



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS I
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**

MARCOS VINÍCIUS GONÇALVES DA SILVA

**SECAGEM DA CASCA DE BUCHA VEGETAL (*Luffa cylindrica*) E APLICAÇÃO
COMO BIOADSORVENTE PARA EFLUENTES TÊXTEIS**

CAMPINA GRANDE PB

2023

MARCOS VINÍCIUS GONÇALVES DA SILVA

**SECAGEM DA CASCA DE BUCHA VEGETAL (*Luffa cylindrica*) E APLICAÇÃO
COMO BIOADSORVENTE PARA EFLUENTES TÊXTEIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Área de concentração: Engenharias.

Orientador: Prof. Dr. Marcello Maia de Almeida

CAMPINA GRANDE/PB

2023

FICHA CARTOGRÁFICA

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

S586s Silva, Marcos Vinicius Goncalves da.
Secagem da casca de bucha vegetal (*Luffa cylindrica*) e aplicação como bioadsorvente para efluentes têxteis [manuscrito] / Marcos Vinicius Goncalves da Silva. - 2023.
53 p. : il. colorido.

Digitado.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2023.
"Orientação : Prof. Dr. Marcello Maia de Almeida, Coordenação do Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental - CCT."

1. Adsorção . 2. Indústria Têxtil. 3. Corantes. 4. Tratamento de efluentes. I. Título

21. ed. CDD 628

MARCOS VINÍCIUS GONÇALVES DA SILVA

**SECAGEM DA CASCA DE BUCHA VEGETAL (*Luffa cylindrica*) E APLICAÇÃO
COMO BIOADSORVENTE PARA EFLUENTES TÊXTEIS**

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de graduado em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Área de concentração: Engenharias.

Aprovado em: 30/ 11/ 2023

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Marcello Maia de Almeida (orientador)
Universidade Estadual da Paraíba



Prof. Dr. Fernando Fernandes Vieira (examinador)
Universidade Estadual da Paraíba



Prof. Dr. Whelton Brito dos Santos (examinador)
Universidade Estadual da Paraíba

AGRADECIMENTOS

Agradeço profundamente a todos que contribuíram para a realização deste trabalho de conclusão de curso. Primeiramente à minha família, especialmente a minha mãe Glacicleide, aos meus tios Arimarques, Glaciene e Maria Mirna, agradeço por seu apoio incondicional, sempre presentes e incentivando meus estudos. Seu apoio foi fundamental para que eu pudesse me dedicar a graduação sem preocupações. Vocês sempre estiveram lá para mim, nos momentos bons e nos momentos ruins. Seu amor e carinho me deram força para continuar. Expresso minha gratidão ao meu orientador Dr. Marcello Maia de Almeida pela orientação, aos membros da banca, Dr. Fernando Fernandes Vieira e Whelton Brito dos Santos e a todos os professores do departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, especialmente ao professor João Damasceno por todo apoio e valiosas sugestões ao longo deste processo.

Aos colegas do curso, agradeço por compartilharem comigo seus conhecimentos e experiências.

RESUMO

O Brasil é o 5º maior produtor têxtil do mundo, sendo o segundo setor que mais emprega na indústria de transformação, tendo as atividades de confecção como a principal atividade econômica de várias regiões. A indústria têxtil é responsável pela geração de efluentes, que podem causar impactos ambientais negativos. Para mitigar esses impactos, é necessário tratar os efluentes têxteis antes de seu descarte. A técnica de adsorção apresenta-se como alternativa eficiente e econômica. Neste trabalho, foi estudada a viabilidade da casca de bucha vegetal como bioadsorvente para a remoção de corantes. Inicialmente, as cascas foram secas em estufa com circulação de ar a partir de um planejamento fatorial 2^2 com duas repetições no ponto central. As variáveis de controle foram a temperatura de secagem e a massa do material. A temperatura utilizada foi de 50, 60 e 70 °C e a massa 100, 200 e 300g. Durante o ensaio de secagem observou-se o monitoramento da perda de umidade em função do tempo, a partir destes dados foram construídas as curvas de secagem. Em seguida, foram realizados os ensaios de adsorção em banho finito com o produto obtido da secagem, nos ensaios de adsorção foram utilizados dois efluentes sintéticos um contendo corante 61-vinho e outro 15-natier. A partir destes dados foi realizado o estudo da cinética de adsorção. A investigação da isoterma de equilíbrio foi realizada na melhor condição de remoção de corante para ambos os corantes. Os resultados dos ensaios mostraram que a cinética de secagem mostrou que quanto maior a temperatura de secagem e menor massa a taxa de secagem é mais elevada. Os dados obtidos foram avaliados utilizando os modelos de Page e Newton. A partir destes observou-se que o modelo de Page apresentou melhor ajuste aos dados experimentais de acordo com o teste de Akaike. A farinha da casca da bucha apresentou eficiência de remoção média do corante 61-vinho de 64% com melhor percentual de remoção de 69% e 70% para a melhor remoção do corante 15-natier. Os resultados dos ensaios mostraram que o modelo cinético de pseudo- segunda ordem apresentou melhor concordância com os dados experimentais, apresentando um coeficiente de determinação em média de 0,99 e teste de Akaike com valores mais negativos e menores erros padrão. O que supõe uma adsorção química. Os resultados mostraram que o modelo de isoterma de Sips é o que melhor descreve o processo de adsorção do corante sobre a farinha da casca da bucha, corroborando com o fenômeno de quimiossorção descrito pelo

modelo cinético pseudo-segunda ordem. Desta forma, a farinha da casca da bucha vegetal mostra-se promissora como bioadsorvente de efluentes contaminados com corantes têxteis.

Palavras-Chave: Adsorção; Indústria Têxtil; Corantes; Remoção; Tratamento de Efluentes.

ABSTRACT

Brazil is the 5th largest textile producer in the world, being the second sector with the most employment in the transformation industry, with garment manufacturing as the main economic activity in several regions. The textile industry generates effluents that can cause negative environmental impacts. To mitigate these impacts, it is necessary to treat textile effluents before their disposal. Adsorption technique presents itself as an efficient and cost-effective alternative. This study investigated the viability of using vegetable loofah peel as a bioadsorbent for dye removal. Initially, the peels were dried in an air-circulating oven using a 2² factorial design with two repetitions at the central point. The controlled variables were drying temperature and material mass. The temperatures used were 50, 60, and 70°C, and the masses were 100, 200, and 300g. During the drying trial, the monitoring of moisture loss over time was observed, and drying curves were constructed from this data. Subsequently, finite bath adsorption tests were conducted using the product obtained from drying. Two synthetic effluents were used in the adsorption tests, one containing the dye 61-wine and the other 15-natier. Kinetics of adsorption were studied based on this data. Investigation of equilibrium isotherms was carried out under the best dye removal conditions for both dyes. The results from the drying kinetics trials showed that the drying rate is higher with increased drying temperature and lower mass. The obtained data were evaluated using the Page and Newton models, where it was observed that the Page model presented a better fit to the experimental data according to the Akaike test. The loofah peel flour showed an average dye removal efficiency of 64% for the 61-wine dye, with the best removal percentage reaching 69%, and 70% for the best removal of the 15-natier dye. Results from the tests showed that the pseudo-second-order kinetic model had better agreement with experimental data, presenting an average determination coefficient of 0.99 and Akaike test with more negative values and smaller standard errors, suggesting chemical adsorption. The results indicated that the Sips isotherm model best describes the dye adsorption process on the loofah peel flour, corroborating with the chemisorption phenomenon described by the pseudo-second-order kinetic model. Therefore, the loofah peel flour proves to be promising as a bioadsorbent for effluents contaminated with textile dyes.

Keywords: Adsorption; Textile Industry; Dyes; Removal; Effluent Treatment;

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Curva do tempo de secagem em relação ao teor de umidade.....	18
Figura 2 – Mapa dos Pontos de Coleta.....	25
Figura 3 – Etapas do processo de preparo das amostras.....	27
Figura 4 – Comparativo de antes e depois da secagem do ensaio 5	31
Figura 5 – Curvas de secagem	32
Figura 6 – Modelos de Secagem aplicados aos experimentos	33
Figura 7 – Diagrama de Pareto – Parâmetros de Secagem	35
Figura 8 – Farinha da casca após trituração	36
Figura 9 – Ensaio experimento 4 após a filtração.	36
Figura 10 – Modelos de Sips e Langmuir aplicados aos dados do corante 61- vinho. (a) Sips; (b) Langmuir	40
Figura 11 – Modelos de Sips e Langmuir aplicados aos dados do corante 15- natier. (a) Sips; (b) Langmuir	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição dos efluentes têxteis e seus limites estabelecidos...	16
Tabela 2 – Modelos matemáticos de secagem	17
Tabela 3 – Planejamento Experimental 2 ²	28
Tabela 4 – Planejamento Experimental 2 ² descodificada	28
Tabela 5 – Intervalo de tempo utilizado para a pesagem do material durante a secagem.....	28
Tabela 6 – Equações das Curvas de Calibração.....	29
Tabela 7 – Umidades Iniciais das cascas das buchas.....	31
Tabela 8 – Dados experimentais dos modelos Cinéticos de Secagem	34
Tabela 9 - Análise Variância e teste F	34
Tabela 10 – Quantidade removida dos corantes a cada experimento para o corante 61-vinho.....	37
Tabela 11 – Quantidade removida dos corantes a cada experimento para o corante 15-natier	37
Tabela 12 – Parâmetros obtidos do modelo cinético pseudo-primeira ordem	38
Tabela 13 – Parâmetros obtidos para o modelo de pseudo-segunda ordem .	38
Tabela 14 – Valores dos parâmetros e coeficiente de determinação no estudo das isotermas para o 61-vinho.	40
Tabela 15 – Valores dos parâmetros e coeficiente de determinação no estudo das isotermas para o 15-natier.	41

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABIT	Associação Brasileira da Indústria Têxtil e Confecção
ANOVA	Analysis of variance (Análise de Variância)
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
IEMI	Inteligência de Mercado
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
LAPECA	Laboratório de Pesquisa em Ciências Ambientais
UEPB	Universidade Estadual da Paraíba
ST	Sólidos Totais

