

RESÍDUOS TÊXTEIS COMO PRECURSORES DE CARVÃO ATIVADO PARA TRATAMENTO DE ÁGUA: AVANÇOS, DESAFIOS E PERSPECTIVAS

Julie Namie Ono Hangai - pg406360@uem.br - Universidade Estadual de Maringá

Wardleison Martins Moreira - wmmoreira@uem.br - Universidade Estadual de Maringá

Marcia Gomes da Silva - mgsilva4@uem.br - Universidade Estadual de Maringá

Maria Angélica Simões Dornellas de Barros - masdbarros@uem.br - Universidade Estadual de Maringá

Resumo: Os resíduos têxteis têm emergido como uma preocupação ambiental crescente devido ao aumento acelerado de sua geração e à limitada capacidade de gerenciamento sustentável. Nesse contexto, a valorização desses resíduos como precursores alternativos para produção de carvão ativado tem atraído crescente interesse no âmbito da economia circular e do tratamento de água. Esta revisão apresenta uma análise crítica do estado da arte relacionado à produção, caracterização e aplicação de carvões ativados derivados de resíduos têxteis para remoção de contaminantes da água. Os estudos reportados na literatura demonstram alto desempenho na remoção de diferentes contaminantes, incluindo metais pesados, corantes e fármacos, evidenciando o potencial desses materiais como adsorventes de baixo custo e elevada eficiência. Entretanto, a elevada heterogeneidade composicional dos resíduos têxteis, especialmente dos resíduos pós-consumo, ainda representa um grande desafio para a padronização, reprodutibilidade e escalabilidade dos processos. Além disso, a presença de fibras sintéticas, misturas de composição, corantes e aditivos químicos pode influenciar significativamente o comportamento térmico do precursor, o desenvolvimento da porosidade e a química superficial do carvão ativado produzido. Portanto, embora os resultados disponíveis sejam promissores, ainda são necessários avanços relacionados à sustentabilidade do processo, regenerabilidade do adsorvente, avaliação ambiental e aplicação em sistemas reais de tratamento de efluentes.

Palavras-chave: Resíduos têxteis, Carvão ativado, Adsorção, Tratamento de água, Economia circular.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

TEXTILE WASTE AS A PRECURSOR TO ACTIVATED CARBON FOR WATER TREATMENT: ADVANCES, CHALLENGES AND PERSPECTIVES

Julie Namie Ono Hangai - pg406360@uem.br - Universidade Estadual de Maringá

Wardleison Martins Moreira - wmmoreira@uem.br - Universidade Estadual de Maringá

Marcia Gomes da Silva - mgsilva4@uem.br - Universidade Estadual de Maringá

Maria Angélica Simões Dornellas de Barros - masdbarros@uem.br - Universidade Estadual de Maringá

Abstract: Textile waste has emerged as a growing environmental concern due to the accelerated increase in its generation and the limited capacity for sustainable management. In this context, the valorization of this waste as an alternative precursor for the production of activated carbon has attracted increasing interest within the framework of the circular economy and water treatment. This review presents a critical analysis of the state of the art related to the production, characterization, and application of activated carbons derived from textile waste for the removal of water contaminants. Studies reported in the literature demonstrate high performance in removing different contaminants, including heavy metals, dyes, and pharmaceuticals, highlighting the potential of these materials as low-cost and highly efficient adsorbents. However, the high compositional heterogeneity of textile waste, especially post-consumer waste, still represents a major challenge for the standardization, reproducibility, and scalability of processes. Furthermore, the presence of synthetic fibers, composition mixtures, dyes, and chemical additives can significantly influence the thermal behavior of the precursor, the development of porosity, and the surface chemistry of the activated carbon produced. Therefore, although the available results are promising, further progress is needed regarding process sustainability, adsorbent regenerability, environmental assessment, and application in real wastewater treatment systems.

Keywords: Textile waste, Activated carbon, Adsorption, Water treatment, Circular economy.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

1. INTRODUÇÃO

A indústria têxtil e de vestuário tem apresentado significativa expansão impulsionada pelo crescimento populacional e pelas rápidas mudanças nas tendências de moda, consolidando-se como uma das principais indústrias de bens de consumo (SHIRVANIMOGHADDAM *et al.*, 2020). Nas últimas duas décadas, a produção têxtil mundial dobrou, acompanhada pelo aumento do consumo global de têxteis. Estima-se que o setor de vestuário gere cerca de 92 milhões de toneladas de resíduos anualmente, com projeção de aumento de 45%, alcançando 134 milhões de toneladas até 2030 (BBC News, 2020).

Diversas estratégias têm sido empregadas para o gerenciamento desses resíduos, incluindo disposição em aterros, incineração, reutilização e reciclagem. Entretanto, apenas uma pequena fração é efetivamente reciclada, enquanto a maior parte ainda é destinada a aterros sanitários ou incineradores, resultando em impactos ambientais associados à emissão de gases de efeito estufa, geração de lixiviados e esgotamento de recursos naturais (JUANGA-LABAYEN *et al.*, 2022).

Paralelamente, a crescente preocupação com a poluição hídrica intensificou a demanda por tecnologias eficientes e sustentáveis para remoção de contaminantes orgânicos e inorgânicos de sistemas aquosos (BROUKOS *et al.*, 2026). Nesse contexto, a adsorção destaca-se pela elevada eficiência, simplicidade operacional e viabilidade econômica. O carvão ativado permanece como o adsorvente mais utilizado devido à sua elevada área superficial específica, estrutura porosa desenvolvida e versatilidade química, permitindo a remoção de corantes, fármacos, metais pesados, pesticidas e outros contaminantes emergentes (CRINI & LICHTFOUSE, 2019). Contudo, sua produção comercial ainda depende de precursores não renováveis ou biomassas lignocelulósicas de maior valor agregado, frequentemente associadas a elevado consumo energético e altos custos de produção (CHEN *et al.*, 2011).

