

UTILIZAÇÃO DE CARVÃO ATIVADO DE CASCA DE BANANA COMO TRATAMENTO ALTERNATIVO DE EFLUENTES DE INDÚSTRIA TÊXTIL

Kate Johanna Mestre Faria Ramalho¹ e Rafaela Lopes Rodrigues¹

José Pedro Thompson Júnior²

Universidade São Francisco

katejohanna98@gmail.com

¹Aluna do Curso de Engenharia Química, Universidade São Francisco; Campus Bragança Paulista

²Professor Orientador, Curso de Engenharia Química, Universidade São Francisco; Campus Bragança Paulista.

Resumo. O Brasil é um dos cinco países do mundo com a maior produção de têxteis. Apesar dessa colocação trazer benefícios socioeconômicos, a indústria têxtil apresenta desafios em relação ao tratamento da água, pois a área corresponde a uma das maiores consumidoras desse recurso. Desta forma, o presente trabalho visa estudar o processo de adsorção utilizando como carvão ativado, a casca de banana para o tratamento de efluentes da indústria têxtil. O carvão ativado é um adsorvente de estrutura porosa, derivado do carbono, que é capaz de reter substâncias na superfície interna dos poros, sendo utilizado no tratamento de efluentes para remover compostos indesejados como corantes na indústria têxtil. O material pode ser obtido através da queima controlada de materiais os quais podem ser de origem residuária como a casca de banana, que possui em sua composição grupos de hidroxila e carboxila que asseguram a capacidade de adsorção de metais pesados e compostos orgânicos, elementos presentes em corantes têxteis. O presente trabalho utilizou de pesquisas bibliográficas com a finalidade de coleta de informações para análise e comparação de resultados, envolvendo o estudo da casca de banana como material adsorvente de efluentes de indústria têxtil. Com os dados dos estudos, pôde-se concluir que o melhor meio de ativação da casca de banana é em meio ácido com ácido fosfórico 1:1 e carbonização, métodos que aumentam a capacidade adsorptiva do material. Também foi possível notar que a casca de banana possui estruturas que auxiliam na adsorção de íons encontrados em efluentes têxteis. Então, o carvão da casca de banana, com o tratamento químico ou físico correto, pode ser uma opção de tratamento de efluentes têxteis.

Palavras-chave: Carvão, Tratamento, Efluentes, Adsorção, Corantes.

Abstract. Brazil is one of the five countries in the world with the largest textile production. Although this placement brings socioeconomic benefits the textile industry presents challenges in relation to water treatment, because the area corresponds to one of the biggest consumers of this resource. Thus, this study aims to analyze the adsorption process using as activated carbon, the banana peel for the treatment of effluents from the textile industry. Activated carbon is an adsorbent with a porous structure, derived from carbon, which is capable of retaining substances on the inner surface of the pores, being used in the treatment of effluents to remove unwanted compounds such as dyes in the textile industry. The material can be obtained through the controlled burning of materials which can be of residual origin such as banana peel, which has in its composition hydroxyl and carboxyl groups that ensure the adsorption capacity of heavy metals and organic compounds, elements present in textile dyes. The present work used bibliographical research in order to collect information for analysis and comparison of results, involving the study of banana peel as adsorbent material

for textile industry effluents. With the data from the studies, it could be concluded that the best way to activate the banana peel is in an acidic medium with 1:1 phosphoric acid and carbonization, methods that increase the adsorptive capacity of the material. It was also possible to notice that the banana peel has structures that help in the adsorption of ions found in textile effluents. So, banana peel charcoal, with the correct chemical or physical treatment, can be an option for treating textile effluents.

Key words: Charcoal, Treatment, Effluents, Adsorption, Dyes.

Introdução

O tingimento de tecidos é uma arte de milhares de anos e que, atualmente, possui uma grade enorme de corantes disponíveis para essa atividade. Essa etapa é uma das mais importantes para o processo da indústria têxtil, tendo em vista que ela define não apenas a beleza mas também a qualidade do produto final, como o grau de fixação em relação à exposição à luz, lavagem e transpiração que são características básicas solicitadas pelos consumidores. No entanto, o processo de lavagem do tecido na indústria para a retirada do excesso de corante produz um efluente prejudicial ao meio ambiente e à sociedade. A água residual desse procedimento possui inúmeros corantes e produtos químicos intermediários que apresentam alta toxicidade e alta coloração do ponto de vista ambiental. A remoção da cor desse efluente é um dos maiores problemas desse setor, que busca uma alternativa que seja altamente eficiente, seja economicamente viável para o processo e diminua os impactos ambientais do segmento têxtil.

Em um presente mais preocupado com a sustentabilidade, os impactos ambientais das indústrias têxteis se tornam um assunto importante para estudo, já que é um ramo em constante crescimento. Apesar de desempenhar um papel significativo na sociedade, as indústrias têxteis são perigosas para o meio ambiente, tendendo a se alocar em países onde a fiscalização é falha de alguma forma não garantindo os cuidados necessários, se tornando a segunda em maior poluição ambiental. Na mesma proporção em que se consome água para essa produção, se produz efluentes com grande descarga de químicos tóxicos, como os corantes. Ainda assim, o uso destes é uma fase essencial para a preparação do produto final, sendo assim, descartar não é uma opção.

Os corantes utilizados para o processo de tingimento não se degradam no meio ambiente, causando impactos na vida aquática, como a proliferação de algas. Os humanos podem ser afetados pela toxicidade dos efluentes têxteis, através da ingestão da água não tratada corretamente. Sugere-se, então, que é necessário repensar nas estratégias de tingimento ou de tratamento desses efluentes.

Um método de tratamento físico que apresenta efetivação na remoção em diversos tipos de corantes é o de adsorção através de carvão ativado. A eficiência pode ser melhorada em altas doses, porém, a regeneração e a reutilização diminuem essa eficiência. Atualmente vem sendo estudado a utilização de materiais baratos para a produção de adsorventes de corantes como quitina, quitosana, serragem, cascas de vegetais, restos de algodão e lodo ativado.

O presente trabalho propôs um estudo sobre o tratamento com adsorvente alternativo para a retirada de coloração dos efluentes da indústria têxtil, tendo como objetivo, a análise e comparação de pesquisas envolvendo o assunto. A proposta é a utilização de um carvão ativado de casca de banana como adsorvente para a remoção com alta eficiência da coloração da água. Diminuindo, assim, os impactos ambientais causados e propondo uma alternativa que pode ser economicamente viável e que atenda as necessidades ambientais.

Referencial Teórico

Efluentes Têxteis

Em vista do grande crescimento industrial necessário para a sociedade, a visão sobre a poluição do meio ambiente deve ser crítica. Ao mesmo tempo que as indústrias ganham espaço, os resíduos gerados devem ser devidamente tratados e avaliados da melhor forma possível.

A remoção da coloração dos efluentes é um grande problema enfrentado pelo setor têxtil, já que a sua degradação é complicada gerando dificuldades de tratamento por sistemas convencionais, geralmente lodo ativado. Os corantes acabam contribuindo para a poluição uma vez que dificultam a penetração dos raios solares, prejudicando o processo de fotossíntese de algumas espécies além de serem potencialmente cancerígenos.

Para o restante do tratamento dos efluentes, as técnicas de coagulação, separação por flotação ou sedimentação apresentam eficiência. Porém, para a remoção de cor, a adsorção por carvão ativado se torna uma opção mais eficiente.

Adsorção

No processo de adsorção, as moléculas do soluto se acumulam na superfície do adsorvente, conseqüentemente, aumentando a área de superfície e diminuindo a concentração do carvão na fase líquida, até atingir a fase de equilíbrio. A adsorção pode ser dividida em física ou química. Ela é física quando o processo de adsorção é realizado através de forças atrativas de van der Waals. Em fase líquida, é comum ocorrer a adsorção de forma física através destas forças relativamente fracas, devido a isso, a natureza do adsorvente não é alterada, então a dessorção pode ser facilmente desenvolvida. Já a adsorção química ocorre quando há o compartilhamento ou troca de elétrons entre adsorvido e adsorvente. Neste caso, as ligações são mais fortes e a natureza do adsorvente pode ser alterada, o que também, exige maior energia para realizar a dessorção. (NATURALTEC, 2017)

As isotermas de adsorção são curvas que indicam como que o adsorvente adsorverá o soluto, se a purificação necessária pode ser alcançada, a quantidade máxima de soluto que será adsorvido e se o adsorvente pode ser economicamente viável.

