e acondicionadas em embalagens herméticas.

Caracterização química dos carvões ativados

Os carvões ativados obtidos foram caracterizados com relação aos seus grupos funcionais por espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR). As amostras avaliadas foram analisadas de forma direta utilizando a técnica de refletância total atenuada (ATR) na região infravermelha de 4000-500 cm-1 em espectrofotômetro Agilent, Cary 360 FTIR.O pH do ponto de carga zero (pHpCZ), foi determinado pela metodologia denominada “Experimento dos 11 Pontos” (Kuśmierek el al., 2016).

As medidas de área e porosidade foram feitas usando as isotermas de adsorção e dessorção dos carvões ativados foram obtidas em um equipamento Micromeritcs modelo ASAP 2420, utilizando aproximadamente 0,20 g de amostra. Antes das medidas as amostras foram submetidas a uma etapa de pré-tratamento, que consistiu no aquecimento a 120 ºC. Em seguida as amostras foram submetidas a uma evacuação a 30 °C por 30 min, seguida de um aquecimento, com taxa de aquecimento de 10°C.min-1, até 200 °C, permanecendo nesta temperatura por 300 min. Posteriormente foram obtidas isotermas de adsorção e dessorção de nitrogênio a 77 K. A área superficial específica foi determinada pela equação de BET (BRUNAUER, 1938). A distribuição de poros foi obtida a partir da isoterma de dessorção utilizando o método BJH (BARRET, 1951), enquanto o volume dos microporos foi determinado pela análise t-plot a partir da isoterma de adsorção (LIPPENS, 1964).

As análises de FTIR e de área superficial e porosidade foram realizadas em análise única por amostra, conforme procedimento padrão do equipamento utilizado. Já a determinação do pHPCZ foi realizada em triplicata.

Resultados e Discussão

Os resultados da caracterização do carvão ativado são apresentados na Tabela 1. O rendimento do carvão ativado obtido a partir do bagaço de malte pode ser considerado satisfatório e está diretamente relacionado à composição química, do material precursor especialmente aos teores de lignina, celulose e hemicelulose. Biomassas com maior conteúdo

de lignina tendem a apresentar rendimentos mais elevados, em função da maior estabilidade térmica desse componente durante o processo de pirólise, o que favorece a formação de carbono fixo e reduz as perdas por volatilização (Borges et al., 2024). Resultados semelhantes foram reportados por Santos et al. (2019), que obtiveram rendimentos de aproximadamente 46,6% para subprodutos de malte submetidos a processos de carbonização e ativação, valores comparáveis aos observados neste estudo. Esses dados corroboram o potencial do bagaço de malte como matéria-prima para a produção de carvão ativado, destacando sua disponibilidade, baixo custo e bom desempenho em termos de aproveitamento de massa. O rendimento é um parâmetro importante, pois influencia diretamente a eficiência do processo produtivo, a demanda por biomassa precursora e os custos operacionais associados à síntese do carvão ativado (Borges et al., 2024; Santos et al., 2019).

O valor pHPCZ indica que o carvão apresenta caráter predominantemente ácido, característica associada à presença de grupos funcionais oxigenados, como carboxílicos e fenólicos, formados durante os processos de carbonização e ativação química. Valores de pHPCZ nessa faixa são comumente reportados para carvões ativados obtidos por ativação com agentes ácidos e refletem a natureza química da superfície (Santos et al., 2020; Duan et al., 2021).

Tabela 1- Resultados da caracterização química do carvão ativado produzido (CM). pH do ponto de carga zero (pHPCZ), área superficial específica (Sg), diâmetro médio de poros (Dp), volume de mesoporos (Vmeso), volume de microporos (Vmicro) e volume total de poros (Vtotal).

Variáveis	Carvão Ativado
Rendimento (%)	41,34
pHPCZ	4,56 ± 0,52
Sg (m^2/g)	804,9
Dp(nm)	3,027
Vmeso(cm^3/g)	0,261
Vmicro(cm^3/g)	0,112
Vtotal (cm^3/g)	0,490