Nesse cenário, a valorização de resíduos como precursores alternativos tem recebido crescente atenção no contexto da economia circular. Resíduos agrícolas, subprodutos florestais e resíduos agroindustriais já vêm sendo amplamente investigados para produção de carvão ativado (ISMAIL *et al.*, 2025). Mais recentemente, resíduos têxteis passaram a ser considerados precursores promissores para síntese de materiais carbonáceos adsorventes. Resíduos contendo fibras naturais, como algodão, linho, rami, juta e sisal, apresentam elevado teor de celulose e significativo potencial de carbonização, favorecendo a produção de carvão via carbonização e ativação (LEE *et al.*, 2023). Além disso, sua reutilização contribui simultaneamente para redução do acúmulo de resíduos sólidos e geração de materiais adsorventes de maior valor agregado.

Apesar desse potencial, a conversão de resíduos têxteis em carvão ativado ainda apresenta desafios científicos e tecnológicos relevantes. Diferentemente das biomassas lignocelulósicas convencionais, os resíduos têxteis possuem elevada heterogeneidade composicional devido à presença de fibras naturais e sintéticas, corantes, aditivos, retardantes de chama e agentes de acabamento. Essa complexidade influencia diretamente o comportamento térmico, o rendimento carbonáceo, o desenvolvimento da porosidade e a química superficial do material obtido. Ademais, fibras sintéticas, como poliéster, poliamida e elastano, podem sofrer fusão e decomposição secundária durante a carbonização, favorecendo a formação de alcatrão, emissões tóxicas e estruturas porosas irregulares.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

Além disso, corantes e aditivos químicos residuais podem alterar as propriedades físico-químicas do carvão ativado, comprometendo sua segurança ambiental e reprodutibilidade (ALI & KHAN, 2026).

Outra limitação importante refere-se à predominância de estudos conduzidos em escala laboratorial, geralmente focados na capacidade de adsorção e na maximização da área superficial específica. Em contrapartida, aspectos relacionados à escalabilidade, viabilidade econômica, regeneração, avaliação do ciclo de vida e riscos ambientais ainda são pouco explorados. Adicionalmente, muitos estudos tratam os resíduos têxteis como uma categoria homogênea, negligenciando a influência da composição das fibras e do histórico de processamento têxtil nas propriedades finais do adsorvente.

Portanto, esta revisão tem como objetivo apresentar uma análise crítica e abrangente do estado da arte sobre a produção de carvão ativado a partir de resíduos têxteis, abordando os métodos de síntese, caracterização, mecanismos de adsorção, aplicações ambientais e os principais desafios associados à viabilidade técnica, econômica e ambiental desses materiais no tratamento de efluentes.

2. GERAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS TÊXTEIS

Os resíduos têxteis são classificados, de maneira geral, em três categorias principais: resíduos pré-consumo, industriais e pós-consumo. Os resíduos pré-consumo são gerados durante as etapas de fiação, tecelagem, malharia, acabamento e confecção, incluindo fibras, fios defeituosos e retalhos de tecido. Já os resíduos industriais derivam de setores que utilizam materiais têxteis em suas cadeias produtivas, como indústrias automotivas, hospitalares e moveleiras. Por fim, os resíduos pós-consumo correspondem aos produtos descartados após o fim de sua vida útil pelo consumidor, incluindo vestuário, carpetes, cortinas e tecidos domésticos (MISHRA *et al.*, 2022).

Do ponto de vista da produção de carvão ativado, os resíduos pré-consumo apresentam maior interesse devido à sua menor heterogeneidade, menor contaminação e composição mais previsível. Em contrapartida, resíduos pós-consumo frequentemente apresentam elevada complexidade composicional em decorrência da presença de misturas de fibras, corantes, acabamentos químicos, aviamentos (botões, zíperes, elastômeros) e impurezas em decorrência ao uso. Essa heterogeneidade representa um dos principais desafios para a valorização desses materiais.

A composição química dos resíduos têxteis varia significativamente conforme a origem da fibra. Fibras naturais, como algodão, juta, linho e cânhamo, possuem predominância de materiais lignocelulósicos, especialmente celulose, hemicelulose e lignina. O algodão destaca-se como um precursor promissor para materiais carbonáceos devido ao seu elevado teor de celulose, frequentemente superior a 85% (LEE *et al.*, 2023).

A estrutura lignocelulósica exerce influência direta sobre o rendimento carbonáceo, desenvolvimento da porosidade e propriedades adsorptivas do carvão ativado. A celulose atua como principal fonte de carbono estrutural, enquanto hemicelulose e lignina influenciam a degradação térmica e a formação da matriz carbonácea. Em biomateriais lignocelulósicos, a decomposição térmica ocorre em diferentes faixas de temperatura, sendo a hemicelulose menos estável termicamente,

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

seguida da celulose e, posteriormente, da lignina, que apresenta degradação mais lenta e ampla distribuição térmica (ISIKGOR & BECER, 2015).

Por outro lado, resíduos contendo fibras sintéticas, como poliéster, poliamida, acrílico e elastano, apresentam comportamento termoquímico substancialmente distinto. Esses materiais possuem elevada estabilidade térmica e podem sofrer fusão parcial durante a carbonização, favorecendo a formação de compostos aromáticos condensados, resíduos alcatroados e emissões gasosas potencialmente tóxicas (LEE *et al.*, 2023). Além disso, tecidos mistos contendo algodão/poliéster representam um desafio adicional devido à dificuldade de separação das frações lignocelulósica e petroquímica.