A isoterma linear indica que a quantidade adsorvida é proporcional à concentração do fluido, porém não indica a capacidade máxima para adsorção. A isoterma côncava são chamadas também de favoráveis, pois extraem quantidades altas em baixos níveis de concentração de adsorvato. As isotermas convexas são chamadas também de desfavoráveis, pois possuem baixa capacidade de remoção em baixas concentrações. (SCHONS)

Segundo a classificação de Giles, as isotermas estão divididas em quatro classes (S, L, H e C) e quatro subgrupos (1, 2, 3 e 4), como mostrado na Figura 1:

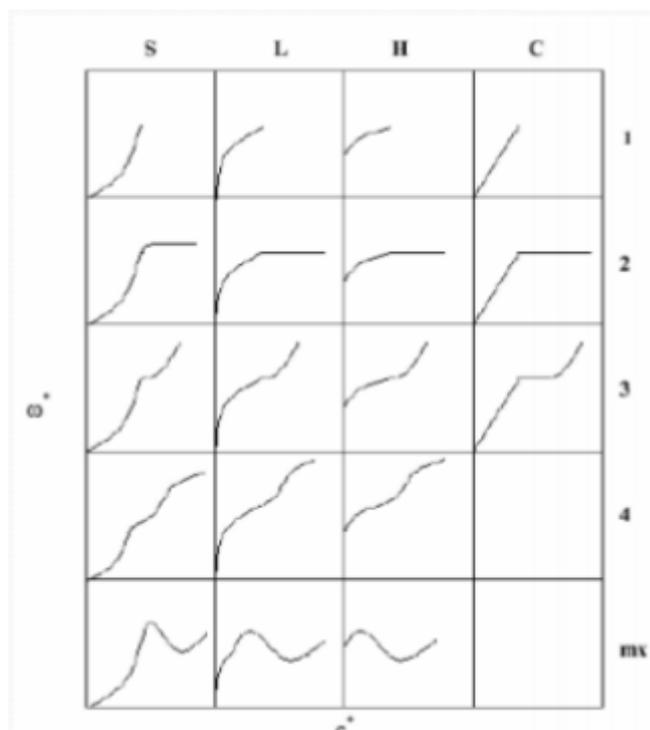


Figura 1 - Classificação de Giles.

A isoterma tipo S (sigmoidal), apresenta uma curvatura inicial voltada para cima, pois as interações adsorvente-adsorbato são mais fracas que as outras. As isotermas tipo L (Langmuir) possuem curvatura inicial voltada para baixo devido à diminuição da disponibilidade de sítios ativos. As isotermas tipo H (high affinity) são as que aparecem quando o adsorbato tem grande afinidade pelo adsorvente. A quantidade adsorvida inicialmente é alta e seu equilíbrio é alcançado em seguida. As isotermas tipo C (constant partition) são as que possuem um início linear indicando que o número de sítios ativos é constante. (SCHONS)

O subgrupo 2 indica a saturação da superfície em que o adsorbato tem mais afinidade pelo solvente do que pelas moléculas já adsorvidas. Já o subgrupo 3 é caracterizado pela subida após um ponto de inflexão. O subgrupo 4 indica a formação de camadas múltiplas de adsorbato adsorvido. E o subgrupo mx, apresenta a isoterma com um máximo a altas concentrações. (SCHONS)

O estudo sobre a cinética do mecanismo de adsorção, pode ser definido como o monitoramento da taxa de transferência de massa do soluto para a superfície do adsorvente. (HOWE et al, 2016)

Para a adsorção acontecer, o adsorbato precisa se difundir pela camada limite da partícula do adsorvente, e logo após, deve-se difundir no interior da partícula. Essa camada limite é formada quando o material adsorvente está imerso em um fluido, o processo de difusão dentro da camada limite é chamado de difusão no filme. À partir da etapa de difusão no filme, pode-se prosseguir a difusão no poro, a qual se refere a difusão do adsorbato pelos poros do adsorvente, ou a difusão de superfície, que se refere a aderência do adsorbato na superfície dos poros prosseguida de uma movimentação pela mesma. Esses mecanismos são demonstrados na Figura 2:

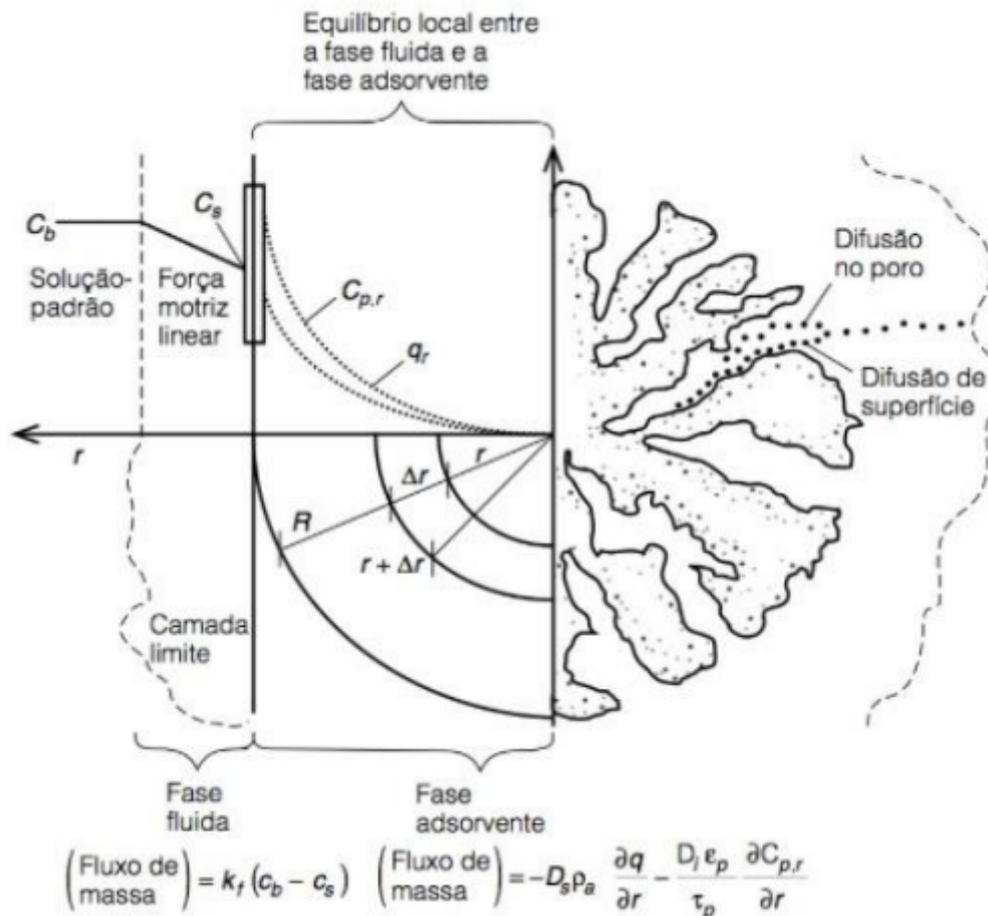


Figura 2 - Mecanismos da Adsorção

Casca de banana

O carvão ativado pode ser feito com rejeitos industriais alimentícios que normalmente são descartados e perdem seu valor. Sendo assim, são economicamente viáveis. A banana, por sua vez, é a segunda fruta mais consumida no país, tendo sua casca descartada, utilizada como alimentação de animais ou até em compostagem. Existem, atualmente, pouca literatura sobre o reaproveitamento dos resíduos da banana. A utilização desse resíduo reduziria a poluição ambiental e ainda agregaria valor à cultura da banana.

A casca da banana representa 30% a 40% do peso total da fruta, apresenta em sua composição grupos de hidroxila e de carboxila da pectina, o que garante a sua capacidade de adsorção de metais pesados e compostos orgânicos.

Metodologia

A metodologia utilizada neste trabalho está apresentada esquematicamente no fluxograma da Figura 3, onde se encontra detalhadamente o processo de seleção de trabalhos e informações estudadas e discutidas, análises realizadas e conclusões obtidas.



Figura 3 - Fluxograma representativo da metodologia utilizada no atual trabalho.

Primeiramente foi realizada uma pesquisa bibliográfica nas plataformas *Research Gate* e *Google Acadêmico* para a obtenção de informações a fim de realização de análises de dados e comparação de resultados. Foram utilizadas as palavras chaves: “carvão ativado”, “processo de adsorção” e “casca de banana”. A escolha dos trabalhos base se deu a partir da relevância com o assunto estudado e dados apresentados para análise.

Para cada trabalho estudado foi observada a eficiência do carvão ativado casca de banana, observando principalmente a capacidade de adsorção e outras características da casca de banana e do carvão ativado de casca de banana.

Foi analisado e discutido o experimento realizado por A. M. Bugiereck (2014), em Florianópolis, considerando a metodologia de preparação de amostras, ensaios realizados e resultados obtidos para a determinação da eficiência do carvão ativado de casca de banana como adsorvente para corantes, onde foram obtidos resultados positivos para o projeto de tratamento de efluentes têxtil.

O trabalho de Canciam e Pereira (2020) foi ponderado a partir dos resultados obtidos pelos experimentos realizados, que demonstraram o ponto de carga zero da casca de banana bem como possíveis estruturas da mesma.

Na pesquisa de Oliveira et al (2017) foram examinados a metodologia e os resultados que apresentaram boas taxas de adsorção de íons cobre em farinha de casca de banana tratada e pirolisada.

