



Produção e caracterização de adsorvente para remoção de corante orgânico em meio aquoso

Igor de Oliveira SANTOS^{1*} , Stefânia Lima Oliveira METZKER¹ ,
Alan Rodrigues Teixeira MACHADO¹ 

¹Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade do Estado de Minas Gerais, Frutal, MG, Brasil.
*E-mail: igoroliveirasantos@hotmail.com

Submissão: 15/08/2023; Aceito em 07/10/2023; Publicado em 24/10/2023.

RESUMO: O presente trabalho teve como objetivo avaliar o potencial do bagaço de cana-de-açúcar como matéria-prima para produção de carvão ativado. Esse adsorvente foi produzido por meio da carbonização em forno mufla do bagaço de cana-de-açúcar a 300 °C, e ativação com cloreto de zinco na proporção de 1:3 de carvão:ZnCl₂. O material obtido (CABC) foi caracterizado por cálculo de área superficial estimada a partir da adsorção do azul de metileno (S_{AM}), pH, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR), Espectroscopia de Fluorescência de Raios X por Energia Dispersiva (FRX) e Difração de Raios X (DRX). Para avaliação da capacidade adsorptiva do CABC foram realizados ensaios com azul de metileno, corante muito utilizado na industrial têxtil e de difícil tratamento. Para fins de comparação, realizou-se também o mesmo ensaio com carvão ativado comercial (CAC). O adsorvente CABC apresentou pH 5,88, uma morfologia irregular, com poros na superfície e S_{AM} de 303,5 m² g⁻¹, 25% superior ao CAC. Durante os testes de adsorção foi seguido as concentrações indicadas por Brum et al. (2008) e comprimento de onda de 645 nm, sendo observado que em concentrações inferiores a 250 mg L⁻¹, os materiais têm capacidades de adsorção próxima, porém quando avaliado em concentrações superiores o CABC se mostra mais eficiente.

Palavras-chave: azul de metileno; adsorção; carvão ativado; isoterma.

Production and characterization adsorbents for organic color removal in aqueous medium

ABSTRACT: The present work aimed to evaluate the potential of sugarcane bagasse as a raw material for producing activated carbon. Sugarcane bagasse activated carbon (CABC) was produced by carbonizing sugarcane bagasse in a muffle furnace at 300 °C, and activation with zinc chloride in a 1:3 ratio of charcoal: ZnCl₂. The obtained material (CABC) was characterized by methylene blue surface area analysis (SAM), pH, Scanning Electron Microscopy (SEM), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectroscopy (FRX) and X-Ray Diffraction (XRD). To evaluate the efficiency of the CABC, tests with methylene blue were also performed with a commercial activated carbon (CAC) from the *Dinâmica* brand. The CABC adsorbent had a pH of 5.88, an irregular morphology, with pores in the fibrous structure and a SAM of 303.5 m² g⁻¹, 25% higher than the CAC. During the adsorption tests, the concentrations indicated by Brum et al. (2008) and a wavelength of 645 nm, observing that at concentrations lower than 250 mg L⁻¹ the materials have adsorption capabilities in the next, however, when evaluated at higher concentrations, the CABC appears to be more efficient.

Keywords: methylene blue; adsorption; activated charcoal; isotherm.

1. INTRODUÇÃO

O consumo é uma necessidade que faz parte de toda a vida do ser humano. No entanto, a fabricação de bens consumíveis ocasiona a produção de resíduos, restos ou rejeitos, uma vez que a sociedade moderna se ergueu sobre equívoco do crescimento infinito em mundo de recursos finitos. Esses produtos necessitam passar pelo processo de descarte, de modo a se transformarem em algo que não cause danos ao ambiente.

Por isso, a legislação brasileira impõe aos geradores a criação de programas, visando uma gestão sustentável desses resíduos, e o marco legal está definido pela Lei 12.305 cap. 2 art. 3º, que rege a Política Nacional de Resíduos Sólidos

(BRASIL, 2012). Eles são classificados quanto a sua origem pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), como: domiciliares, sólidos urbanos, estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços, industriais, serviços de saúde, construção civil, agrossilvopastoris, serviços de transportes e mineração (BRASIL, 2012).

Cada vez mais, esses resíduos têm despertado grande interesse e se tornado importantes no cenário ambiental, industrial, econômico e acadêmico, uma vez que grandes volumes são gerados anualmente no Brasil e no mundo (ASSAD, 2017; WOICIECHOWSKI et al., 2019). Se tratando de Brasil, podemos citar diversos resíduos como bagaço de cana-de-açúcar, cascas de arroz, caroço de açaí,

dentre outros, uma vez que o país apresenta alta potencialidade para resíduos orgânicos (RODRIGUES, 2017). Esse tipo de material é enquadrado como resíduos agrossilvopastoris, sendo sua produção sazonal relacionada com a maturidade da cultura e/ou oferta de matéria-prima, assim como o tipo e a quantidade variando com o tempo (VIANA; CRUZ, 2016).

