



VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS TÊXTEIS: TRANSFORMAÇÃO DE CALÇA JEANS EM CARVÃO ATIVADO COM ANALISE FÍSICO-QUÍMICA

VALORIZATION OF TEXTILE WASTE: TRANSFORMATION OF JEANS INTO
ACTIVATED CARBON WITH PHYSICOCHMICAL ANALYSIS

VALORIZACIÓN DE RESIDUOS TEXTILES: TRANSFORMACIÓN DE JEANS EN
CARBÓN ACTIVADO CON ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO



10.56238/sevenVIIImulti2026-107

Diego Massayuki Yamassaki Sussuki

Instituição: Universidade Tecnológica Federal do Paraná
E-mail: sussukimassayuki48@gmail.com

Gylles Ricardo Ströher

Instituição: Universidade Tecnológica Federal do Paraná
E-mail: gyllesrs@gmail.com

Gisely Luzia Ströher

Instituição: Universidade Tecnológica Federal do Paraná
E-mail: gisely@utfpr.edu.br

RESUMO

Considerando os impactos ambientais associados à elevada geração de resíduos têxteis e à necessidade de alternativas sustentáveis para o tratamento de efluentes industriais, especialmente no setor têxtil, torna-se relevante a valorização desses resíduos por meio de rotas tecnológicas ambientalmente adequadas. Objetiva-se, neste trabalho, avaliar a viabilidade da conversão de resíduos de tecido de calça jeans em carvão ativado, bem como analisar sua eficiência adsorptiva em comparação a um carvão ativado comercial. Para tanto, procede-se à produção do carvão ativado de calça jeans por carbonização em mufla, seguida de caracterizações fisico-químicas quanto ao teor de umidade, teor de cinzas e rendimento gravimétrico. A capacidade de adsorção foi avaliada por meio das isotermas de Langmuir e Freundlich, utilizando ácido oxálico como adsorbato modelo, além de ensaios de remoção de permanganato de potássio monitorados por espectroscopia UV-Vis. Desse modo, observa-se que o carvão ativado obtido a partir de calça jeans apresentou comportamento adsorptivo favorável, com valores de R_1 entre 0 e 1 e parâmetros de Freundlich indicativos de adsorção eficiente, além de área superficial superior à do carvão ativado comercial. Adicionalmente, o material apresentou baixos teores de cinzas e elevada eficiência na remoção do contaminante, superando o desempenho do adsorvente comercial em determinadas condições experimentais. O que permite concluir que a transformação de resíduos de calça jeans em carvão ativado configura-se como uma alternativa tecnicamente viável, ambientalmente sustentável e economicamente promissora, contribuindo para a valorização de resíduos têxteis e para o desenvolvimento de processos alinhados aos princípios da economia circular.

Palavras-chave: Carvão Ativado. Calça Jeans. Adsorção. Isoterma de Langmuir e Freundlich.

ABSTRACT

Considering the environmental impacts associated with the high generation of textile waste and the need for sustainable alternatives for the treatment of industrial effluents, especially in the textile sector, the valorization of these wastes through environmentally appropriate technological routes becomes relevant. This work aims to evaluate the feasibility of converting denim fabric waste into activated carbon, as well as to analyze its adsorptive efficiency compared to commercial activated carbon. To this end, activated carbon from denim was produced by carbonization in a muffle furnace, followed by physicochemical characterizations regarding moisture content, ash content, and gravimetric yield. The adsorption capacity was evaluated using the Langmuir and Freundlich isotherms, using oxalic acid as a model adsorbate, in addition to potassium permanganate removal tests monitored by UV-Vis spectroscopy. Thus, it is observed that the activated carbon obtained from jeans exhibited favorable adsorptive behavior, with R_l values between 0 and 1 and Freundlich parameters indicative of efficient adsorption, in addition to a surface area superior to that of commercial activated carbon. Furthermore, the material presented low ash content and high efficiency in contaminant removal, surpassing the performance of the commercial adsorbent under certain experimental conditions. This allows us to conclude that the transformation of jeans waste into activated carbon is a technically viable, environmentally sustainable, and economically promising alternative, contributing to the valorization of textile waste and the development of processes aligned with the principles of the circular economy.

Keywords: Activated Carbon. Jeans. Adsorption. Langmuir and Freundlich Isotherms.

RESUMO

Considerando los impactos ambientales asociados a la alta generación de residuos textiles y la necesidad de alternativas sostenibles para el tratamiento de efluentes industriales, especialmente en el sector textil, la valorización de estos residuos mediante rutas tecnológicas ambientalmente apropiadas cobra relevancia. Este trabajo busca evaluar la viabilidad de convertir residuos de tela vaquera en carbón activado, así como analizar su eficiencia de adsorción en comparación con el carbón activado comercial. Para ello, se produjo carbón activado a partir de tela vaquera mediante carbonización en un horno de mufla, seguido de caracterizaciones fisicoquímicas respecto al contenido de humedad, el contenido de cenizas y el rendimiento gravimétrico. La capacidad de adsorción se evaluó mediante las isotermas de Langmuir y Freundlich, utilizando ácido oxálico como adsorbato modelo, además de pruebas de eliminación de permanganato de potasio monitoreadas mediante espectroscopía UV-Vis. Así, se observa que el carbón activado obtenido a partir de tela vaquera presentó un comportamiento de adsorción favorable, con valores de R_l entre 0 y 1 y parámetros de Freundlich indicativos de una adsorción eficiente, además de un área superficial superior a la del carbón activado comercial. Además, el material presentó un bajo contenido de cenizas y una alta eficiencia en la eliminación de contaminantes, superando el rendimiento del adsorbente comercial en ciertas condiciones experimentales. Esto nos permite concluir que la transformación de residuos vaqueros en carbón activado es una alternativa técnicamente viable, ambientalmente sostenible y económicamente prometedora, que contribuye a la valorización de residuos textiles y al desarrollo de procesos alineados con los principios de la economía circular.

Palabras clave: Carbón Activado. Vaqueros. Adsorción. Isotermas de Langmuir y Freundlich.

1 INTRODUÇÃO

A necessidade do uso de vestimentas acompanha a humanidade desde os períodos mais remotos da história. Inicialmente, as roupas tinham como principal função a proteção do corpo, sendo confeccionadas a partir de materiais naturais, como folhas e peles de animais. Com o desenvolvimento das sociedades humanas ao longo do tempo, o vestuário deixou de atender exclusivamente a uma necessidade funcional, passando a assumir significados mais amplos. Nesse contexto, a roupa passou a representar um importante elemento de diferenciação social, expressão de identidade cultural e meio de comunicação simbólica, refletindo valores, crenças e estruturas sociais de diferentes épocas e grupos (Menezes *et al.*, 2024).

