

Transformando resíduos em recursos: o potencial das bitucas de cigarro como materiais adsorventes sustentáveis

**Bianca Maas; Enrico Dultra Alfredo Azevedo; Julia Correia Da Silva;
Karoline Konell; Leticia Giordani Maass***

Discentes do Curso Técnico em Química (modalidade integrado). Instituto Federal de Santa Catarina -
Câmpus Jaraguá do Sul - Centro.

*E-mail: @cs.bituca@gmail.com

Elder Correa Leopoldino

Docente das unidades curriculares de Química, Instituto Federal de Santa Catarina - Câmpus Jaraguá
do Sul - Centro.

RESUMO - O presente estudo investigou a viabilidade de reutilizar bitucas de cigarro, especificamente o acetato de celulose (AC) presente nos filtros, para a obtenção de celulose adsorvente. O objetivo principal foi transformar esse resíduo altamente poluente em um material sustentável para a remoção de poluentes, utilizando o corante azul de metileno (AM) como modelo de adsorvato. Deste modo, foram conduzidas etapas experimentais que incluíram coleta, higienização, desacetilação e caracterização das bitucas, com análises por espectroscopia no infravermelho (FTIR). A partir destes processos, ensaios de adsorção foram conduzidos por cinéticas via UV-Vis em 665 nm, e foram avaliados os efeitos de massa do adsorvente, concentração inicial de AM e temperatura. Os dados cinéticos demonstraram um melhor ajuste ao modelo de pseudoprimeira ordem, indicando que o processo de adsorção é predominantemente físico, mediado por forças de Van der Waals. A temperatura ótima foi de 25 °C, onde se obteve maior taxa de adsorção e eficiência. As isotermas de adsorção foram modeladas segundo os modelos de Langmuir, Freundlich e Sips, sendo o modelo de Freundlich o que apresentou melhor ajuste. Os resultados evidenciaram que a celulose derivada das bitucas apresentaram maior capacidade adsorvente ($Q_e = 1,232 \text{ mg g}^{-1}$) do que o próprio AC ($Q_e = 0,816 \text{ mg g}^{-1}$), o que reforça o impacto da desacetilação na performance do material. Por fim, os resultados confirmam o potencial das bitucas de cigarro como matéria-prima alternativa

PALAVRAS CHAVES: Cigarro. Adsorção. Celulose. Acetato de celulose. Azul de metileno.

ABSTRACT - The incorrect disposal of cigarette butts poses a global environmental problem. This study explores the feasibility of reusing cigarette butts—specifically the cellulose acetate (CA) found in filters—to obtain adsorbent cellulose. The primary objective was to transform this highly polluting waste into a sustainable material for pollutant removal, using methylene blue (MB) dye as a model adsorbate. The experimental procedures included the collection, cleaning, deacetylation, and characterization of the cigarette butts, with analyses performed using Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR). Adsorption experiments were carried out through kinetic studies using UV-Vis spectroscopy at 665 nm. The effects of adsorbent mass, initial MB concentration, and temperature were investigated. The kinetic data showed a better fit to the pseudo-first-order model, indicating that the adsorption process is predominantly physical in nature, governed by Van der Waals forces. The optimal temperature was found to be 25 °C, at which the highest adsorption rate and efficiency were achieved. Adsorption isotherms were

modeled using the Langmuir, Freundlich, and Sips models, with the Freundlich model providing the best fit. The results demonstrated that the cellulose obtained from cigarette butts exhibited a higher adsorption capacity ($Q_e = 1.232 \text{ mg g}^{-1}$) compared to the original cellulose acetate ($Q_e = 0.816 \text{ mg g}^{-1}$), highlighting the beneficial effect of deacetylation on material performance. In conclusion, the findings confirm the potential of cigarette butts as an alternative raw material that, after a simple treatment process, can be repurposed as an efficient adsorbent. This represents a creative and sustainable solution that combines waste reduction with environmental protection.

KEYWORDS: Cigarettes. Adsorption. Cellulose. Cellulose Acetate. Methylene blue.

1 INTRODUÇÃO

A poluição é uma questão presente em todos os debates ambientais e sociais, e está principalmente relacionada ao descarte inadequado de diversos tipos de produtos, como as bitucas de cigarros (filtros). Em um estudo realizado por Sanquetta e Anater (2016, *apud* Oliveira; Yokoyama, 2020) durante os anos de 2006 e 2012, os rejeitos de bitucas de cigarro ocuparam cerca de 1,1 milhão de m^3 , dos quais muitos têm uma destinação incorreta. Este fato causa impactos ambientais significativos, principalmente devido ao fato de que a decomposição desse material pode levar mais de 5 anos, afetando diretamente o ambiente em que estamos inseridos, já que existem substâncias tóxicas na composição desses resíduos (Ribeiro, 2022).

Um dos componentes presente na estrutura do filtro do cigarro é o acetato de celulose (AC), um composto derivado da celulose que possui diversas características, como alta eficiência para a retenção de substâncias tóxicas no cigarro e lenta degradação. Seu objetivo principal e utilidade é formar o filtro do cigarro para reter parte das substâncias tóxicas presentes no cigarro, das quais pode-se considerar como exemplos a nicotina e o alcatrão (Jung; Tocchetto; Gonçalves, 2014; Fenzo; Giordano; Sansone, 2020).

A partir das questões citadas anteriormente, o presente trabalho buscou encontrar uma alternativa para reciclar as bitucas de cigarros, utilizando o acetato de celulose como base para a produção de um material adsorvente. Este processo permite extrair e reutilizar a celulose advinda do acetato de celulose presente nas bitucas, contribuindo assim para a redução do impacto ambiental causado por esse resíduo. Posto isso, esse mesmo material foi utilizado para a adsorção de corantes, como é o caso do azul de metileno¹, que também são poluentes, assim favorecendo outra questão de cunho ambiental.

¹ Conforme pesquisa realizada por Vieira, Artifon e Paulino (2017).

2 METODOLOGIA

2.1 COLETA, HIGIENIZAÇÃO E TRATAMENTO

As bitucas de cigarro foram adquiridas por meio do descarte organizado em um coletor disposto na entrada da instituição. Todas as bitucas foram recolhidas e tratadas, primeiramente retirando-se o papel e as partes queimadas. Como forma de melhor organizar a execução das atividades, siglas foram atribuídas para cada material, das quais foram: RS (recolhidas e sujas), RL (recolhidas e limpas), DR (desacetiladas recolhidas).

O tratamento das bitucas recolhidas e compradas se baseou em adicionar 78,98 g de material em um béquer contendo 900 mL de água deionizada a uma temperatura de 50 °C, tendo esse processo a duração de 1 h. Na sequência, foram adicionadas em béqueres, contendo 400 mL de hipoclorito de sódio (2% m/V), no qual, permaneceram por 6 h. Feito isto para garantir que não há impurezas nos filtros de acetato de celulose, executou-se duas lavagens com etanol limpo, e em seguida, os filtros foram colocados na estufa. Com a conclusão desta etapa, foi efetuada uma análise espectrofotométrica na região do infravermelho PerkinElmer Spectrum Two, no qual as amostras foram analisadas a fim de verificar se houve degradação na estrutura dos materiais advinda do processo de higienização, e também para confirmar a desacetilação foi efetiva.

2.2 DESACETILAÇÃO DO ACETATO DE CELULOSE

Posteriormente, realizou-se o processo de desacetilação de 5 g bitucas higienizadas completamente (RL)², com o uso de 500 mL de uma solução com NaOH 1% em refluxo por um período de 3h, conforme a metodologia de desacetilação proposta por Souza (2022). Feito tal etapa, as soluções foram filtradas e colocadas em um dessecador por um período de 1 semana. Depois, foram caracterizadas em um espectrofotômetro na região do infravermelho PerkinElmer Spectrum Two.