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	14
2.1	Objetivo geral	14
2.2	Objetivos específicos	14
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
3.1	Bucha vegetal (<i>Luffa cylindrica</i>)	15
3.2	Efluentes têxteis.....	15
3.3	Secagem	16
3.3.1	<i>Curvas de Secagem</i>	18
3.4	Metodologias de tratamento de efluentes.....	19
3.4.1	<i>Adsorção</i>	19
3.5	Cinética de Adsorção.....	20
3.5.1	<i>Pseudo-primeira Ordem</i>	21
3.5.2	<i>Pseudo-segunda Ordem</i>	21
3.6	Isotermas de Adsorção.....	21
3.6.1	<i>Modelo de Freundlich</i>	22
3.6.2	<i>Modelo de Langmuir</i>	23
3.6.3	<i>Modelo de Sips</i>	23
3.7	Estado da Arte	23
4	METODOLOGIA	25
4.1	Caracterização dos materiais.....	25
4.1.1	<i>Matéria Prima</i>	25
4.1.2	<i>Corantes</i>	26
4.2	Preparo das amostras.....	26
4.3	Secagem	27
4.3.1	<i>Curva de Secagem</i>	28
4.4	<i>Adsorção</i>	28
4.4.1	<i>Curvas de Calibração</i>	28
4.4.2	<i>Cinética de adsorção</i>	29
4.4.3	<i>Isotermas de Adsorção</i>	30
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	31
5.1	Cinética de Secagem	31
5.1.1	<i>Análise estatística dos modelos de secagem</i>	32

5.2	Cinética de Adsorção.....	35
5.2.1	<i>Análise Estatística</i>	38
5.3	Isotermas de Equilíbrio.....	39
6	CONCLUSÃO	43
	REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO

A preocupação com a contaminação ambiental e a busca por alternativas sustentáveis para a remoção de poluentes têm impulsionado o desenvolvimento de novas tecnologias e materiais. Nesse contexto, a adsorção tem se destacado como um processo eficiente e promissor, capaz de remover substâncias tóxicas e indesejáveis presentes em diversos tipos de efluentes.

No cenário atual, um importante fator no aspecto da proteção ambiental dos corpos hídricos é o tratamento dos efluentes antes do seu lançamento sobre os rios e córregos dos municípios, principalmente os de origem industrial. (Tassi, 2022).

Dentre as muitas formas de tratamento existentes, nenhuma é completamente eficaz e algumas requerem uma combinação de técnicas para serem eficientes, cujos altos custos inviabilizam tais métodos. Assim, tratamentos alternativos eficazes são necessários. O maior rigor da legislação ambiental tem contribuído para o desenvolvimento de novas tecnologias para o tratamento de efluentes têxteis, como a biossorção e a biodegradação (Almeida e Corso, 2014).

A indústria têxtil tem uma considerável importância socioeconômica no Brasil, pois está presente no país desde meados do início do processo de industrialização se tornando, em algumas regiões do país, até os dias atuais, a principal fonte de renda (Ribeiro, 2021).

Segundo dados da ABIT (2022) a indústria têxtil e de confecção, representa 24,6 mil empresas, dos distintos portes, distribuídas em todo o território nacional, empregadoras de 1,3 milhão de trabalhadores. Somadas, geram faturamento anual superior a R\$ 160 bilhões. Estudo do IEMI para a ABIT demonstra que a produção nacional de vestuário em 2022 foi de R\$ 150,3 bilhões, com aumento de 0,5% em relação aos R\$ 149,6 bilhões de 2021.

A indústria têxtil gera um efluente que causa efeitos desfavoráveis aos ecossistemas aquáticos quando lançados sem nenhum tipo de tratamento adequado. Isso ocorre devido a este tipo de indústria utilizar vários produtos químicos durante seu processo produtivo, como os corantes (Ramos, 2022).

Diante do exposto, o trabalho apresenta um estudo da casca de bucha vegetal após processamento de secagem como bioadsorvente na remoção de corantes utilizados na indústria têxtil. Para o uso comum da bucha vegetal após a colheita, a

bucha vegetal é exposta ao sol para facilitar a retirada da casca e as sementes. Com isso, a casca acaba sendo tratada como resíduo e geralmente é descartada. O presente trabalho busca dar uma aplicabilidade para a casca.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

- Investigar a aplicação da casca de bucha vegetal (*Luffa cylindrica*) como bioadsorvente no tratamento de efluentes têxteis.

2.2 Objetivos específicos

- Estudar a cinética de secagem em estufa com circulação de ar a partir do planejamento fatorial 2^2 com duas repetições no ponto central monitorando a variação do peso em função do tempo.
- Investigar a capacidade de adsorção da casca da bucha vegetal em relação a fatores de massa e temperatura para a remoção de corantes têxteis em efluentes ou águas contaminadas;
- A partir da isoterma de adsorção, calcular parâmetros como capacidade máxima de adsorção.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Bucha vegetal (*Luffa cylindrica*)

A bucha vegetal como é popularmente conhecida, é uma planta perene, herbácea, com caule 5-angulares, provida de gavinhas axilares, com hábito de crescimento trepador exigindo tutoramento para seu cultivo. As folhas são palmatilobadas, com 3 a 5 lóbulos, com pecíolo longo. As flores são amarelas, solitárias ou agrupadas, com pedicelo longo. O fruto é uma baga ovóide, oblonga, de até 45 centímetros de comprimento, com polpa fibrosa e sementes negras (MEDEIROS, 2015).

É uma fibra forte, apresenta baixa densidade, alta porosidade, volume específico dos poros bastante alto, estabilidade em uma ampla faixa de pH e resistência a autoclavagens sem a ocorrência de danos, mudanças de formas, estrutura e textura, além de estar dotada de um intrincado conjunto de fibras finas lignocelulósicas hidrofílicas, resistentes, elásticas e suaves, sendo também biodegradável e de baixo custo (FICHES, 2022).

3.2 Efluentes têxteis

Os efluentes têxteis são resíduos líquidos gerados durante os processos de fabricação na indústria têxtil. Esses efluentes contêm uma variedade de poluentes, incluindo corantes, produtos químicos e outros materiais orgânicos e inorgânicos.

O consumo de água em uma indústria têxtil é bastante elevado, considerando que quase todas as etapas de produção exigem o uso de água. Estudos apontam que 90% do consumo geral de água em uma fábrica têxtil é proveniente das etapas de produção de tecidos (Silva, 2019).

Durante o processo de tingimento do tecido são usados diversos produtos químicos que podem alterar as propriedades físico-químicas da água, como: pH, cor, condutividade, turbidez e dureza (Silva, 2019).

Para obter uma estimativa da contaminação existente na água, é necessária a realização de análises que avaliem aspectos físicos, químicos e microbiológicos. Com base nos valores obtidos nessas análises é possível verificar se os corpos

hídricos se encontram de acordo com o uso ao qual eles se destinam (Andrade, 2019).

O tingimento das diversas fibras têxteis envolve a transferência de massa de um ou mais corantes do banho de tingimento para a fibra. A maior parte dos processos de tingimento é reversível, o que implica que as moléculas de corante do banho são transferidas para a fibra, e outras moléculas de corante são desprendidas da fibra e retornam novamente ao banho (Macedo, 2019). A composição média dos efluentes têxteis é apresentada na tabela 1:

Tabela 1 – Composição dos efluentes têxteis e seus limites estabelecidos

Composto	Concentração média (mg/L)	Concentração (mg/L)
		CONAMA nº 357/2005 e nº 430/2011
DBO ₅ (mg O ₂ L ⁻¹)	22 – 2692	Remoção > 60% ou máximo de 120 mg/L
DQO (mg O ₂ L ⁻¹)	280,1 – 10488	-
DQO/DBO ₅	2 – 59	-
pH	5,1 – 11,8	5 – 9
Turbidez	0,2 – 1600	100 uT
ST	1187 – 15158	500 mg/L

Fonte: Adaptado de RAMOS (et al., 2020), CONAMA, 2005 e CONAMA 2011

Contudo é sabido que todo processo de tintura em tecido envolve como operação final lavagem dos tecidos em banhos correntes, a fim de se retirar o excesso de corantes, o que acarreta um grande volume de efluente, que, se não tratado corretamente, pode trazer grandes problemas ao meio ambiente como um todo (Silva, 2013).

Entretanto, não há na legislação brasileira limite permitido de concentrações de corantes permitidas para as águas residuárias oriundas de empresas têxteis (Andrade, 2019).

3.3 Secagem

A secagem consiste em um complexo processo, que envolve a transferência de calor e massa entre o ar de secagem e o produto a ser seco, na qual o aumento da temperatura provoca o aumento da pressão parcial de vapor no produto, provocando a redução no teor de água (Goneli et al., 2014).

Segundo Mujumdar (2007) dois processos ocorrem quando um material úmido é submetido a secagem térmica, são eles: transferência de energia e transferência de umidade interna para a superfície do sólido.

O processo de secagem de um produto, sob condições constantes de temperatura, umidade relativa e velocidade do ar, pode ser dividido em um período de velocidade constante e outro de velocidade decrescente (Villela, 1992).

De acordo com Oliveira (2021) a evaporação da água da superfície de um sólido é dependente de fatores externos, como temperatura, umidade relativa, velocidade do ar, área de superfície exposta e pressão e o transporte da umidade dentro de um sólido é função da natureza física do sólido, da temperatura e do seu conteúdo de umidade.

Durante a secagem de produtos biológicos ocorrem variações nas suas características físicas, químicas e biológicas, que, dependendo da intensidade do efeito, causam sua perda ou inutilidade para uma determinada função alimentícia ou germinativa (Farias, 2011).

Por meio da secagem, é possível ser determinada a cinética de secagem, a qual procura determinar o comportamento do material sólido que é seco, sendo representada pelas curvas de secagem e de taxa de secagem (Menezes et al., 2013).

Na Tabela 2 podem ser observados os modelos frequentemente utilizados no ajuste de dados experimentais do processo de secagem.