Outro aspecto crítico refere-se à presença de aditivos químicos incorporados aos tecidos durante os processos de tingimento e acabamento. Corantes, retardantes de chama, resinas, plastificantes, surfactantes e metais provenientes de pigmentos podem alterar significativamente a química superficial do carvão produzido, afetando tanto sua capacidade adsorptiva quanto sua segurança ambiental (ALI & KHAN., 2026). Em determinados casos, a presença desses compostos pode favorecer a formação de subprodutos tóxicos durante a carbonização, exigindo controle rigoroso das condições operacionais.

A caracterização físico-química dos resíduos têxteis constitui uma etapa fundamental para avaliação do seu potencial como precursor carbonáceo. Entre as principais técnicas empregadas destacam-se a análise elementar (CHNS/O), análise termogravimétrica (TGA), espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), difração de raios X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Essas técnicas permitem determinar parâmetros fundamentais, como teor de carbono fixo, composição elementar, estabilidade térmica, grupos funcionais superficiais e morfologia estrutural.

A análise termogravimétrica (TGA) é particularmente relevante, pois fornece informações sobre o comportamento de degradação térmica do resíduo e auxilia na definição das condições de carbonização e ativação. Resíduos ricos em celulose geralmente apresentam intensa perda de massa entre 300 e 400 °C, associada à decomposição das cadeias polissacarídicas (NEME *et al.*, 2022), enquanto materiais sintéticos podem apresentar eventos térmicos mais complexos relacionados à fusão e volatilização de polímeros (LEE *et al.*, 2023).

Além da composição química, parâmetros como teor de cinzas, umidade e compostos voláteis exercem influência significativa sobre a qualidade do carvão ativado obtido. Elevados teores de cinzas podem reduzir a área superficial específica, enquanto baixos teores de carbono fixo tendem a comprometer o rendimento final do material carbonáceo (HERIYANTO *et al.*, 2025). Assim, a seleção adequada do resíduo precursor é uma etapa decisiva para obtenção de adsorventes de elevado desempenho.

Nesse contexto, embora os resíduos têxteis apresentem elevado potencial como matéria-prima alternativa para produção de carvão ativado, sua diversidade composicional ainda representa um dos maiores obstáculos para padronização, escalabilidade e reprodutibilidade dos processos. Portanto, novas estratégias de segregação, classificação e pré-tratamento dos resíduos tornam-se fundamentais para viabilizar aplicações industriais sustentáveis desses materiais.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

3. SÍNTESE DE CARVÃO ATIVADO A PARTIR DE RESÍDUOS TÊXTEIS

Assim como outros tipos de materiais precursores, a produção de carvão ativado a partir de resíduos têxteis ocorre, de forma geral, em duas etapas principais: carbonização (ou pirólise) e ativação. A carbonização consiste na decomposição térmica do material precursor em atmosfera inerte, promovendo a eliminação de compostos voláteis e a formação de uma matriz carbonácea rica em carbono fixo.

A eficiência da carbonização depende fortemente das condições operacionais empregadas, incluindo temperatura, taxa de aquecimento, tempo de residência, atmosfera reacional e composição do resíduo têxtil. Em resíduos predominantemente celulósicos, como algodão, juta e linho a degradação térmica ocorre principalmente entre 300 e 500 °C (ARJONA *et al.*, 2026; CHEN *et al.*, 2018; CHEN *et al.*, 2020).

Após a carbonização, o material obtido é submetido ao processo de ativação, considerado a etapa mais importante na produção do carvão ativado. A ativação é responsável pelo desenvolvimento da estrutura porosa e pelo aumento significativo da área superficial específica do adsorvente. Sem essa etapa, o carvão produzido apresenta área superficial limitada e baixa capacidade adsorviva.

Os processos de ativação podem ser classificados em ativação física e ativação química. Na ativação física, o material carbonizado é submetido à gaseificação utilizando vapor d'água ou CO₂, em temperaturas elevadas, normalmente entre 600 °C a 1000 °C, na ausência de oxigênio (JABER *et al.*, 2024). Esse processo promove a remoção seletiva de carbono da matriz sólida, ampliando os poros existentes e formando novas estruturas microporosas. Embora ambientalmente mais favorável devido à ausência de reagentes químicos agressivos, a ativação física normalmente requer maior consumo energético e maiores tempos de processamento.

Em um estudo, fibras de juta foram submetidas a ativação física, com carbonização em atmosfera de N₂ a 500 °C, seguida de ativação física com CO₂ a temperaturas de 800 °C e 900 °C, por 1 hora. O aumento da temperatura e do tempo de ativação promoveu o desenvolvimento de microporos, embora tenha reduzido o rendimento de carbono. A ativação com CO₂ em diferentes temperaturas também alterou a distribuição do volume dos poros, tendo-se uma predominância de microporos a 800 °C e de mesoporos a 900 °C. Geralmente, os mesoporos facilitam o transporte do soluto até os sítios de adsorção, enquanto os microporos são responsáveis pela retenção efetiva dos contaminantes (CHEN *et al.*, 2018).

A ativação química, por outro lado, é o método mais empregado nas pesquisas para a produção de carvão ativado derivado de resíduos têxteis devido à sua elevada eficiência no desenvolvimento da porosidade. Nesse processo, o precursor é impregnado com agentes químicos, como KOH, NaOH, H₃PO₄, ZnCl₂ e FeCl₃, antes da etapa de tratamento térmico. Esses reagentes promovem desidratação, degradação controlada da biomassa e rearranjo estrutural do carbono, favorecendo a formação de uma estrutura altamente porosa. Dessa forma, são empregadas menores temperaturas durante a ativação química em comparação à ativação física, tipicamente variando de 400 °C a 600 °C (JABER *et al.*, 2024). Entretanto, o uso desses agentes apresenta limitações

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores

UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO GRANDE DO SUL

PUCRS



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

importantes relacionadas ao uso de reagentes agressivos, elevado custo operacional e necessidade de lavagem intensiva após a ativação para a estabilização do pH do carvão ativado.