2.3 VARREDURA DO AZUL DE METILENO E CURVA DE CALIBRAÇÃO

Já para a determinação do comprimento de onda máximo de absorção ($\lambda_{\text{máx}}$) do azul de metileno foi realizada uma varredura no espectrofotômetro Femto Cirrus 80 na região do UV-Vis para o azul de metileno. Para isso foi necessário uma solução de 4,8 mg L⁻¹, numa faixa entre 300

² RL= Recolhidas e limpas.

e 700 nm, com variação de 5 nm, utilizando uma cubeta de quartzo de 3 mL e caminho óptico de 10 mm.

Foram feitas 8 soluções utilizando uma solução concentrada de azul de metileno 100 mg L⁻¹, a qual foi diluída para estabelecer diferentes concentrações, com variações de 2 a 12 mg L⁻¹ e com adições sucessivas de substrato (AM) a um volume fixo de solvente, para a confecção da curva de calibração. Estas soluções foram analisadas também em um espectrofotômetro na região do UV-Vis, utilizando uma cubeta de vidro de 3,5 mL e caminho óptico de 10 mm.

2.4 ENSAIOS DE ADSORÇÃO

A fim de analisar os parâmetros que influenciam a cinética de adsorção, diferentes ensaios foram realizados. O primeiro se baseou em alterar a massa de celulose como adsorvente, das quais foram variações de respectivamente: 200 mg, 150 mg, 100 mg, 50 mg e 25 mg. Estas, foram analisadas com base em uma concentração fixa de adsorvato de 16 mg L⁻¹, utilizando 50 mL de solução. Junto disso, uma massa fixa de 100 mg foi utilizada para realizar ensaios, com uma temperatura fixa de 25 °C, alterando a concentração de AM³, das quais foram 4 mg L⁻¹, 8 mg L⁻¹, 12 mg L⁻¹, 16 mg L⁻¹. Por fim, ensaios com uma massa de celulose e uma concentração fixa de azul de metileno, respectivamente 100 mg e 16 mg L⁻¹, foram realizados em diferentes temperaturas, sendo estas: 15 °C, 20 °C, 25 °C, 30 °C, 35 °C e 40 °C.

É importante ressaltar que todos os ensaios foram realizados em um período total de 20 minutos em agitação constante, e que, em todos os experimentos, foram coletadas alíquotas de 2,5 mL da solução em contato com as amostras em intervalos de tempo de 30 segundos até o sétimo minuto, e após de um em um minuto.

2.5 TRATAMENTO DE DADOS

Todos os dados e ajustes lineares e não lineares, bem como os erros relativos, foram tratados pelo software OriginPro 9.0. Para cada estudo foram utilizadas equações apropriadas citadas ao longo do texto.

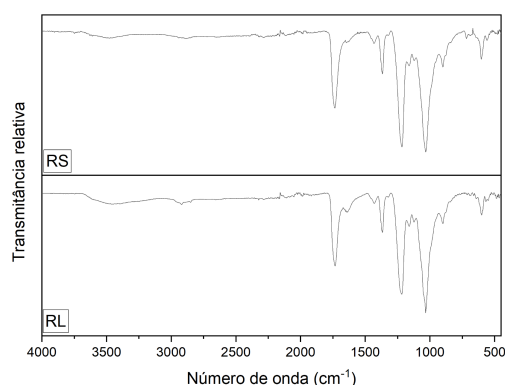
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

³ Todas com um volume de 50 mL.

3.1 HIGIENIZAÇÃO

Após a higienização, observou-se algumas características do material e da solução presente, como a coloração da água, que estava escura, como possível analisar na Figura A1 do apêndice A. A mesma situação ocorreu ao usar o etanol, a coloração da solução ficou amarelada e as bitucas se encolheram, indicando a presença de impurezas, o que confirma a necessidade deste processo na higienização. Para observar se houve mudança na estrutura do filtro de cigarro além de verificar quais as espécies químicas estavam presentes, foi realizada uma análise de IR (Figura 1).

Figura 1 - Espectros de FT-IR de comparação dos materiais RS e RL⁴.



Fonte: Autoria própria (2025).

Como é possível perceber pela comparação dos espectros dos materiais antes e depois do processo de higienização, não houve diferença significativa. Em ambos os espectros o acetato de celulose se mostra presente, principalmente pela presença do grupo funcional C=O de ésteres alifáticos saturados na região de 1750-1735 cm^{-1} . Há também duas vibrações assimétricas acopladas, sendo a primeira a mais importante, tais bandas ocorrem na região 1300-1000 cm^{-1} . Essas vibrações acontecem a partir da deformação axial C-O (Paiva, 2010).

3.2 DESACETILAÇÃO

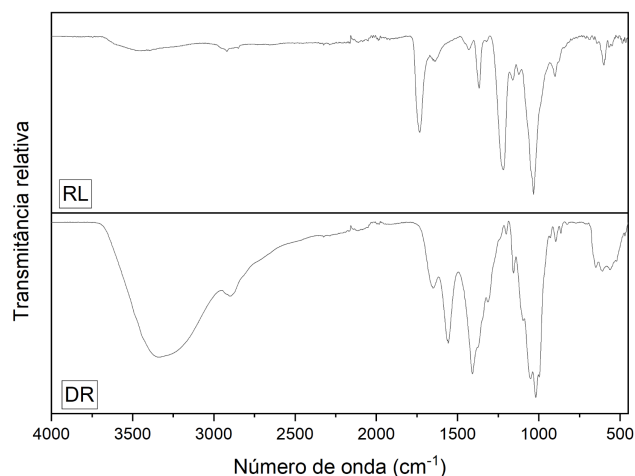
Em seguida foi realizado o processo de desacetilação, com as bitucas já higienizadas (RL)⁵. Nesta reação, inicialmente foi observado que a cor da solução acabou mudando para um amarelo escuro, juntamente com a cor do filtro que ficou amarronzado durante o decorrer do experimento, o que evidencia a sujeira presente. O processo todo apresentou um rendimento de

⁴ RS= Recolhidas sujas.

⁵ RL= Recolhidas limpas.

52%, um resultado positivo visto a quantidade de massa utilizada (massa obtida 2,60 g) e também aos recursos utilizados, sendo apenas uma solução 1% de NaOH. Ao final foi realizada análises de IR para verificar se a metodologia utilizada foi eficaz, conforme Figura 2.

Figura 2 - Espectros de FT-IR de comparação dos materiais RL e DR⁶.



Fonte: Autoria própria (2025).

Pelos espectros da Figura 2 é possível observar o desaparecimento das bandas C=O de éster, características dos grupos acetatos, em 1750-1735 cm^{-1} , e o surgimento das bandas de estiramento dos grupos O-H, expressados em torno de 3400 e 3300 cm^{-1} . Assim, se torna evidente que após a desacetilação os grupos acetato foram substituídos por grupos hidroxilas. Esse fato evidencia que o material desacetilado é celulose, sendo possível visualizar tal afirmação na Figura A2 presente no apêndice A (Paiva, 2010).