Uma forma de reciclar o bagaço de cana é a sua utilização como matéria-prima do carvão ativado ou ativo (CA). O CA é um sólido hegemonicamente amorfo, processado de forma a aumentar a sua área superficial e seu volume de poros. Possui boa propriedade de adsorção, tanto em aplicações líquidas, como gasosas, portanto, é muito utilizado para purificar, filtrar, descolorir, desodorizar, desclorificar, desintoxicar, entre outros usos, sendo um dos adsorventes mais utilizados (SANCHEZ et al., 2020).

Entretanto, estudiosos da área relatam sobre a importância de se encontrar novos materiais para a produção de carvão. Sendo assim, o mesmo é indicado para amenizar a problemática ambiental contribuindo para a redução de resíduos, uma vez que, qualquer material rico em matéria orgânica, como lignina, madeira, hulha, carvões minerais (antracito, betuminoso, linhito), cascas de coco, de arroz, de nozes, caroços de frutas, grão de café, entre outros, podem servir de matéria-prima para produção de CA (SILVA et al., 2019).

Uma das aplicações do CA é o tratamento de corantes da indústria têxtil, sendo um deles, o azul de metileno (AM), que tem como finalidade tingimento ou mudança de cor através de soluções aquosas. Por esse motivo necessita de grandes volumes de água durante sua utilização, o que acarreta grandes quantidades de água residuárias, que muitas vezes são descartadas sem o devido tratamento, ato esse, que é responsável por causar grandes danos ao ecossistema devido a ação tóxica, mutagênica e cancerígena do corante (SILVA JUNIOR et al., 2022).

O mesmo autor ainda cita a dificuldade que é tratar o AM, devido a sua estabilidade a luz, calor e agentes oxidantes. Mesmo assim podemos citar coagulação química/floculação, processos de oxidação, troca de íons e ultrafiltração como alternativas para o tratamento, no entanto, todas as técnicas citadas apresentam como limitação o alto custo de implantação, sendo assim a adsorção se apresenta como uma técnica de alta eficiência, viabilidade econômica, simples operação e possibilidade de uso em diversos corantes da indústria têxtil.

Sendo assim, esse trabalho tem como objetivo a produção e caracterização de carvão ativado, usando como matéria-prima o bagaço de cana-de-açúcar (CABC), obtido através da ativação química com cloreto de zinco ($ZnCl_2$) na proporção 1:3 (carvão: ativante), seguido de tratamento térmico em estufa e mufla. E para avaliar eficiência do CABC, foi realizado estudos de adsorção de azul de metileno, além de um comparativo com o carvão ativado comercial (CAC).

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Coleta do bagaço de cana-de-açúcar

Para a realização dos experimentos foram utilizados, aproximadamente, 10 kg de bagaço de cana-de-açúcar, doados por uma agroindústria da região de Frutal – MG. O bagaço foi coletado e seco em estufa até atingir massa constante.

2.2. Teor de umidade (%) e densidade do bagaço de cana-de-açúcar

O teor de umidade foi determinado seguindo a metodologia proposta pelas Normas Analíticas do Instituto Adolfo Lutz (1985). Para essa determinação, foram separadas cerca de 2,5 g da amostra de bagaço de cana-de-açúcar, antes da secagem em estufa, que foram acondicionados em cadinho de porcelana, previamente tarados. A amostra foi submetida ao aquecimento em estufa por 24 h, a 100°C até massa constante e, posteriormente, foi resfriada em dessecador até temperatura ambiente para aferição da massa.

Para aferir o valor de densidade, foi pesada uma amostra do bagaço de cana-de-açúcar que, após essa etapa, foi transferida para um recipiente contendo água destilada, onde permaneceu em repouso até que ocorresse a decantação total do bagaço. Logo após, apenas o bagaço foi retirado e transferido para uma proveta graduada contendo água destilada, sendo a variação do volume correspondente ao volume do bagaço de cana-de-açúcar.

2.3. Preparo da fase adsorvente (CA) a partir do bagaço da cana-de-açúcar (CABC)

Toda a massa de bagaço (aproximadamente 5 kg em massa seca) foi carbonizada em mufla por 2 h, a temperatura de 300 °C e, posteriormente, acondicionada em recipientes metálicos até atingir temperatura ambiente. Seguidamente, armazenada e triturada manualmente usando cadinho e pistilo e submetida a ativação química utilizando o cloreto de zinco, de acordo com a metodologia proposta por Schettino Jr. et al. (2007). Para tanto, o carvão foi misturado com uma solução de $ZnCl_2$ (4,4 mol L⁻¹) na proporção em massa de carvão: $ZnCl_2$ de 1:3 (m/m).

A mistura do carvão e a solução de cloreto de zinco permaneceram em contato e repouso por 1 h. Posteriormente ao repouso, a mistura foi filtrada e, a parte retida no filtro, foi seca em estufa, a 110 °C, por 18 h, e mais 1 h em mufla a 500 °C. Em seguida, o material foi imerso em água destilada e agitado por 20 min. A suspensão foi passada em papel quantitativo faixa branca. Após o término deste procedimento, o CA foi seco em estufa, a 110 °C, por 18 h.