Diferentes agentes químicos promovem carvões ativados com características distintas mesmo que utilize o mesmo precursor, um exemplo disso é o estudo conduzido por Chen *et al.* (2020) que investigaram a produção de carvões ativados a partir de resíduos de linho, utilizando H_3PO_4 e $ZnCl_2$ como agentes ativadores, na proporção de impregnação de 1:1 (linho:ativador), em temperaturas de 700 °C e 800 °C, durante 1 hora. Os resultados mostraram que a ativação com H_3PO_4 proporciona maior rendimento final de carvão ativado, enquanto a ativação com $ZnCl_2$ favorece a obtenção de carvões com maior área superficial específica. O rendimento final de carvão ativado reflete a viabilidade econômica do processo, enquanto a área superficial específica é um parâmetro determinante para a eficácia do carvão ativado como adsorvente.

Além do agente químico empregado, a razão de impregnação do mesmo com o precursor na ativação química exerce forte influência sobre as propriedades finais do carvão ativado. Razões elevadas normalmente promovem maior desenvolvimento da porosidade e aumento da área superficial específica, porém podem ocasionar colapso estrutural da matriz carbonácea e redução do rendimento final. Da mesma forma, temperaturas excessivamente elevadas podem ampliar o diâmetro médio dos poros, reduzindo a fração microporosa responsável pela adsorção de moléculas de menor tamanho.

Nesse contexto, estudo mais recente conduzido por Heriyanto *et al.* (2025), avaliaram a viabilidade e o rendimento de carvão ativado feito a partir de resíduos têxteis pós-consumo de diversas composições. Os resultados quanto a variação da razão de impregnação de H_3PO_4 demonstraram que todas as composições de resíduos têxteis analisadas apresentaram redução do rendimento final de carvão ativado de forma gradativa ao aumento da impregnação de H_3PO_4 , a qual foi variada entre 1:1 e 1:4. Segundo os autores, esse comportamento está associado à dissolução observada dos resíduos têxteis com o aumento de teor de H_3PO_4 , fazendo com que o material se degradasse mais rapidamente durante a carbonização, permitindo que os fragmentos de polímero degradados fossem liberados como compostos voláteis.

Diante desses resultados torna-se evidente a importância da escolha adequada do método de síntese a partir de resíduos têxteis, considerando tanto os aspectos econômicos quanto as características do adsorvente e do próprio contaminante em aplicações no tratamento de água.

4. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DOS CARVÕES ATIVADOS

A caracterização físico-química dos carvões ativados derivados de resíduos têxteis constitui uma etapa fundamental para compreender a relação entre as condições de síntese, a estrutura porosa desenvolvida e o desempenho adsorptivo do material. As propriedades texturais, morfológicas e químicas do carvão ativado influenciam diretamente sua capacidade de adsorção, seletividade, estabilidade e potencial de regeneração. Dessa forma, diferentes técnicas analíticas têm sido amplamente empregadas para avaliar as características estruturais e superficiais desses adsorventes.

Entre os principais parâmetros avaliados nos estudos reportados na literatura, destacam-se área superficial específica, volume e distribuição de poros, composição elementar, grupos funcionais

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

superficiais, estabilidade térmica, cristalinidade e morfologia estrutural. Como mencionado anteriormente, essas propriedades são fortemente influenciadas pela natureza do material precursor, pelo método de ativação empregado e pelas condições de carbonização.

A determinação das propriedades texturais é normalmente realizada por adsorção/dessorção de nitrogênio a 77 K, utilizando o método de Brunauer-Emmett-Teller (BET). Essa técnica permite estimar a área superficial específica do material, parâmetro diretamente relacionado à capacidade adsorviva do carvão ativado.

Além da área superficial, a distribuição do tamanho de poros desempenha papel decisivo no processo de adsorção, a mesma pode ser avaliada pela isoterma de adsorção de CO₂ realizada a 273 K como o procedimento proposto pelo modelo de Horvath-Kawazoe (DOMBROWSKY *et al.*, 2001).

Segundo Thommes *et al.* (2015), para fins de classificação dos tamanhos de poros (diâmetro, d_p), a União Internacional de Química Pura e Aplicada (*International Union of Pure and Applied Chemistry* - IUPAC) estabelece a seguinte convenção:

- Microporos: $d_p < 2$ nm.
- Mesoporos: $2 \text{ nm} < d_p < 50$ nm.
- Macroporos: $d_p > 50$ nm.

Esta classificação é relevante uma vez que o tamanho dos poros do material adsorvente deve ser compatível com o adsorvato que se deseja remover. Por um exemplo, microporos são particularmente importantes para adsorção de moléculas pequenas, enquanto mesoporos favorecem difusão intrapartícula e adsorção de compostos maiores, como corantes têxteis.

A análise morfológica é frequentemente realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV), permitindo observar o desenvolvimento da porosidade superficial, fissuras, cavidades e alterações estruturais decorrentes da carbonização e ativação. Em geral, o processo de ativação promove erosão da matriz carbonácea e abertura de poros previamente obstruídos por compostos voláteis. Como visto na Figura 1 referente ao estudo conduzido por Heriyanto *et al.* (2025), resíduos têxteis lignocelulósicos tendem a originar estruturas fibrosas parcialmente preservadas após a carbonização, enquanto resíduos sintéticos frequentemente apresentam superfícies fundidas ou colapsadas devido ao comportamento termoplástico dos polímeros.