Tabela 2 – Modelos matemáticos de secagem

Modelos	Equações
Exponencial dois termos	$U^* = c \exp(-kt) + d. \exp(-k_2t)$
Henderson e Pabis	$U^* = a \exp(-kt)$
Midili	$U^* = a \exp^{-kt^n} + bt$
Newton	$U^* = a \exp(-kt)$
Page	$U^* = \exp^{-kt^n}$

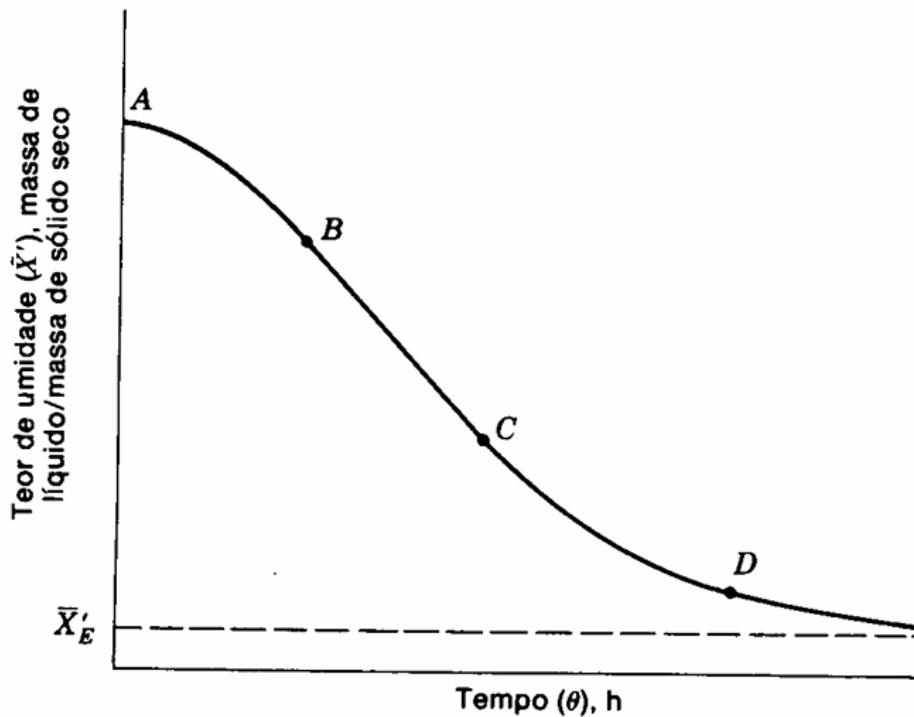
t (tempo de secagem; k,n,a e b (constantes dos modelos)

3.3.1 Curvas de Secagem

As curvas de secagem permitem prever o momento do processo em que se atinge o teor de umidade desejado e desta forma obter produto de boa qualidade (CANO-CHAUCA, 2004).

Os modelos matemáticos aplicados nas cinéticas de secagem para descrever o processo de perda de água do produto em relação ao tempo de secagem levam em consideração fatores externos, como por exemplo, a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem (ANDRÉ, 2018). A figura 1 representa o comportamento da curva geral da cinética de secagem.

Figura 1 – Curva do tempo de secagem em relação ao teor de umidade



Fonte: FOUST et al. 1982.

Segundo Foust (1982) os períodos de secagem representados na figura 1, são os seguintes:

- Segmento AB: período de regime não permanente;
- Segmento BC: período de taxa constante;
- Segmento CD: período de taxa decrescente.

3.4 Metodologias de tratamento de efluentes

Segundo Tassi (2022) os métodos que podem ser utilizados para a o tratamento de efluentes são: processos físico-químicos, tratamentos biológicos, lodos ativados, lagoas aeradas, filtros biológicos, além dos tratamentos avançados, como: osmose reversa, adsorção, processos oxidativos avançados, ozônio e fotocatalise heterogênea. Neste trabalho vamos enfatizar o processo de adsorção.

3.4.1 Adsorção

Esse processo se baseia no fenômeno de interação do par adsorvato/adsorvente que depende diretamente da área de interface livre apresentada pelo adsorvente. Diante disso, os sólidos adsorventes dotados de grandes superfícies específicas apresentam um grande favorecimento a adsorção, como, por exemplo, os materiais porosos e/ou aqueles constituídos por partículas finamente divididas (Santos, 2017).

Os materiais adsorventes podem ser orgânicos, inorgânicos, sintéticos ou naturais e para o alcance de um processo de adsorção eficaz é necessário apresentar boas propriedades mecânicas, tais como resistência ao desgaste, e propriedades cinéticas capazes de transferir as moléculas rapidamente aos locais de adsorção. Em última instância, os processos de fabricação, bem como as matérias-primas precursoras dos sólidos adsorventes, devem ser viáveis economicamente com a finalidade de competir com processos de separação alternativos. (Thomas; Crittenden, 1998).

O processo de adsorção é uma propriedade físico-química utilizado como processos de separação e purificação, que ocorre quando partículas líquidas ou gasosas ficam retidas na superfície de sólidos (Muranaka, 2010).

O processo de adsorção depende de vários fatores, entre eles: natureza do adsorvente, adsorbato, e as condições de adsorção como a solubilidade do soluto, temperatura e pH (Sousa, 2017)

3.4.1.1 Adsorção Física

Segundo Andia (2009) A adsorção física, também chamada de fisissorção, é um processo de adsorção em que as moléculas do (adsorvato) são atraídas e retidas na superfície do (adsorvente). A fisissorção é um processo exotérmico e reversível devido a suas fracas ligações intermoleculares. O adsorvato é mantido na superfície por forças de van der Waals relativamente fracas e múltiplas camadas podem ser formadas com aproximadamente o mesmo calor de adsorção (Sousa, 2017).

3.4.1.2 Adsorção Química

A adsorção química ou quimissorção é quando o processo ocorre por meio de forças de natureza química. Ou seja, a adesão do adsorvato à superfície do adsorvente se estabelece por ligações químicas, que dependem muito das substâncias envolvidas. Visto que há a formação de ligações químicas, trata-se de um processo exotérmico e irreversível (Demboguski et al., 2019). O adsorbato sofre uma mudança química e é geralmente dissociado em fragmentos independentes, formando radicais e átomos ligados ao adsorvente (Tombasi, 2008).

3.5 Cinética de Adsorção

Há vários modelos propostos para ajustar os dados experimentais obtidos ao analisar a evolução do processo de adsorção ao longo do tempo. Dos modelos que apresentam essa característica, os mais usados são o de pseudo-primeira ordem e o de pseudo-segunda ordem (Guimarães, 2010).

A equação de pseudo-primeira ordem determina que a taxa de adsorção global é proporcional à força motriz e para a equação de pseudo-segunda ordem a taxa de adsorção global é o quadrado da força motriz (Santos, 2017).

3.5.1 Pseudo-primeira Ordem

Esse modelo considera que o processo de adsorção de um adsorvato presente na fase líquida é reversível e que alcança um estado de equilíbrio (Guimarães, 2010).

A equação é dada por:

$$q_t = q_e \times (1 - \exp(-k_1 \times t)) \quad 1$$

Sendo, que q_t é a quantidade de adsorvato que foi adsorvido em tempo t (mg g⁻¹), q_e é a quantidade de equilíbrio (mg g⁻¹), K_1 é a constante de pseudo-primeira ordem (min⁻¹) e t é o tempo de contato (min).

3.5.2 Pseudo-segunda Ordem

A equação é dada por:

$$q_t = \frac{K_2 q_e^2 t}{1 + q_e K_2 t} \quad 2$$

Sendo, que q_t é a quantidade de adsorvato que foi adsorvido em tempo t (mg g⁻¹), q_e é a quantidade de equilíbrio (mg g⁻¹), K_2 é a constante de pseudo-segunda ordem (g mg⁻¹ min⁻¹) e t é o tempo de contato (min).

3.6 Isotermas de Adsorção

A isoterma de adsorção é a relação de equilíbrio entre a concentração na fase fluída e a concentra nas partículas adsorventes a uma dada temperatura. Para líquidos, a concentração geralmente é expressa em unidades de massa. A concentração do adsorvido no solido é dada como massa adsorvida por unidade de massa do adsorvente (Angia, 2009).

De acordo com Ruthven (1984), o equilíbrio de adsorção é alcançado quando a quantidade de adsorvato adsorvido não muda mais com o tempo. Isso ocorre

depois de um longo período de contato entre o adsorvente e o fluido, que deve ter uma composição química definida.

Os pesquisadores nomearam as quatro principais classes de isotermas como sendo: S e L – Isotermas do tipo Langmuir; H – alta afinidade; C – constante de partição (Angia, 2009).

As isotermas podem ser classificadas de acordo com suas características, são elas:

- As isotermas do tipo L mostram que quanto mais sítios de sólidos são preenchidos maior é a dificuldade de ser preencher sítios vagos por outras moléculas de soluto (Angia, 2009).
- A isoterma do tipo S, tem inclinação linear, onde a adsorção inicial é baixa e aumenta à medida que o número de moléculas adsorvidas aumenta. Isso ocorre devido o fenômeno chamado de adsorção cooperativa, ou seja, houve uma associação entre as moléculas adsorvidas (Sousa, 2017).
- As isotermas do tipo H trata-se de um caso especial de curva do tipo L e é observada quando a superfície do adsorvente possui alta afinidade pelo soluto adsorvido (Falone e Vieira, 2004).
- As isotermas do tipo C, correspondem a uma participação constante de soluto entre a solução e o adsorvente, dando à curva um aspecto linear. As isotermas C e L são muito próximas, podem ser consideradas iguais na maioria dos casos (Sousa, 2017).

3.6.1 Modelo de Freundlich

O modelo de Freundlich é uma equação empírica que não pressupõe homogeneidade na energia dos locais na superfície e sem limite na carga máxima de adsorção, e mostra uma consistência de uma distribuição exponencial de centros ativos característicos de uma superfície heterogênea. O modelo é descrito na equação 3:

$$q_{eq} = KC_{eq}^{1/n} \quad 3$$

onde, K é a constante de Freundlich relacionada com a capacidade de adsorção [$\text{mg g}^{-1}(\text{mg L}^{-1})^{-1/n}$] e n é o expoente de Freundlich (adimensional).

3.6.2 Modelo de Langmuir

A isoterma de Langmuir é um modelo teórico válido para adsorção em uma monocamada sobre uma superfície completamente homogênea com um número finito de locais de adsorção idênticos e específicos e com uma interação insignificante entre moléculas (Figuerola et al., 2014). O modelo é expresso pela equação 4:

$$q_{eq} = \frac{q_{max} K C_{eq}}{1 + K C_{eq}} \quad 4$$

Onde, q_{eq} é a quantidade de soluto adsorvida por unidade de massa (mg g^{-1}); C_{eq} concentração do soluto no equilíbrio (mg g^{-1}) e K é a constante de equilíbrio.

3.6.3 Modelo de Sips

A isoterma de Sips é uma forma combinada das equações de Langmuir e Freundlich, deduzidas para sistema de adsorção heterogêneos, contornando a limitação do aumento da concentração do adsorvato associada ao modelo de isoterma de Freundlich (Arjmandi et al., 2016). O modelo é expresso pela equação:

$$q_{eq} = \frac{(K C_{eq})^n q_{m\acute{a}x}}{1 + (K C_{eq})^n} \quad \text{Equação 5}$$

Sendo, K a constante de equilíbrio e n é a constante do modelo de Sips.