2.4. pH

O pH dos carvões, CABC e CA comercial (CAC) foram medidos segundo a norma ASTM D3838 – 05 apud Valix, Cheung e McKay (2004). Uma amostra de 0,5 g de CA foi aquecida em 20 mL de água destilada, por 15 min contados a partir da fervura. Posteriormente, a suspensão foi filtrada em papel de filtro qualitativo e o pH dessa solução obtida foi mensurando com o auxílio de um pHmetro digital.

2.5. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As morfologias das superfícies dos carvões ativados (CABC e CAC) foram avaliadas por meio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV), de baixo vácuo, da marca Hitashi, modelo TM 3000, com detectores de elétrons retroespalhados (BSE) e aceleração variável (5kV e 15kV).

2.6. Espectroscopia de Infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

Os grupos funcionais do CABC foram investigados por Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR), com uso do equipamento de Nicolet 6700 FTIR (ThermoScientific).

2.7. Fluorescência de Raios X (FRX)

A composição mineral do CABC foi analisada em um espectrômetro da marca SHIMADIZU modelo EDX – 720. As condições experimentais empregadas foram: atmosfera a vácuo e colimador de 10 nm.

2.8. Difração de Raios X (DRX)

O estudo sobre a cristalinidade do CABC foi realizado por meio da difração de raios X (DRX). Para obtenção do difratograma foi utilizado um tubo de raios X de cobre (Cu) com tensão de 40,0 kV e corrente elétrica de 30,0 mA com varredura por passo de 0,020, variando de 10 a 80° na velocidade de 5 s/passos, em equipamento da Shimadzu XRD-7000.

2.9. Área superficial específica pelo método da adsorção do azul de metileno (S_{AM}) e confecção de isotermas

Foram preparadas soluções com concentrações de 10, 25, 50, 100, 250, 500, 600, 800, 1000 mg L⁻¹, todas no pH de 5,32, seguindo as recomendações de Brum et al. (2008). 25 mL dessas soluções ficaram em agitação constante de 140 rpm durante 24 h em contato com 0,100 g de CABC. Ao término da agitação, as soluções foram filtradas em filtro quali 15 e a concentração final de azul de metileno foi mensurada utilizando espectrofotômetro de UV/Vís com comprimento de onda 645 nm. Em seguida, conforme o método proposto no trabalho de Stavropoulos; Zabaniotou (2005), foram determinados os valores das áreas superficiais do CABC.

De posse dos dados experimentais, foi construída a curva de concentração de equilíbrio versus q_e e, em seguida, foi realizado um estudo a respeito do equilíbrio de adsorção, ajustando-se os dados ao modelo matemático de Langmuir Wang et al. (2009).

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (01)$$

em que: q_e: capacidade adsorptiva no equilíbrio (mg g⁻¹); q_m: capacidade adsorptiva máxima no equilíbrio (mg g⁻¹); K_L: constante de equilíbrio de Langmuir (L mg⁻¹); C_e: concentração de equilíbrio do adsorvato (mg L⁻¹).

3. RESULTADOS

3.1. Caracterização do Resíduo de Bagaço de Cana

Na Tabela 1 podem ser observados os valores médios de densidade e umidade obtidos para o bagaço de cana-de-açúcar.

Tabela 1. Valores médio de densidade e umidade do bagaço de cana. Table 1. Average density and moisture values of sugarcane bagasse.

Tratamento	Densidade (g L ⁻¹)	Umidade (%)
Bagaço de cana-de-açúcar	80,92 (±11,41)	49,82 (±0,99)

*valores de desvio padrão entre parênteses.

3.2. pH

O CABC obtido possui pH de 5,88, sendo considerado levemente ácido. Entretanto, o CAC possui pH de 7,58, sendo bem próximo da neutralidade. Esse é um parâmetro que pode influenciar as interações eletrostáticas que regem a adsorção (ARAÚJO et al. 2018).

3.3. Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

Com o objetivo de avaliar os grupos funcionais na superfície do CABC, foi realizada a análise por FTIR. O espectro obtido é mostrado na Figura 1, onde pode-se observar bandas próximas a 1600 cm⁻¹, 1240 cm⁻¹ e entre 900 a 500 cm⁻¹.

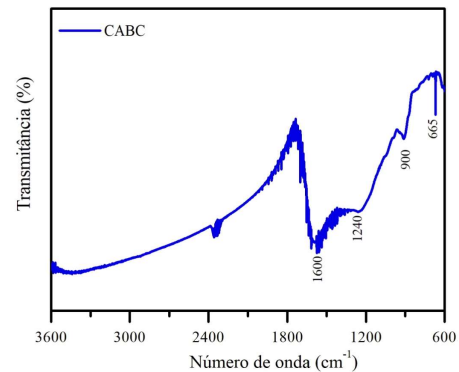


Figura 1. Espectro de FTIR do CABC. Figure 1. CABC FTIR spectrum.