No século XIX, com o avanço das sociedades e o desenvolvimento tecnológico, consolidou-se o conceito de moda conforme compreendido na contemporaneidade. Nesse período, observou-se a transição de uma produção predominantemente artesanal para um modelo de produção em larga escala, voltado ao atendimento das demandas de um número crescente de consumidores (Menezes *et al.*, 2024).

A expansão da produção em larga escala para atender aos mercados interno e externo ocorreu em função da necessidade humana de vestuário, bem como do uso diversificado de materiais têxteis em diferentes aplicações, tais como decoração, setor militar, área hospitalar, entre outras. Dessa forma, a indústria têxtil assume relevância nas dimensões social, cultural, econômica e política, exercendo influência significativa sobre os modos de vida em diferentes contextos históricos (Fujita *et al.*, 2015).

Em 2022, o Brasil destacou-se como a quinta maior indústria têxtil do mundo e a quarta maior no segmento de vestuário. A produção anual atingiu aproximadamente 1,3 milhões de toneladas de produtos têxteis e 6,71 milhões de toneladas no setor de vestuário. Além disso, o país apresenta potencial para se consolidar como exportador global de fibras sintéticas (Cavalcanti *et al.*, 2022).

O setor têxtil e de confecção configura-se como o segundo maior empregador da indústria de transformação, ficando atrás apenas da indústria de alimentos e bebidas. O segmento emprega aproximadamente 1,5 milhão de trabalhadores diretos e cerca de 8 milhões de trabalhadores indiretos, além de apresentar um faturamento estimado em 257 bilhões de reais (Sobral *et al.*, 2025). Esses indicadores evidenciam sua expressiva relevância para a economia nacional, especialmente em função do caráter intensivo em mão de obra e da significativa geração de emprego e renda (Cavalcanti *et al.*, 2022).

Contudo, a produção têxtil em larga escala tem provocado significativos impactos ambientais, sendo responsável por cerca de 10% da poluição global, o que coloca o setor como o segundo mais poluente entre as atividades industriais. Esses impactos estão associados, principalmente, ao elevado consumo de água, estimado em aproximadamente 1,5 trilhões de litros por ano, e à geração de grandes volumes de efluentes líquidos e resíduos sólidos, que ultrapassam 92 milhões de toneladas anuais

(Carvalho, 2024). Além disso, a indústria têxtil emite mais de 1,7 milhões de toneladas de CO₂ por ano, contribuindo de forma expressiva para a poluição atmosférica. Tais efeitos ambientais ocorrem ao longo de toda a cadeia produtiva, desde a produção da matéria-prima, como no cultivo intensivo do algodão, até os processos químicos empregados no tingimento e acabamento dos produtos têxteis, nos quais o uso excessivo de produtos químicos responde por cerca de 20% da poluição das águas, agravando a contaminação do solo, do ar e dos recursos hídricos (Morita, 2013).

Esses impactos ambientais negativos comprometem a qualidade do meio ambiente e a saúde humana, estando associados a fenômenos como as mudanças climáticas, o aumento da incidência de determinados tipos de câncer e a redução da camada de ozônio (Morita, 2013).

Além disso, os tecidos apresentam variações significativas em seu tempo de decomposição. Os tecidos naturais tendem a possuir um período de degradação relativamente curto, variando entre 10 e 20 anos (Cunha et al., 2023). Em contrapartida, os tecidos sintéticos podem levar mais de 200 anos para se decompor no meio ambiente (Gomes & Gomes, 2019).

Dessa forma, a valorização de resíduos têxteis por meio de sua conversão em produtos de maior valor agregado, como o carvão ativado, apresenta-se como uma alternativa viável e sustentável para o tratamento de efluentes da própria indústria têxtil. Considerando a necessidade de empregar métodos específicos para a remoção de agentes colorantes, de modo a atender aos limites estabelecidos pela legislação ambiental vigente, o processo de adsorção destaca-se como uma rota eficiente, amplamente explorada tanto pelo seu apelo ambiental quanto econômico (Costa, 2020).

Nesse contexto, o carvão ativado tem sido o material adsorvente mais utilizado, em virtude de sua elevada capacidade de adsorção e alta eficiência na remoção de moléculas orgânicas responsáveis pela coloração dos efluentes, além de seu potencial no tratamento de águas contaminadas. Ademais, a busca pelo aproveitamento de resíduos como fontes de carbono para a produção de carvão ativado tem ganhado destaque na comunidade científica, reforçando a importância dessa abordagem como estratégia sustentável para a mitigação dos impactos ambientais do setor têxtil (Costa, 2020).

Assim, essa estratégia contribui simultaneamente para a mitigação dos impactos ambientais e para a maximização dos benefícios econômicos, promovendo uma abordagem mais sustentável para o setor industrial (Costa, 2020).

Dessa forma, a transformação de resíduos de calça jeans em carvão ativado apresenta potencial viabilidade econômica, considerando que o jeans é um tecido bastante consumido mundialmente. Em 2010, a produção global tenha alcançado aproximadamente 32 milhões de peças de jeans, o que corresponde a cerca de 295 mil toneladas de tecido. Nesse contexto, o Brasil destaca-se como o terceiro maior consumidor e o segundo maior produtor mundial de tecido jeans, reforçando a relevância da proposta sob as perspectivas ambiental e econômica, ao aliar o reaproveitamento de resíduos à geração de produtos de valor agregado (Morita, 2013).

Entre os modelos de isoterma propostos para descrever os dados experimentais de adsorção líquido-sólido, expressos pela relação entre a quantidade adsorvida no equilíbrio (Q_e) e a concentração de equilíbrio do adsorbato (C_e), destacam-se os modelos de Langmuir e Freundlich (Sussuki, 2024).

A adsorção é um processo físico-químico no qual componentes de uma fase gasosa ou líquida são transferidos e retidos na superfície de um material sólido, geralmente sob condições de temperatura constante. As isotermas de adsorção correspondem a modelos matemáticos que descrevem o equilíbrio de distribuição de um soluto entre as fases líquida e sólida, permitindo a determinação da quantidade de soluto adsorvida pelo material adsorvente (Sussuki, 2024).

A relação entre a quantidade máxima de soluto adsorvida (Q_{max}) e a concentração de equilíbrio (C_e) permite a classificação do comportamento do processo de adsorção em diferentes regimes, tais como favorável, extremamente favorável, não favorável, linear e irreversível. Essa avaliação é fundamental para a compreensão da eficiência do adsorvente e das características do mecanismo de adsorção em distintos sistemas (Sussuki, 2024).

A equação de Langmuir é a primeira a ser utilizada para determinar a adsorção de gases pelo sólido, em que são baseados em três principais suposições fundamentais. Sendo ele primeiro que a superfície de adsorção tem que ser homogênea, ou seja, a adsorção vai ocorrer de maneira constante sem depender da extensão da cobertura, segundo, a adsorção tem que ocorrer em sítios específicos e por fim a adsorção tem que atingir seu limite quando umas das camadas monomolecular for recoberto totalmente a superfície do adsorvente (Sussuki, 2024).