3.3 CURVA DE CALIBRAÇÃO

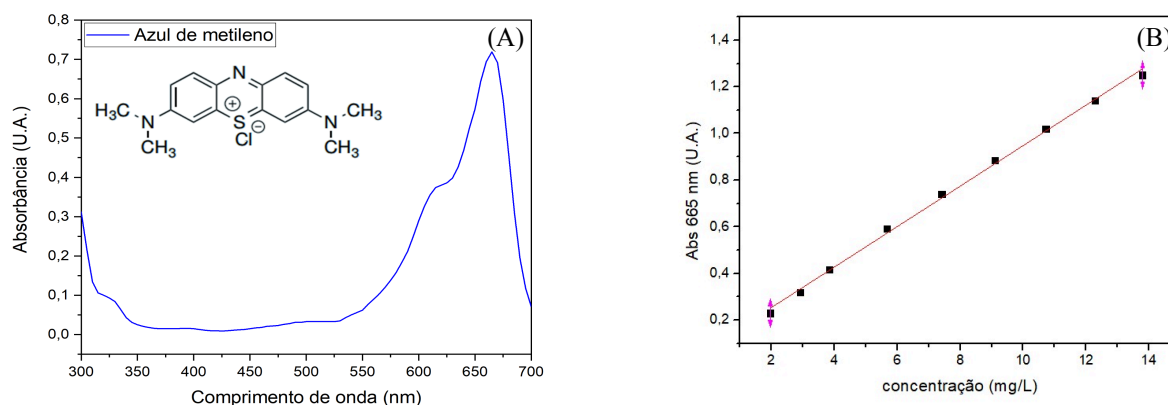
Para o estudo de adsorção de azul de metileno, molécula escolhida para os testes, foi necessário estudar o espectro de absorção deste composto. A varredura (Figura 3, A) foi realizada para determinar os comprimentos de onda, na região do UV-Vis, onde há transições eletrônicas. O espectro apresentado mostra duas bandas de transição eletrônica sobrepostas, sendo uma de menor intensidade em 615 nm e a outra de maior intensidade em 665 nm. Uma vez determinado que o comprimento de onda de absorção máxima é 665 nm, resultado corroborado por Dinh *et al.*, (2019), foi construída uma curva de calibração, para determinar as concentrações nos ensaios de adsorção. Tal curva encontra-se na Figura 3 (B), com média e desvio inclusos⁷. Percebe-se que

⁶ RL= Recolhidas limpas. DR = Desacetiladas recolhidas.

⁷Os restantes dos dados da curva estão presentes na Figura A3 do Apêndice A.

a absorção máxima ocorre na região compreendida entre os comprimentos de onda do laranja e do vermelho, cores complementares do azul, no círculo cromático, o que corrobora a coloração azul observada (Garção; Tessaro; Gracetto, 2021; Moraes, 2018).

Figura 3 - (A) Espectro eletrônico na região UV-Vis para o azul de metileno em água, a uma concentração de 4,8 mg L⁻¹, a 25 °C; e (B) curva de calibração para o azul de metileno em água realizada em 665 nm, a 25 °C.



Fonte: Autoria própria (2025).

3.4 CINÉTICA DE ADSORÇÃO

Estudos cinéticos foram realizados para avaliar a variação da concentração de azul de metileno em função do tempo. Os dados, tratados com o auxílio da Equação 1, permitiram a determinação da capacidade adsorvida (Q_t) ao longo do tempo.

$$Q_t = \frac{(c_0 - c_t) \cdot V}{m} \quad \text{Equação 1}$$

Em que: Q_t é a quantidade adsorvida por massa de adsorvente no tempo t (mg g⁻¹); C_0 concentração inicial do adsorvato (mg L⁻¹); concentração no tempo t (mg L⁻¹); V é o volume da solução (L); e n a massa de adsorvente (g) (Nascimento *et al.*, 2020).

Os dados experimentais foram aplicados aos modelos cinéticos de adsorção de pseudoprimeira ordem, a qual é representada pela Equação 2. E de pseudossegunda ordem, que é representada pela Equação 3.

$$Q_t = Q_e \cdot (1 - e^{-k_1 t}) \quad \text{Equação 2}$$

$$Q_t = \frac{Q_e^2 \cdot k_2 \cdot t}{1 + Q_e \cdot k_2 \cdot t} \quad \text{Equação 3}$$

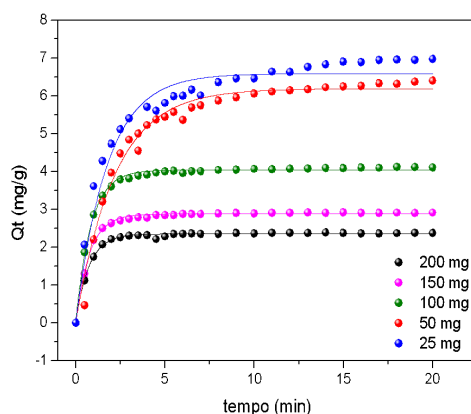
Em que: Q_t é a quantidade adsorvida por massa de adsorvente no tempo t (mg g^{-1}); Q_e é a quantidade adsorvida por massa de adsorvente no equilíbrio (mg g^{-1}); t é o tempo (min); k_1 é a constante de adsorção de primeira ordem (min^{-1}); k_2 é a constante de adsorção de segunda ordem ($\text{g mg}^{-1} \text{min}^{-1}$) (Ho; Mckay, 1999; Yuh-Shan, 2004).

Assim, foi determinado que a cinética de primeira ordem é a que melhor se ajusta ao processo de adsorção da celulose frente ao azul de metileno, pois apresenta valores de R^2 mais próximas de 1, assim como é mostrado nas Tabelas 1 e 3, que estão apresentadas nas seções 3.4.1 e 3.4.4. Isso indica que a adsorção provavelmente é um processo físico, pois a cinética de primeira ordem é geralmente aplicada em sistemas em que a adsorção física é prevaiente, de modo que as interações entre o adsorbato e o adsorvente se dão por meio das forças de Van der Waals. Já para o acetato de celulose, não foi possível determinar qual cinética se adequa melhor ao seu processo, pois, assim como é mostrado na Tabela 2 (apresentada na seção 3.4.3), os valores de R^2 obtidos são muito parecidos, de modo que seria necessário a obtenção de mais dados em relação a esse material como adsorvente (Sangoremi, 2025).

3.4.1 Influência da massa de celulose em uma solução de azul de metileno

Com a utilização das cinéticas de adsorção de azul de metileno com celulose, e analisando os ensaios variando a massa de celulose, foi possível a construção de gráficos de Q_t versus t conforme Figura 4.

Figura 4 - Capacidade adsorptiva versus tempo para cinéticas de adsorção de azul de metileno variando a massa de adsorvente (celulose oriunda do acetato de celulose), com uma concentração de AM de 16 mg/L, a 25° C.



Fonte: Autoria própria (2025).

Tabela 1: Dados cinéticos utilizando celulose como material adsorvente.

Massa de celulose (mg)	Ajuste de primeira ordem			Ajuste de segunda ordem		
	k_1 (min^{-1})	Q_e (mg g^{-1})	R^2	k_2 ($\text{g mg}^{-1} \text{min}^{-1}$)	Q_e (mg g^{-1})	R^2

25	0,567	6,584	0,938	0,121	7,297	0,995
50	0,455	6,186	0,983	0,084	7,067	0,973
100	1,181	4,039	0,996	0,496	4,281	0,986
150	1,286	2,878	0,995	0,773	3,039	0,978
200	1,341	2,350	0,995	1,013	2,475	0,974

Fonte: Autoria própria (2025).