Segundo Deze et al., (2012) o valor de n pode variar de acordo como o sistema funciona, $n = 1$ indica que o sistema é homogêneo, e segue o modelo de Langmuir; $n < 1$ indica que o sistema é heterogêneo e $n > 1$, indica a formação de uma camada de adsorvato sobre o adsorvente.

3.7 Estado da Arte

A obtenção de biomassa a partir de resíduos agroindustriais para aplicação na adsorção de efluentes é um tema de estudo recente, com potencial para o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis para o tratamento de efluentes.

A biomassa é um material orgânico que pode ser obtido a partir de uma variedade de fontes, incluindo resíduos agroindustriais, como cascas, bagaços, palhas e resíduos de processamento de alimento.

A secagem da biomassa é um passo importante para otimizar sua capacidade de adsorção. A secagem remove a umidade da biomassa, o que torna as moléculas do contaminante mais propensas a interagir com a superfície da biomassa.

No estudo de Sousa et al., (2020), os autores avaliaram a cinética de adsorção de efluentes têxteis simulados por corantes em um bioadsorvente, a farinha de casca de laranja. O adsorvente foi obtido pela secagem das cascas de laranja em estufa com circulação de ar. Para isso, foi utilizado um planejamento fatorial 2^2 , com duas repetições no ponto central. As variáveis estudadas foram a temperatura e a massa do adsorvente. A variável resposta foi a percentagem de remoção de corante.

No trabalho de Teles et al., (2023) que investigou o processo de secagem do malte, realizando os experimentos em uma estufa de circulação de ar, utilizando um planejamento fatorial completo 2^2 com três repetições no ponto central. Foram avaliadas as curvas de secagem e os resultados foram ajustados a modelos matemáticos para descrever a cinética de secagem. A variável dependente analisada foi a constante de secagem, a partir de quatro modelos matemáticos empíricos: Modelo de Newton, Modelo de Page, Modelo de Page modificado e Modelo de Fick. As variáveis independentes foram as temperaturas 50, 60 e 70°C e a massa do produto, 100, 200 e 300g.

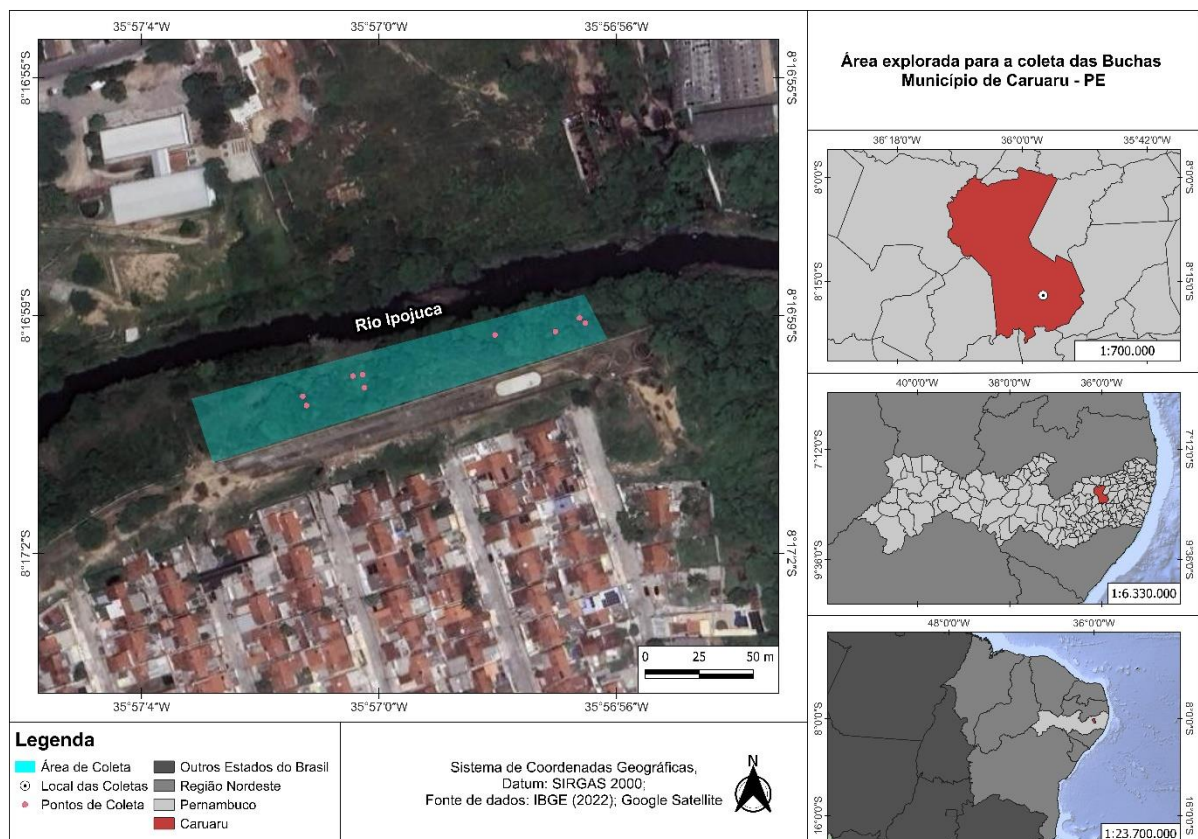
4 METODOLOGIA

4.1 Caracterização dos materiais

4.1.1 Matéria Prima

As buchas vegetais foram coletadas sem atingir o grau de maturação, na cidade de Caruaru – PE (Figura 2). Os experimentos foram realizados no LAPECA, localizado no Centro de Ciências e Tecnologia (CCT) e vinculado ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA), no Campus I, Campina Grande – PB.

Figura 2 – Mapa dos Pontos de Coleta



Fonte: elaborado pelo autor (2023)

4.1.2 Corantes

Os corantes Guarany® utilizados nos ensaios foram obtidos no centro de Campina Grande – PB. A fabricante dispõe de sete tipos de corantes diferentes, sendo categorizadas de acordo com a finalidade e tipo de tecido a serem aplicados os corantes. As classes são: tingecor; vivacor; sintexcor; colorjeans; fixacor; tiracor e hobbycor.

Segundo informações do fabricante, os corantes tingecor são especiais para tingir tecidos de algodão, linho, sisal, rami, cânhamo, juta, rayon e viscose. Já os corantes vivacor, são indicados para poliamida (nylon), lycra, lã e seda natural.

Foram utilizados os corantes vivacor 15-natier (azul) e tingecor 61-vinho, adquiridos no comércio de Campina Grande- PB.

4.2 Preparo das amostras

No laboratório, as buchas foram cortadas e descascadas manualmente, tendo suas fibras descartadas, sendo aproveitadas para os experimentos apenas a casca. Após a etapa de corte, as amostras foram pesadas e em seguida levadas a estufa de secagem seguindo o planejamento experimental (Tabela 03).

Não foi realizado nenhum processo de tratamento das cascas antes da secagem. A figura 3 detalha as etapas que foram seguidas no preparo das amostras.

Figura 3 – Etapas do processo de preparo das amostras



Fonte: elaborado pelo autor (2023)

4.3 Secagem

O estudo da secagem foi realizado a partir de um planejamento experimental 2^2 com duas repetições no ponto central. As variáveis de independentes foram a temperatura e a massa do bioadsorvente. A matriz do planejamento é apresentada nas Tabelas 3 e 4. Para os estudo secagem foi utilizada a estufa com circulação de ar modelo SSDc 40L da fabricante SolidSteel. Para a análise dos dados experimentais, foi utilizado o software *Statistica* versão 7.0, utilizando-se a análise da regressão não linear, pelo método Quasi-Newton.

Tabela 3 – Planejamento Experimental 2²

Ensaio	Temperatura (°C)	Massa (g)
1	-1	-1
2	+1	-1
3	-1	+1
4	+1	+1
5	0	0
6	0	0

Tabela 4 – Planejamento Experimental 2² decodificada

Ensaio	Temperatura (°C)	Massa (g)
1	50	100
2	70	100
3	50	300
4	70	300
5	60	200
6	60	200

4.3.1 Curva de Secagem

Para construção da curva de secagem utilizaram-se as temperaturas de 50°C, 60°C e 70°C com variação de $\pm 2,5^\circ\text{C}$ e a massa inicial da casca da bucha seguindo o planejamento experimental. O material foi retirado da estufa em determinados intervalos de tempo, conforme a Tabela 5, para a realização da pesagem foi utilizada uma balança de precisão da marca Coleman modelo BN 600 com precisão de 0,01g.

Tabela 5 – Intervalo de tempo utilizado para a pesagem do material durante a secagem.

Tempo de monitoramento (min)	Intervalo de pesagem (min)
Primeira hora	A cada 5min
Segunda hora	A cada 10min
Terceira hora	A cada 20min
A partir da quarta hora	A cada 30min

4.4 Adsorção

4.4.1 Curvas de Calibração

Essas variações incluíram concentrações de 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180 e 200 mg L⁻¹, com o propósito de estabelecer um intervalo abrangente para a construção da curva. A absorbância foi medida a um comprimento de onda de 525 nm para o corante 61-vinho e de 540 nm para o 15-natier. Os dados resultantes foram utilizados para elaborar a curva de calibração.

A Tabela 6 apresenta as equações das curvas de calibração e seus respectivos coeficientes de correlação

Tabela 6 – Equações das Curvas de Calibração

Corante	Equação	R ²	
15-natier	$Abs = 3352,9C$	0,9799	6
61-vinho	$Abs = 576,45C$	0,9922	7

Abs – Absorbância; **C** – Concentração.

4.4.2 Cinética de adsorção

Após a secagem do material, as amostras foram trituradas e armazenadas para realizar os experimentos de adsorção com o corante 61-vinho e 15-natier. Os erlenmeyers contendo 25 mL da solução de corante com 200 mg. L⁻¹ e com massa de 0,25 g do adsorvente foram colocadas sob agitação de 80 rpm, sendo ordenadas com um intervalo de 5 minutos entre cada amostra, totalizando um experimento de 60 minutos. O líquido resultante foi centrifugado a uma velocidade de rotação de 2400 rpm por 15 minutos, visando a separação dos sólidos em suspensão. A concentração de cada amostra foi determinada por meio da leitura da absorbância em um espectrofotômetro.