O modelo de Langmuir, representado na equação 1, foi um dos primeiros a descrever o fenômeno de adsorção de gases em superfícies sólidas, fundamentando-se em premissas teóricas específicas. O modelo assume que a superfície do adsorvente apresenta características homogêneas, de modo que a energia de adsorção seja uniforme e independente do grau de cobertura. Além disso, considera que o processo ocorre em sítios bem definidos e que a adsorção é limitada à formação de uma única camada molecular, atingindo um valor máximo quando todos os sítios disponíveis da superfície são ocupados (Sussuki, 2024).

$$Q_e = \frac{Qm \cdot Kl \cdot Ce}{1 + Qm \cdot Ce} \quad (1)$$

Nessa equação, Qm representa a capacidade máxima de adsorção relacionada à formação de uma monocamada ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$), Q_e corresponde à quantidade de soluto adsorvida por unidade de massa do adsorvente ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$), Kl é a constante de Langmuir associada à afinidade e à energia do processo de adsorção ($\text{L} \cdot \text{mg}^{-1}$) e C_e refere-se à concentração do soluto em equilíbrio na fase líquida ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) (Sussuki, 2024). Neste trabalho, os experimentos foram conduzidos utilizando a forma linearizada da

equação de Langmuir, representado na equação 2, com o objetivo de determinar os valores de Qm e Kl.

$$\frac{Ce}{Qe} = \frac{1}{Qm \cdot Kl} + \frac{1}{Kl} Ce \quad (2)$$

A partir da Equação 2, pode-se construir o gráfico de $\frac{Ce}{Qe}$ em função de Ce, obtendo-se uma relação linear. Nessa representação, o intercepto da reta corresponde a $\frac{1}{Qm \cdot Kl}$, enquanto o coeficiente angular é igual a $\frac{1}{Kl}$ (Sussuki, 2024).

Na isoterma de Langmuir, utiliza-se o parâmetro de equilíbrio Rl para avaliar a forma da isoterma de adsorção, permitindo indicar se o processo de adsorção é favorável ou não. Esse parâmetro pode ser determinado por meio da Equação 3 (Sussuki, 2024).

$$Rl = \frac{1}{1 + Qm \cdot Kl} \quad (3)$$

O parâmetro Rl permite classificar o comportamento da adsorção: valores de $Rl > 1$ indicam adsorção desfavorável; $Rl = 1$ caracterizam uma adsorção linear; valores entre $0 < Rl < 1$ correspondem a uma adsorção favorável; e $Rl = 0$ indicam um processo de adsorção irreversível (Sussuki, 2024).

Contudo, o ajuste dos dados experimentais de adsorção por meio da isoterma de Langmuir não fornece informações detalhadas sobre o mecanismo químico do processo, uma vez que se trata essencialmente de um procedimento de ajuste de curva. Dessa forma, os parâmetros obtidos são válidos apenas quando o sistema experimental atende às suposições estabelecidas pelo modelo. Ainda assim, apesar dessas limitações, a equação de Langmuir é amplamente utilizada como uma ferramenta para estimar a capacidade de adsorção de diversos solutos, em razão de sua simplicidade e aplicabilidade prática (Sussuki, 2024).

A equação de Freundlich, representado na equação 4, foi desenvolvida considerando uma distribuição logarítmica dos sítios ativos de adsorção à medida que a superfície do adsorvente é progressivamente recoberta pelo soluto, distinguindo-se, assim, do modelo de Langmuir, que assume uma superfície homogênea (Sussuki, 2024).

$$Qe = Kf \cdot Ce^{\frac{1}{n}} \quad (4)$$

Na equação 4, Ce representa a concentração do soluto em equilíbrio na fase líquida, Qe corresponde à quantidade de soluto adsorvida por unidade de massa do adsorvente, Kf é a constante

de Freundlich associada à capacidade de adsorção, e n é um parâmetro empírico relacionado à intensidade do processo de adsorção (Sussuki, 2024).

A isoterma de Freundlich é considerada válida quando não há interações significativas entre as moléculas do adsorbato. Nesse modelo, a diminuição da energia de adsorção com o aumento da cobertura da superfície pelo soluto é atribuída à heterogeneidade da superfície do adsorvente. A equação de Freundlich também pode ser expressa em sua forma linear, conforme apresentado na Equação 5 (Sussuki, 2024).

$$\ln(Qe) = \ln(Kf) + \frac{1}{n} \ln(Ce) \quad (5)$$

A partir do gráfico de $\ln(Qe)$ em função de $\ln(Ce)$, obtém-se uma relação linear, cujo intercepto corresponde a $\ln(Kf)$ e cujo coeficiente angular é igual a $\frac{1}{n}$. Valores do parâmetro n compreendidos entre 1 e 10 indicam um processo de adsorção favorável (Sussuki, 2024).

A análise do teor de cinzas constitui um importante indicador da qualidade do carvão ativado. De modo geral, carvões ativados comerciais apresentam aproximadamente 15% de cinzas. Valores reduzidos desse parâmetro são considerados desejáveis, uma vez que a menor presença de material inorgânico diminui o caráter hidrofílico do adsorvente, evitando a retenção excessiva de água e favorecendo a adsorção de outros compostos (Sussuki, 2025).

Para o cálculo do teor de umidade, utilizou-se a Equação 6, na qual U representa a umidade, N_m corresponde à massa perdida após o processo de secagem e P refere-se à massa inicial da amostra (Ferreira e Finzer, 2017).

$$U = \frac{100 \cdot N_m}{P} \quad (6)$$

Para o cálculo do teor de cinzas, utilizou-se a Equação 7, na qual C representa o teor de cinzas, N corresponde à massa residual após o processo de calcinação e P refere-se à massa inicial da amostra (Ferreira e Finzer, 2017).

$$C = \frac{100 \cdot N}{P} \quad (7)$$

O rendimento gravimétrico do carvão foi determinado por meio da Equação 8, na qual R_c representa o rendimento gravimétrico, P_c corresponde à massa do carvão seco obtido e P_j refere-se à massa do tecido de calça jeans utilizado como matéria-prima (Vieira et al., 2013).

$$R_c = \frac{100 \cdot P_c}{P_j} \quad (8)$$

2 OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo propor uma alternativa sustentável para o reaproveitamento de resíduos têxteis de tecido de calça jeans, por meio de sua conversão em carvão ativado. O material obtido foi caracterizado quanto ao teor de umidade, teor de cinzas e o rendimento na produção, bem como avaliado quanto à sua eficiência adsorvente por meio da determinação das isotermas de adsorção de Langmuir e Freundlich. A capacidade de adsorção do carvão ativado produzido foi comparada à de um carvão ativado comercial, utilizando-se o permanganato de potássio ($KMnO_4$) como contaminante modelo, possibilitando a análise e a comparação do desempenho adsorvente de ambos os materiais.