Por fim, foi analisado o trabalho de Rodrigues et al. (2021), com intenção de verificar a capacidade adsorptiva da casca de banana em diferentes meios de ativação.

Resultados e Discussão

Os resultados apresentados neste tópico estão divididos em 4 subtópicos, onde se apresentam as metodologias e resultados dos trabalhos estudados, a comparação de dados e, por fim, o resultado mais eficiente.

Neste trabalho, foram utilizadas amostras de cascas de banana *in natura* higienizadas, picadas e secas em uma estufa durante 24 horas em uma temperatura de 60°C. Depois desse processo, as cascas de banana foram picadas, trituradas e peneiradas até a granulometria menor que 0,6 mm, tendo como material resultante uma farinha que necessitou ser armazenada sob refrigeração. Para a primeira amostra, essa farinha foi submetida ao processo de ativação química por ácido fosfórico numa proporção 1:1 durante 1 hora. Após o processo, foi seca a 100°C em estufa e submetida à carbonização em mufla à atmosfera ambiente por 2 horas a 600°C com taxa de aquecimento de 10°C.min⁻¹.

Ao final da carbonização, a amostra foi lavada com uma solução de bicarbonato de sódio 1% a 80°C até a neutralização do pH, e em seguida seca a 100°C em estufa até sua massa permanecer constante. Já na segunda amostra, a farinha foi carbonizada a 400°C por 2 horas sem qualquer tratamento químico. O carvão obtido foi macerado até apresentar-se como um pó fino.

Os ensaios de cinética foram realizados em processos de batelada. Utilizou-se 1g de amostra de cada carvão em 500 mL de solução contendo 15mg.L⁻¹ do corante azul de metileno em temperatura de 20°C, sob constante agitação. A cada 5 minutos da primeira hora, foram coletadas amostras da solução para medidas de concentração, e após a primeira hora aumentou o intervalo para 30 minutos. A análise de concentração do corante azul de metileno foi realizada no comprimento de onda de 665 nm em um espectrofotômetro UV-Vis.

Para a obtenção de isotermas, as amostras foram analisadas em equilíbrio. Preparou-se uma solução de índigo blue com 100 mg.L⁻¹ e transferiu-se a 8 erlenmeyers, contendo 300 ml cada. Foi necessário pesar oito amostras de massa igual a 0,05 g à 0,4 g, com variação de 0,05 g, as quais foram colocadas nos Erlenmeyers. Anotou-se o pH inicial e submeteu-se a agitação por 5 h em um shaker. Após a agitação e o equilíbrio atingido, foram recolhidos 5 mL de cada amostra, em triplicata, os quais foram submetidos à centrifugação por 7 minutos à 3600 rpm. Na sequência, as amostras foram quantificadas mediante a leitura da absorbância em 665 nm no espectrofotômetro UV-Vis.

A Figura 4 apresenta a concentração de corante na solução em função do tempo, sendo a Figura 4a com carvão ativado com ácido fosfórico 1:1 e a Figura 4b com carvão apenas carbonizado a 400°C por duas horas.

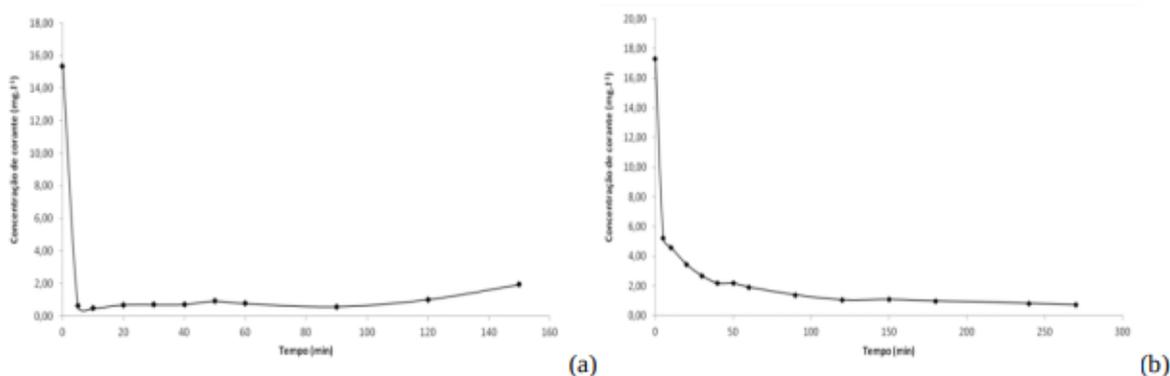


Figura 4 - Concentração de corante na solução em função do tempo. (a) com carvão ativado com ácido fosfórico 1:1 por 1 hora (amostra 1) e (b) carvão apenas carbonizado a 400°C por 2 horas (amostra 2). (Fonte: BUGIERECK, 2014)

Houve uma remoção do corante de aproximadamente 98% em vinte minutos para a amostra 1 e aproximadamente 96% para a amostra 2. Considerando que houve interferência no pH na amostra 1.

Com a obtenção da linearização da relação entre concentração e tempo, pôde-se definir qual o mecanismo cinético que se enquadra melhor ao caso estudado com os menores desvios apresentados. Nas Figura 5 e Figura 6, estão representados respectivamente os modelos de pseudo-primeira e pseudo-segunda ordem. Assim, pôde-se verificar a capacidade de reutilização do carvão.

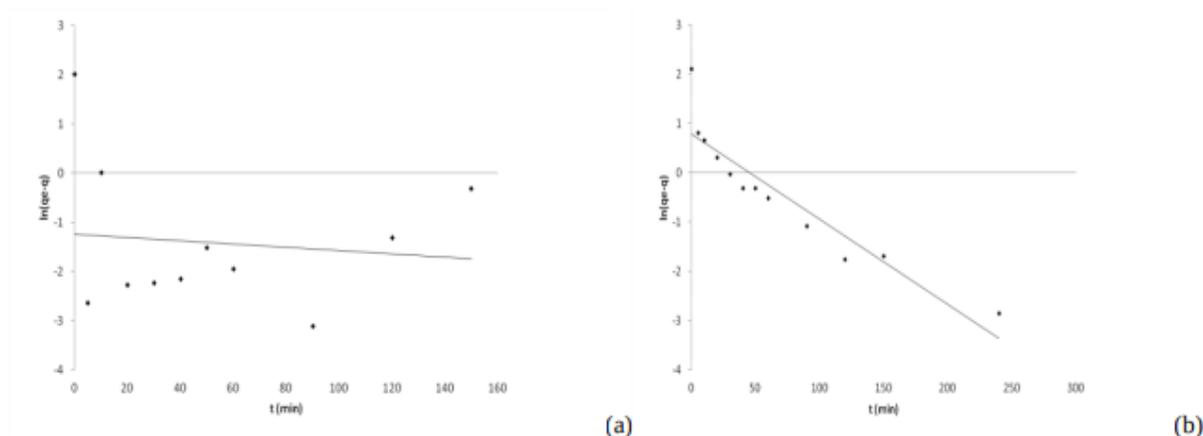


Figura 5 - Linearização para o modelo pseudo-primeira ordem, (a) resultados obtidos com carvão ativado com ácido fosfórico 1:1 por q hora e (b) com carvão somente carbonizado a 400°C. (Fonte: BUGIERECK, 2014)

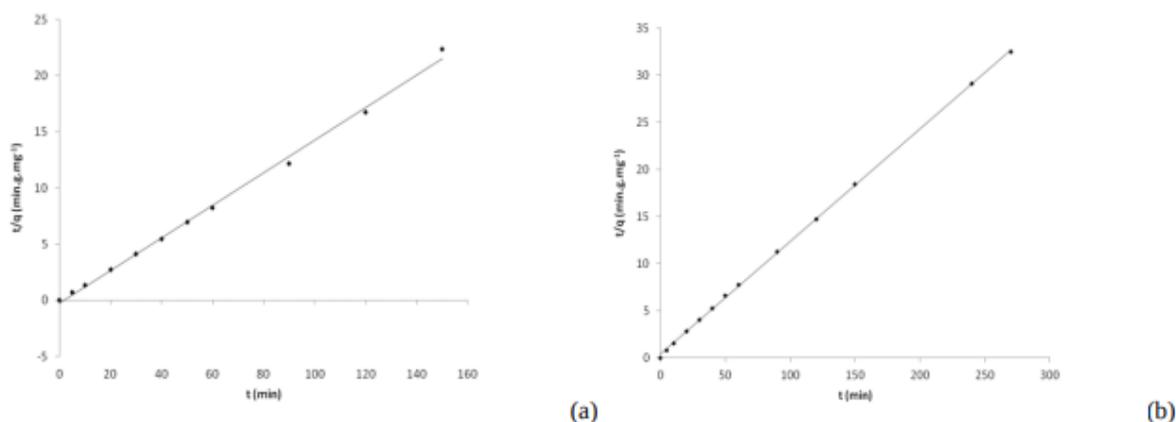


Figura 6 - Linearização para o modelo pseudo-segunda ordem, (a) resultados obtidos com carvão ativado com ácido fosfórico 1:1 por q hora e (b) com carvão somente carbonizado a 400°C. (Fonte: BUGIERECK, 2014)

O ajuste estatístico foi realizado por comparação dos coeficientes de determinação (R^2), e a partir dos valores de q_e calculados com o ajuste dos modelos e de q_e obtidos com os resultados do experimento, para modelos de pseudo-primeira e pseudo-segunda ordem. Para a amostra 1, obteve-se experimentalmente um q_e de $7,43 \text{ mg.g}^{-1}$, porém o valor calculado foi de $6,89 \text{ mg.g}^{-1}$. Já para a amostra 2, foi calculado um q_e de $8,36 \text{ mg.g}^{-1}$ e foi obtido experimentalmente um valor igual a $8,30 \text{ mg.g}^{-1}$.