3.4. Microscópio eletrônico de varredura (MEV)

Na Figura 2 podem ser observadas as imagens obtidas por MEV para caracterizar a superfície e a morfologia do CABC e do CAC.

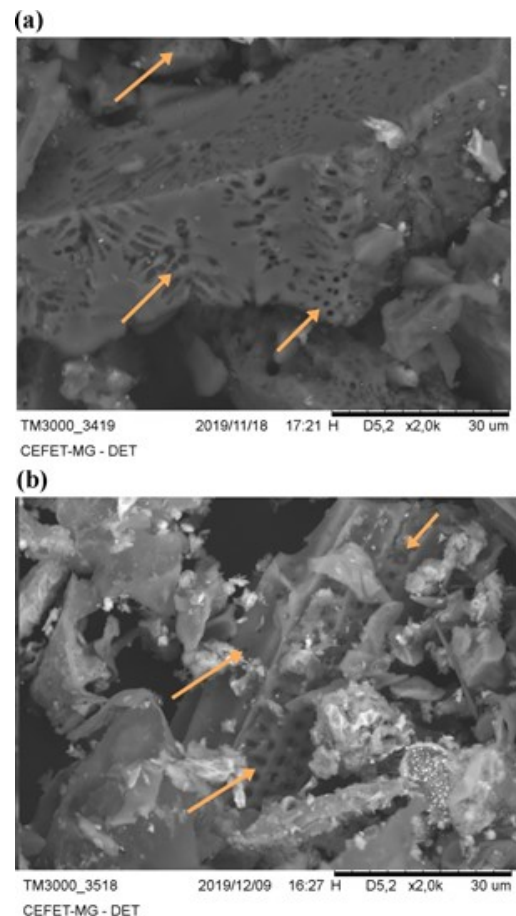


Figura 2. Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura no modo retroespalhado com ampliação de 2000x (a) CAC; (b) CABC.

Figure 2. Micrographs obtained by scanning electron microscopy in the backscattered mode with 2000x magnification (a) CAC; (b) CABC.

3.5. Fluorescência de Raios X (FRX)

O resultado da análise química por FRX, apresentada na forma de óxidos, para o CABC é mostrado na Tabela 2.

Tabela 2. Composição Química por FRX do CABC.
Table 2. Chemical Composition by FRX of CABC.

Óxidos	Porcentagem (%)
ZnO	68,777
Cl	19,349
SiO ₂	4,746
Fe ₂ O ₃	3,560
Al ₂ O ₃	1,666
TiO ₂	0,724
SO ₃	0,670
P ₂ O ₅	0,507

3.6. Difração de Raios X

A Figura 3 mostra o difratograma do CABC e tal técnica foi utilizada para avaliar a cristalinidade do CABC.

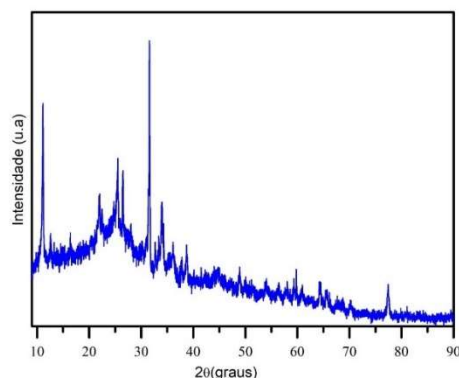


Figura 3. Difratograma obtido para o CABC.
Figure 3. Diffractogram obtained for the CABC.

3.7. Área Superficial Específica Pelo Método da Adsorção do Azul de Metileno

As capacidades adsorptivas para o corante azul de metileno do CABC e do CAC foram determinadas para estimar as áreas superficiais específicas destes adsorventes. A diferença de remoção entre o CABC e o CAC pode ser observada na Figura 4, enquanto na Tabela 3 observa-se as quantidades adsorvidas para cada concentração analisada.

O q_m para o cálculo da área foi obtido a partir da divisão $1/b$, sendo o b o coeficiente angular da equação da reta dos gráficos C_e/q_e , representados na Figura 5.

Tabela 3. Valores de Remoção de Azul de Metileno.
Table 3. Methylene Blue Removal Values.

Concentração Azul de Metileno (mg L ⁻¹)	Eficiência de Remoção CABC (%)	Eficiência de Remoção CAC (%)
1000	62,6	27,3
800	78,5	33,8
600	97,0	43,1
500	99,9	78,9
250	100,0	97,7
100	100,0	100,0
50	100,0	100,0
25	99,1	100,0
10	99,7	100,0

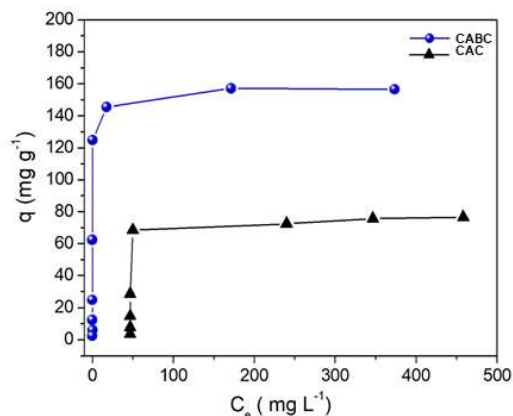


Figura 4. Isotermas de adsorção do corante AM sobre CABC e CAC.
Figure 4. AM dye adsorption isotherms on CABC and CAC.