3 METODOLOGIA

O tecido de calça jeans utilizado neste estudo foi coletado no município de Apucarana, Estado do Paraná, Brasil, região reconhecida pela intensa atividade no setor têxtil. Após a coleta, o material foi preparado por meio do corte em fragmentos menores e acondicionado em recipientes metálicos com capacidade de 330 mL, assegurando condições adequadas de manipulação e transporte até a etapa de processamento.

A conversão do tecido em carvão ativado de calça jeans (CCJ) foi realizada em mufla *Jung, LF0212*. O processo foi conduzido a uma temperatura constante de 550 °C durante 5 horas, promovendo a decomposição térmica da matéria orgânica e resultando na formação de uma matriz carbonosa com propriedades adequadas para aplicação como adsorvente (Sussuki, 2024).

Após a carbonização, o material foi triturado cuidadosamente para padronização da granulometria e, em seguida, armazenado em frascos herméticos, com o objetivo de evitar a exposição à umidade e a possíveis contaminantes (Sussuki, 2024).

Para avaliação da eficiência do CCJ, foram realizados experimentos comparativos utilizando como referência um carvão ativado comercial (CC). Ambos os adsorventes foram submetidos a pré-tratamento de secagem em estufa *New Lab, AR NL 82-150*, operando a 105 °C por 5 horas. Essa etapa foi essencial para a remoção da umidade residual e de impurezas superficiais, garantindo maior confiabilidade aos resultados obtidos (Sussuki, 2025).

Na avaliação das isotermas de Langmuir e Freundlich, após o processo de remoção da umidade, foram adicionados 0,5 g de carvão em diferentes erlenmeyers de 125 mL. Em seguida, volumes distintos de solução padrão de ácido oxálico a 0,3 mol·L⁻¹ foram adicionados conforme descrito na Tabela 1, completando-se o volume total de cada sistema para 100 mL com água ultrapura.

Tabela 1 – Volume de solução padrão de ácido oxálico.

Ensaio	Volume (ml) de ácido oxálico	Volume (ml) de água ultrapura
1	100,00	0,00
2	90,00	10,00
3	80,00	20,00
4	70,00	30,00
5	60,00	40,00
6	50,00	50,00
7	40,00	60,00
8	20,00	80,00
9	10,00	90,00
10	5,00	95,00
11	2,00	98,00
12	1,00	99,00

Fonte: Autoria própria (2026)

Os ensaios foram submetidos à agitação orbital por 4 horas, a 50 rpm, em incubadora com agitação orbital Cienlab, modelo CE 725, e, posteriormente, mantidos em repouso por 18 horas para o estabelecimento do equilíbrio. Em seguida, as amostras foram filtradas, descartando-se os primeiros 5 mL do filtrado. Alíquotas de 10,00 mL foram então tituladas com solução de hidróxido de sódio a 0,2 mol·L⁻¹, utilizando solução indicadora de fenolftaleína alcoólica a 1% (Sussuki, 2025).

Para a determinação dos teores de cinzas e umidade do carvão obtido a partir de calça jeans (CCJ), os cadiinhos foram inicialmente calcinados em mufla Jung, modelo LF0212, a 550 °C por um período de 2 horas, com o objetivo de eliminar possíveis impurezas. Em seguida, os cadiinhos foram resfriados à temperatura ambiente e pesados. Posteriormente, adicionou-se 0,5 g de CCJ a cada cadiinho, os quais foram levados à estufa Nem Lab, modelo AR NL 82-150, a 105 °C por 4 horas. A pesagem após a secagem permitiu a determinação da massa do carvão seco, possibilitando o cálculo do teor de umidade e dos compostos voláteis presentes nas amostras. Para a determinação do teor de cinzas, as amostras previamente secas foram novamente submetidas à calcinação em mufla a 550 °C por um período adicional de 4 horas. Após esse procedimento, a massa residual, correspondente às cinzas, foi pesada, possibilitando o cálculo da porcentagem de cinzas em cada amostra (Sussuki, 2025).

Por fim, a eficiência de adsorção do carvão ativado obtido a partir de calça jeans foi avaliada em comparação com o carvão ativado comercial, utilizando o permanganato de potássio como contaminante modelo. Os ensaios de adsorção foram conduzidos com diferentes massas de adsorvente, variando entre 15 mg e 250 mg, previamente pesadas em balança analítica e acondicionadas em tubos Falcon estéreis de 25 mL. No total, foram preparadas dez amostras, sendo cinco contendo carvão ativado de calça jeans (CCJ) e cinco contendo carvão ativado comercial (CC), conforme descrito na Tabela 2. Essa metodologia permitiu a comparação direta entre os dois materiais, fornecendo subsídios para avaliar o desempenho do CCJ como uma alternativa sustentável ao carvão ativado convencional.

Tabela 2 - Massa das Amostras de CCJ e CC.

Massa do carvão ativado (mg)	Amostra do carvão ativado de calça jeans	Amostra do carvão ativado comercial
250,00	1a	1b
125,00	2a	2b
62,50	3a	3b
31,25	4a	4b
15,63	5a	5b

Fonte: Autoria própria (2026).

Cada tubo Falcon contendo as amostras de carvão ativado recebeu 15 mL de solução aquosa de permanganato de potássio ($KMnO_4$), preparada com concentração de $0,0004\text{ mol}\cdot L^{-1}$. Após a adição da solução os sistemas foram agitados manualmente e mantidos em repouso estático por um período de 72 horas, de forma a garantir o equilíbrio do processo de adsorção entre o soluto e os diferentes adsorventes (CCJ e CC).

Finalizado o tempo de contato, procedeu-se à separação das fases por meio de centrifugação. As amostras foram processadas em centrífuga *HCL-4*, durante 20 minutos, operando a uma rotação de 3900 rpm. Esse procedimento teve como finalidade a decantação e a adequada separação das partículas sólidas do carvão ativado em relação à fase líquida sobrenadante, possibilitando análises posteriores sem interferências provenientes de material particulado.

Em seguida, as soluções sobrenadantes foram submetidas à análise espectrofotométrica em equipamento de espectroscopia UV-Vis, *Agilent Technologies, Cary 60* (Andrade, 2014). As medidas foram realizadas em cubeta de vidro de 1,00 cm em 525 nm para avaliação da eficiência de adsorção dos diferentes carvões ativados (Silva, 2012).