Baseando-se nos dados obtidos, o mecanismo cinético que melhor se adequa é o de adsorção pseudo-segunda ordem, o que possibilita a adsorção com possível formação de complexos ou grupos superficiais, devido ao mecanismo de pareamento iônico. Dessa forma, a possibilidade de reutilização do adsorvente é afetado, pois seria difícil fazer a remoção da sua superfície.

O equilíbrio de adsorção do corante foi expresso nas Figuras 7 e 8 em isotermas de adsorção nos modelos de Langmuir e Freundlich.

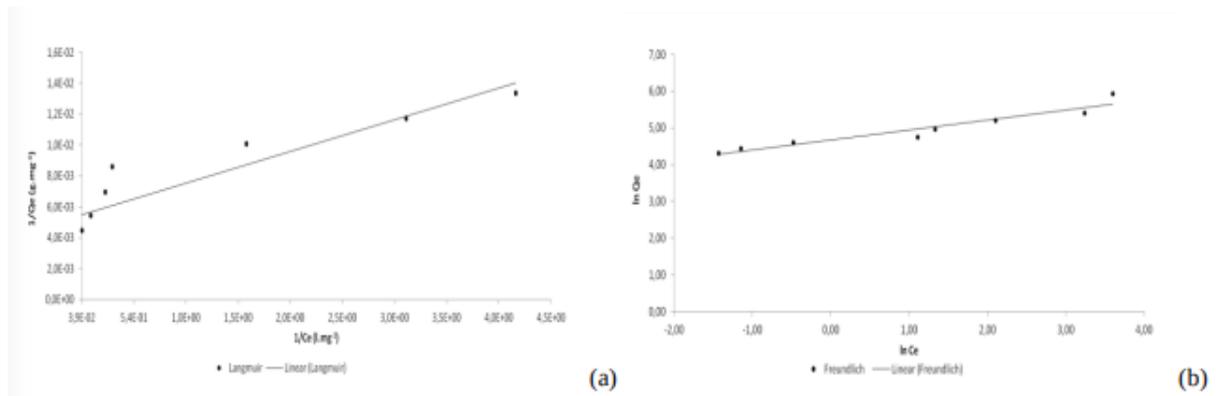


Figura 7 - Linearização da isoterma de adsorção para o carvão ativado com ácido fosfórico 1:1 por 1 hora em $pH_{inicial} = 6,0$. (a) Isoterma de Langmuir; (b) Isoterma de Freundlich. (Fonte: BUGIERECK, 2014)

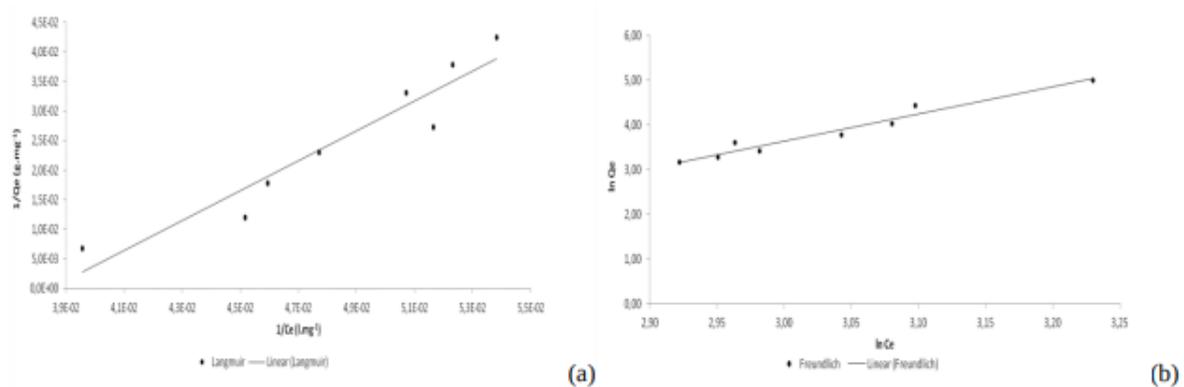


Figura 8 - Linearização da isoterma de adsorção para o carvão carbonizado a 400°C em $pH_{inicial} = 6,0$. (a) Isoterma de Langmuir; (b) Isoterma de Freundlich. (Fonte: BUGIERECK, 2014)

As Tabelas 1 e 2 apresentam os parâmetros ajustados das isotermas de Freundlich e Langmuir para os dois carvões estudados.

Tabela 1 - Parâmetros das isotermas de Langmuir e Freundlich para o carvão ativado com ácido fosfórico 1:1 por 1 hora. (Fonte: BUGIERECK, 2014)

Langmuir			Freundlich			
q_{max} (mg.g ⁻¹)	K (L.mg ⁻¹)	R ²	1/n	n	$K_F ((mg.g^{-1}).(L.mg^{-1})^{1/n})$	R ²
185,185	2,700	0,805	0,27	3,67	107,168	0,918

Tabela 2 - Parâmetros das isotermas de Langmuir e Freundlich para o carvão carbonizado a 400°C. (Fonte: BUGIERECK, 2014)

As Langmuir			Freundlich			
q_{max} (mg.g ⁻¹)	K (L.mg ⁻¹)	R ²	1/n	n	$K_F ((mg.g^{-1}).(L.mg^{-1})^{1/n})$	R ²
10,288	0,038	0,904	6,057	0,16	$4,85 \times 10^{-7}$	0,957

Segundo análises realizadas, a isoterma que melhor se enquadrou para o estudo foi a de Freundlich, sendo favorável para a amostra 1 e desfavorável para a amostra 2, apresentando adsorção multicamada.

Para entender os resultados, foi estudada a morfologia dos materiais obtidos, amostras 1 e 2, através da microscopia eletrônica de varredura (MEV). Com intenção de avaliar as alterações das estruturas devido aos diferentes parâmetros empregados. O material em pó, previamente seco foi aderido a um suporte metálico, com fita de carbono e recoberto com um filme de ouro, devido às características isolantes do carvão. As ampliações aplicadas foram de 5000 vezes.

A análise morfológica mostra a diferença entre os poros da superfície da matéria prima utilizada e das amostras preparadas. Onde é possível notar que a matéria prima da Figura 9a possui uma superfície mais lisa, enquanto a amostra 1 (b) e a amostra 2 (c) possuem um aumento de densidade dos poros.

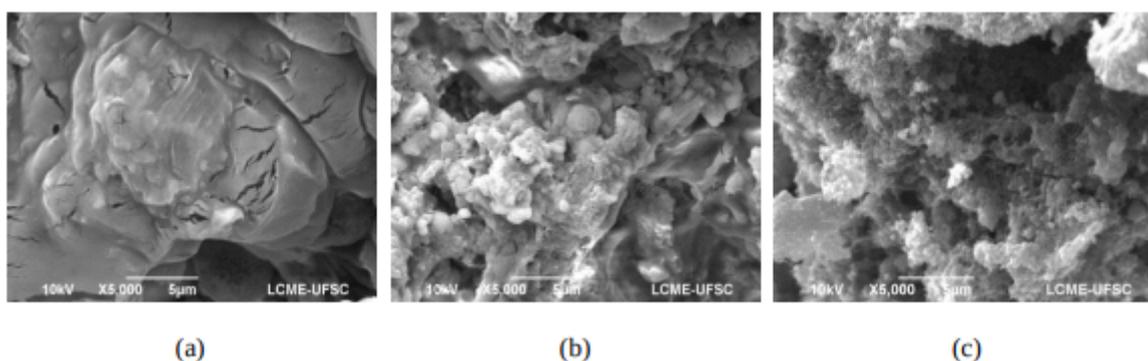


Figura 9 - Micrografias de MEV com ampliação de 5000 vezes para (a) MP, (b) amostra somente carbonizada e (c) amostra ativada e carbonizada. (Fonte: BUGIERECK, 2014)

Para a amostra 1, obtiveram-se poros menores e bem distribuídos. O aumento na densidade dos poros deve-se à corrosividade do ácido fosfórico e seu efeito. Ele também atua como um catalisador para promover a quebra das ligações aril-éter, para a formação de ésteres fosfóricos por meio da combinação do agente ativador com os grupos hidroxila da lignina na superfície da matéria prima do carvão ativado. Essas reações fazem com que a cadeia se separe e haja expansão estrutural e redistribuição do carbono remanescente, assim, ocorre a polimerização dos grupos fosfatos com o aumento da temperatura, aumentando a quantidade de mesoporos. Depois que o ácido é removido, a matriz ficará em um estado expandido com uma estrutura de poros que serão utilizados para a adsorção.