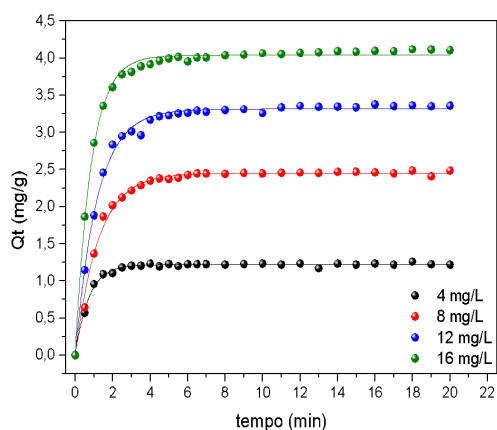
As curvas experimentais foram ajustadas aos modelos cinéticos de pseudoprimeira ordem e pseudosegunda ordem. Os resultados do ajuste ao modelo de pseudosegunda ordem estão apresentados na Figura A4 do Apêndice A, enquanto a variação da concentração média em função do tempo encontra-se na Figura A5, também no Apêndice A. Os parâmetros obtidos juntamente com o (R^2) de cada ajuste estão descritos na Tabela 1. A análise desses resultados indica que os ajustes de pseudoprimeira apresentou melhor adequação aos dados experimentais, uma vez que os coeficientes de determinação (R^2) foram mais próximos de 1. Nelas é possível verificar como a quantidade de adsorvente afeta a eficiência da adsorção, uma vez que um aumento de massa de adsorvente altera a taxa de adsorção do azul de metileno em solução. É possível analisar tal afirmação a partir da Tabela 1, onde os valores calculados de capacidade de adsorção em equilíbrio (Q_e) diminuíram progressivamente com o aumento da massa do adsorvente, partindo de 6,584 mg/g para 25 mg e alcançando 2,350 mg/g para 200 mg. Essa tendência é coerente com a literatura, sendo atribuída à maior disponibilidade de sítios ativos por unidade de massa em menores quantidades de adsorvente.

A capacidade de adsorção da celulose, conforme avaliada pelo modelo de pseudosegunda ordem, apresentou valores de Q_e variando entre 2,475 mg/g e 7,297 mg/g. Quando comparados ao valor de 3,96 mg/g obtido por Cáceres *et al.* (2017) para o caroço de azeitona moído, nota-se que a celulose apresenta desempenho superior em grande parte das condições testadas. Essa diferença indica que a celulose possui potencial favorável como material adsorvente, destacando-se pela sua maior eficiência de adsorção por grama. Embora o modelo de pseudoprimeira ordem tenha se mostrado mais adequado para descrever a cinética de adsorção da celulose, por apresentar (R^2) superior, o modelo de pseudosegunda ordem também demonstrou bom ajuste aos dados experimentais, com valores de (R^2) favoráveis. Dessa forma, a comparação com os dados de Cáceres *et al.* (2017) é considerada válida, uma vez que foi realizada com base nos resultados do modelo de pseudosegunda ordem, o mesmo utilizado pelo autor.

3.4.2 Influência da concentração inicial de azul de metileno utilizando uma massa fixa de celulose

Como forma de comparação, realizou-se também a variação da concentração da solução utilizando uma massa fixa (100 mg), onde as concentrações foram: 4 mg L⁻¹, 8 mg L⁻¹, 12 mg L⁻¹, 16 mg L⁻¹. A partir do estudo dessas diferentes concentrações foi confeccionado um gráfico, apresentado na Figura 5.

Figura 5 - Capacidade adsortiva versus tempo para cinéticas de adsorção de azul de metileno variando a concentração de AM, com uma concentração fixa de celulose 100 mg, à 25° C.



Fonte: Autoria própria (2025).

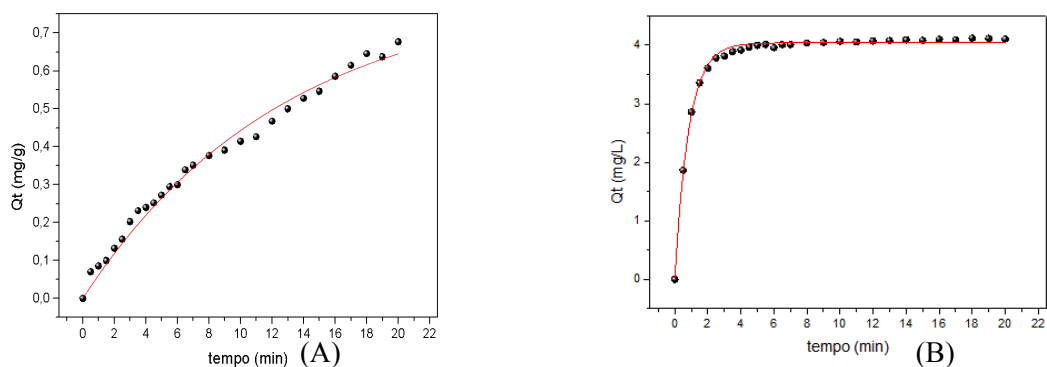
Com este gráfico, percebeu-se que quanto menor a concentração da solução de azul de metileno mais o material adsorverá, ou seja a concentração em solução diminuirá conforme o tempo, tendendo a mais próximo de zero, observa-se tal fator na comparação dos gráficos de maior e menor concentração de solução.

Em concentrações iniciais mais baixas, a quantidade de moléculas de AM em solução é menor, permitindo que os sítios ativos da celulose (com sua massa fixa de 100 mg) adsorvam uma proporção maior dessas moléculas, pois possuem mais sítios ativos disponíveis. Isso leva a uma melhor eficiência de remoção e, conseqüentemente, a uma concentração residual mais baixa na solução. Por fim, a análise da influência da concentração inicial foi de grande importância para a determinação da capacidade máxima de adsorção de celulose e para o desenvolver os modelos de isotermas de adsorção de Langmuir e Freundlich que foram utilizadas neste projeto (Crini, 2006).

3.4.3 Comparação do acetato de celulose com a celulose

Em relação aos testes quantitativos de adsorção, estudos cinéticos foram conduzidos utilizando também o acetato de celulose (RL⁸) como adsorvente, com o objetivo de comparar a eficiência de adsorção do azul de metileno utilizando dois diferentes adsorventes em uma única condição experimental. A condição escolhida foi a que se mostrou mais eficiente para a celulose (DR⁹), que foi a temperatura de 25 °C com 16 mg L⁻¹. No decorrer do processo, a concentração de adsorvato (azul de metileno) diminui ao utilizar ambos os adsorventes. Isto ocorre, pois o corante está se instalando nos sítios ativos disponíveis presentes na área superficial dos adsorventes. Na Figura 6 e na Tabela 2 estão apresentados os dados coletados, com média e desvio.

Figura 6 - Cinéticas de adsorção do azul de metileno em água, com concentração de 16 mg·L⁻¹, utilizando 100 mg de RL (A) e DR (B) como adsorventes, à 25°C.



Fonte: Autoria própria (2025)

Tabela 2: dados cinéticos utilizando acetato de celulose como material adsorvente.

Massa de acetato de celulose (mg)	Ajuste de primeira ordem			Ajuste de segunda ordem		
	k_1 (min ⁻¹)	Q_e (mg·g ⁻¹)	R ²	k_2 (g mg ⁻¹ ·min ⁻¹)	Q_e (mg·g ⁻¹)	R ²
100	0,078	0,816	0,987	0,045	1,232	0,990

Fonte: Autoria própria (2025).

Com esse experimento, além da efetivação de adsorção, pode-se comparar a atuação de ambos os adsorventes, podendo perceber claramente a distinção da capacidade de adsorção deles. A partir da análise de ambos os gráficos, tem-se que o Q_e obtido utilizando acetato de celulose como adsorvente foi de 0,816, enquanto o Q_e utilizando celulose foi de 1,232, ou seja, é possível constatar que a bituca desacetilada (celulose) possui uma cinética de adsorção superior à bituca acetilada, pois apresentou uma quantidade de material adsorvida muito superior do que o acetato de celulose. Estes resultados explicam o porque temos o pouco uso de AC para reações de

⁸ RL= Recolhidas e limpas.

⁹ DR = Desacetiladas recolhidas.

adsorção, no qual, muitas das vezes só é utilizado quando modificado, como as pesquisas de Barrancelli, Hoffmann (2005) e Borgo, Lazarin, Gushikem (2002).