A química superficial dos carvões ativados é normalmente investigada por espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR). Essa técnica permite identificar grupos funcionais oxigenados e nitrogenados presentes na superfície do adsorvente, incluindo hidroxilas, carbonilas, carboxilas, lactonas e grupos aromáticos. A presença desses grupos influencia diretamente os mecanismos de adsorção, especialmente em processos envolvendo interações eletrostáticas, ligações de hidrogênio e complexação superficial.

A difração de raios X (DRX) é utilizada para avaliar o grau de organização estrutural e cristalinidade do carvão ativado. De maneira geral, materiais carbonáceos derivados de resíduos têxteis apresentam estrutura predominantemente amorfa, caracterizada por bandas largas associadas aos planos gráfiticos desordenados como mostrado por Heriyanto *et al.* (2025).

Outra propriedade relevante corresponde ao ponto de carga zero (pH_{pzc}), parâmetro que indica o pH no qual a superfície do adsorvente apresenta carga líquida nula. Esse parâmetro possui

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



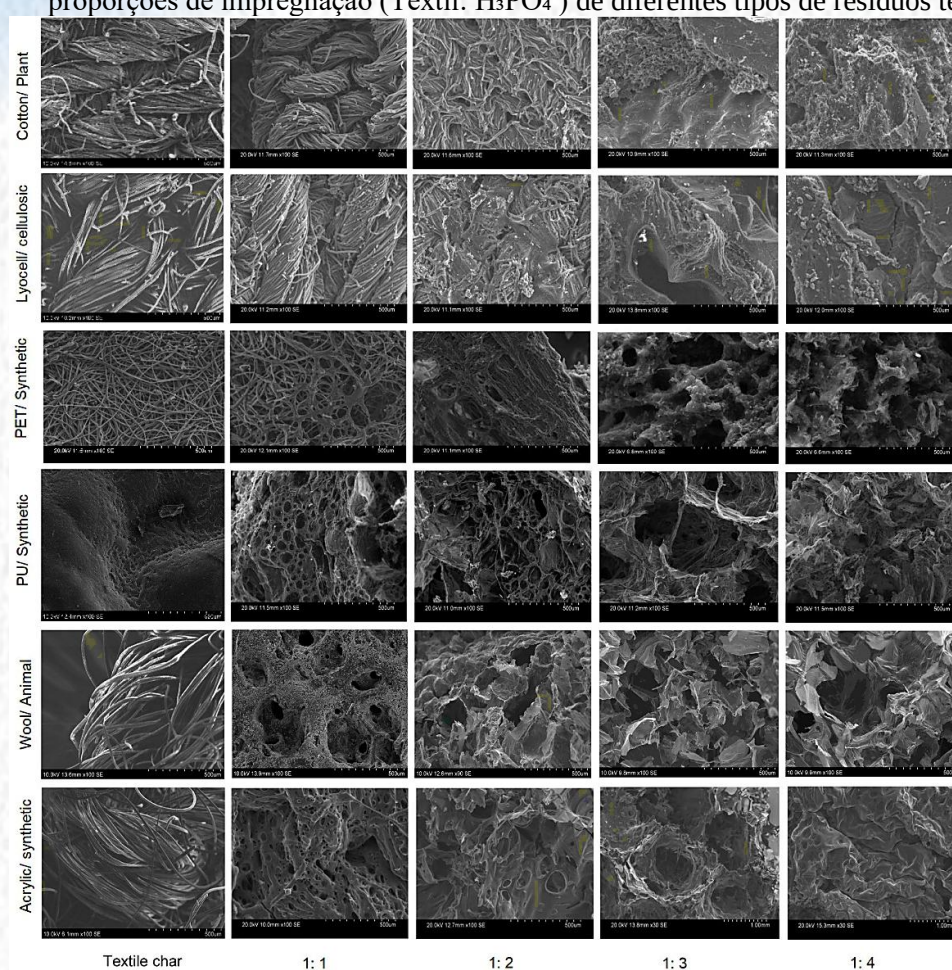
abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

forte influência sobre os mecanismos de adsorção de espécies iônicas, particularmente metais pesados e corantes aniônicos ou catiônicos. Um exemplo dessa influência foi observado no estudo conduzido por Xu *et al.* (2017), no qual foi averiguado que o carvão ativado feito a partir de resíduos de poliéster e impregnado com diferentes agentes químicos ($MgCl_2$, $MgCl$ e MgO) resultou em um pH_{pzc} mais ácido (cerca de 4-5). Nos experimentos de cinética de adsorção os pesquisadores utilizaram solução ácida com pH 3, o que resultou em carga superficial positiva dos carvões e possibilitou a adsorção de Cr (VI) por meio de interação cátion- π , interação eletrostática e a interação de troca iônica.

Figura 1 - Imagens de MEV do carvão ativado após transformação térmica em diferentes proporções de impregnação (Têxtil: H_3PO_4) de diferentes tipos de resíduos têxteis.



Fonte: Imagem retirada de Heriyanto *et al.*, 2025.

A análise elementar (CHNS/O) também fornece informações importantes sobre a composição química do carvão ativado, permitindo determinar os teores de carbono, hidrogênio,

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

nitrogênio, enxofre e oxigênio. Em geral, o aumento da temperatura de carbonização promove elevação do teor de carbono e redução dos teores de hidrogênio e oxigênio, indicando maior grau de carbonização e aromaticidade, em contrapartida, diminui o rendimento final de carvão ativado (HERIYANTO *et al.*, 2025).