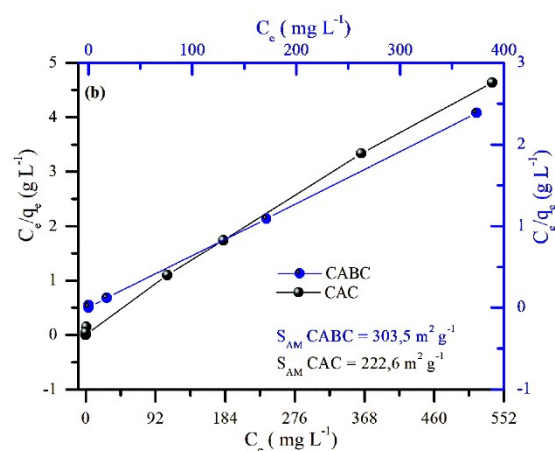


Figura 5. Isotermas de adsorção linearizadas do corante AM sobre CABC e CAC de acordo com o modelo de Langmuir.
Figure 5. Linearized adsorption isotherms of AM dye on CABC and CAC according to the Langmuir model.

4. DISCUSSÃO

4.1. Caracterização do Resíduo de Bagaço de Cana

Ao analisar a umidade, observa-se que o valor médio é de 49,82%, sendo este valor próximo ao informado pela empresa, que é de 50% e coerente com o informado em outras pesquisas (CARVALHO et al. 2019; CASTRO; SILVA; SANTOS, 2019; RESENDE et al. 2019). Segundo CARVALHO et al. (2017), os teores de umidade mais comuns variam entre 45 e 50%, sendo raro observar valores abaixo de 44%. Entretanto, o valor obtido nesta pesquisa pode ser prejudicial ao processo de produção de CA, visto que, umidades superiores a 50% podem dificultar a carbonização eficiente do bagaço.

Para a densidade, observa-se que o valor médio obtido foi de 80,92 g L⁻¹, abaixo do encontrado na literatura (PEGO et al., 2019), podendo estar relacionado com o baixo rendimento na obtenção de CA, como demonstrado por Figueiredo, Botari; Botari (2017), sendo que matéria-prima menos densa, resulta em menor rendimento na produção de CA.

4.2. pH

Foi observado que, se um CA possui caráter básico, significa que no processo de ativação ocorreu a formação de

grupos com essa característica. Este fato pode explicar o efeito da ativação promovido nos CABCS, induzindo a formação de grupos de caráter ácido como os grupos oxigenados (ABREU, 2013).

4.3. Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

A banda próxima a 1600 cm^{-1} , que pode ser relacionada às vibrações do grupo C=C aromáticos, possivelmente atribuídos à formação de produtos da carbonização com anéis aromáticos em suas estruturas como observados por Lima et al (2017) e Zorel Junior (2001). As bandas registradas na região próxima à região de 1240 cm^{-1} indicam a presença de grupos de C-O, enquanto na região entre 900 a 500 cm^{-1} são atribuídas a deformação C-H de compostos aromáticos. Também vale a pena mencionar que, a ausência de bandas próximas a 2900 cm^{-1} indica uma carbonização completa do bagaço de cana-de-açúcar, uma vez que, nesta região, são encontradas bandas referentes ao estiramento assimétrico de CH_2 e CH , característicos da celulose e outros compostos orgânicos (GE et al., 2023). A banda de 2400 cm^{-1} indica a presença de moléculas de CO_2 (ADJENTINA et al, 2022; ESCOBAR, SANTOS e DANTAS, 2022).

4.4. Microscópio eletrônico de varredura (MEV)

Foi possível observar que ambos os carvões apresentam uma superfície irregular e porosa. É sabido que a remoção dos poluentes é potencializada em superfícies porosas, uma vez que os poros representam o volume disponível para que ocorra o processo de adsorção (BRANDÃO, 2018).

4.5. Fluorescência de Raios X (FRX)

Destaca-se a presença do óxido de zinco (ZnO) e cloro (Cl) que, juntos, representam 88 % do total obtido. Tanto o zinco (Zn), encontrado no óxido de zinco, quanto o cloro (Cl), provavelmente, têm origem no cloreto de zinco (ZnCl_2) usado no processo de ativação química. Os demais constituintes são comumente encontrados em amostras de carvão (ABREU et al. 2011).

4.6. Difração de Raios X

Observou-se a presença de picos de difração que podem ser atribuídos aos compostos inorgânicos presentes no bagaço de cana-de-açúcar, bem como a derivados do processo de ativação química com ZnCl_2 .