A quantidade de material adsorvido foi calculada pela Equação 08:

$$q = \frac{V(C_i - C_t)}{M} \quad 8$$

Em que:

C_i : concentração inicial do corante (mg/L)

C_t : concentração do corante no tempo t (mg/L)

M : massa do bioadsorvente (g)

V : volume da solução do corante (mL)

4.4.3 *Isotermas de Adsorção*

As isotermas de adsorção foram obtidas para o ensaio que apresentou a melhor remoção. O tempo de contato foi definido a partir do modelo cinético que melhor se ajustou aos dados experimentais. As isotermas utilizadas no trabalho foram as de Langmuir e Sips.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Cinética de Secagem

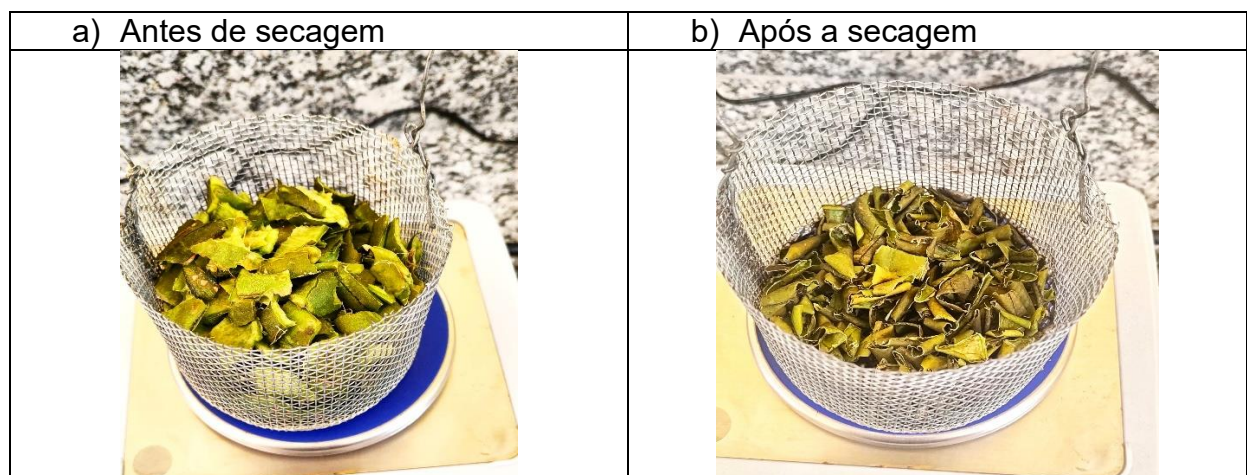
A determinação da umidade inicial das cascas foi realizada por meio de um aparelho de infravermelho. Essa medida foi necessária para obter a massa seca do material. Os resultados estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Umidades Iniciais das cascas das buchas

Ensaio	Umidades Iniciais (%)
1	89,78
2	86,60
3	89,09
4	89,01
5	89,15
6	93,80

A curva de secagem é apresentada na Figura 5. De acordo com a ANVISA que dispõe sobre o teor de umidade destes produtos, para serem classificados como farinha, eles devem conter no máximo 15% umidade em base seca. Os resultados apresentados apontam valores variando entre 4 e 10% de umidade em base seca. A Figura 4 apresenta os resultados do experimento 5 após a secagem.

Figura 4 – Comparativo de antes e depois da secagem do ensaio 5



Fonte: autoria própria (2023)

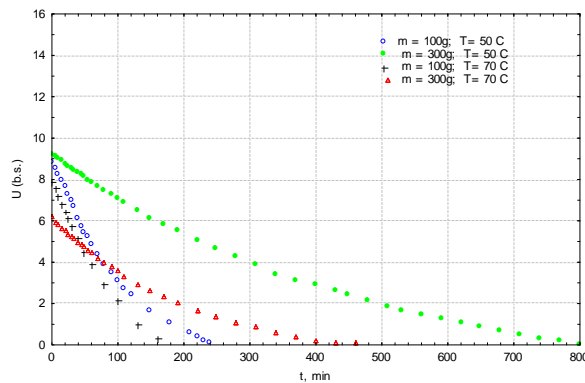
A figura 5a descreve o comportamento cinético das curvas de secagem obtidas para os ensaios de 1 a 4. Observa-se que para quantidades menores de casca e temperaturas mais elevadas a secagem ocorre mais rapidamente como era previsto na literatura. A figura 5b, apresenta o comportamento da cinética de

secagem, para os ensaios 5 e 6 realizados na condição de ponto central para verificar a reprodutibilidade dos resultados. Verifica-se comportamento similar ao observado nas curvas de cinética de secagem apresentadas anteriormente. Observamos uma boa reprodução dos dados experimentais.

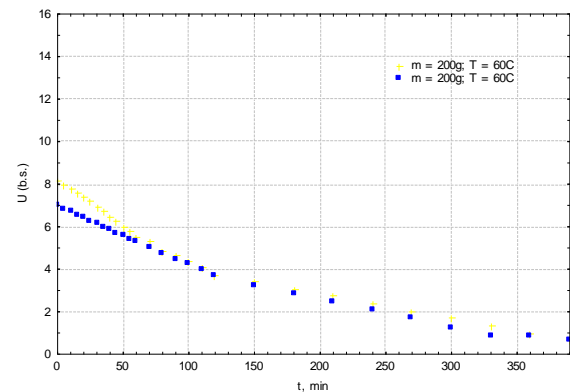
Este comportamento revela que o tempo e a temperatura do ar de secagem exercem influência sob a cinética de secagem de alimentos, como o observado por Nunez et al. (2014) na descrição da cinética de secagem da polpa de jabuticaba.

Figura 5 – Curvas de secagem

a) Ensaios de 1 a 4



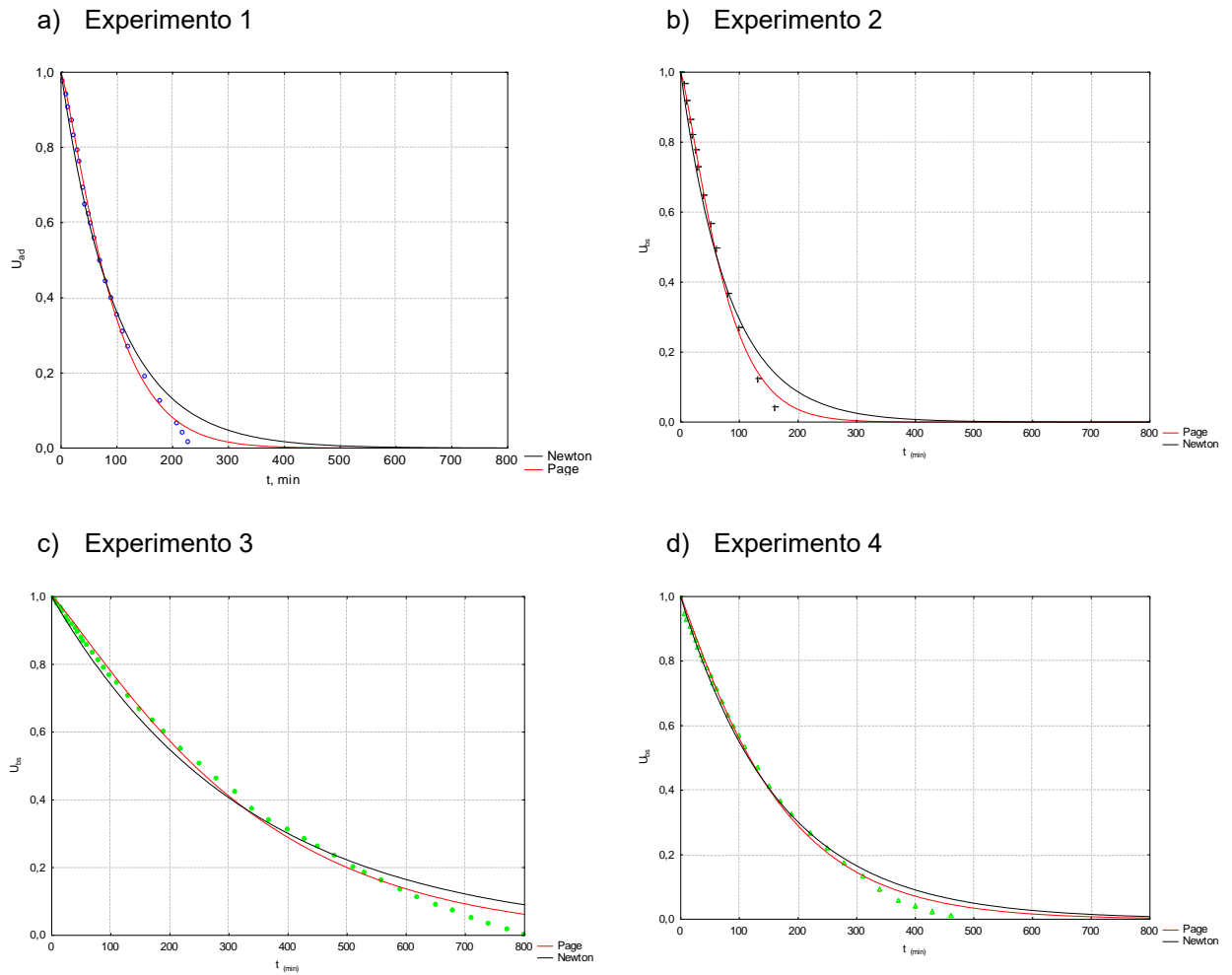
b) Ensaios 5 e 6



5.1.1 Análise estatística dos modelos de secagem

As Figuras 06a, 06b, 06c e 06d apresentam os ajustes dos dados experimentais aos modelos de secagem utilizados no presente trabalho. Verifica-se que os dois modelos ajustam de maneira satisfatória os resultados encontrados, principalmente, na parte inicial da curva de secagem onde ocorre uma secagem praticamente constante. Os valores de R^2 apresentam valores em média de 0,99 para os modelos como observado na Tabela 7.

Figura 6 – Modelos de Secagem aplicados aos experimentos



A Tabela 7 apresenta um resumo dos parâmetros dos modelos de secagem utilizados neste trabalho. Os resultados apresentados corroboram com o que foi mostrado anteriormente durante as curvas de secagem. Ensaios realizados com menor massa e maior temperatura a secagem ocorre mais rapidamente. Este fato que também foi observado por De Lima Marsiglia et al. (2021), ao realizarem a cinética de secagem de casca de jabuticaba nas temperaturas de 45, 50 e 55°C. Estudos como os de Sousa et al. (2020) e Teles et al. (2023), também encontraram resultados semelhantes. Os experimentos mostraram que o tempo de secagem varia de acordo com a massa inicial e a temperatura. Assim, experimentos com menor massa e maior temperatura apresentaram tempos de secagem mais curtos.