Para a amostra 2, também foi obtido uma porosidade maior do que a matéria prima utilizada, já que a carbonização causa a volatilização de compostos voláteis e gases leves, assim, formando uma estrutura porosa.

Estudo de Canciam e Pereira - Caracterização química da casca de banana nanica como bioissorvente de íons fluoreto

Canciam e Pereira (2020) utilizaram a espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (F-TIR) e ponto de carga zero (PCZ) para caracterizar a superfície adsorvente da casca de banana nanica utilizando as metodologias de Canciam (2017) e Robles & Regalbuto (2004) respectivamente. A Figura 10 apresenta a determinação do PCZ cujo ponto está próximo de 7,2.

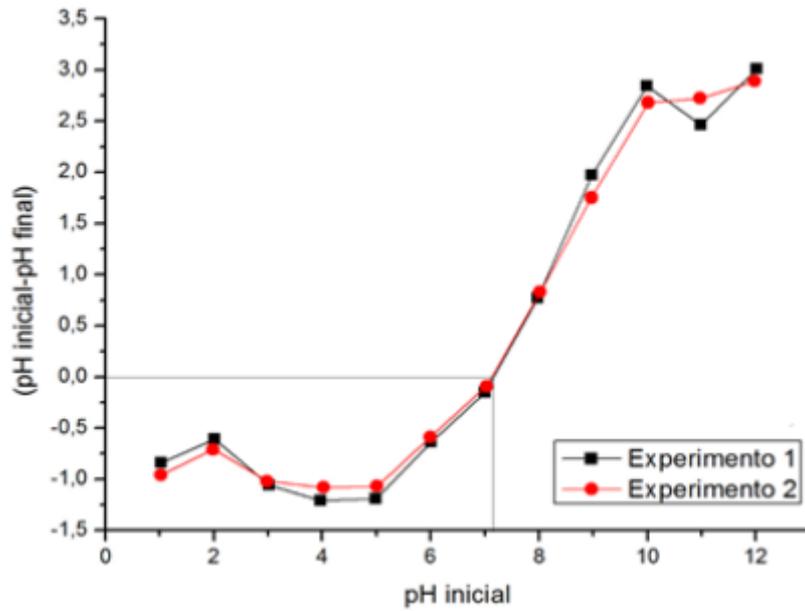


Figura 10 - Determinação do PCZ.

Na Figura 11 pode-se observar as bandas de absorção 1040×10^2 , 1630×10^2 , 2914×10^2 , $3330 \times 10^2 \text{ m}^{-1}$. As correlações do espectro com as estruturas envolvidas na adsorção de íons fluoreto estão na tabela 3.

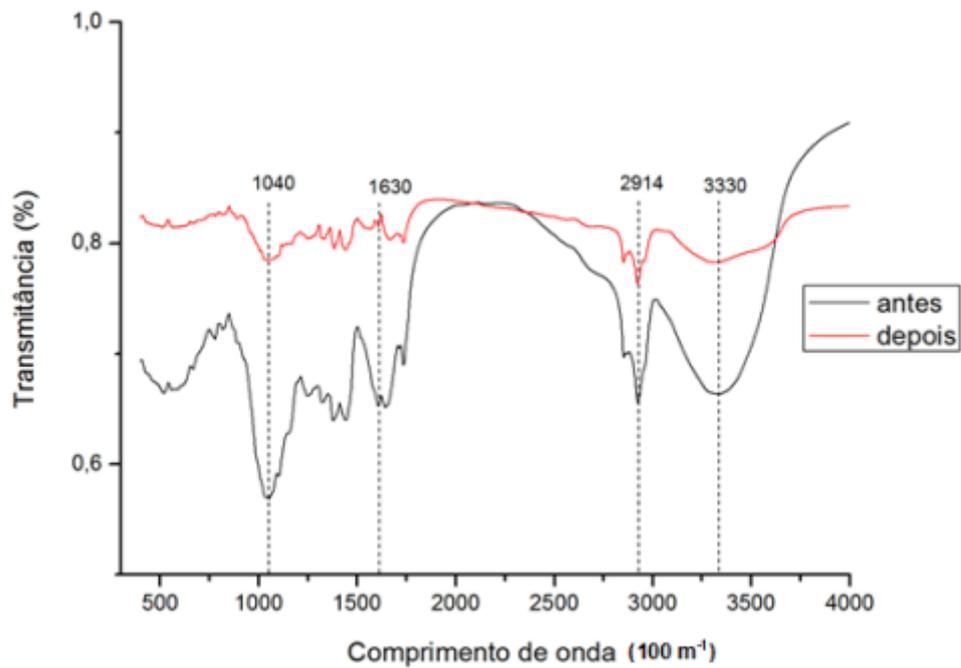


Figura 11 - Espectros vibracionais F-TIR

Tabela 3 - Correlação no Infravermelho

Bandas de absorção (10 ² m ⁻¹)	Grupos	Estruturas encontradas
1040	C-O	Celulose, hemiceluloses, pectina e lignina
1630	C=C	Lignina
2914	C-H	Celulose e lignina
3330	N-H	Leucina, valina, treonina e fenilalanina

Com isso, pode-se concluir que as estruturas químicas encontradas na casca de banana estão presentes no processo de adsorção de íons fluoreto.

Estudo de Oliveira et al. - Reaproveitamento da casca de banana para tratamento de soluções aquosas contendo cobre

Oliveira et al (2017) estudou a adsorção de íons cobre em farinha de casca de banana, observando as variáveis de tempo de adsorção, massa e tipo de adsorvente.

A preparação da farinha se seguiu utilizando 900 g de cascas de banana lavadas em água destilada, cortadas e secas em estufa a 60°C por 24h e depois a 100°C por 48h, após, as cascas foram postas em liquidificador doméstico, transformando em farinha de partículas entre 60 a 100 mesh.

Para o tratamento químico e térmico da casca de banana, 50g da farinha foram tratadas com 1L de solução de NaOH (0,5 mol.L⁻¹) a 25°C por 1h com agitação mecânica. Esta farinha foi lavada com água destilada até que seu pH se encontra próximo do neutro. Depois, a amostra foi levada para uma estufa a 50°C por 48h e depois por 24h a 70°C. O tratamento químico foi seguido por 60 g da farinha em pirólise à temperatura de 600°C por 2h em atmosfera inerte.

A solução de cobre foi feita com uma concentração de 40 mg.L⁻¹ de sulfato de cobre II anidro 98%. As concentrações de íons Cu⁺² foram monitoradas através de espectrometria de absorção atômica.

Os resultados das porcentagens de adsorção de cobre em cada experimento podem ser observados na Tabela 4 e Figura 12.

Tabela 4 - Resultados Obtidos

Experimentos	Massa da farinha (mg)	Tempo de adsorção (min)	Tipo de farinha	Porcentagem de Cu ²⁺ adsorvido (%)	Concentração final de Cu ²⁺ (mg.L ⁻¹)
1	30	30	tratada	67,4	13,0
2	70	30	tratada	94,8	2,1
3	30	60	tratada	71,4	11,4
4	70	60	tratada	94,5	2,2
5	30	45	in natura	37,1	25,2
6	70	45	in natura	46,9	21,2
7	30	45	pirolisada	98,6	0,5
8	70	45	pirolisada	97,6	1,0
9	50	30	in natura	46,2	21,5
10	50	60	in natura	49,6	20,5
11	50	30	pirolisada	98,3	0,7
12	50	60	pirolisada	98,6	0,6
13	50	45	tratada	89,5	4,2
14	50	45	tratada	86,4	5,4
15	50	45	tratada	90,8	3,7

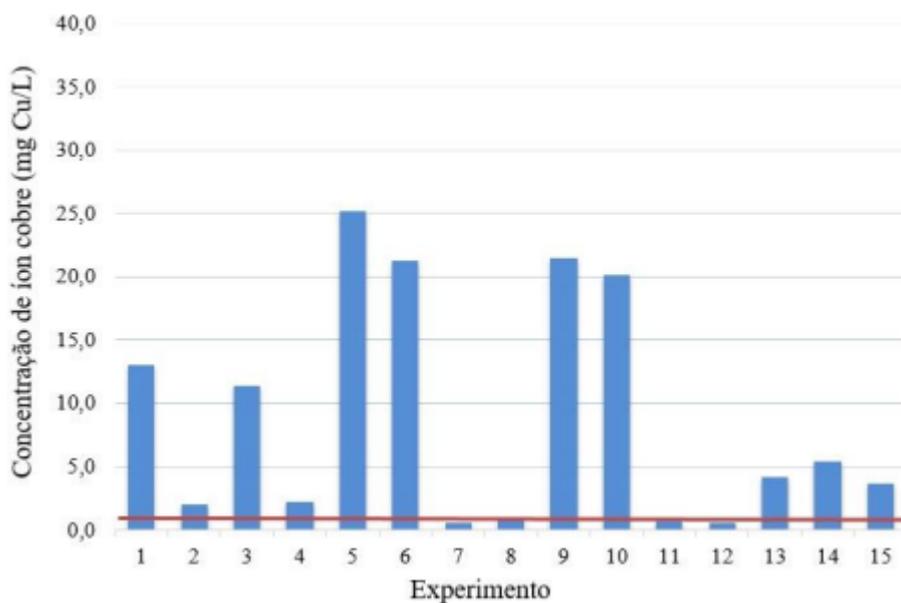


Figura 12 - Gráfico da concentração final de íon cobre na solução de cada experimento.