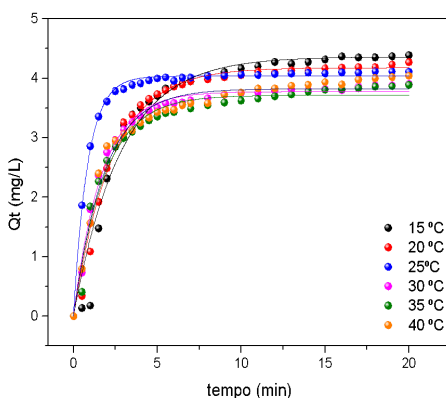
Estas diferenças podem ser explicadas devido às diferentes polaridades que cada adsorvente possui, visto que, como o AM se trata de uma molécula polar, realiza interações mais fortes com compostos também polares, como a celulose, por exemplo. Devido a presença de grupos hidroxila em sua composição, a celulose apresenta uma maior polaridade do que o acetato de celulose, ou seja, interage mais facilmente e mais fortemente com o AM do que em comparação com o acetato de celulose (Amode *et al.*, 2016).

3.4.4 Efeito da temperatura na adsorção

Para compreender a influência da temperatura no processo de adsorção, foram realizados ensaios com uma massa e uma concentração fixa frente a variação de temperatura do sistema. A partir desses estudos cinéticos, foram obtidos três gráficos principais que serão discutidos a seguir.

A fim de determinar se a temperatura varia o potencial de adsorção para com a solução de azul de metileno, foram elaborados os seguintes gráficos junto da tabela de resultados, os quais estão respectivamente na Figura 7 e Tabela 3 e apresentam os dados referentes a concentração de AM versus tempo para variação de temperatura.

Figura 7 - Comparativos da variação de temperaturas versus Q_t (mg/L), tendo massa de celulose e concentração de AM fixos, sendo 100 mg e 16 mg/L respectivamente.



Fonte: Autoria própria (2025).

Tabela 3: resultados obtidos pela variação da temperatura.

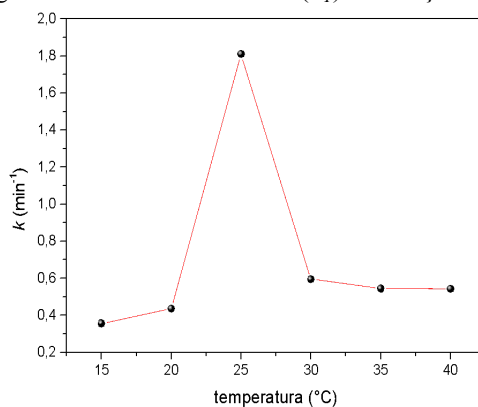
Temperatura °C	Ajuste de primeira ordem			Ajuste de segunda ordem		
	k_1 (min ⁻¹)	Q_e (mg g ⁻¹)	R ²	k_2 (g mg ⁻¹ min ⁻¹)	Q_e (mg g ⁻¹)	R ²
15	0,355	4,363	0,955	0,078	5,167	0,927
20	0,435	4,178	0,985	0,115	4,797	0,959
25	1,181	4,039	0,996	0,496	4,281	0,986
30	0,594	3,777	0,991	0,204	4,195	0,981
35	0,544	3,715	0,975	0,180	4,169	0,974
40	0,542	3,824	0,975	0,179	4,290	0,985

Fonte: Autoria própria (2025).

Por meio destes experimentos, identificou-se que não houve alteração na taxa de adsorção do corante, em que até mesmo em testes realizados na temperatura máxima de 40 °C o corante não se degradou. Mas, junto disso, mostrou-se que a temperatura que apresentou a maior taxa de adsorção foi a de 25 °C, visto que apresentou os menores valores de concentrações finais, como também ocorrido no artigo de Saatkamp (2016) que utilizou serragem de eucalipto para adsorver AM. Portanto, é possível concluir que essa temperatura é a mais favorável em relação à eficiência do adsorvente.

Essa faixa de temperatura também se mostra como a mais vantajosa para a velocidade do processo de adsorção, já que a partir do gráfico da Figura 8, o qual possibilita uma melhor análise do comportamento das constantes cinéticas obtidas em função da temperatura, é possível averiguar que a temperatura de 25 °C apresenta a maior constante cinética (k_1), sendo esta equivalente à 1,181 min⁻¹, sendo quase o dobro do valor das outras constantes. Contudo, esses dados não se ajustaram de forma satisfatória à equação de Arrhenius, pois não seguem uma tendência linear, de modo que não foi possível estimar outros parâmetros cinéticos.

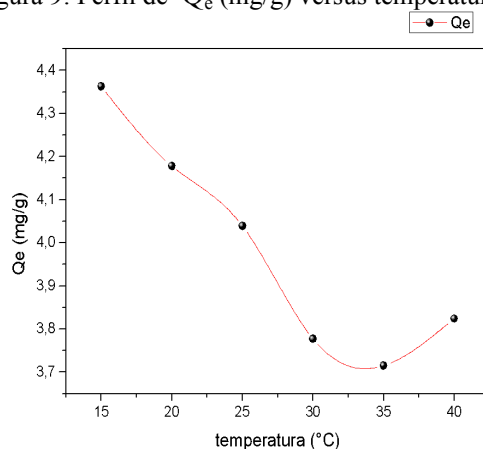
Figura 8: Constantes cinéticas (k_1) em função da temperatura.



Fonte: Autoria própria (2025).

Além disso, os resultados obtidos demonstram que conforme o aumento da temperatura, menor o Q_e (quantidade de soluto adsorvido por unidade de massa do adsorvente no equilíbrio) obtido e, junto disso, ao se ultrapassar a temperatura de 25 °C, temos respectivamente menores k e R^2 para a cinética, o que indica que acima desta temperatura a interação entre adsorbato e adsorvente decresce. De acordo com Müller *et al.* (2019), isso demonstra que a adsorção se dá por um processo exotérmico, de modo que ao aumentarmos a temperatura do sistema, a adsorção é desfavorecida, como observado nos dados apresentados anteriormente. Tais resultados podem ser melhor visualizados na Figura 9.

Figura 9: Perfil de Q_e (mg/g) versus temperatura (°C).



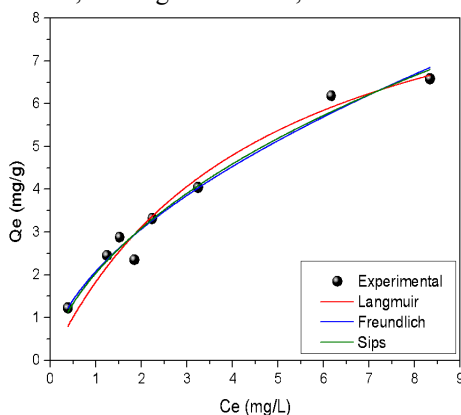
Fonte: Autoria própria (2025).

Ademais, também pode-se perceber que as menores temperaturas, 15 e 20 °C, possuem os maiores valores de Q_e , e, portanto, deveriam ser consideradas como a faixa de temperatura ideal para a adsorção. Contudo, elas são desfavorecidas pelos seus baixos valores de k_f , o que faz com que, dentre as temperaturas estudadas, a temperatura de 25 °C prevaleça como a melhor. Esses resultados se complementam com a pesquisa realizada por Saatkamp em 2016, em que, ao realizar a adsorção do AM em serragem, também obteve como melhor resultado a temperatura de 25 °C. Tal conclusão também é corroborada por Farias *et al.* (2022), que afirma que, em processos de adsorção em meio aquoso, cinéticas que possuem maior velocidade são mais vantajosas, pois normalmente apresentam uma capacidade alta de adsorção em um pequeno período de tempo.

3.5 ISOTERMAS DE ADSORÇÃO

O equilíbrio de adsorção foi avaliado utilizando os modelos de Langmuir, Freundlich e Sips, de modo que para comparar o ajuste dos dados experimentais em relação a cada modelo foi elaborado o gráfico apresentado na Figura 10. Os parâmetros foram obtidos por regressão não linear de acordo com cada equação, e estão evidenciados na Tabela 4.