Para uma análise mais precisa do desempenho dos materiais adsorventes, a eficiência de remoção do permanganato de potássio ($KMnO_4$) foi determinada a partir dos valores de absorbância máxima, obtidos por espectroscopia UV-Vis, no comprimento de onda de 525 nm, utilizando a equação (9).

$$R (\%) = 100 - \frac{100 \cdot A_0}{A_f} \quad (9)$$

Em que R representa o rendimento em porcentagem, A_0 corresponde à absorbância da mistura inicial de água com $KMnO_4$ antes da adição do carvão, e A_f à absorbância da mistura após o processo de adsorção.

4 DESENVOLVIMENTO

Com base nos dados obtidos por meio da titulação das amostras, a Tabela 3 apresenta a quantidade adsorvida do padrão primário ácido oxálico, expressa em milimoles por grama de carvão, para o carvão comercial (CC) e para o carvão produzido a partir da calça jeans (CCJ).

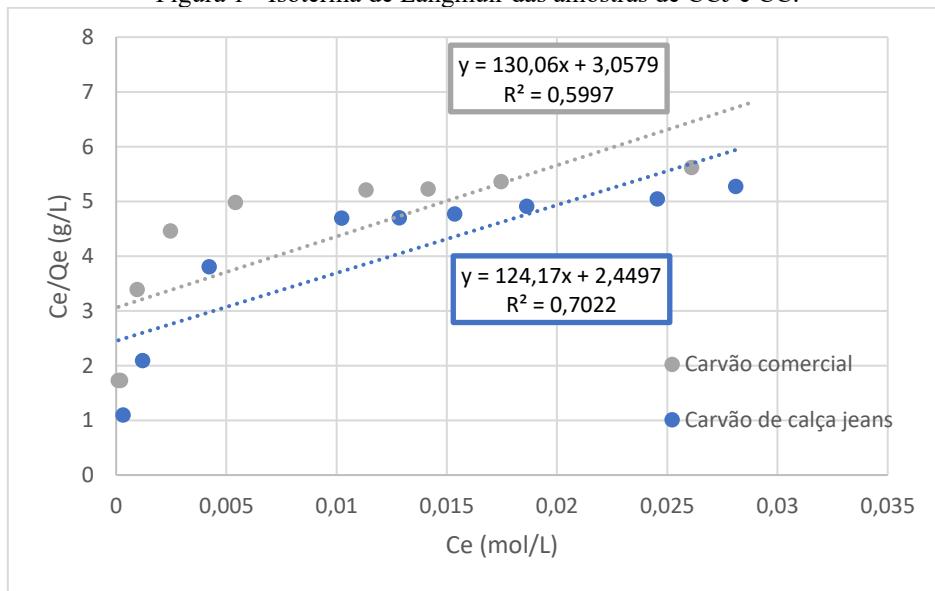
Tabela 3 – Milimol de ácido oxálico adsorvidos por grama de carvão.

Ensaio	Carvão comercial (CC)	Carvão de calça jeans (CCJ)
1	5,44	5,33
2	4,65	4,86
3	4,34	4,01
4	3,81	3,79
5	3,26	3,21
6	2,71	2,73
7	2,18	2,18
8	1,09	1,11
9	0,55	0,57
10	0,28	0,29
11	0,12	0,11
12	0,06	0,06

Fonte: Autoria própria (2026)

Com base nos dados apresentados na Tabela 3, não foi possível identificar diferenças significativas na eficiência adsorptiva entre os materiais avaliados, uma vez que o teste de Tukey, ao nível de 5% de significância, não indicou diferença estatística entre o carvão comercial (CC) e o carvão produzido a partir de jeans (CCJ), evidenciando desempenho semelhante. Diante disso, foram elaboradas as isotermas de Langmuir para ambos os materiais, conforme apresentado na Figura 1, a fim de analisar e comparar o comportamento adsorptivo dos carvões.

Figura 1 - Isoterma de Langmuir das amostras de CCJ e CC.



Fonte: Autoria própria (2025)

A partir da análise da Figura 1, observa-se que o processo de adsorção apresentou comportamento favorável tanto para as amostras de carvão ativado comercial (CC) quanto para o carvão obtido a partir de calça jeans (CCJ). Com base nas Equações 10 e 11, derivadas do modelo de Langmuir, foi possível determinar o parâmetro de equilíbrio R1 e estimar a área superficial do carvão ativado, cujos resultados estão apresentados na Tabela 4.

$$\frac{Ce}{Qe} = 130,06Ce + 3,0579 \quad (10)$$

$$\frac{Ce}{Qe} = 124,17Ce + 2,4497 \quad (11)$$

Tabela 4 – Parâmetro determinados na isoterma de Langmuir.

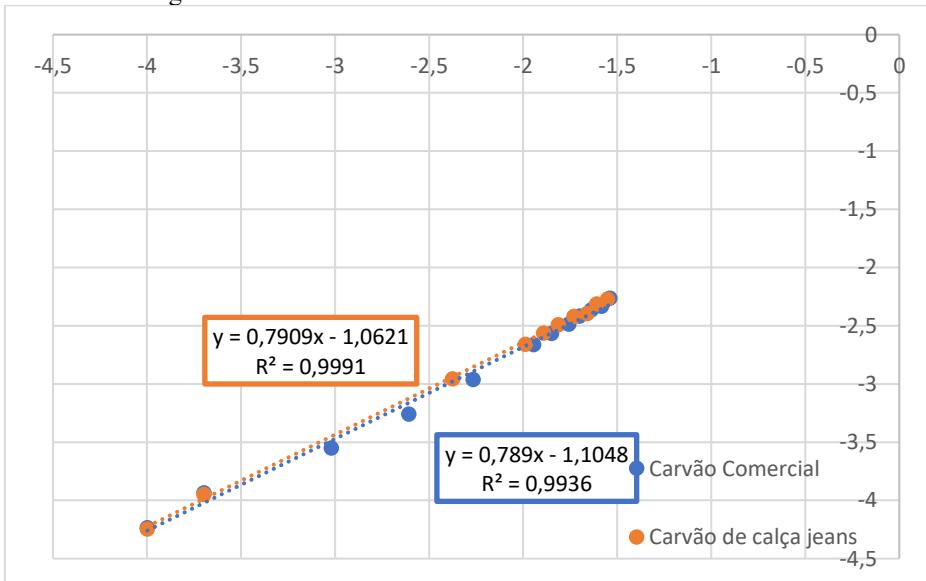
Parâmetro	RI	Área carvão ativado (m ² .g ⁻¹)
CC	0,002401	972,0129
CCJ	0,003288	1018,2843

Fonte: Autoria própria (2025)

Os dados apresentados na Tabela 4 indicam que os valores de RI obtidos para o carvão ativado comercial (CC) e para o carvão ativado de calça jeans (CCJ) situam-se entre 0 e 1, caracterizando um processo de adsorção favorável, de acordo com o modelo de Langmuir. Adicionalmente, a área superficial do carvão ativado de calça jeans apresentou valor superior ao do carvão ativado comercial, evidenciando seu maior potencial adsorvente.