A linha vermelha no gráfico da Figura 12 representa a concentração máxima estabelecida pelo CONAMA (Resolução No 357 de 2005) de 1,0 mg.L⁻¹, então, os experimentos com a farinha pirolisada se encontraram dentro da legislação, devido o abrigo de íons Cu²⁺ nos poros da farinha, que foram aumentados de tamanho consideravelmente depois do processo de pirólise.

Os experimentos 9, 4 e 15 adsorveram mais de 90% de íons Cu²⁺, chegando próximo da legislação. A elevada taxa de adsorção, pode ser explicada por causa da mercerização do complexo lignocelulósicos da biomassa causados pelo NaOH, que por sua vez, aumentam a área superficial e deixa os sítios da farinha mais exposta e ativas para adsorver os íons de cobre. A adsorção de Cu²⁺ de 40 mg por litro não foi satisfatória na farinha in natura, mesmo com bom potencial de adsorção, com aproximadamente 50% de remoção de íon Cu²⁺ no experimento 10.

Estudo de Rodrigues et al. - Casca de banana como bioadsorvedor de pigmentos de meio aquoso

A casca de banana, adquirida em escolas, foi lavada com água destilada e cortadas em pedaços com aproximadamente 5 cm. Foram utilizadas amostras ativadas em meio ácido, básico e natural (água destilada).

Para a ativação em meio ácido, foi utilizado uma solução de ácido clorídrico a 0,5mol/L, onde as cascas de banana ficaram submersas por duas horas sob agitação manual. Após esse procedimento, as cascas de banana foram lavadas com um banho de imersão, trocando a água a cada 30 minutos, por 4 vezes, com objetivo de retirada de resíduos dos poros. Em seguida, o material foi seco à luz do sol durante 3 dias e após em estufa a 65°C durante dois períodos de 12 horas com descanso de 12 horas. Com a finalização da secagem, o material foi triturado.

Para a ativação em meio básico, foi utilizado uma solução de hidróxido de sódio a 0,5 mol/L e uma solução de bicarbonato de sódio a 0,5 mol/L utilizando o mesmo procedimento do meio ácido.

A ativação em meio ácido apresentou alteração na coloração de incolor para levemente marrom com aspecto turvo. No meio básico com NaOH, a alteração foi de incolor para marrom intenso com aspecto turvo, onde as cascas de banana começaram a escurecer até um tom verde-escuro, podendo ser o processo de decomposição do material. Já com a ativação de NaHCO_3 , a solução passou de incolor para marrom com aspecto levente turvo, as cascas escureceram em direção ao centro, que se manteve com o aspecto característico da casca de banana (amarela), sem degradação aparente.

Segundo a Tabela 5, o material ativado em meio ácido obteve o melhor rendimento (6,62%).

Tabela 5 - Rendimento mássico da casca de banana preparada em diferentes meios. (RODRIGUES, 2021)

	Meio ácido	Meio básico NaOH	Meio básico NaHCO_3	Meio natural
Massa inicial in natura	1489,17g	2398g	3500g	1123,43g
Massa final (pó)	98,60g	61,6609g	149,80g	60,06g
Rendimento	6,62%	2,57%	4,28%	5,35%

Para a análise estrutural das amostras, foi realizada a análise microscópica MEV.

Para a definição do tamanho da partícula, foram realizadas análises granulométricas por meio de peneiramento, utilizando um agitador de peneiras com 6 peneiras de respectivamente 8, 10, 16, 30, 50 e 200 Mesh.

A análise estrutural mostrou que a ativação ácida apresentou menor dano da superfície do que a ativação básica, a qual causou danos severos.

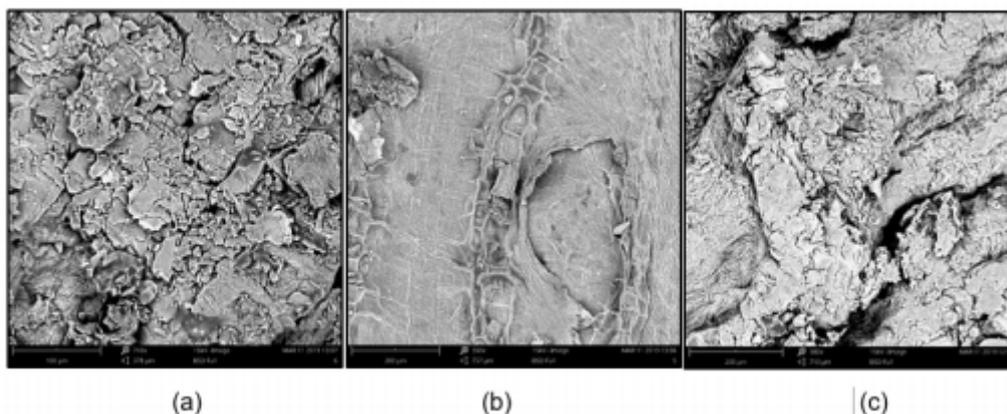


Figura 13 - MEV Casca de banana em (a) meio ácido, (b) meio básico, (c) meio natural. (RODRIGUES, 2021)

Os dados apresentados na Tabela 6 mostram que a alteração de meio de tratamento afeta no tamanho da partícula, contribuindo, ou não, para a diminuição do seu tamanho e aumento da área de contato. Segundo os resultados obtidos, o meio ácido obteve o menor diâmetro ($0,76 \pm 0,09$ mm), em segundo ficou o meio básico com NaOH ($0,92 \pm 0,1$ mm) e em seguida o tratamento somente com água ($1,13 \pm 0,13$ mm).

Tabela 6 - Análise granulométrica - Casca de banana. (RODRIGUES, 2021)

Peneira (mesh)	Di (mm)	Massa Casca Banana (g) em meio ácido (HCl)	Massa Casca Banana (g) em meio básico (NaOH)	Massa Casca Banana (g) em meio aquoso (água destilada)
8	2,360	3,763	3,410	5,910
10	2,000	3,248	3,048	4,854
16	1,180	19,278	14,417	16,841
30	0,600	36,184	20,037	11,608
50	0,300	11,021	7,341	3,621
200	0,075	10,911	0,862	2,828
Fundo		0,0980	-----	0,1632

Para a coleta de dados para a construção da curva, foram feitas uma solução de 50 mL com concentração de 13 mg/L de amarelo de tartrazina e 676 mg/L para o azul índigo. Foram adicionadas massas variadas de adsorvente (em gramas): 0,05; 0,06; 0,08; 0,10; 0,12; 0,14; 0,15; 0,17; 0,19; 0,21; 0,23, onde ficaram em agitação durante 1 hora. Após esse procedimento, as amostras foram filtradas e analisadas em espectrofotômetro, com amostras em 26°C e em banho de gelo a 10°C. Assim, pôde-se construir as curvas de isotermas.

As isotermas para o amarelo de tartrazina foram obtidas com temperatura ambiente e a 10°C e para o azul índigo foram obtidas com temperatura ambiente.

Analisando o comportamento de adsorção dos diferentes meios de ativação estudados, notou-se que o meio básico e neutro não foram satisfatórios. Em meio básico acredita-se que a degradação da casca de banana seja um fator de grande importância que pode ter destruído os sítios ativos do material, além do escurecimento das amostras que inviabiliza a leitura no espectrofotômetro. Já com a ativação em meio básico não houve interação, comprovando que não houve ativação dos sítios.

Sabe-se que a temperatura é um fator de influência no processo adsorptivo, pois sua elevação pode causar a desobstrução de poros, melhorar a difusão e sua variação pode alterar o estado de equilíbrio de alguns adsorvatos, uma vez que é um processo exotérmico. (RODRIGUES, 2021)

Foram construídas isotermas para o amarelo de tartrazina com os 3 meios de ativação estudados para a temperatura de 10°C. Para os meios básico e neutro, a temperatura não influenciou nos resultados, onde não houve adsorção. Para o meio ácido, houve uma melhora na adsorção, indicada pela diminuição da concentração de corante, que também ocorreu para o corante azul. Optou-se, então, por aplicar os modelos matemáticos e prosseguir com o estudo apenas com a ativação em meio ácido.