4.7. Área Superficial Específica Pelo Método da Adsorção do Azul de Metileno

Em baixas concentrações, entre 10 e 250 mg L^{-1} , as capacidades adsorptivas são próximas para ambos os materiais. Já na faixa de concentração entre 500 e 1000 mg L^{-1} , a remoção do CABCS foi superior à do CAC. Essa diferença pode ser explicada por dois fatores, o primeiro é a diferença na origem dos carvões utilizados, e o segundo é o tamanho da área superficial do carvão, que segundo Silva, Lima e Quináia, (2019), são dois fatores que exercem influência direta no potencial de adsorção.

Os valores de q_m foram $156,25$ para o CABCS e $118,95$ para o CAC mg g^{-1} , e a área do azul de metileno considerada foi de $1,93\text{ m}^2\text{ mg}^{-1}$. Desta forma, as áreas encontradas foram de $303,5$ e $222,6\text{ m}^2\text{ mg}^{-1}$, para o CABCS e CAC, respectivamente. A área do CABCS é 25% superior ao CAC, demonstrando maior potencial para a retenção de poluentes, o que também pode explicar o q_m superior, uma vez que a

adsorção é um fenômeno de superfície, portanto, quanto maior for a área superficial do sólido, maior será a adsorção (RAMOS et al. 2017).

No trabalho de Silva e Oliveira (2012) foi testado a adsorção em bagaço in natura e ativado com ácido sulfúrico, obtendo q_m de $31,791$ e $38,227\text{ mg g}^{-1}$ respectivamente. Jorge, Tavares e Santos obtiveram adsorção máxima de $67,9794\text{ mg g}^{-1}$, em ambos os casos os resultados são inferiores ao demonstrado.

5. CONCLUSÕES

O carvão produzido do bagaço de cana-de-açúcar possui superfície irregular, porosa e área de $303,5\text{ m}^2\text{ g}^{-1}$, valor superior ao do CAC.

Em relação à eficiência de tratamento, o CABCS e CAC apresentaram eficiências semelhantes em concentrações inferiores a 100 mg L^{-1} e para concentrações superiores a 250 mg L^{-1} , o CABCS apresentou eficiência superior ao CAC, tendo capacidade máxima de adsorção igual a $156,25\text{ mg g}^{-1}$. Quando buscado em literatura, esse valor é superior ao de outros trabalhos usando bagaço de cana com outros métodos de ativação, o que indica que os métodos com ZnCl_2 são eficientes no aumento da porosidade do carvão.

Sendo assim, o bagaço de cana-de-açúcar mostrou potencial para ser usado como matéria-prima na produção de carvão ativado, além de ajudar na problemática ambiental, uma vez que podemos dar a destinação adequada para os excedentes de bagaço de cana-de-açúcar não queimados nas caldeiras.

6. REFERÊNCIAS

- ABREU, M. B. Preparação de carvão ativado de bagaço de cana de açúcar e sua aplicação na adsorção de Cd(II) e Cu(II) . 2013. Trabalho de Conclusão de Curso [Tecnologia em Processos Químicos] – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, 2013.
- ADJENTINA, B. L.; SILVERIO, B. C.; LUZ, M. S.; SANTOS, K.G. Leito fixo aplicado à pirólise de fibra de coco: efeito da temperatura e da adição de MgCl_2 . In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 40. Anais... 2022, Uberlândia: ENEMP., 2022. p. 1-12. Disponível em: <https://enemp2022.com.br/trabalhos finais/FEN7.pdf>. Acessado em: 19 out. 2023.
- ARAÚJO, L. S.; COUTINHO, A. dos R.; ALVAREZ-MENDEZ, M. O.; MORUZZI, R. B.; CALIJURI, M. do C.; CUNHA, D. G. F. Caracterização e avaliação de fatores que determinam a remoção de microcistina-LR em carvão ativado granular produzido a partir de diferentes matérias-primas. *Engenharia Ambiental e Sanitária*, v. 23, n. 6, p. 1131-1142, 2018. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522018177756>
- ASSAD, L. Aproveitamento de resíduos do setor sucroalcooleiro desafia empresas e pesquisadores. *Ciência e Cultura*, v. 69, n. 4, p. 1, 2017.
- BRANDÃO, I. B. *Otimização e estudo da adsorção de corante azul de metileno utilizando carvão ativado subproduto da pirólise do lodo de esgoto*. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso [Graduação em Engenharia Química] – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.
- BRASIL. *Lei n. 12.305/10*, de 18 de maio de 2012. Política nacional de resíduos sólidos. PNRS. 2. ed. Brasília, 18 maio. 2012.