Fonte: elaborada pelos autores

A área superficial específica obtida encontra-se dentro da faixa reportada na literatura para carvões ativados produzidos a partir de biomassa lignocelulósica por ativação química. Santos et al. (2020) relatam áreas superficiais elevadas para materiais derivados de resíduos agroindustriais submetidos à ativação controlada, enquanto Duan et al. (2021) descrevem valores variando em função do agente ativador e das condições de pirólise, frequentemente situando-se entre 600 e 1200 m^2/g. De forma semelhante, Santos et al. (2020) reportam que a otimização das condições de ativação pode resultar em materiais com área superficial superior a 800 m^2/g e estrutura predominantemente micro-mesoporosa, indicando que as condições de ativação empregadas favoreceram o desenvolvimento da estrutura porosa. O diâmetro médio de poros e o volume de mesoporos confirmam o caráter predominantemente mesoporoso do material, em concordância com os achados de Duan et al. (2021), que destacam que a ativação química favorece o alargamento de poros e a formação de mesoporos estáveis. A presença simultânea de microporos está alinhada ao comportamento descrito por Santos et al. (2020),

que associam a contribuição de microporos à elevada área superficial específica e ao aumento do número de sítios ativos disponíveis para adsorção.

O espectro de infravermelho do carvão ativado obtido a partir do resíduo de bagaço de malte indicaram modificações na composição química da superfície, refletindo a transformação da biomassa lignocelulósica em uma matriz carbonácea mais estável. A redução da banda larga na região de 3600–3200 cm^{-1}, associada ao estiramento de grupos hidroxila (–OH), indica a decomposição térmica dos constituintes lignocelulósicos durante o processo de carbonização e ativação. As bandas na região de 3000–2850 cm^{-1}, atribuídas ao estiramento das ligações C–H alifáticas, também apresentam diminuição de intensidade, sugerindo a perda de cadeias orgânicas alifáticas. As bandas na região de 1700–1500 cm^{-1} tornam-se mais evidentes, o que pode estar relacionado ao estiramento de grupos carbonila (C=O) e às vibrações de ligações C=C aromáticas, características de estruturas carbonáceas aromatizadas. As bandas observadas entre 1300 e 1000 cm^{-1} são atribuídas à presença de grupos C–O superficiais remanescentes ou criados durante a ativação, os quais conferem caráter funcional à superfície do carvão ativado, sendo relevantes para processos de adsorção (Barbosa, 2007; Brito et al., 2018).

As isotermas de adsorção/dessorção de N_2 (77 K) apresentaram comportamento característico de isoterma do tipo IV(a), segundo a classificação da IUPAC, com laço de histerese do tipo H4, indicando uma estrutura micro-mesoporosa. A elevada adsorção em baixas pressões relativas ($P/P_0 < 0,1$) evidencia contribuição dos microporos, enquanto a presença da histerese está associada à condensação capilar em mesoporos estreitos, típicos de poros em forma de fenda (slit-shaped pores). A distribuição de tamanho de poros (BJH) revelou maior concentração de poros na faixa de aproximadamente 3–4 nm, acompanhada por uma distribuição menos intensa em diâmetros maiores, corroborando a coexistência de micro e mesoporos. Essa arquitetura porosa, aliada à elevada área superficial específica, torna o material promissor para diversar aplicações no futuro, como na imobilização enzimática ou incorporação em filmes destinados a embalagens ativas absorvedoras de etileno, uma vez que a elevada porosidade pode favorecer ambas as possíveis futuras aplicações (Santos el al., 2020; Viana et al., 2025).

Conclusões

O reaproveitamento do subproduto de malte mostrou-se uma estratégia sustentável e tecnicamente viável para a produção de carvão ativado, valorizando um resíduo agroindustrial dentro dos princípios da economia circular. As características texturais observadas apontam potencial de aplicação do material em sistemas adsorventes, incluindo embalagens ativas, contribuindo para o aproveitamento integral da cadeia produtiva do malte.

Agradecimentos

À UESB, CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a FAPESB (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia) pela concessão das bolsas e pela oportunidade oferecida.

Referências



Abuelnoor, N., AlHajaj, A., Khaleel, M., Vega, L. F., & Abu-Zahra, M. R. M. (2021). Activated carbons from biomass-based sources for CO_2 capture applications. Chemosphere, 282, 131111. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131111

Arun, K. B.; Madhavan, A.; Sindhu, R.; Binod, P. Pandey, A.; R, R.; Sirohi, R. Remodeling agro-industrial and food wastes into value-added bioactives and biopolymers. Industrial Crops & Products, v. 154, 2020.

Barbosa, L. C. de A. Espectroscopia no infravermelho na caracterização de compostos orgânicos. Viçosa: Editora UFV, 2007.

Barrett, E. P., Joyner, L. G., & Halenda, P. P. (1951). The determination of pore volume and area distributions in porous substances. I. Computations from nitrogen isotherms. Journal of the American Chemical Society, 73(1), 373–380. https://doi.org/10.1021/ja01145a126

Biswas, B.; Pandey, N.; Bisht, Y.; Singh, R.; Kumar, J.; Bhaskar, T. Pyrolysis of agricultural biomass residues: Comparative study of corn cob, wheat straw, rice straw and rice husk. Bioresource Technology, v. 237, p. 57-63, 2017.