Tabela 8 – Dados experimentais dos modelos Cinéticos de Secagem

	Experimentos	R ²	K (min ⁻¹)	n	AIC	SE
NEWTON	1	0,992	0,003		-153,849	0,0406
	2	0,995	0,01		-288,943	0,0347
	3	0,998	0,0059		-85,803	0,0469
	4	0,997	0,012		-230,903	0,0246
PAGE	1	0,998	0,0011	1,23	-206,675	0,0129
	2	0,998	0,0037	1,16	-330,113	0,0210
	3	0,997	0,0024	1,26	-112,500	0,0168
	4	0,998	0,004	1,09	-250,100	0,0171

Em que:

K: Constante de Secagem;

n: Coeficiente de Page

AIC: Teste de AKAIKE

SE: Erro padrão

A Tabela 8 apresenta a análise de variância para as variáveis resposta tempo de secagem e constante de secagem obtida pelo modelo de Newton. A partir do teste de hipótese F observa-se que o modelo linear proposto para o tempo de secagem é estatisticamente significativo apresentando uma razão entre o F calculado e o F tabelado igual a 15,90. Desta feita, realizou-se o teste de curvatura onde é possível ver que o valor de R² apresenta um valor melhor de 0,99.

Tabela 9 - Análise Variância e teste F

Variável Resposta	Qualidade do ajuste	Coeficiente de Correlação	Para o modelo de Newton		
			F _{calc}	F _{tab}	F _{calc} /F _{tab}
t _s	0,99	0,99	304,7	19,16	15,90
K _s	0,69/0,98*	0,87/0,99*	4,83	19,16	0,25

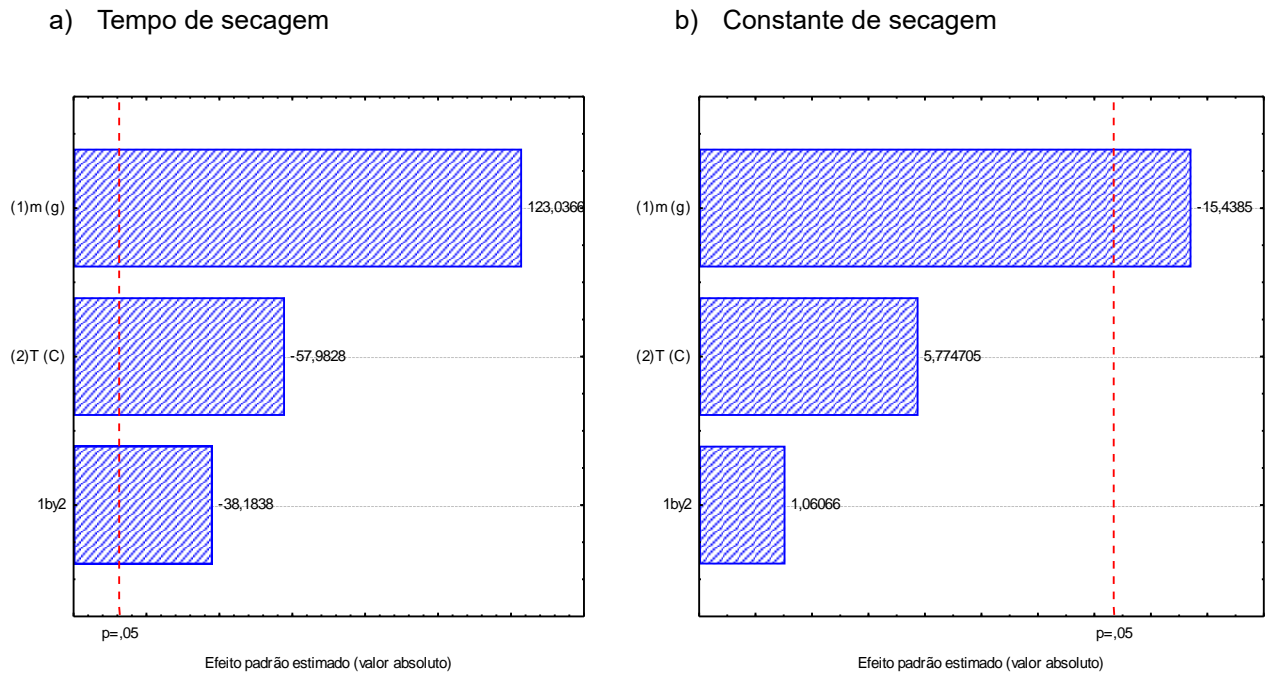
*Teste de curvatura; t_s (tempo de secagem); K_s (constante de secagem)

Considerando os efeitos das variáveis independentes (temperatura e massa da casca da bucha vegetal) foi obtido um modelo estatístico apenas para o tempo de secagem de acordo com a ANOVA após a secagem em estufa com circulação de ar. Este modelo é representado pela equação 9 onde são colocados apenas os parâmetros que foram estatisticamente significativos de acordo com o diagrama de

Pareto (Figura 10). Modelo estatístico para o tempo de secagem é expresso na equação 9:

$t_s = 405,83 + 217,00m - 102,50T - 67,50m * T$	9
---	---

Figura 7 – Diagrama de Pareto – Parâmetros de Secagem



5.2 Cinética de Adsorção

Para cada farinha produzida em diferentes condições de secagem, foi testado os modelos cinéticos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem e feita a análise de qual modelo que melhor representa o processo de adsorção do corante sobre a farinha da casca da bucha. A figura 8 mostra o resultado da farinha da casca da bucha após a trituração.

Figura 8 – Farinha da casca após trituração



Fonte: autoria própria (2023)

A eficiência de remoção do corante utilizando a farinha da casca da bucha como adsorvente foi avaliada por meio de ensaios cinéticos a temperatura ambiente. A figura 9 mostra as amostras após o processo de agitação e centrifugação.

Figura 9 – Ensaio experimento 4 após a filtração.



Fonte: autoria própria (2023).

Os resultados dos ensaios mostraram que a farinha apresentou eficiência de remoção do corante 61-vinho de 64% em média, conforme Tabela 9.

Tabela 10 – Quantidade removida dos corantes a cada experimento para o corante 61-vinho

Ensaio	Temperatura	Massa	Remoção (%)
1	50	100	64,45
2	70	100	54,54
3	50	300	67,12
4	70	300	68,00
5	60	200	63,01
6	60	200	63,87

O pior resultado foi obtido com uma concentração de 68,21 mg/L do corante 61-vinho na solução, uma massa de 100 g de farinha de casca da bucha, uma temperatura de 70 °C e um tempo de contato de 1 hora. Nesse caso, a eficiência de remoção do corante foi de 54,54%.

Para o melhor resultado, a concentração do corante 61-vinho na solução foi de 63,99 mg/L, a massa de farinha de casca da bucha foi de 300 g, a temperatura foi de 70 °C e o tempo de contato foi de 1 hora. Neste caso, a eficiência de remoção do corante foi de 68%.

Os ensaios para o 15-natier foram realizados com as condições que resultaram na menor e na maior eficiência de remoção do corante 61-vinho. Na Tabela 10 é mostrado os resultados dos ensaios.

Tabela 11 – Quantidade removida dos corantes a cada experimento para o corante 15-natier

Ensaio	Temperatura	Massa	Remoção (%)
2	50	300	58,09
4	70	300	69,82

Nos estudos de Souza et al., (2020) utilizando a casca de laranja como adsorvente, obtiveram o melhor resultado de remoção do corante tupy-16 bordô nas condições de 300g, 70°C e com tempo de secagem de 395 minutos. Resultado similar ao que foi encontrado no presente trabalho.

5.2.1 Análise Estatística

Os parâmetros dos modelos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem foram estimados pelo software Statistica versão 7. Os resultados estão apresentados nas tabelas 12 e 13, sendo a tabela 12 referente ao modelo de pseudo-primeira ordem e a tabela 13 referente ao modelo de pseudo-segunda ordem.

Tabela 12 – Parâmetros obtidos do modelo cinético pseudo-primeira ordem

Modelo	Pseudo Primeira Ordem				
Parâmetros	qE (mg g ⁻¹)	K1(min ⁻¹)	R ²	AIC	SE
Ensaio					
1	12,46242	0,255722	0,9886	-13,8417	0,547336
2	12,46771	0,154060	0,9583	-115,646	0,010908
3	13,02574	0,218104	0,9847	-91,51	0,0276
4	13,06282	0,227875	0,9847	-8,6024	0,569529
5	12,27369	0,288798	0,9916	-18,2613	0,461775
6	12,44689	0,256553	0,9885	-13,7692	0,548865

qE – Quantidade Adsorvida; K₁ – Constante do modelo; AIC – Akaike; SE – Erro padrão

Tabela 13 – Parâmetros obtidos para o modelo de pseudo-segunda ordem

Modelo	Pseudo SegundaOrdem				
Parâmetros	qE (mg g ⁻¹)	K2 (g min ⁻¹ meq ⁻¹)	R ²	AIC	SE
Ensaio					
1	0,035319	13,29353	0,9978	-35,0672	0,241942
2	0,016961	13,84317	0,9826	-7,57567	0,396498
3	0,027438	14,01682	0,9949	-22,8483	0,38709
4	0,028475	14,04303	0,9957	-24,6245	0,361529
5	0,045446	12,94469	0,9978	-35,6779	0,236325
6	0,035630	13,27140	0,9976	-33,9707	0,252363

qE – Quantidade Adsorvida; K₁ – Constante do modelo; AIC – Akaike; SE – Erro padrão

Antunes (2016) estudou o efeito da temperatura na adsorção de corante em bucha vegetal. O objetivo do estudo foi avaliar como a temperatura afeta a capacidade da bucha vegetal de remover corantes de soluções aquosas. Os resultados do estudo mostraram que a temperatura tem um efeito positivo na adsorção de corante em bucha vegetal. Isso ocorre porque o aumento da temperatura aumenta a energia cinética das moléculas do corante, tornando mais provável que elas colidam com a superfície da bucha vegetal e sejam adsorvidas. O

estudo mostrou que o coeficiente de determinação (R^2) para os ensaios realizados a 70°C foi de 0,967, o que indica que a temperatura de 70°C é adequada para a adsorção de corante em bucha vegetal.

Segundo Ho e McKay (1999), quando o modelo de pseudo-segunda ordem representa a cinética de adsorção, a adsorção química pode ser o mecanismo predominante no processo. Isso ocorre porque a adsorção química é rápida e ocorre em concentrações mais baixas, onde a competição pelos sítios de adsorção é menor.