- CARVALHO, A. H. S.; DOS SANTOS, C. A.; FARAH, S. P. dos S.; FARAH, A. F. Influência da umidade do bagaço da cana-de-açúcar no sistema de cogeração de energia. **SITEFA**, [s. l.], v. 2, n. 1, p. 445-456, 2019. <https://doi.org/10.33635/sitefa.v2i1.48>
- CARVALHO, M. M.; LIRA, V. S.; WATANABE, C. H.; FRACÁCIO, R. Estudo da toxicidade de metais (zinco e cádmio) sobre *Ceriodaphnia dubia*, por multivias de exposição e recuperação biológica de descendentes. **Engenharia Ambiental e Sanitária**, v. 22, n. 5, p. 961-968, 2017. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522017158722>
- CASTRO, B. S.; SILVA, A. M. B.; SANTOS, P. M. Aplicação de controle fuzzy na combustão de bagaço de cana-de-açúcar em caldeiras. In: ENCONTRO DE DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS AGROINDUSTRIAIS, 3., 2019, Uberaba. **Anais...** Uberaba: 2019. p. 1-6. Disponível em: <https://repositorio.uniube.br/bitstream/123456789/1122/1/EDEPA%20-%20APLICA%3%87%3%83O%20DE%20CONTROLE%20FUZZY%20NA%20COMBUST%3%83O%20DE%20BAGA%3%87O%20DE%20CANA-DE-A%3%87%3%9ACAR%20EM%20CALDEIRAS.pdf>. Acessado em: 19 out. 2023.
- ESCOBAR, A. L.; SANTOS, K. G.; DANTAS, S. C. Efeito dos tratamentos ácido e alcalino na capacidade adsorptiva do biocarvão obtido através da pirólise de malte. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 40. **Anais...** Uberlândia. ENEMP, 2022. Disponível em: p. 1-8. <https://proceedings.science/enemp/enemp-2022/trabalhos/efeito-dos-tratamentos-acido-e-alcalino-na-capacidade-adsorptiva-do-biocarvao-obt?lang=pt-br>. Acessado em: 19 out. 2023.
- ABREU, C. S.; INÁCIO, T. D.; FALLAVENA, V. L. V.; AZEVEDO, C. M. N.; PIRES, M. J. R. Avaliação de métodos de determinação do teor de matéria mineral em carvões brasileiros. In: SALÃO DA INICIAÇÃO CIENTIFICA PUCRS, 7. **Anais...** 2011. Ipiranga: PUCRS, p. 1-3. Disponível em: <https://ebooks.pucrs.br/edipucrs/anais/SIC/XII/XII/5/5/3/2/1.pdf>. Acessado em: 19 out. 2023.
- FIGUEIREDO, A. C. F.; BOTARI, A.; BOTARI, J. C. Remoção de cloridrato de metilamina por adsorção utilizando carvão ativado obtido da borra a partir de Café. In: Safety, Health and Environment World Congress, 17. **Anais...** 2017. Vila Real, p. 1-13.
- GE, L.; ZHAO, C.; ZHOU, T.; CHEN, S.; LI, Q.; WANG, X.; SHEN, D.; WANG, Y.; XU, C. An analysis of the carbonization process of coal-based activated carbon at different heating rates. **Energy**, v. 267, n. 25, e126557, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126557>
- INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Métodos químicos e físicos para análise de alimentos**. 3. Ed. São Paulo: IMESP, 1985. v. 1, p. 21-22 e 27-28.
- JORGE, I. R.; TAVARES, F. P.; SANTOS, K. G. Remoção do corante azul de metileno no tratamento de efluentes por adsorção em bagaço de cana de açúcar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS 37. **Anais...** 2015. São Carlos. ENEMP, p. 1-10. Disponível em: [https://www.proceedings.blucher.com.br/article-](https://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/remoo-do-corante-azul-de-metileno-no-tratamento-de-efluentes-por-adsoro-em-bagaço-de-cana-de-acar-20637)
- details/remoo-do-corante-azul-de-metileno-no-tratamento-de-efluentes-por-adsoro-em-bagaço-de-cana-de-acar-20637. Acessado em: 19 out. 2023.
- LIMA, J. Z.; VAZ, L. A. A.; RODRIGUES, V. G. S.; RAIMONDI, I. M. Estudo da viabilidade do uso de turfas in natura e ativada como material adsorvente de Cd. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE SUBSTÂNCIAS HÚMICAS 7. **Anais...** 2017. Sinop: Matéria Orgânica e Suas Multifuncionalidades. p. 1-4. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/directbitstream/4953ed08-8268-4dda-9456-63da026ef21d/trabalho+19+-+Estudo+da+viabilidade+do+uso+de+turfas+in+natu+ra+e+ativada+como+material+adsorvente+de+Cd.+%28XII+Encontro+Brasileiro+de+Subst%3%A2ncias+H%3%BAmicas+e+Mat%3%A9ria+Org%3%A2nica+Natural%2C+2017%29.pdf>. Acessado em: 19 out. 2023.
- PEGO, M. F. F.; BIANCHI, M. L.; VEIGA, T. R. L. A. 2019. Avaliação das propriedades do bagaço de cana e bambu para produção de celulose e papel. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 62, 1-11, 2019. <https://doi.org/10.22491/rca.2019.3158>
- RAMOS, J. P.; PAVÃO, M. F. U.; BARRA, E. C.; VILHENA, K. S. S.; GOUVEIA, F. P. Potencial de adsorção do resíduo proveniente do processo de obtenção do silício metálico. **Revista Virtual de Química**, v. 9, n. 2, p. 751-763, 2017.
- RESENDE, J. F.; POLIZELLI, M. A.; MONGELLI, L. T.; MAIA, L. F.; SOUZA, K. I. M. Estudo de pré-tratamentos para disponibilização de açúcares redutores a partir do bagaço de cana-de-açúcar. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 10, p. 19219-19227, 2019. <https://doi.org/10.34117/bjdv5n10-152>
- RODRIGUES, J. C. W.; PEREIRA, C. E.; PAES, L. F.; SANTOS, S. C. N.; BORDINHON, A. M. Utilização de resíduos agrícolas na produção de mudas de rúcula (*Eruca sativa*) e alface (*Lactuca sativa*). **Revista Brasileira de Agroecologia**, [s.l.], v. 11, n. 2, p. 1-6, 2017.
- SANCHEZ, B. S. N.; FAYNE, R. B. A.; BURROWAY, B. B. S. Charcoal: An ancient material with a new face. **Clinic in Dermatology**, v. 38, n. 2, p. 262-264, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.clindermatol.2019.07.025>
- SCHETTINO JR, M. A.; FREISTA, J. C. C.; CUNHA, A. G.; EMMERICH, F. G.; SOARES, A. B.; SILVA, P. R. N. Preparação e caracterização de carvão ativado quimicamente a partir da casca de arroz. **Química Nova**, v. 30, n. 7, p. 1553-1668, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422007000700031>
- SILVA, G. S. P.; LIMA, L. S. de; QUINÁIA, S. P. Remoção dos compostos MIB e geosmina de água de abastecimento usando carvão ativado de caroço de pêssego. **Revista Virtual de Química**, v. 39, n. 5, p. 673-685, 2019.
- SILVA JUNIOR, O. J.; MOREIRA, C. V. C.; MONTEIRO, A. F. F.; MELO, V. E. R.; OLIVEIRA, J. B. L.; KULESZA, J. E.; BARROS, B. S. Síntese, caracterização e aplicação de ca-mofs na remoção do azul de metileno por adsorção. **Química Nova**, v. 45, n. 5, p. 507-517, 2022. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170852>
- SILVA, W. L. L.; OLIVEIRA, S. P. Modificação das características de adsorção do bagaço de cana para