Para uma análise mais aprofundada, também foi determinada a isoterma de Freundlich para o carvão ativado de calça jeans (CCJ) e para o carvão ativado comercial (CC), conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Isoterma de Freundlich das amostras de CCJ e CC



Fonte: Autoria própria (2025)

Com base nos valores de R^2 obtido na figura 2 para CCJ e CC, foi observado que o carvão ativado comercial apresenta um ajuste inferior à curva, quando é comparado com carvão ativado de calça jeans. A partir da equação 12 e 13, obtido pelo modelo de isoterma de Freundlich, foram determinados o valor de n , sendo eles de 1,52 e 1,27 respectivamente, e como os ambos os valores estão entre 1 e 10, isso indica que o processo de adsorção foi favorável em ambos os casos.

Com base nos valores de R^2 obtidos na Figura 2 para o carvão ativado de calça jeans (CCJ) e para o carvão ativado comercial (CC), observou-se que o carvão ativado comercial apresentou um ajuste inferior ao modelo quando comparado ao carvão ativado de calça jeans. A partir das Equações 12 e 13, derivadas do modelo de isoterma de Freundlich, foram determinados os valores do parâmetro n , sendo 1,52 para o CCJ e 1,27 para o CC. Como ambos os valores se situam entre 1 e 10, conclui-se que o processo de adsorção foi favorável em ambos os casos.

$$\ln(Qe) = 0,7909 \ln(Ce) - 1,0621 \quad (12)$$

$$\ln(Qe) = 0,789 \ln(Ce) - 1,1048 \quad (13)$$

Para a análise dos teores de umidade e cinzas, foram determinados os valores de massa da amostra seca e da cinza residual, conforme apresentado na Tabela 5

Tabela 5 - Massa em grama da amostra.

Amostra	Massa do carvão (g)	Massa seca (g)	Massa de cinza (g)
1	0,5012	0,4658	0,0079
2	0,5007	0,4632	0,0086
3	0,5004	0,4621	0,0108

Fonte: Autoria própria (2025)

Na Tabela 6 são apresentados os teores de umidade e de cinzas de cada amostra, os quais foram calculados com base nas Equações 6 e 7.

Tabela 6 - Teor de umidade e de cinza de cada amostra.

Amostra	Teor de umidade (%)	Teor de cinza (%)
1	7,06	1,58
2	7,49	1,72
3	7,65	2,16

Fonte: Autoria própria (2025)

Na Tabela 7 estão apresentados a média e o desvio padrão dos teores de umidade e cinza

Tabela 7. Teores médios de umidade e cinzas, e seus respectivos desvios padrão, do carvão de calça jeans

	Media	Desvio Padrão
Teor de umidade	7,4021	0,2489
Teor de cinza	1,8174	0,2479

Fonte: Autoria própria (2025)

O teor de cinzas obtido apresentou valor reduzido, sendo considerado favorável para a produção de carvão ativado, uma vez que teores inferiores a 15% são desejáveis por contribuírem para a qualidade do material adsorvente (Sussuki, 2025). Utilizando a Equação 8, determinou-se o rendimento gravimétrico do carvão. A Tabela 8 apresenta a massa de carvão obtida a partir da calça

jeans após o processo de carbonização, bem como a massa inicial do tecido de calça jeans utilizado como matéria-prima.

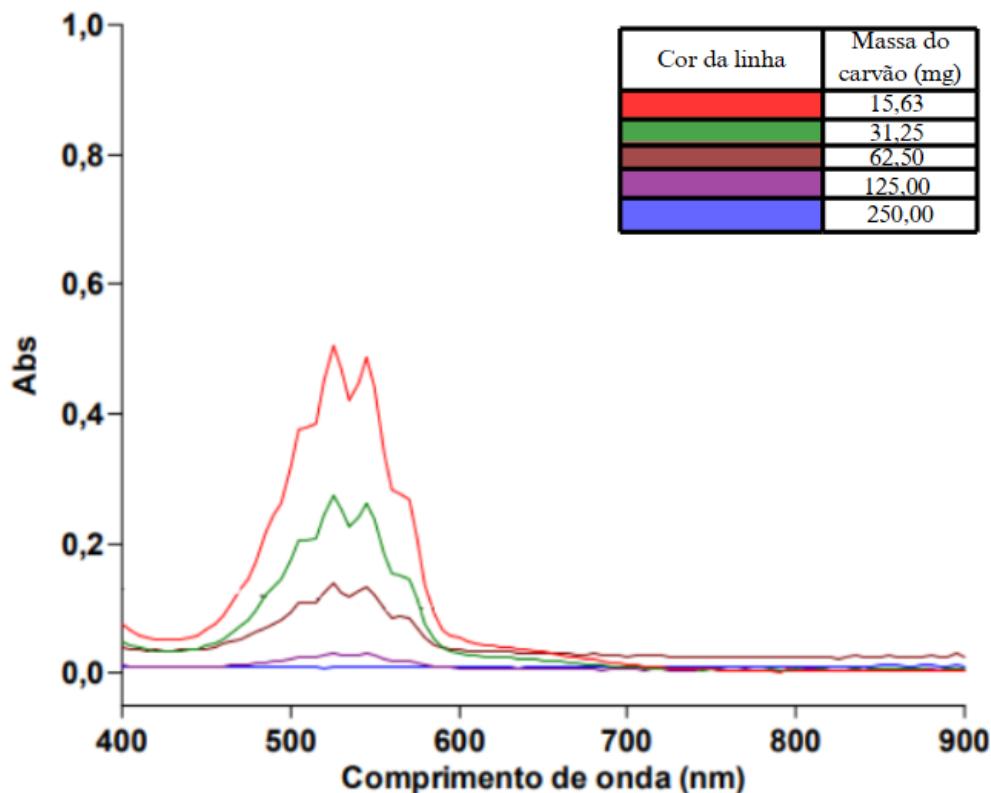
Tabela 8. Rendimento gravimétrico do carvão de calça jeans

Massa inicial do tecido de calça jeans (g)	Massa do carvão de calça jeans (g)	Rendimento gravimétrico (%)
247,9364	50,1564	20,23

Fonte: Autoria própria (2025)

Por fim, para comparar a eficiência do CCJ e CC utilizando permanganato como contaminante, a figura 3, mostra os dados obtidos por espectroscopia UV-Vis construindo um gráfico, a qual é a união dos diferentes espectros obtidos conforme variação de massa de adsorvente (carvão). Cada curva espectral foi representada por uma cor distinta, correspondente às diferentes massas (em mg) de carvão ativado de calça jeans (CCJ).