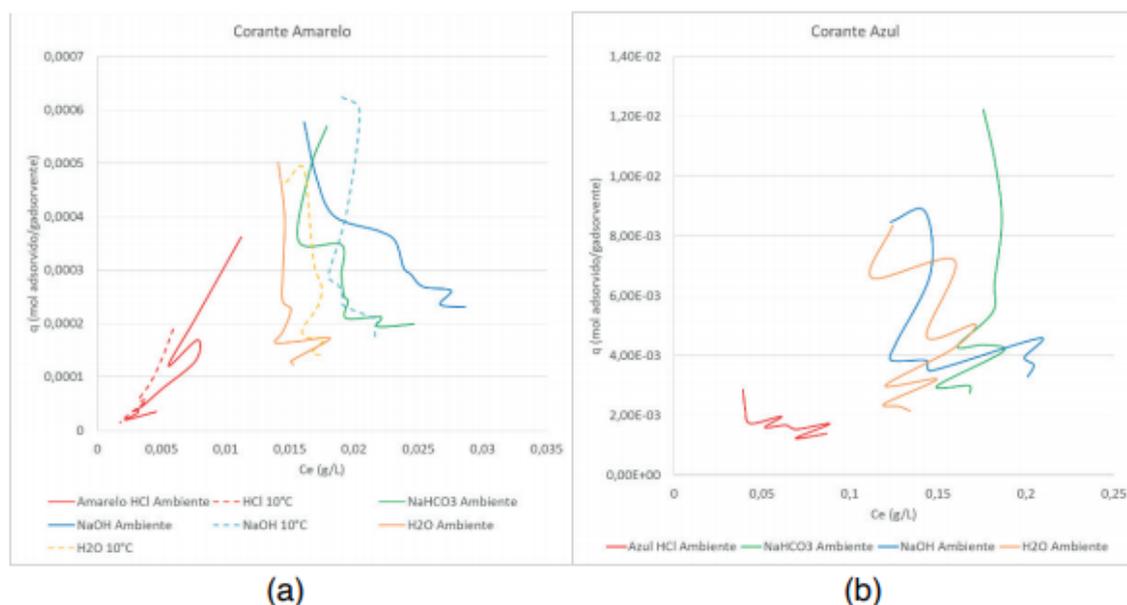


Figura 14 - (a) Comportamento adsorptivo do material com corante amarelo, (b) material com corante azul. (RODRIGUES, 2021)

Após a construção das isotermas, foram ajustados os modelos de Langmuir e Freundlich, Redlich-Peterson, Temkin e Dubinin-Radushkevich.

A Figura 14a apresenta os modelos ajustados para a isoterma obtida com o adsorvente ativado em meio ácido com o processo de adsorção realizado em temperatura ambiente com o corante amarelo de tartrazina, onde a curva laranja representa os dados obtidos experimentalmente. Os modelos que melhor se ajustaram à isoterma experimental foram os de Langmuir, Freundlich e Dubinin-Radushkevich, enquanto os outros dois modelos não tiveram um bom ajuste. Mesmo que semelhantes, o modelo de Langmuir e Redlich-Peterson possuem interpretações diferentes, onde o primeiro pode representar o modelo de adsorção de corantes em meio líquido e o segundo para prever a biossorção de metais. Os modelos de Temkin e Dubinin-Radushkevich, não podem representar esse modelos, pois são mais adequados a sistemas gasosos. Já o modelo de Freundlich prevê uma adsorção física, de baixa ligação entre o soluto e o adsorvente. Assim, conclui-se que a adsorção pode ocorrer em multicamadas, tendendo a apresentar interação física entre o adsorvente e adsorvato.

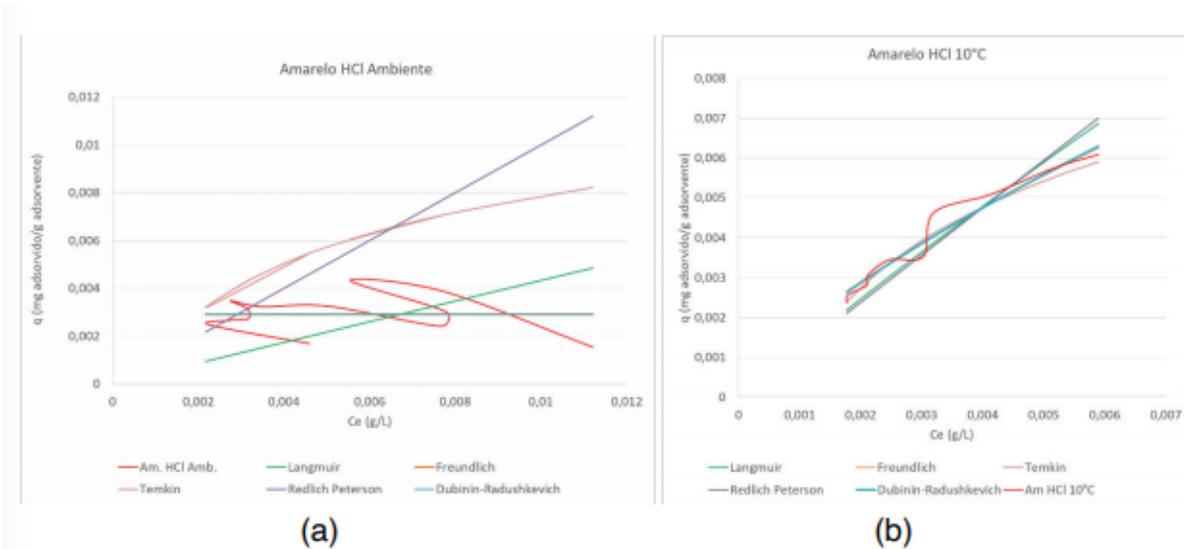


Figura 15 - Curvas de adsorção (a) para o corante amarelo em temperatura ambiente; (b) para o corante amarelo à 10°C. (RODRIGUES, 2021)

A Figura 15b apresenta os modelos ajustados para a isoterma obtida com o adsorvente ativado em meio ácido com o processo de adsorção realizado com temperatura de 10°C com o corante amarelo de tartrazina, onde a curva laranja representa os dados obtidos experimentalmente. As baixas temperaturas favorecem a isoterma por ser um processo exotérmico, obtendo uma similaridade maior com os modelos projetados. Os modelos de Langmuir, Redlich-Peterson e Freundlich tiveram comportamentos satisfatórios, onde apresenta interação física, comportamento favorável à adsorção em multicamadas.

A Figura 16 apresenta os modelos ajustados para a isoterma obtida com o adsorvente ativado em meio ácido com o processo de adsorção realizado com temperatura ambiente com o corante azul índigo. Nenhum dos modelos pôde ser ajustado à isoterma experimental. No entanto, considerando os valores de erro, o modelo de Freundlich e Langmuir, podem representar a adsorção analisada, tendo comportamento favorável à adsorção. Já os modelos de Temkin e Redlich-Peterson apresentam linearidade e o de Dubinin-Radushkevich uma curva nula.

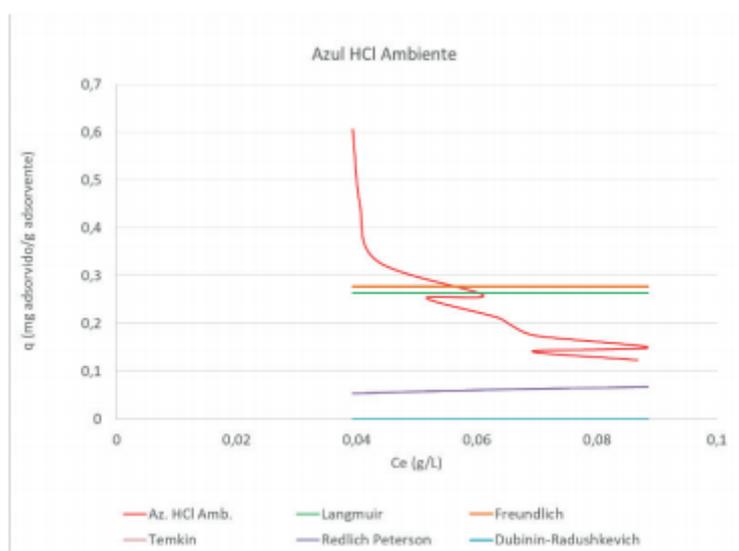


Figura 16 - Curva de adsorção corante azul à temperatura ambiente. (RODRIGUES, 2021)

Tabela 7 - Parâmetros dos corantes analisados de acordo com a temperatura. (RODRIGUES, 2021)

Modelos	Amarelo à temperatura ambiente	Amarelo à 10°C	Azul à temperatura ambiente
Langmuir	3,2E-05	1,9E-06	0,22
Freundlich	5,4E-06	6,9E-07	0,20
Temkin	1,1E-4	6,4E-07	1,1E-3
Redlich-Peterson	1,0E-10	2,6E-06	--
Dubini	5,4E-06	6,8E-07	--

De acordo com os dados obtidos na Tabela 7, e sabendo que os modelos mais utilizados para esse estudo são os de Langmuir e Freundlich, o modelo de Langmuir apresentou menor erro. Essa conclusão corrobora com o perfil da IUPAC de adsorção física.