Em estudos anteriores, como o de Evangelista (2022), Bastos (2018) e Franco (2019), que utilizaram a bucha vegetal como bioadsorvente para remover eteramina, o modelo cinético de pseudosegunda ordem foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais.

Durante a fase inicial da adsorção, os modelos de pseudo-primeira ordem e de pseudo-segunda ordem apresentaram um desempenho semelhante. No entanto, a partir de um determinado tempo, o modelo de pseudo-segunda ordem se mostrou mais adequado. Os resultados obtidos neste trabalho, corroboram os resultados dos estudos anteriores.

5.3 Isotermas de Equilíbrio

A farinha da casca da bucha utilizada no estudo de equilíbrio foi a que apresentou o melhor percentual de remoção do corante. Este resultado foi obtido utilizando-se as seguintes condições: massa de farinha de 300 g e temperatura de 70 °C.

Os modelos aplicados aos dados são apresentados nas Figuras 13 (a) e (b) e Figuras 14 (a) e (b), que correspondem aos adsorventes 61-vinho e 15-natier, respectivamente.

Figura 10 – Modelos de Sips e Langmuir aplicados aos dados do corante 61-vinho. (a) Sips; (b) Langmuir

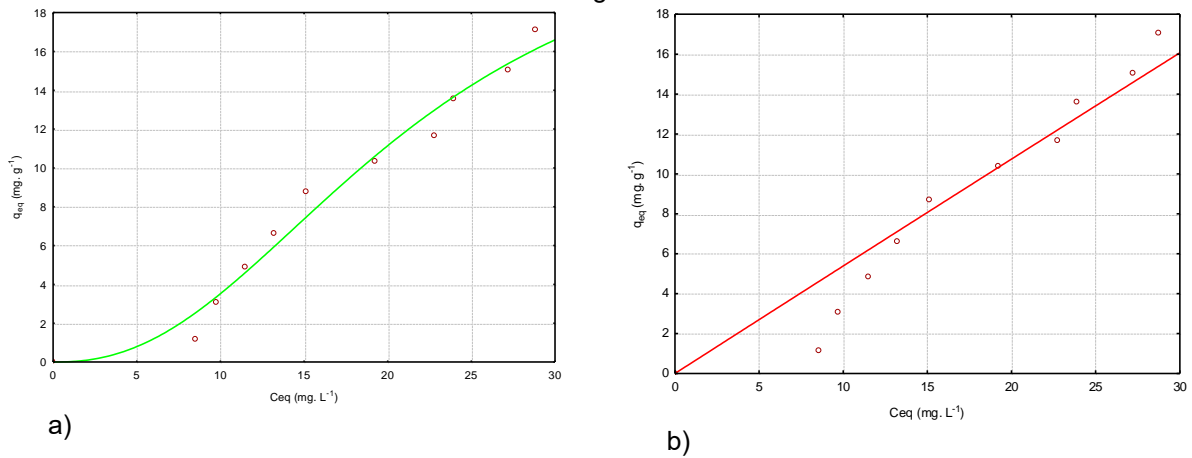
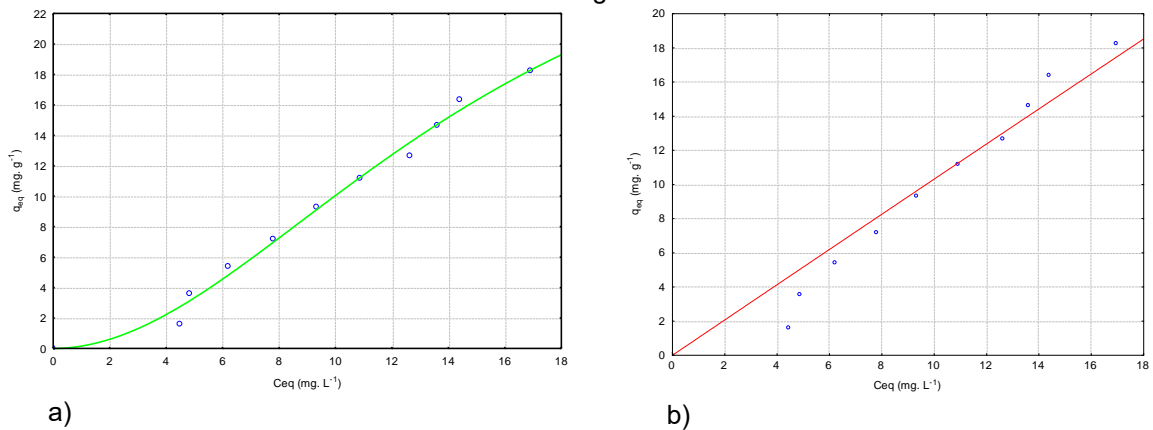


Figura 11 – Modelos de Sips e Langmuir aplicados aos dados do corante 15-natier. (a) Sips; (b) Langmuir



A Tabela 14 apresenta os parâmetros dos modelos de isotermas utilizados no presente estudo para ajustar os resultados experimentais obtidos. Os dados foram estimados pelo software *Statistica* versão 7.0.

Tabela 14 – Valores dos parâmetros e coeficiente de determinação no estudo das isotermas para o 61-vinho.

Isotermas	Parâmetros	Valores parâmetros	R ²	AIC	SE
Langmuir	Q _{max}	1801,043	0,965	-11,88243	0,38785
	K	0,0003			
Sips	Q _{max}	24,097	0,989	-18,3827	0,3478
	K	0,0468			
	N	2,330			

Q_{max} – Capacidade máxima de adsorção; K e N – Constantes dos modelos; SE – Erro padrão

A Tabela 15 apresenta os parâmetros dos modelos de isotermas de adsorção de Langmuir e Sips, utilizados para ajustar os resultados experimentais obtidos de adsorção do corante 15-natier.

Tabela 15 – Valores dos parâmetros e coeficiente de determinação no estudo das isotermas para o 15-natier.

Isotermas	Parâmetros	Valores parâmetros	R ²	AIC	SE
Langmuir	Q _{max}	3118,323	0,977	-16,8573	0,35162
	K	0,0003			
Sips	Q _{max}	33,614	0,995	-19,5489	0,34012
	K	0,0646			
	N	1,957			

Q_{max} – Capacidade máxima de adsorção; **K** e **N** – Constantes dos modelos; **SE** – Erro padrão

Os resultados experimentais encontrados neste trabalho mostraram que a isoterma de Sips é a que melhor descreve o processo de adsorção do corante sobre a farinha da casca de bucha. Essa isoterma é uma combinação de dois modelos matemáticos: a isoterma de Langmuir e a isoterma de Freundlich.

Em altas concentrações, a isoterma de Sips se comporta como a isoterma de Langmuir, o que significa que a adsorção ocorre em uma única camada. Em baixas concentrações, a isoterma de Sips se comporta como a isoterma de Freundlich, o que significa que a adsorção ocorre em múltiplas camadas.

A forma da isoterma de Sips é do tipo S, o que indica que a adsorção inicial é baixa e aumenta à medida que o número de moléculas adsorvidas aumenta. Este comportamento é consistente com a adsorção cooperativa, que é um tipo de adsorção em que as moléculas adsorvidas interagem entre si.

Evangelista (2022) estudou o uso da bucha vegetal para o tratamento de efluentes em leito fixo. Os resultados do estudo mostraram que os modelos de Sips e Langmuir são capazes de descrever o processo de adsorção de corante em bucha vegetal. No entanto, o modelo de Sips apresentou um coeficiente de determinação (R²) de 0,9824, enquanto o modelo de Langmuir apresentou um R² de 0,9701.

Foi observado por Sousa (2015), que estudou a adsorção utilizando a casca de banana, que o modelo de Sips foi o que mais se adequou aos dados experimentais, com o R² de 0,97.

No trabalho de Franco (2019) no qual é estudado a adsorção de eteraminas pela bucha vegetal, os modelos que mais se adequaram aos dados foi a isoterma de

Freundlich. O formato da isoterma foi do tipo S, que indica a formação de multicamadas, o que corrobora com o presente trabalho.

No estudo de Vicentin (2016) o equilíbrio foi obtido no tempo de 30 minutos, apresentando o melhor resultado de remoção do corante na concentração de 75 mg L⁻¹, tendo o modelo do isoterma de Langmuir com o melhor ajuste.

6 CONCLUSÃO

De acordo com um planejamento fatorial completo de 2^2 , as condições ótimas para o processo de secagem são temperatura de 70°C , tempo de 800 minutos e massa de 300g.

O modelo cinético de Page apresentou melhor ajuste aos dados experimentais de secagem, com um coeficiente de determinação (R^2) acima de 0,99.

A quantidade de corante adsorvida no processo de adsorção utilizando a farinha de casca da bucha vegetal produzida em diferentes condições com remoção na faixa de 64% de média para os ensaios do corante 61-vinho, para um tempo de contato de 60 minutos. Já para o corante 15-natier, o melhor resultado de remoção ficou com 70% e 58% para a pior remoção.

O modelo cinético de pseudo-segunda ordem apresentou melhor ajuste aos dados experimentais de adsorção, com um coeficiente de determinação (R^2) acima de 0,99.

A isoterma de adsorção proposta por Sips apresentou melhor ajuste aos dados experimentais de adsorção, com um coeficiente de determinação (R^2) acima de 0,99.

Provavelmente, a casca da bucha vegetal apresenta os grupos funcionais OH^- presentes em sua estrutura favorecendo a remoção de substâncias orgânicas. A secagem do material foi essencial para que o produto obtido apresentasse características em sua estrutura que favoreceram a adsorção. Desta forma, resíduo da casca da bucha vegetal após processamento de secagem em estufa com circulação de ar mostrou-se promissor como uso de bioadsorvente em tratamento de efluentes contaminados com corantes da indústria têxtil. Apresentando valores de remoção de 70%.

Como sugestão para posteriores trabalhos, sugere-se fazer tratamentos prévios nas cascas, seja lavagem ou correções de pH, pois esses fatores podem ter influência sobre a capacidade de adsorção da casca, visto que a mesma apresenta uma camada viscosa no seu interior.

REFERÊNCIAS

ABIT. Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção. Valor da produção de vestuário teve aumento de 0,5% em 2022. 22, maio. 2023.

ALMEIDA, Erica Janaina Rodrigues.; CORSO, Carlos. Renato. **Comparative study of toxicity of azo dye Procion Red MX-5B following biosorption and biodegradation treatments with the fungi *Aspergillus niger* and *Aspergillus terreus***. Chemosphere, v. 112, p.317–322, 2014. Disponível em : <<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.04.060>>. Acesso em: 18/07/2023 .