Além disso, análises termogravimétricas (TGA) são frequentemente utilizadas para avaliar a estabilidade térmica dos carvões ativados e investigar eventos de degradação associados à presença de grupos funcionais residuais ou materiais inorgânicos. Carvões ativados mais estáveis termicamente tendem a apresentar maior resistência à regeneração térmica e maior durabilidade operacional o que influencia diretamente na viabilidade técnico-econômica.

Embora diversas técnicas de caracterização sejam amplamente utilizadas na literatura, ainda existe significativa falta de padronização metodológica entre os estudos envolvendo resíduos têxteis como precursores carbonáceos. Diferenças nas condições de preparação, métodos analíticos e parâmetros operacionais dificultam comparações diretas entre os materiais produzidos. Além disso, muitos trabalhos concentram-se apenas na área superficial BET, negligenciando parâmetros fundamentais como química superficial e estabilidade estrutural.

Portanto, uma caracterização físico-química abrangente torna-se essencial para correlacionar adequadamente a estrutura do carvão ativado com seu desempenho em processos de adsorção, além de contribuir para o desenvolvimento de materiais mais eficientes, seletivos e ambientalmente seguros a partir de resíduos têxteis.

5. APLICAÇÕES E MECANISMOS DE ADSORÇÃO DOS CARVÕES ATIVADOS DERIVADOS DE RESÍDUOS TÊXTEIS

Os carvões ativados produzidos a partir de resíduos têxteis têm demonstrado elevado potencial para aplicação em processos de adsorção, principalmente no tratamento de águas contaminadas por corantes, metais pesados, fármacos e compostos orgânicos emergentes, conforme apresentado na Tabela 1 (AKKOUICHE *et al.*, 2020; ZHANG *et al.*, 2025).

Entre as aplicações investigadas estão a remoção de corantes, fármacos e metais pesados, como Cu (II), Pb (II), Cr (VI), Zn (II). A elevada afinidade desses materiais por espécies metálicas está associada principalmente à presença de grupos funcionais oxigenados e nitrogenados na superfície do material, os quais atuam como sítios ativos para complexação e troca iônica (JIA *et al.*, 2002). Nesse contexto, a adsorção utilizando carvão ativado tem sido considerada uma das tecnologias mais eficientes para remoção desses poluentes devido à simplicidade operacional, elevada eficiência e possibilidade de regeneração do adsorvente quando ocorre somente a fisissorção.

Os mecanismos envolvidos na adsorção são complexos e normalmente ocorrem de maneira simultânea. Entre os principais mecanismos destacam-se o preenchimento de poros, interações eletrostáticas, ligações de hidrogênio, forças de van der Waals, interações $\pi-\pi$ e complexação superficial (Thommes *et al.*, 2015). A predominância de cada mecanismo depende tanto das propriedades do adsorvente quanto das características físico-químicas do adsorvato.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO GRANDE DO SUL

PUCRS



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

Tabela 1 - Carvões ativados produzidos a partir de diferentes resíduos têxteis.

Resíduo têxtil	Processo de ativação	Área superficial (m ² /g)	Contaminante	Capacidade de adsorção (mg/g)	Referência
Denim 100% algodão	H ₃ PO ₄ , 1:1, 60 °C por 24 h; carbonização lenta em 3 etapas a 5 °C/min sob fluxo de N ₂ : (1) 300 °C por 2 h, (2) 500 °C por 1 h, (3) resfriamento a 100 °C	1582	Azul Brilhante Remazol R	292	Silva <i>et al.</i> (2018)
Juta	Ativação física em 2 etapas: (1) 500 °C por 1 h, 10 °C/min sob fluxo de N ₂ , (2) 800 °C por 1 h sob fluxo de CO ₂	1120	Cu(II) Pb(II) Cr(VI) Zn(II) Rodamina B Tricloroetileno	47 23,8 51,3 88,7 224 356	Chen <i>et al.</i> (2018)
Poliéster	ZnCl ₂ por 24 h; 700 °C por 90 min, 5 °C/min sob fluxo de N ₂	846	I ₂ Azul de metileno PhOH	980,48 384,0 300,62	Yu <i>et al.</i> (2018)
Acrílico	Ativação física em 2 etapas: (1) 700 °C por 2 h, 5 °C/min sob fluxo de N ₂ , (2) 900 °C por 2 h sob fluxo de vapor d'água	752	Não especificado	Não especificado	Nahil e Williams (2012)
Tecido 100% algodão	H ₃ PO ₄ , 1:2, 85 °C por 7 h; 600 °C por 1 h, 10 °C/min sob fluxo de N ₂	1175	Ácido clofibrico Tetraciclina Paracetamol	49,9 109 105	Boudrahen <i>et al.</i> (2017)

As interações eletrostáticas também desempenham papel fundamental, especialmente na adsorção de espécies iônicas. O pH da solução e o ponto de carga zero (pH_{pzc}) do carvão ativado influenciam diretamente a carga superficial do adsorvente e, conseqüentemente, a atração ou repulsão entre adsorvente e adsorvato. Em meios ácidos, superfícies protonadas tendem a favorecer a adsorção de ânions, enquanto superfícies carregadas negativamente apresentam maior afinidade por cátions e íons metálicos (Xu *et al.*, 2017).

A presença de grupos funcionais contendo oxigênio e nitrogênio também contribui significativamente para os mecanismos de adsorção por meio de ligações de hidrogênio e complexação superficial. Grupos carboxílicos, fenólicos, carbonílicos e amínicos podem atuar como sítios ativos para interação química com moléculas orgânicas e íons metálicos, aumentando a seletividade e eficiência do processo adsorptivo (HERIYANTO *et al.*, 2025).