- remoção de azul de metileno de soluções aquosas. **Scientia Plena**, v. 8, n. 9, p. 1-9, 2012.
- STAVROPOULOS, G. G.; ZABANIOTOU, A. A. Production and characterization of activated carbons from olive-seed waste residue. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 82, n. 1-2, p. 79-85, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2005.03.009>
- VALIX, M.; CHEUNG, W. H.; MCKAY, G. Preparation of activated carbon using low temperature carbonisation and physical activation of high ash raw bagasse for acid dye adsorption. **Chemosphere**, v. 56, p. 493-501, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.04.004>
- VIANA, L. G.; CRUZ, P. S. Reaproveitamento de Resíduos Agroindustriais. In: CONGRESSO BAIANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 4. **Anais...** Cruz das Almas, 2016. p. 1-3.
- WANG, F. Y.; WANG, H.; MA, J. W. Adsorption of cadmium (II) ions from aqueous solution by a new low-cost adsorbent - Bamboo charcoal. **Journal of Hazardous Materials**, v. 177, n. 1-3, p. 300-306, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.12.032>
- WOICIECHOWSKI, A. L.; CARVALHO, J. C. de; SPIER, M. R.; HABU, S.; YAMAGHISHI, C. T.; GHIGGI, V.; SOCCOL, C. R. Emprego de Resíduos Agroindustriais em Bioprocessos Alimentares. In: BICAS, J. L.; MARÓSTICA JÚNIOR, M. R.; PASTORE, G. M. (Eds.) **Biotecnologia de Alimentos**. Atheneu Editora, 2019. Cap. 6, p. 143-171.
- ZOREL JUNIOR, H. E.; COSTALONGA, A. G. C.; CRESPI, M. S.; RIBEIRO, C. A. Comportamento térmico do 8-quinolinol e seus nitro-derivados. **Química Nova**, v. 24, n. 5, p. 599-603, 2001. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422001000500005>

Agradecimentos: Ao programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCIAMB/UEMG)

Contribuição dos autores: I.O.S. – conceituação, coleta e análise de dados, redação de texto (esboço original, revisão e edição); S.L.O. M. - orientação, conceituação, metodologia, coleta e análise de dados, revisão de texto; A.R.T.M. - co-orientação, revisão e edição de texto, análise de dados. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Financiamento: *Não se aplica.*

Revisão por comitê institucional: *Não se aplica.*

Comitê de Ética: *Não se aplica.*

Disponibilização de dados: Os dados do estudo podem ser obtidos mediante solicitação, via e-mail, ao autor correspondente.

Conflito de Interesse: Os autores declaram que não existem conflitos de interesse com outros pesquisadores ou instituições.