Figura 10: Isotermas de adsorção, relacionado C_e (mg/L) e Q_e (mg/g). Comparativos entre Langmuir, Freundlich e Sips, com concentração de 16 mg/L de AM, 100 mg de celulose, à 25 °C.



Fonte: Autoria própria (2025).

Tabela 4: Parâmetros estimados através dos modelos de isotermas ajustados aos dados experimentais das cinéticas de adsorção de azul de metileno utilizando celulose obtida do acetato de celulose, a 25 °C.

Modelo	Equação base	Parâmetros estimados
Langmuir	$Q_e = \frac{Q_m \cdot K_L \cdot C_e}{1 + (K_L \cdot C_e)}$	$K_L = 0,21 \text{ L mg}^{-1}$
		$Q_m = 10,41 \text{ mg g}^{-1}$
		$R^2 = 0,96052$
Freundlich	$Q_e = K_F \cdot C_e^{1/n}$	$K_F = 2,08 \text{ (mg/g)} \cdot (\text{L/mg})^{1/n}$
		$n = 1,78$
		$R^2 = 0,96977$
Sips	$Q_e = \frac{Q_m \cdot (K_S \cdot C_e)^n}{1 + (K_S \cdot C_e)^n}$	$K_S = 0,17 \text{ L mg}^{-1}$
		$Q_m = 30,95 \text{ mg g}^{-1}$
		$n = 0,65$ $R^2 = 0,96469$

A partir da Tabela 4, é possível concluir que o modelo de Freundlich foi o que melhor se adequou aos dados experimentais, já que apresentou o melhor fator de correlação (R^2) entre os modelos utilizados. Ademais, os modelos de Langmuir e Sips também se ajustaram de modo

satisfatório aos dados experimentais, sendo assim possível obter conclusões importantes sobre a adsorção a partir deles.

Por meio do modelo da isoterma de Langmuir foi possível determinar a natureza do processo adsorptivo através da determinação do fator de separação (R_L). Esse valor é obtido através da Equação 4, em que K_L representa a constante de Langmuir e C_i indica a concentração inicial de adsorvato, tal como descrita por Müller *et al.* (2019). O valor do parâmetro R_L , estimado em 0,23, situa-se na faixa entre 0 e 1, o que caracteriza a adsorção como favorável segundo os critérios do modelo de Langmuir (Silva *et al.*, 2024).

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_i} \quad \text{Equação 4}$$

Tal conclusão é complementada pelo fator n apresentado pelo modelo de Freundlich, que também determina o favorecimento da adsorção e indica a intensidade desse processo. Assim como mostrado na Tabela 4, o valor deste parâmetro foi de 1,78, o que indica, novamente, um processo favorável, considerando sua variação entre $1 < n < 10$ (Silva *et al.*, 2024).

Além disso, o modelo de Sips, que se baseia nos modelos de Freundlich e Langmuir, apresenta parâmetros como o K_S , que representa a constante de equilíbrio, e n_S , que representa o grau de heterogeneidade da superfície do adsorvente. O valor de n_S pode variar entre 0 a 1, de modo que: se $n_S = 1$, o sistema é homogêneo, ou seja, que o adsorvente se comporta tal como o modelo descrito por Langmuir; e se $n_S < 1$, temos que o adsorvente se assemelha ao modelo de Freundlich, pois seus sítios ativos se comportam de maneira heterogênea. Assim, ao estimar que o valor de n_S é 0,65, temos um indício que, de fato, o processo de adsorção da celulose com o azul de metileno se comporta tal como descrito por Freundlich, que pressupõe que a adsorção acontece em multicamadas e que há variação de energia entre os sítios ativos (Febrianto *et al.*, 2009; Pessoa, 2019).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme o avanço do projeto, todas as análises feitas tiveram resultados positivos, corroborando para a comprovação das hipóteses propostas durante seu desenvolvimento. Com a comparação dos resultados obtidos entre o material retirado do filtro de cigarro e seu derivado foi possível determinar que a celulose atua como um melhor material adsorvente, do que em comparação com seu derivado, acetato de celulose.

Para uma melhor análise, os dados das isotermas se fazem essenciais, afirmando que existem formas de influenciar o sistema reacional, como alteração da massa, temperatura e concentração, visto que alteram expressivamente a taxa de adsorção da celulose, modificando a interação do adsorbato e do adsorvente. Além disso, as cinéticas e as isotermas realizadas indicaram que o processo de adsorção com celulose obtida a partir de filtros de cigarro é sim favorável, por mais que não tenha sido possível confirmar tais questões devido a impossibilidade de calcular os valores de ΔH e ΔG , devido a não linearidade dos pontos obtidos, o que impossibilita a realização do ajuste de Arrhenius, sendo por fim a melhor isoterma de trabalho a de Freundlich.

Por fim, o trabalho realizado cumpriu seu objetivo, ao demonstrar que um material descartado pode possuir um novo meio de reciclagem, o que pode inibir sua acumulação e poluição no meio ambiente. Além disso, contribui como um novo parâmetro para estudos da adsorção de corantes.

REFERÊNCIAS

AMODE, Jeminat O. *et al.* Adsorption of methylene blue from aqueous solution using untreated and treated (*Metroxylon* spp.) waste adsorbent: equilibrium and kinetics studies. **Int J Ind Chem**, [S.L], v. 7, p. 333-345, maio 2016. Disponível em: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007.pdf>. Acesso em: 07 nov. 2024.

BARRANCELLI, Gustavo Trentini; HOFFMANN, Andrea Anilda. Estudo voltamétrico do corante azul de metileno imobilizado na superfície de acetato de celulose modificado quimicamente com óxido de titânio. **Ciências Exatas e da Terra**. 2005. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/36614/000519456.pdf?sequence=1>. Acesso em: 21 jun. 2025.

BORGO, Claudemir Adriano; LAZARIN, Angélica Machi; GUSHIKEM, Yoshitaka. **Adsorção de azul de metileno em membrana de acetato de celulose/ZrO₂/fosfato: preparação e caracterização; Adsorção de azul de metileno em membrana de acetato de celulose/ZrO₂/fosfato: preparação e caracterização**. 2002. Disponível em: <https://www.google.com/url?q=https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/20556304&sa=D&source=docs&ust=1750807217019518&usg=AOvVaw1WeHzYUuBMZbk81mA8Awjm>. Acesso em: 20 jun. 2025.

CÁCERES, Gabriela Rossatto; MORAIS, Marcilio Machado; CREXI, Valéria Terra. CINÉTICA DE ADSORÇÃO DO CORANTE AZUL DE METILENO EM CAROÇO DA AZEITONA. In: CONGREGA - URCAMP 2017 (14ª MOSTRA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA), 14., 2017, Bagé. **Anais [...]**. Bagé: Urcamp, 2017. p. 777-778. Disponível em: <http://revista.urbcamp.tche.br/index.php/congregaanaismic/article/view/1214/777>. Acesso em: 22 jun. 2025.

CRINI, G. Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: a review. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 97, n. 9, p. 1061-1085, jun. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2005.05.001>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.05.001>. Acesso em: 21 jun. 2025.

DINH, Van-Phuc *et al.* Insight into the adsorption mechanisms of methylene blue and chromium(iii) from aqueous solution onto pomelo fruit peel. **Rsc Advances**, [S.L.], v. 9, n. 44, p. 25847-25860, ago. 2019. Royal Society of Chemistry (RSC). <http://dx.doi.org/10.1039/c9ra04296b>. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1039/c9ra04296b>. Acesso em: 08 nov. 2024.