ANDIA, Javier Paúl Montalvo. Remoção de boro de águas e efluentes de petróleo por adsorção. **Rio de Janeiro, PUC-Rio, curso de Engenharia de Materiais**, 2009.

ANDRADE, Paulo José de et al. Desenvolvimento de um sistema de filtração para tratamento de soluções de corantes têxteis a base de quitosana. 2019.

ANDRÉ, A.M.M.C.N.et al. Modelagem matemática para descrição da cinética de secagem da semente de maracujá amarelo. In: **Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia CONTECC**. 2018.

ARJMANDI, M.; PAKIZEH, M.. AN EXPERIMENTAL STUDY OF H₂ AND CO₂ ADSORPTION BEHAVIOR OF C-MOF-5 AND T-MOF-5: A COMPLEMENTARY STUDY. Brazilian Journal of Chemical Engineering, v. 33, n. 1, p. 225–233, jan. 2016.

ANTUNES, Angela et al. Avaliação da potencialidade de adsorção da bucha vegetal (*Luffa cylindrica*) para remoção de corante de meios aquosos. **TECNO-LÓGICA**, Santa Cruz do Sul, v. 20, n. 2, p. 72-79, 2016.

BASTOS, Patricia Cardoso. Caracterização do biossorvente *Luffa Cylindrica* in natura e funcionalizado e seu uso na remoção de eteraminas de soluções aquosas. 2018.

BRASIL, Resolução CONAMA n°357, de 17 de março de 2005. Classificação de águas, doces, salobras e salinas do Território Nacional. Publicado no D.O.U.

BRASIL. Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução da Diretoria Colegiada - RDC nº 711, de 1º de julho de 2022. Dispõe sobre os requisitos sanitários dos amidos, biscoitos, cereais integrais, cereais processados, farelos, farinhas, farinhas integrais, massas alimentícias e pães. Brasília, DF, 1º de julho de 2022.

CANO-CHAUCA, Milton et al. Curvas de secagem e avaliação da atividade de água da banana passa. **Boletim do centro de pesquisa de processamento de alimentos**, v. 22, n. 1, 2004.

DA SILVA EVANGELISTA, Jéssica Cristine et al. **Adsorção de eteramina por Luffa Cylindrica lavada em batelada e em coluna de leito fixo visando o tratamento de efluentes de flotação**. 2022.

DEMOGURSKI, Laura da Silva; ROSSET, Morgana; FERIS, Liliana Amaral. Remoção dos poluentes emergentes paracetamol e diclofenaco sódico por adsorção em carvão ativado em pó. **Simpósio sobre Sistemas Sustentáveis (5.: 2019: Porto Alegre). Anais: volume 01. Porto Alegre: GFM, 2019.**, 2019.

DE LIMA MARSIGLIA, Wanda Izabel Monteiro et al. Modelagem e simulação do processo de secagem das cascas de jabuticaba (*Myrciaria cauliflora*). **Research, Society and Development**, v. 10, n. 3, p. e21510313214-e21510313214, 2021.

Deze EG, Papageorgiou SK, Favvas EP, Katsaros FK. Porous alginate aerogel beads for effective and rapid heavy metal sorption from aqueous solutions: Effect of porosity in Cu²⁺ and Cd²⁺ ion sorption. **Chemical Engineering Journal**. 2012;209:537-46.

FALONE, Sandra Zago; VIEIRA, Eny Maria. Adsorção/dessorção do explosivo tetril em turfa e em argissolo vermelho amarelo. **Química Nova**, v. 27, p. 849-854, 2004.

FARIAS, R. P; **Secagem de banana em estufa: efeitos térmicos e geométricos**. Tese. Doutorado em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande –PB, 2011.

FICHES, Iago Seginardi. OLIVEIRA, Kelly Regina. FELIPPE, Monica Tais Siqueira D'Amelio. Estudo da bucha vegetal como material bioadsorvente para remoção de

corante azul marinho. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**. Ano. 07, Ed. 09, Vol. 08, pp. 58-86. setembro de 2022. ISSN: 2448-0959, Link de acesso: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-quimica/bucha-vegetal>, DOI: 10.32749/nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-quimica/bucha-vegetal.

FIGUEROA, Danilo; MORENO, Anderson; HORMAZA, Angelina. Equilibrio, termodinámica y modelos cinéticos en la adsorción de Rojo 40 sobre tuza de maíz. **Revista Ingenierías Universidad de Medellín**, v. 14, n. 26, p. 105-120, 2015.

FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. **Princípios das operações unitárias**. 2a ed. Rio de Janeiro: LTC, 1982.

FRANCO, K. B; **Estudo da adsorção de eteraminas de soluções aquosas pela bucha vegetal (Luffa Cylindrica) em sistema batelada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

GONELI, A.L.D., VIEIRA, M. C., VILHASANTI, H. C.B., et al., Modelagem matemática e difusividade efetiva de folhas de aroeira durante a secagem. **Redalyc**, v.44, n.1, p.56-64, fev. 2014.

GUIMARÃES, D. **Tratamento de efluentes ricos em sulfato por adsorção em resinas de troca iônica**. 2010. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

HO, Y. S.; MCKAY, G. M. Pseudo-second order model for sorption process. *Process Biochemistry*, v. 34, p. 451 – 465, 1999.

MACEDO, Keyliane Rocha. Métodos de tratamento de efluentes gerados pela indústria têxtil: uma revisão bibliográfica. 12f., Mossoró, 2019.

MEDEIROS, Marcelo Gurgel. **Caracterização e avaliação de acessos de bucha vegetal**. 2015. 73 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Mossoró-RN, 2015.

MENEZES, M.L., STRÖHER, A.P., PEREIRA, N.C., et al., de. Análise da cinética e ajustes de modelos matemáticos aos dados de secagem do bagaço do maracujá-amarelo. **Engevista**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p.176-186, 2013.

MORAES, Sergio Oliveira; RODRIGUES, V. C. Secagem de alimentos. **Universidade de São Paulo**, 2006.

MUJUMDAR, A. S. Principles, classification, and selection of dryers. In **Handbook of industrial drying**. 3. ed. CRC Press. p. 28-57, 2006.

MURANAKA, Cínthia Tiemi. **Combinação de adsorção por carvão ativado com processo oxidativo avançado (POA) para tratamento de efluentes contendo fenol**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. doi:10.11606/T.3.2010.tde-20082010-145336. Acesso em: 2023-04-12.

NUNES, J. S.; CASTRO, D. S. de; MOREIRA, I. dos S.; SOUSA, F. C. de; SILVA, W. P. da. Descrição cinética de secagem da polpa de jabuticaba usando modelos empíricos. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, [S. l.], v. 9, n. 1, p. 20–25, 2014. Disponível em: <https://www.gvaa.com.br/revista/index.php/RVADS/article/view/2593>. Acesso em: 25 nov. 2023.

OLADELE, Joshua Olasunkanmi et al. **DETERMINATION OF SUITABLE THIN LAYER DRYING CURVE MODEL FOR SPONGE-GOURD (*Luffa Cylindrica*) SEED**.

OLIVEIRA, Genardo Queiroz de. **Secagem da fibra do pseudocaule da bananeira: avaliação de modelos cinéticos, difusividade efetiva, propriedades termodinâmicas e caracterização estrutural**. Orientador: Rui Nelson Otoni Magno. 2021. 68 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) - Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2021. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br:8080/jspui/handle/2011/14971>.

RAMOS, Márcio Daniel Nicodemos et al. Análise crítica das características de efluentes industriais do setor têxtil no Brasil. **Revista Virtual de Química**, v. 12, p. 913-929, 2020.

RAMOS, Marizabel da Silva. **Aplicação de redes neurais artificiais (RNA) na modelagem matemática do processo de adsorção de corantes têxteis presentes em águas residuárias usando a fibra de sisal como adsorvente**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2022.

RIBEIRO, Milena Hellen Damasceno; NETO, André Pedro Fernandes. **O impacto da automação na indústria têxtil no município de Jaguaruana – CE**. Universidade Federal Rural do Semiárido – UFRSA, Curso de Bacharelado em Ciência e Tecnologia. Trabalho de Conclusão de Curso - Rio Grande do Norte, 2021.

SANTOS, Kleber Jean Leite dos. **Produção, caracterização e aplicação como agente adsorvente do biocarvão obtido a partir da Syagrus oleracea e Wodyetia bifurcata**. 2017. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Tecnologia, Programa de Pós Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2017.

SILVA, Damião Alves dos Santos. **Caracterização do efluente e avaliação da eficiência do sistema de tratamento de uma indústria têxtil do Vale do Piancó-PB**. 2019. 53f. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Química) - Centro de Formação de Professores, Universidade Federal de Campina Grande, Cajazeiras, Paraíba, Brasil, 2019.

SILVA, Paulo Ozeride. **Métodos de tratamento de efluentes da indústria têxtil**. 2013.

SOUZA, E. S. ; SOUZA, E. S. ; ALMEIDA, M. M. ; VIEIRA, F. F. ; VIEIRA, F. F. ; LUIZ, M. R. ; SOUZA, N. C. ; ARAUJO, H. W. C. ; FERREIRA, W. B. . Utilização da farinha

da casca de laranja como bioadsorvente em efluentes têxteis. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, p. 60101-60109, 2020.

TASSI, Felipe Gomes. **Metodologias para tratamento de efluentes têxteis: uma revisão**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de São Carlos, Lagoa do Sino, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/15984>.

TAMBOSI, J. L. **Remoção de fármacos e avaliação de seus produtos de degradação através de tecnologias avançadas de tratamento**. Tese de Doutorado em Engenharia Química. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2008.

TELES, T. B.; LUIZ, M. R.; TOMAZ, J. L. F.; DE ALMEIDA, M. M.; DE SOUZA, N. C.; DE LIMA, C. V. A.; OLIVEIRA, T. da S. Avaliação do processo de secagem de resíduo de malte. **Brazilian Journal of Development**, [S. l.], v. 9, n. 2, p. 7698–7712, 2023. DOI: 10.34117/bjdv9n2-103. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/57359>. Acesso em: 22 nov. 2023.

THOMAS, W. J.; CRITTENDEN, Barry. **Adsorption Technology and Design**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=ipDjl2tyXfkC>.

VILLELA, F. A.; SILVA, W. R. DA .. Curvas de secagem de sementes de milho utilizando o método intermitente. **Scientia Agricola**, v. 49, n. spe, p. 145–153, 1992.

VICENTIN, Bruna Martins. **Estudo da adsorção de corante têxtil em fibras naturais de bucha vegetal (*Luffa Cylindrica*)**. 2017. 43 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2017.