Figura 3 - Espectros obtidos de permanganato de potássio com CCJ.



Fonte: Autoria própria (2025)

A análise comparativa das curvas espectrais permite visualizar claramente o comportamento da absorbância em função da quantidade de adsorvente utilizada, evidenciando a influência direta da massa de CCJ na remoção do permanganato de potássio presente na solução. Observa-se que, à medida que a massa de carvão ativado aumenta, os valores de absorbância diminuem, refletindo maior

eficiência na adsorção e, consequentemente, na remoção do contaminante em cada condição experimental.

Os resultados de maior rendimento de adsorção estão apresentados na Tabela 9, contemplando tanto o carvão ativado comercial (CC) quanto o produzido a partir de calças jeans (CCJ).

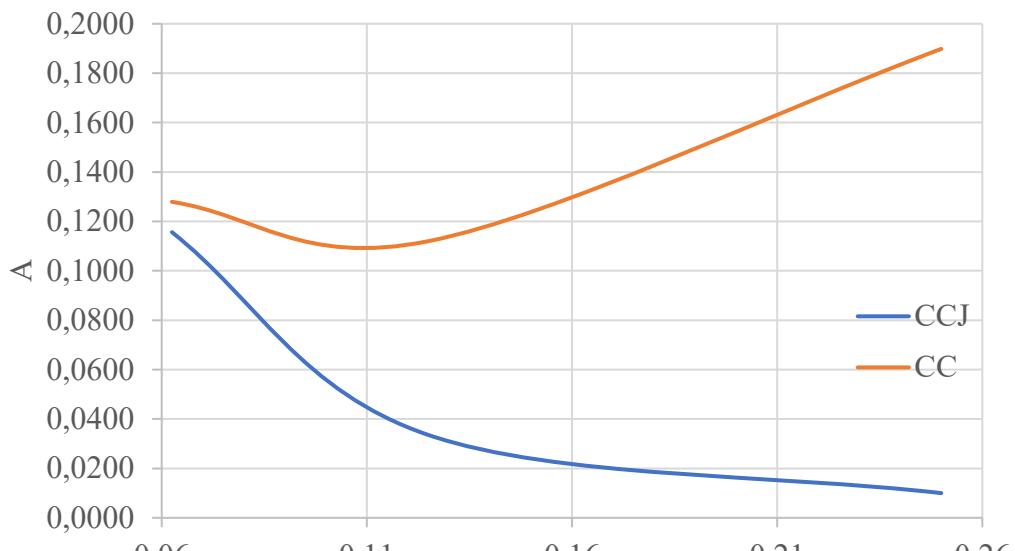
Tabela 9 - Rendimento do CC e CCJ.

Massa do carvão ativado (mg)	Rendimento CCJ (%)	Rendimento CC (%)
250	98,93	79,74
125	96,42	88,05
62,50	87,66	86,35

Fonte: Autoria própria (2025)

Os dados obtidos de forma comparativa (CCJ e CC) podem ser visualizados na Figura 4.

Figura 4. Massas de CCJ e CC em função da absorção na espectroscopia Uv-Vis.

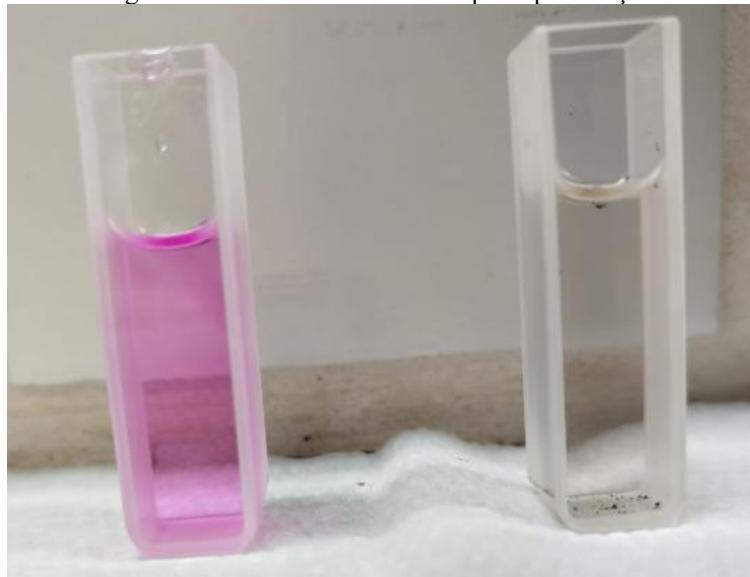


Fonte: Autoria própria (2025)

A Figura 5 ilustra visualmente o processo de remoção do permanganato de potássio (KMnO_4), permitindo observar, de forma comparativa, as diferenças entre a solução inicial (antes do contato com o adsorvente) e a solução após o tratamento.

A análise qualitativa evidencia que uma parcela significativa do contaminante foi removida, confirmando a eficiência do processo de purificação e reforçando os resultados quantitativos obtidos por espectroscopia UV-Vis.

Figura 5. Cubetas com KMnO_4 e após a purificação.



Fonte: Autoria própria (2025)

Dessa forma, observa-se que o CCJ apresentou desempenho superior ao CC, evidenciando que a transformação de resíduos de tecido de calças jeans em carvão ativado configura-se como uma alternativa economicamente viável e ambientalmente estratégica.

Esse processo possibilita a geração de produtos de maior valor agregado a partir de materiais que, de outra forma, seriam descartados, contribuindo tanto para a valorização de resíduos sólidos quanto para a promoção de práticas mais sustentáveis na cadeia produtiva têxtil.

No cenário nacional, o Brasil destaca-se como um dos maiores produtores têxteis do mundo, o que implica elevada disponibilidade de resíduos passíveis de aproveitamento na produção de carvão ativado (Fujita *et al.*, 2015).

Especificamente, este estudo foi desenvolvido no município de Apucarana, Estado do Paraná, reconhecido como um dos principais polos industriais do vestuário e da produção têxtil do Estado.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos demonstram que o carvão ativado produzido a partir de resíduos de calça jeans apresentou desempenho satisfatório, comparável, e em alguns aspectos, superior ao carvão ativado comercial. A análise das isotermas de Langmuir indicou comportamento de adsorção favorável para ambos os materiais, com valores do parâmetro de equilíbrio R_l situados entre 0 e 1, evidenciando a viabilidade do processo. Além disso, o carvão ativado de calça jeans apresentou maior área superficial, o que contribuiu para sua maior capacidade de adsorção.

Os ajustes pelo modelo de Freundlich foi coeso com esses resultados, apresentando valores do parâmetro n dentro da faixa considerada favorável ($1 < n < 10$), com melhor coeficiente de determinação (R^2) para o carvão de calça jeans, indicando maior heterogeneidade superficial e afinidade com o adsorbato.