FARIAS, Josiane Pinheiro *et al.* Comparison of the adsorption kinetics of methylene blue using rice husk ash activated with different chemical agents. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, [S.L.], v. 57, n. 2, p. 279-289, 9 jul. 2022. Zeppelin Editorial e Comunicação. <http://dx.doi.org/10.5327/z2176-94781195>. Disponível em: <https://doi.org/10.5327/Z2176-94781195>. Acesso em: 22 jun. 2025.

FEBRIANTO, Jonathan *et al.* **Equilibrium and kinetic studies in adsorption of heavy metals using biosorbent**: A summary of recent studies. *Journal Of Hazardous Materials*, [s.l.], v. 162, n. 2-3, p.616-645, mar. 2009. Elsevier BV. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030438940800928X?casa_token=z3a9vfN3lwEAAAAA:ZCdu59Vay1c8kGXk8Ej2lmXIVJ-UazsUk78pEqItUBzy3byE5Ywe14g5u9scIHdfwo mlG6ALec. Acesso em: 26 jun 2024.

FENZO, Anna de; GIORDANO, Michele; SANSONE, Lucia. A Clean Process for Obtaining High-Quality Cellulose Acetate from Cigarette Butts. **Materials**, [S.L.], v. 13, n. 21, p. 4710-4723, 22 out. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma13214710>. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma13214710>. Acesso em: 25 set. 2024.

GARÇÃO, Maria Isabella Lima; TESSARO, Andre Luiz; GRACETTO, Augusto Cesar. ESTUDOS DE ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO EM ALGODÃO / METHYLENE BLUE ADSORPTION STUDIES ON COTTON. **Brazilian Journal Of Development**, [S.L.], v. 7, n. 2, p. 16499-16507, fev. 2021. Brazilian Journal of Development. <http://dx.doi.org/10.34117/bjdv7n2-327>. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.34117/bjdv7n2-327>. Acesso em: 06 nov. 2024.

HO, Y.S; MCKAY, G. A kinetic study of dye sorption by biosorbent waste product pith. **Resources, Conservation And Recycling**, [S.L.], v. 25, n. 3-4, p. 171-193, mar. 1999. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0921-3449\(98\)00053-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0921-3449(98)00053-6). Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(98\)00053-6](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(98)00053-6). Acesso em: 21 jun. 2025.

JUNG, Aliar Anacleto; TOCCHETTO, Marta Regina Lopes; GONÇALVES, Juliana Almeida. PAPA-BITUCAS: COLETOR PARA O DESCARTE CORRETO DE BITUCAS DE CIGARRO. *In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE QUALIDADE AMBIENTAL*, 9, 2014, Porto Alegre. *Anais eletrônicos [...]*. Porto Alegre: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental Seção Rio Grande do Sul (ABES-RS), 2014. Disponível em: <https://www.abes-rs.org.br/qualidade2014/trabalhos/id879.pdf>. Acesso em: 16 out. 2024.

MORAES, Samira Nascimento Stain. **Utilização da espectroscopia Raman para identificação de impurezas em frascos de vidro**. 2018. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Química, Unesp-Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 2018. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/3cf71eda-edb2-4839-abd2-feb9faebf06f>. Acesso em: 17 nov. 2024.

MÜLLER, Laura Cecilia *et al.* Adsorção do azul de metileno em serragem de *Pinus elliottii* (pinus) e *Drepanostachyum falcatum* (bambu). **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [S.L.], v. 24, n. 4, p. 687-695, ago. 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522019160344>. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522019160344>. Acesso em: 22 jun. 2025.

NASCIMENTO, Ronaldo Ferreira do *et al.* **Adsorção**: aspectos teóricos e aplicações ambientais. 2. ed. Fortaleza: Imprensa Universitária da Universidade Federal do Ceará (Ufc)Ufc, 2020. 309 p. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/53271> . Acesso em: 19 maio 2025.

OLIVEIRA, Fernanda Ramos Fernandes de; YOKOYAMA, Leonardo Querobim. Ensine a pescar: a instalação de bituqueiras não é o suficiente para o descarte correto de cigarros. **Educação Ambiental**, São Paulo, v. 1, n. 3, p. 02-09, ago. 2020. Disponível em: <https://educacaoambientalbrasil.com.br/index.php/EABRA/article/download/20/20>. Acesso em: 15 maio 2024.

PAIVA, Donald L. *et al.* **Introdução à espectroscopia**. São Paulo: Cengage Learning, 2010. p. 1-700.

PESSOA, Maria Eduarda Araújo. **OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE BIORSORÇÃO DE CORANTE TÊXTIL REACTIVE BLUE 222**. 2019. 85 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal da Paraíba Centro de Tecnologia, João Pessoa, 2019. Disponível em: https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/25376/1/MariaEduarda_TFC_final.pdf. Acesso em: 23 jun. 2025.

RIBEIRO, Guilherme de Melo. **PANORAMA DA POLUIÇÃO POR BITUCAS DE CIGARRO NA PRAIA DO LIDO/CRUSH, FORTALEZA/CEARÁ**. 2022. 86 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciências Ambientais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/69231>. Acesso em: 07 set. 2024.

SAATKAMP, Rodrigo Henrique. **ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO EM SERRAGEM DE EUCALIPTOS IN NATURA E PÓS TRATAMENTO POR PLASMA FRIO**. 2016. 47 f. TCC (Doutorado) - Curso de Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016. Disponível em: https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/167246/TCC_2_Rodrigo_Saatkamp.pdf?sequence=1. Acesso em: 21 jun. 2025.

SANGOREMI, Abidemi Anthony. Adsorption Kinetic Models and Their Applications: a critical review. **International Journal Of Research And Scientific Innovation**, [S.L.], p. 245-258, maio

2025. RSIS International. <http://dx.doi.org/10.51244/ijrsi.2025.120500019>. Disponível em: <https://doi.org/10.51244/IJRSI.2025.120500019>. Acesso em: 22 jun. 2025.

SILVA, Francisco *et al.* ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO UTILIZANDO CARVÃO ATIVADO PREPARADO A PARTIR DA CASCA DO TAMBORIL (*Enterolobium contortisiliquum*). **Química Nova**, [S.L.], v. 47, n. 5, p. 1-9, jan. 2024. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20230106>. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20230106>. Acesso em: 22 jun. 2025.

SOUZA, Alessandro Almeida de. **RECICLAGEM DE BITUCA DE CIGARRO PARA OBTENÇÃO DE CELULOSE E SEU DERIVADO XANTATO**. 2022. 48 f. TCC (Graduação) - Curso de Química Tecnológica, Universidade de Brasília, Brasília, 2022. Disponível em: https://bdm.unb.br/bitstream/10483/35218/1/2022_AlessandroAlmeidaDeSouza_tcc.pdf. Acesso em: 02 dez. 2024.

VIEIRA, T.; ARTIFON, S. S.; PAULINO, A. T. Adsorção de azul de metileno utilizando diferentes hidrogéis de quitosana. In: **Seminário de Iniciação Científica**, 27. Florianópolis: Universidade do Estado de Santa Catarina, [s.d.]. Disponível em: https://www.udesc.br/arquivos/udesc/id_cpmenu/6218/48_15034010137226_6218.pdf. Acesso em: 21 jun. 2025.

YUH-SHAN, Ho. Citation review of Lagergren kinetic rate equation on adsorption reactions. **Scientometrics**, [S.L.], v. 59, n. 1, p. 171-177, jan. 2004. Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1023/B:SCIE.0000013305.99473.cf>. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/B:SCIE.0000013305.99473.cf>. Acesso em: 21 jun. 2025.