Os estudos cinéticos frequentemente demonstram que a adsorção em carvões ativados derivados de biomassa segue modelos de pseudo-segunda ordem, indicando participação significativa de interações químicas superficiais no processo de adsorção. Já os dados de equilíbrio normalmente

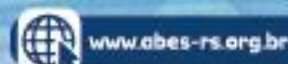
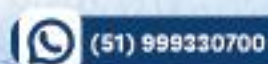
Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



apresentam melhor ajuste ao modelo de Langmuir, sugerindo adsorção predominantemente em monocamada sobre sítios homogêneos. Entretanto, modelos como o de Freundlich também são amplamente empregados, como no estudo de Silva *et al.* (2018), em que os pesquisadores produziram carvão ativado a partir de denim 100% algodão impregnado com H_3PO_4 para a remoção de corante Azul Brilhante Remazol R e, os resultados demonstraram que a isoterma de Freundlich descreveu melhor o processo de adsorção.

Apesar dos resultados promissores reportados na literatura, ainda existem limitações importantes relacionadas à regeneração, estabilidade química e desempenho em sistemas reais multicomponentes. Os estudos encontrados são conduzidos utilizando soluções sintéticas em condições laboratoriais idealizadas, o que dificulta extrapolações para aplicações industriais em larga escala. Além disso, a presença simultânea de sais, surfactantes e matéria orgânica em efluentes reais pode reduzir significativamente a eficiência adsorptiva devido à competição por sítios ativos.

Portanto, embora os carvões ativados produzidos a partir de resíduos têxteis apresentem elevado potencial para aplicação ambiental, avanços adicionais ainda são necessários para otimizar sua seletividade, regenerabilidade e viabilidade operacional em condições industriais reais.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos analisados nesta revisão demonstram que os resíduos têxteis possuem elevado potencial como precursores alternativos para a produção de carvão ativado aplicado ao tratamento de água. A elevada disponibilidade desses resíduos, aliada ao significativo teor de carbono presente principalmente em fibras lignocelulósicas, torna essa rota promissora sob a perspectiva da economia circular e da valorização de resíduos sólidos. Além disso, diversos trabalhos reportaram carvões ativados com elevada área superficial específica, porosidade desenvolvida e eficiência satisfatória na remoção de corantes, metais pesados e contaminantes emergentes.

Entretanto, a aplicação desses materiais em larga escala ainda enfrenta importantes desafios técnicos, ambientais e econômicos. A elevada heterogeneidade dos resíduos têxteis, especialmente pós-consumo, dificulta a padronização dos processos e compromete a reprodutibilidade dos carvões ativados produzidos. A presença de fibras sintéticas, corantes e aditivos químicos também influencia diretamente o comportamento térmico do precursor, podendo favorecer a emissão de gases tóxicos e resíduos secundários durante a carbonização.

Do ponto de vista técnico, a maioria dos estudos permanece restrita à escala laboratorial e utiliza soluções sintéticas em condições idealizadas, limitando a extrapolação para efluentes industriais reais. Além disso, parâmetros fundamentais como regenerabilidade, estabilidade e desempenho em sistemas multicomponentes ainda são insuficientemente investigados.

Sob a perspectiva ambiental e econômica, embora os resíduos têxteis sejam matérias-primas de baixo custo, o processo de produção do carvão ativado ainda apresenta limitações relacionadas ao elevado consumo energético e, no caso da ativação química, uso de agentes químicos agressivos somado ao alto consumo de água. A geração de efluentes líquidos e emissões gasosas

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

durante o processo também reforça a necessidade de estratégias mais sustentáveis de síntese e controle ambiental.

Portanto, apesar do elevado potencial dos resíduos têxteis como precursores carbonáceos, a consolidação dessa rota depende do desenvolvimento de processos mais sustentáveis e economicamente viáveis. Nesse contexto, futuras pesquisas devem priorizar estudos em escala piloto, avaliação ambiental integrada e aplicação em sistemas reais de tratamento de efluentes, visando ampliar a viabilidade industrial desses materiais adsorventes.

Agradecimentos

Gratulações à Universidade Estadual de Maringá (UEM) e ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) pelo suporte financeiro concedido por meio da bolsa de iniciação científica, bem como pelo apoio institucional para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ALI, A.; KHAN, M. Z. Textile Microplastics in Wastewater: A Critical Review of Removal and Carbonization Technologies. **Carbon Materials and Carbon Allotropes**, v. 12, nº 01, 2026. DOI: <https://doi.org/10.3390/c12010024>.

AKKOUICHE, F.; BOUDRAHEM, F.; YAHIAOUI, I.; VIAL, C.; AUDONNET, F.; AISSANI-BENISSAD, F. Cotton textile waste valorization for removal of tetracycline and paracetamol alone and in mixtures from aqueous solutions: Effects of H₃PO₄ as an oxidizing agent. **Water Environment Research**, v. 93, p. 464-478, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/wer.1449>.

BEALL, A. **Why clothes are so hard to recycle**. BBC news, 12 jul. 2020. Disponível em: <https://www.bbc.com/future/article/20200710-why-clothes-are-so-hard-to-recycle>. Acesso em: 06 mai. 2026.

BOUDRAHEM, N.; DELPEUX-OULDRIANE, S.; KHENNICHE, L.; BOUDRAHEM, F.; AISSANI-BENISSAD, F.; GINEYS, M. Single and mixture adsorption of clofibric acid, tetracycline and paracetamol onto Activated carbon developed from cotton cloth residue. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 111, p. 544-559, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.08.025>.

BROUKOS, P.; FRAGKOGIOS, A.; FRAGKIADAKIS, M.; SHAH, N. Application of benders decomposition for the solution of non-linear waste water treatment network design problem. **Sustainable Futures**, v.11, nº 101811, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sfr.2026.101811>.