Borges, J. F., Nascimento, P. A., Alves, A. N., Santos, M. P. F., Brito, M. J. P., Bonomo, R. C. F., Santos, L. S., & Veloso, C. M. (2024). Laccase immobilization on activated carbon from hydrothermal carbonization of corn cob. Waste and Biomass Valorization, 15, 501–520. https://doi.org/10.1007/s12649-023-02160-1

Brito, M. J. P., Veloso, C. M., Bonomo, R. C. F., Fontan, R. C. I., Santos, L. S., Monteiro, K. A. (2018) Activated carbons preparation from yellow mombin fruit stones for lipase immobilization, Fuel Processing Technology. 156: 421–428.

Brunauer, S., Emmett, P. H., & Teller, E. (1938). Adsorption of gases in multimolecular layers. Journal of the American Chemical Society, 60(2), 309–319. https://doi.org/10.1021/ja01269a023

Duan, D., Chen, D., Huang, L., Zhang, Y., Zhang, Y., Wang, Q., Xiao, G., Zhang, W., Lei, H., & Ruan, R. (2021). Biomass-derived activated carbon as catalyst: A review of applications in fast pyrolysis processes. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 158, 105246. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105246

Fischer, C., Oschatz, M., Nickel, W., Leistenschneider, D., Kaskel, S., & Brunner, E. (2017). Bioinspired carbide-derived carbons with hierarchical pore structure for the adsorptive removal of mercury from aqueous solution. Chemical Communications, 53, 4845–4848. https://doi.org/10.1039/C6CC08041C

Heidarinejad, Z., Dehghani, M. H., Heidari, M., Javedan, G., Ali, I., & Sillanpää, M. (2020). Methods for preparation and activation of activated carbon: a review. *Environmental Chemistry Letters*, *18*(2), 393-415.

Kuśmierek, K.,Szala, M. Świątkowski, A. (2016). Adsorption of 2,4-dichlorophenol and 2,4-dichlorophenoxyacetic acid from aqueous solutions on carbonaceous materials obtained by

combustion synthesis, J. Taiwan Inst. Chem. Eng. 63, 371–378. doi:10.1016/j.jtice.2016.03.036.

Li, Y., Zhang, R., Zhang, C., Li, Q., Nie, L., Wang, C., & Wang, X. X. (2026). Unlocking the resource potential of agricultural waste: A systemic transition from linear disposal to circular resources. *Environmental Technology & Innovation*, 105116.

Lippens, B. C., Linsen, B. G., & de Boer, J. H. (1964). Studies on pore systems in catalysts I. The adsorption of nitrogen; apparatus and calculation. Journal of Catalysis, 3(1), 32–37. https://doi.org/10.1016/0021-9517(64)90089-2

Moraes, S. L.; Massola, C. P.; Saccoccio, E. M.; Silva, D. P.; Guimarães, Y. B. T. Cenário brasileiro da geração e uso de biomassa adensada. Revista IPT -Tecnologia e Inovação, v.1, n.4, p. 58-73, 2017.

Santos, M. P. F.; Brito, M. J. P; Junior, E. C. S.; Bonomo, R. C. F.; Veloso, C. M. Pepsin immobilization on biochar by adsorption and covalent binding, and its application for hydrolysis of bovine casein. J Chem Technol Biotechnol, v. 94, p. 1982–1990, 2019.

Santos, M. P. F., Silva, J. F., Fontan, R. C. I., Bonomo, R. C. F., Santos, L. S., & Veloso, C. M. (2020). New insight about the relationship between the main characteristics of precursor materials and activated carbon properties using multivariate analysis. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 98(7), 1501–1511. https://doi.org/10.1002/cjce.23721

Santos, M. P. F., de Souza Junior, E. C., Villadóniga, C., Vallés, D., Castro-Sowinski, S., Bonomo, R. C. F., & Veloso, C. M. (2024). Proteases: Importance, immobilization protocols, potential of activated carbon as support, and the importance of modifying supports for immobilization. *BioTech*, *13*(2), 13.

Viana, E. B. M., Almeida, M. F., Cordeiro, M. J., Lacerda, S. M. P., & São José, A. R. (2025). Filme bioplástico ecológico produzido com amido de banana-da-terra verde (Musa paradisiaca L.): Efeito da adição de carvão ativado e modificação hidrotérmica. Polymer Composites. https://doi.org/10.1002/pc.70669