Na Tabela 8, foram determinados e organizados os parâmetros do modelo de Freundlich ajustadas as isotermas.

Tabela 8 - Parâmetros dos corantes analisados de acordo com a temperatura. (RODRIGUES, 2021)

Parâmetros	Amarelo à temperatura ambiente	Amarelo à 10°C	Azul à temperatura ambiente
n	11442	1,4	2,0E-8
Kf (mg/L)	0,003	0,240	0,278

A constante Kf está relacionada com a capacidade adsorptiva. O valor de n determina se a adsorção é favorável ($1 < n < 10$), desfavorável ($0 < n < 1$) ou inviável ($n < 0$), nesse último caso o solvente tem mais afinidade pelo adsorvente do que o soluto (NASCIMENTO et al. 2014). Confirmada pelo valor de n, a isoterma obtida para o corante amarelo em 10°C foi a única favorável. Para o corante azul à temperatura ambiente, não se mostrou favorável em nenhum dos estudos. Para o corante amarelo à temperatura ambiente, também notou-se que o valor de n não é favorável.

Com todos esses estudos, foi visto que o melhor rendimento de obtenção da ativação do material se dá com ativação em meio ácido. O mesmo meio de ativação, também apresentou menor granulometria e menor dano superficial ao material, sendo favorável para a adsorção, ativando os sítios e possibilitando a interação adsorvente/adsorvato. Por ser um processo exotérmico, em menores temperaturas há uma melhora de adsorção do soluto. Dos modelos matemáticos avaliados, o de Freundlich foi o mais favorável representando as isotermas obtidas que indicavam uma adsorção física. Concluindo que a casca de banana pode ser utilizada como adsorvente para o corante amarelo com temperaturas mais baixas, porém não é adequada para o corante azul. Apresentando uma adsorção física, entende-se que o é possível a recuperação do material, tanto soluto como o bioadsorvente.

Evidências da casca de banana como material adsorvente

De acordo com os dados analisados sobre os estudos base deste projeto, pode-se observar alguns fatos sobre o uso da casca de banana como adsorvente.

Primeiramente, a escolha da ativação do material. A ativação feita em meio neutro pode ser desconsiderada, uma vez que não se obteve grandes resultados a serem analisados. Já

a ativação em meio básico apresentou danos superficiais ao material de estudo, inviabilizando sua utilização. Assim, o meio ácido é a melhor opção, obtendo maior rendimento do adsorvente, sendo menos prejudicial à superfície do material, aumentando a área de contato, obtendo poros menores e bem distribuídos que facilitarão a adsorção do corante.

Nos estudos analisados, a ativação do material para adsorção do corante azul foi feita com dois ácidos, fosfórico e clorídrico. Comparando os resultados obtidos para este corante, nota-se melhores resultados para o primeiro caso, vendo que a ativação com o ácido clorídrico não obteve resultados positivos para a adsorção do corante azul. Assim, a melhor opção para a escolha é o ácido fosfórico. Outro fator que apresentou grande relevância foi a carbonização, aumentando a porosidade do material. Juntando o tratamento químico com ácido fosfórico e a carbonização do material, pode-se esperar uma eficiência de aproximadamente 98%, como mostra o estudo de Bugiereck et al (2014).

Observa-se, também, que o processo realizado em temperaturas mais baixas favorecem a isoterma, uma vez que o processo é exotérmico. O modelo de isoterma mais adequado é o de Freundlich, ocorrendo uma adsorção física em multicamadas, com taxa de adsorção no modelo pseudo-segunda ordem possibilitando a formação de complexos ou grupos superficiais o que dificulta a reutilização do carvão, pois se torna difícil a remoção da sua superfície.

Sobre a estrutura química da casca de banana, o estudo de Canciam e Pereira (2020) pôde evidenciar que as estruturas de celulose, hemiceluloses, pectina, lignina, leucina, valina, treonina e fenilalanina presentes na casca de banana influenciam na adsorção de íons fluoreto, facilitando a retenção dessa substância. Já o trabalho de Oliveira et al, utiliza a farinha da casca de banana para adsorção de íons cobre, sendo o método de formulação da farinha com maior eficiência o das amostras pirolisadas e tratadas com NaOH. Com isso, pode-se observar a possibilitação da casca de banana como uma alternativa para retenção de íons como fluoreto e cobre.

Conclusão

O objetivo deste trabalho de graduação foi analisar e comparar pesquisas envolvendo a utilização da casca de banana como adsorvente de corantes. Utilizando esta matéria prima em tratamentos de efluentes de indústria têxtil, com foco no corante azul usado na fabricação do jeans, removendo com eficiência a coloração da água para a diminuição de impactos ambientais, propondo um tratamento que seja economicamente viável e que atenda as necessidades ambientais.

Com os dados analisados, conclui-se que o melhor meio de ativação para a matéria prima é o meio ácido, tendo um bom rendimento de material adsorvente, apresentando menos danos à superfície e obtendo poros menores, aumentando a área de contato para adsorção. O ácido para ativação deve ser o ácido fosfórico 1:1, pois ele apresentou melhores resultados com a remoção do corante azul. A carbonização do material favorece a formação de poros, o que auxilia o aumento da área de contato.

O processo de adsorção deve ocorrer em temperaturas baixas, pois favorece a isoterma, já que se trata de um processo exotérmico. O modelo de isoterma que melhor se adequa ao estudo é o de Freundlich, apresentando uma adsorção física em multicamadas, o que indica que o material não poderá ser reutilizado.

A partir dos estudos de caracterização da casca de banana, foi possível observar que a sua estrutura é interessante para a adsorção de íons fluoreto e cobre, substâncias que podem ser encontradas em efluentes têxteis.

A matéria prima pode ser adquirida gratuitamente em instituições como escolas,

empresas e restaurantes que fazem o descarte desse material, ou até mesmo pagar taxas mínimas para a aquisição do mesmo. A fabricação do carvão ativado de casca de banana é simples e não demanda muito tempo até que o produto esteja finalizado.

Com os dados analisados pode-se concluir que a casca de banana é uma boa opção de tratamento para a remoção de corantes, mesmo sendo de utilização única. Tendo o tratamento químico e físico correto, atende às necessidades, gerando altas expectativas em relação à sua eficiência.

Agradecimentos

Agradecimentos ao professor orientador José Pedro Thompson Júnior que possibilitou a realização deste trabalho de graduação. Agradecimentos à Universidade São Francisco por todo o suporte disponibilizado para a finalização desta graduação. Agradecimentos a todo o corpo docente que nos prepararam como engenheiras. Agradecimentos à professora Dra. Monica Tais Siqueira D'Amélio Felipe por todo o suporte e atenção disponibilizada durante toda a graduação.

Referências Bibliográficas

BUGIERECK, A.M; BEHLING, S.M; FIORI, M.A; MELLO, J.M.M de; COLPANI, L; MAGRO, J.D. **Adsorção de Corante Catiônico por Carvão Ativado de Casca de Banana**. In: XX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 2014, Florianópolis - SC. Anais [...]. [S. l.: s. n.], 2014.

CANCIAM, César A.; PEREIRA, Nehemias C. **Caracterização Química da Casca de Banana Nanica como Biossorvente de Íons Fluoretos**. In: Ii Congresso Online Nacional de Química, 2020, Online. Anais [...]. [S. l.: s. n.], 2020.

COELHO, Filipe Alves; D'AMELIO, Monica Tais Siqueira; SABLÓN, Vicente Idalberto Becerra. **Engenharia Moderna: Soluções para Problemas da Sociedade e da Indústria 2**. Ponta Grossa - Paraná: Atena, 2021. 240 p. ISBN 978-65-5706-999-8.

HOWE, K.J.; HAND, D.W.; CRITTENDEN, J.C.; TRUSSELL, R.R.; TCHOBANOGLIOUS, G. **Princípios de Tratamento de Água**. São Paulo - SP: Cengage Learning Brasil, 2016. 9788522124084. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788522124084/>. Acesso em: 13 Jun 2021

NATURALTEC (org.). **Carvão Ativado: Ficha Técnica**. [S. l.], 2017. Disponível em: <https://www.naturaltec.com.br/carvao-ativado-ficha-tecnica/>. Acesso em: 21 abr. 2021.

OLIVEIRA, K. S. G. C *et al.* **Reaproveitamento da Casca de Banana Para Tratamento de Soluções Aquosas Contendo Cobre**. In: XII Congresso Brasileiro De Engenharia Química Em Iniciação Científica, 2017, São Carlos - SP. Anais [...]. [S. l.: s. n.], 2017.

SCHONS, Elenice. **Fenômenos interfaciais**. Disponível em: https://cetm_engminas.catalao.ufg.br/n/53793-fenomenos-interfaciais. Acesso em: 20 maio 2021.