A caracterização físico-química revelou baixos teores de umidade e cinzas, inferiores ao limite de 15% recomendado para carvões ativados comerciais, evidenciando a boa qualidade do material obtido. O rendimento gravimétrico mostrou-se compatível com valores reportados na literatura para materiais lignocelulósicos, reforçando a viabilidade do processo de produção.

Este estudo demonstrou, de forma consistente, que a transformação de resíduos de tecido de calça jeans em carvão ativado (CCJ) constitui uma estratégia eficaz e promissora. Os resultados obtidos evidenciam que o CCJ apresentou desempenho superior na adsorção de permanganato de potássio ($KMnO_4$), superando o carvão ativado comercial (CC) em todas as massas testadas.

Essa constatação confirma a viabilidade técnica da conversão de resíduos têxteis em materiais de maior valor agregado, oferecendo uma alternativa sustentável ao descarte convencional. Além de contribuir para a mitigação dos impactos ambientais associados ao acúmulo de resíduos sólidos, a aplicação do CCJ representa uma solução economicamente atrativa, alinhada aos princípios da economia circular e ao reaproveitamento de subprodutos industriais.

Assim, o presente trabalho demonstra, de forma prática e aplicada, a viabilidade da conversão de resíduos têxteis, em especial de calças jeans, em carvão ativado para uso em processos de adsorção. Essa abordagem reforça o potencial do reaproveitamento de resíduos como estratégia sustentável, ao mesmo tempo em que oferece uma alternativa competitiva aos carvões ativados comerciais, conciliando benefícios ambientais e econômicos.

REFERÊNCIAS

- C FERREIRA, J. A. D. E., & D FINZER, J. R. (2017). Carvão Ativado de Bagaço da Cana-de-Açúcar: Adsorção de Íons de Chumbo. Disponível em: <<https://dspace.uniube.br/handle/123456789/489>>. Acesso em: 10 dez. 2025.
- CARVALHO, L. D (2024). Impactos ambientais causados pela indústria têxtil no Brasil. Disponível em: <<https://ric.cps.sp.gov.br/handle/123456789/29153>>. Acesso em: 10 dez. 2025.
- Cavalcanti, A. M., & dos Santos, G. F. (2022). A indústria têxtil no Brasil: uma análise da importância da competitividade frente ao contexto mundial. *Exacta*, 20(3), 706-726. Disponível em: <<https://periodicos.uninove.br/exacta/article/view/17784>>. Acesso em: 10 dez. 2025.
- Costa, J. G. B. (2020). Carvão ativado a partir de resíduo têxtil: síntese, caracterização e aplicação na remoção de corante reativo em esgoto sintético (Master's thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Norte). Disponível em: <<https://repositorio.ufrn.br/items/620e3434-54dc-4472-aa97-410cef8fde8d>>. Acesso em: 15 dez. 2025.
- CUNHA, G. A.; SILVA, M. A. E.; SILVA, W. R. D.; SILVA, R. D.; SOUZA, L. S. Estudo da gestão dos resíduos texteiros em uma indústria na cidade de Taquaritinga-SP e proposta para o reaproveitamento sustentável. *Ciência & Tecnologia*, v. 15, n. 1, p. e15111-e15111, 2023. Disponível em: <<https://publicacoes.fatecjaboticabal.edu.br/citec/article/view/295/255>>. Acesso em: 15 dez. 2025.
- Fujita, R. M. L., & Jorente, M. J. (2015). A Indústria Têxtil no Brasil: uma perspectiva histórica e cultural. *ModaPalavra e-periódico*, (15), 153-174. Disponível em: <<https://www.redalyc.org/pdf/5140/514051496008.pdf>>. Acesso em: 14 dez. 2025.
- GOMES, D. M; GOMES, M. P. Uma análise sob a ótica do desenvolvimento econômico sustentável. *DIREITO*, p. 92, 2019. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/372089980_MODELO_DE_PRODUCAO_FAST_FASHION_NA_OTICA_DA_SUSTENTABILIDADE> Acesso em: 15 dez. 2025.
- MENEZES, A. P. D. S., SIMÕES, P. E. D. S., & SILVA, S. C. D. S. Escravidão contemporânea na indústria têxtil brasileira: análise das cadeias produtivas e a sociedade de consumo. Disponível em: <https://ric.cps.sp.gov.br/bitstream/123456789/31905/1/gestaoempresarial_2024_2_anapauladossantosmenezes_escravidaocontemporaneaindustriatextil.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2025.
- Morita, A. M. (2013). Avaliação de impactos ambientais do setor têxtil por meio da ACV (avaliação do ciclo de vida) estudo de caso: calça jeans. Disponível em: <<http://repositorio.uem.br:8080/jspui/handle/1/3687>>. Acesso em: 06 dez. 2025.
- SILVA, N. C. da. Remoção de Antibióticos da Água por Meio do Processo de Adsorção em Carvão Ativado. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Ilha Solteira, SP, fevereiro 2012. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/entities/publication/a82491f9-6083-4dcc-b6f1-3aec9d7a0481>>. Acesso em: 23 dez. 2025.
- Sobral, B. H. C., & Rezende, E. A. (2025). Inovações incrementais na indústria têxtil: um estudo de caso de otimização de set up. *Brazilian Journal of Technology*, 8(1), e76489-e76489. Disponível em: <<https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BJT/article/view/76489>>. Acesso em: 15 dez. 2025.

SUSSUKI, D. M. Y; STRÖHER, G. R; STROHER, G. L. VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS TÊXTEIS: TRANSFORMAÇÃO DE POLIÉSTER EM CARVÃO ATIVADO. In: Anais do Congresso Brasileiro Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia. Anais. Diamantina (MG) Online, 2024. Disponível em: <<https://www.even3.com.br/anais/cobicet2024/897517>>. Acesso em: 08 dez. 2025.

SUSSUKI, D. M. Y et al. ANÁLISE DE ISOTERMA DE LANGMUIR E FREUNDLICH: TRANSFORMAÇÃO DE ALGODÃO EM CARVÃO ATIVADO. In: Anais do Congresso Brasileiro Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia. Anais...Diamantina (MG) Online, 2025. Disponível em: <<https://www.even3.com.br/anais/congresso-brasileiro-interdisciplinar-ciencia-tecnologia/1178286>>. Acesso em: 17 dez. 2025.

Vieira, R. D. S., Lima, J. T., Monteiro, T. C., Selvatti, T. D. S., Baraúna, E. E. P., & Napoli, A. (2013). Influência da temperatura no rendimento dos produtos da carbonização de *Eucalyptus microcorys*. *Cerne*, 19, 59-64. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/cerne/a/KzVHpC4crG4tmSzFyRdDPM/?format=html&lang=pt>>. Acesso em: 15 dez. 2025.