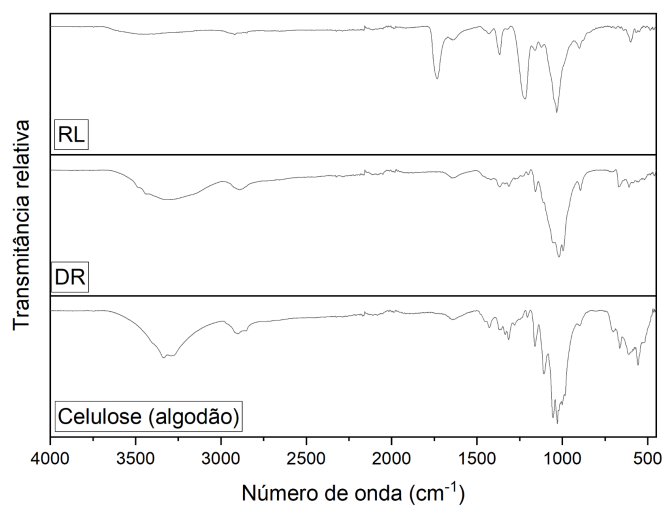
APÊNDICE A

Figura A1 - Bitucas passando pelo primeiro processo de higienização.



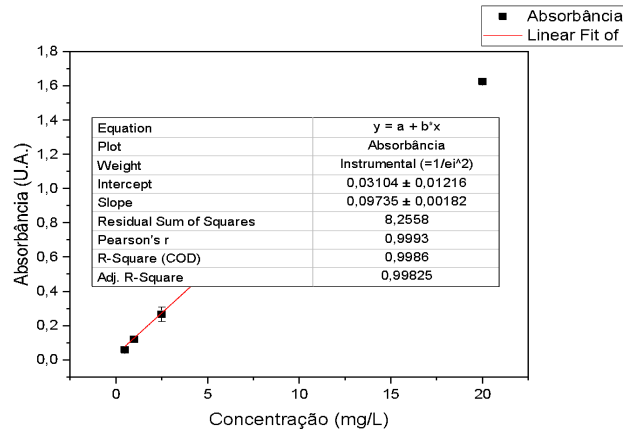
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura A2 - Espectro de FT-IR de comparação entre o acetato de celulose limpo, a celulose obtida e celulose pura (algodão).



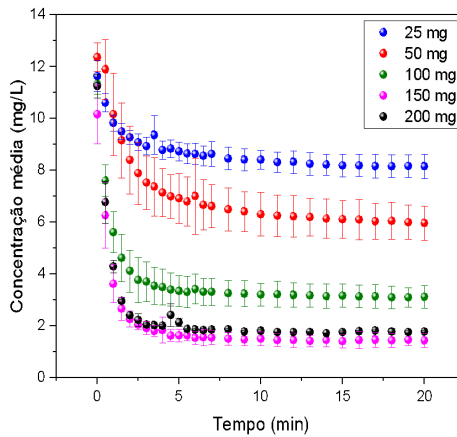
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura A3 - Dados do ajuste linear da curva de calibração feita para o azul de metileno em água, a 25 °C.



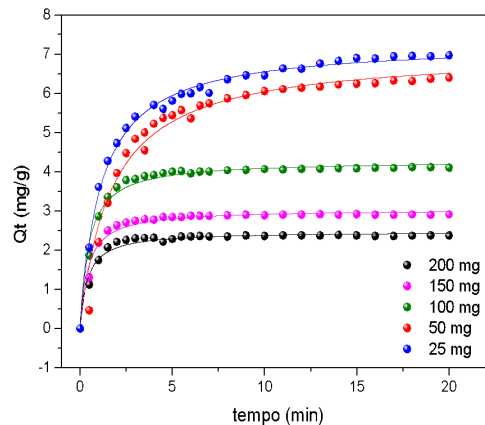
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura A4 - Concentração versus tempo para cinéticas de adsorção de azul de metileno variando a massa de adsorvente (celulose oriunda do acetato de celulose), com uma concentração de AM de 16 mg/L, a 25° C.



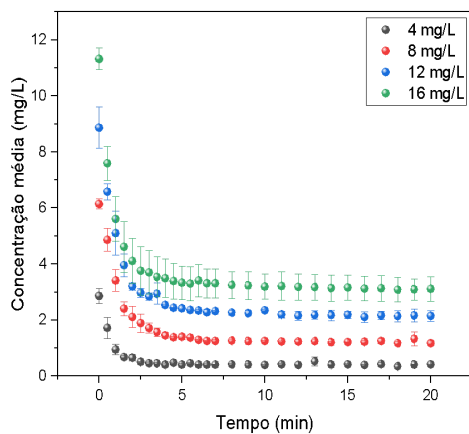
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura A5 - Capacidade adsortiva versus tempo para cinéticas de adsorção de azul de metileno variando a massa de adsorvente (celulose oriunda do acetato de celulose), com uma concentração de AM de 16 mg/L, a 25° C. Ajustes não lineares de segunda ordem.



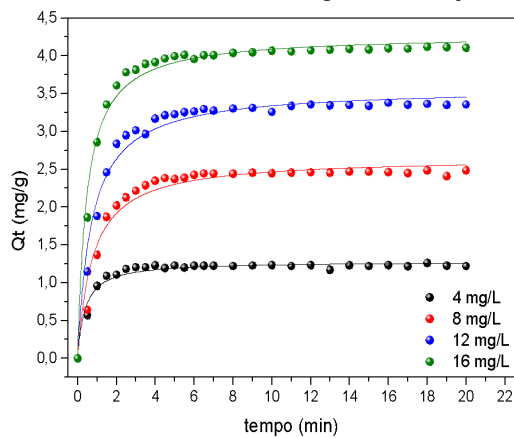
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura A6 - Concentração versus tempo para cinéticas de adsorção de azul de metileno variando a concentração de AM e massa fixa de adsorvente celulose 100 mg, a 25° C. Ajustes não lineares de segunda ordem.



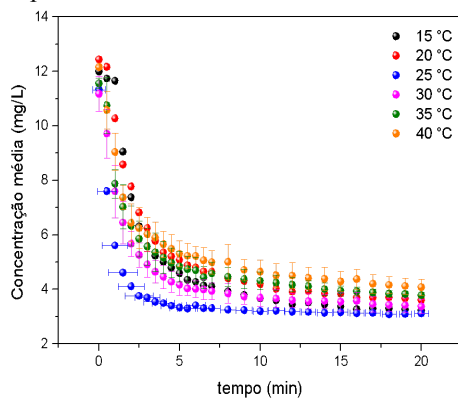
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura A7 - Capacidade adsortiva versus tempo para cinéticas de adsorção de azul de metileno variando a concentração de AM e massa fixa de adsorvente celulose 100 mg, a 25° C. Ajustes não lineares de segunda ordem.



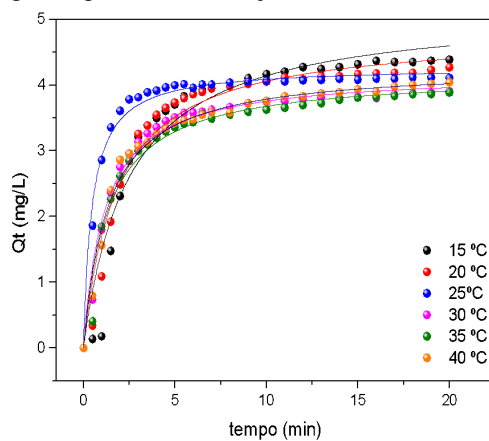
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura A8 - Concentração versus tempo para a variação de temperaturas, tendo massa de celulose e concentração de AM fixos, sendo 100 mg e 16 mg/L respectivamente.



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura A10 - Comparativos da variação de temperaturas versus Q_t (mg/L), tendo massa de celulose e concentração de AM fixos, sendo 100 mg e 16 mg/L respectivamente. Ajustes não lineares de segunda ordem.



Fonte: Autoria própria (2025).