CHEN, Y.; ZHU, Y.; WANG, Z.; LI, Y.; WANG, L.; DING, L.; GAO, X.; MA, Y.; GUO, Y. Application studies of activated carbon derived from rice husks produced by chemical-thermal process

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

- a review. **Advances in Colloid and Interface Science**, v.163, nº01, p. 39-52, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2011.01.006>.

CHEN, W.; HE, F.; ZHANG, S.; XV, H.; XV, Z. Development of porosity and surface chemistry of textile waste jute-based activated carbon by physical activation. **Environmental Science and Pollution Research**, v.25, p. 9840-9848, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1335-5>.

CHEN, W.; ZHANG, Y.; ZHANG, S.; LU, W.; Xu, H. Pyrolysis Behavior and Pore-Forming Mechanism During Reuse of Textile Waste Flax by Activation. **Waste and Biomass Valorization**, v.11, p. 4259-4268, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00770-2>.

CRINI, G.; LICHTFOUSE, E. Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. **Environmental Chemistry Letters**, v.17, p. 145-155, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0785-9>.

DOMBROWSKI, R. J.; LASTOSKIE, C. M.; HYDUKE, D. R. The Horvath–Kawazoe method revisited. **Colloids and Surfaces A**, v. 187-188, p. 23-39, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(01\)00618-5](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(01)00618-5).

HERIYANTO; GHOSE, A.; HOSSAIN, R.; SAHAJWALLA, V. Novel upcycling of mixed textile waste into valuable activated carbon: A circular economy solution. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 223, nº 108526, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108526>.

ISIKGOR, F. H.; BECER, C. R. Lignocellulosic biomass: a sustainable platform for the production of bio-based chemicals and polymers. **Polymer Chemistry**, v. 6, nº 25, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1039/C5PY00263J>.

ISMAIL, M. I.; REEM, M. E.; ABDEL-AZIZ, A. B.; ALREFAEY, K. A.; FAHIM, I. S. Removal of hexavalent chromium in wastewater using fava bean-based activated carbon with bimetallic Fe⁰-Cu. **Discover Chemistry**, v. 02, nº192, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44371-025-00267-z>.

JABER, L.; BACKER, S. N.; LAOUI, T.; ABUMADI, F.; KOUJAN, M. M. S.; KHALIL, K. A.; SHANABLEH, A.; ATIEH, M. A. Recent trends in surface impregnation techniques on activated carbon for efficient pollutant removal from wastewater. **Desalination and Water Treatment**, v. 319, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100562>.

JIA, Y. F.; XIAO, B.; THOMAS, K. M. Adsorption of metal ions on nitrogen surface functional groups in activated carbons. **Langmuir**, v. 18, nº 02, p. 470-478. DOI: <https://doi.org/10.1021/la011161z>.

JUANGA-LABAYEN, J.P.; LABAYEN, I.V.; YUAN, Q. A Review on textile recycling practices and challenges. **Textiles**, v.02, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/textiles2010010>.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

LEE, H. S.; JUNG, S.; LIN, K. A.; KWON, E. E.; LEE, J. Upcycling textile waste using pyrolysis process. **Science of The Total Environment**, v. 859, nº 160393, 2023. DOI: [https://doi-org.ez79.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.scitotenv.2022.160393](https://doi.org.ez79.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.scitotenv.2022.160393).

NAHIL, M.A.; WILLIAMS, P.T. Surface chemistry and porosity of nitrogen-containing activated carbons produced from acrylic textile waste. **Chemical Engineering Journal**, v.184, p. 228-237. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.01.047>.

NEME, I.; GONFA, G.; MASI, C. Activated carbon from biomass precursors using phosphoric acid: A review. **Heliyon**, v. 08, nº 12, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11940>.

MISHRA, P.K.; Izrayeel, A. M. D.; Mahur, B. K.; Ahuja, A.; Rastogi, V. K. A comprehensive review on textile waste valorization techniques and their applications. **Environmental Science and Pollution Research**, v.29, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22222-6>.

SHIRVANIMOOGHADDAM, K.; Motamed, B.; Ramakrishna, S.; Naebe, M. Death by waste: fashion and textile circular economy case. **Science of The Total Environment**, v.718, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137317>.

SILVA, T. L.; CAZETTA, A. L.; SOUZA, P. S. C.; ZHANG, T.; ASEFA, T.; ALMEIDA, V. C. Mesoporous activated carbon fibers synthesized from denim fabric waste: Efficient adsorbents for removal of textile dye from aqueous solutions. **Journal of Cleaner Production**, v. 171, p. 482-490, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.034>.

THOMMES, M.; KANEKO, K.; NEIMARK, A. V.; OLIVIER, J. P.; RODRIGUEZ-REINOSO, F.; ROUQUEROL, J.; SING, K. S. W. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, v. 87, p. 1051-1069, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117>.

XU, Z.; ZHANG, D.; YUAN, Z.; CHEN, W.; ZHANG, T.; TIAN, D.; DENG, H. Physicochemical and adsorptive characteristics of activated carbons from waste polyester textiles utilizing MgO template method. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, p. 22602-22612, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9939-8>.

YU, X.; WANG, S.; GAO, Y.; BAO, Z. Orthogonal design-guided preparation of multi-level porous-activated carbon by pyrolysis of waste polyester textiles. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, p. 30567-30574, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3002-2>.

ZHANG, Y.; ZHAO, X.; CHEN, S. Catalytic Effects of Different Metal Salts on Cotton Waste Textiles by Pyrolysis: Pyrolysis Behavior and Properties of Activated Carbon. **Textiles**, v. 05, nº 01, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/textiles5010004>.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br