



UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS I – CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM BACHARELADO EM ENGENHARIA SANITÁRIA
E AMBIENTAL

LETICIA DE SENA COSTA

APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL NA
MODELAGEM MATEMÁTICA NO PROCESSO DE ADSORÇÃO DE POLUENTES
TÊXTEIS EM ÁGUAS RESIDUÁRIAS

CAMPINA GRANDE - PB

2025

LETICIA DE SENA COSTA

**APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL NA
MODELAGEM MATEMÁTICA NO PROCESSO DE ADSORÇÃO DE POLUENTES
TÊXTEIS EM ÁGUAS RESIDUÁRIAS**

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

Orientador: Prof. Dr. Fernando Fernandes Vieira.

CAMPINA GRANDE - PB

2025

É expressamente proibida a comercialização deste documento, tanto em versão 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.

C837a Costa, Leticia de Sena.

Aplicação da técnica de planejamento experimental na modelagem matemática no processo de adsorção de poluentes têxteis em águas residuárias [manuscrito] / Leticia de Sena Costa. - 2025.

25 f. : il. color.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia sanitária e ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2025.

"Orientação : Prof. Dr. Fernando Fernandes Vieira, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - CCT".

1. Planejamento fatorial. 2. Adsorção. 3. Mesocarpo da laranja. I. Título

21. ed. CDD 660.63

LETICIA DE SENA COSTA

APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL NA
MODELAGEM MATEMÁTICA NO PROCESSO DE ADSORÇÃO DE POLUENTES
TÊXTEIS EM ÁGUAS RESIDUÁRIAS

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

Aprovada em: 12/06/2025.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado eletronicamente por:

- **Fernando Fernandes Vieira** (***.840.164-**), em **20/06/2025 16:37:24** com chave **fdbc07fa4e0d11f0aba31a7cc27eb1f9**.
- **Marcello Maia de Almeida** (***.043.354-**), em **21/06/2025 04:11:23** com chave **f03f4bee4e6e11f0932a1a1c3150b54b**.
- **Thyago Nobrega Silveira** (***.214.304-**), em **25/06/2025 10:11:19** com chave **e277c55451c511f0b53306adb0a3afce**.

Documento emitido pelo SUAP. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse https://suap.uepb.edu.br/comum/autenticar_documento/ e informe os dados a seguir.

Tipo de Documento: Folha de Aprovação do Projeto Final

Data da Emissão: 25/06/2025

Código de Autenticação: 2903ee



LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Absorbância versus comprimento de onda	10
Figura 2 - Curva de calibração.	10
Figura 3 - Curvas de cinética de secagem do mesocarpo da laranja	12
Figura 4 - Modelos de Newton, Paige e Midilli ajustados aos dados de secagem do mesocarpo da laranja na temperatura de 50°C	13
Figura 5 - Modelos de Newton, Paige e Midilli ajustados aos dados de secagem do mesocarpo da laranja na temperatura de 60°C	14
Figura 6 - Modelos de Newton, Paige e Midilli ajustados aos dados de secagem do mesocarpo da laranja na temperatura de 70°C	14
Figura 7 - Gráfico de Pareto (QT).....	18
Figura 8 - Gráfico de Pareto (RED%).	18
Figura 9 - Gráfico de contorno para as variáveis dependentes QT (I) e RED% (II), analisando as interações entre concentração e massa.....	21
Figura 10 - Gráfico de contorno para as variáveis dependentes QT (I) e RED% (II), analisando as interações entre concentração e tempo.	21

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Intervalo de pesagens do material durante o processo de secagem.	9
Tabela 2 - Variáveis do experimento.	11
Tabela 3 - Parâmetros dos modelos de secagem do mesocarpo da laranja, a partir dos dados experimentais obtidos para as temperaturas de 50°C, 60°C e 70°C.....	15
Tabela 4 - Análise de variância e coeficiente de determinação dos modelos de Newton, Page e Midilli ajustados para a secagem do mesocarpo da laranja à 50°C.....	15
Tabela 5 - Análise de variância e coeficiente de determinação dos modelos de Newton, Page e Midilli ajustados para a secagem do mesocarpo da laranja à 60°C.....	15
Tabela 6 - Análise de variância e coeficiente de determinação dos modelos de Newton, Page e Midilli ajustados para a secagem do mesocarpo da laranja à 70°C.....	16
Tabela 7 - Matriz do planejamento experimental.....	17
Tabela 8 - Efeitos estimados e coeficientes de QT.	19
Tabela 9 - Efeitos estimados e coeficientes de RED%.....	19

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	7
2	METODOLOGIA.....	9
2.1	Preparação do adsorvente.....	9
2.1.1	<i>Estudo de secagem do mesocarpo da laranja.....</i>	9
2.2	Preparação do adsorvato	10
2.3	Planejamento experimental.....	11
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	12
3.1	Cinética de secagem do mesocarpo da laranja.....	12
3.2	Avaliação dos modelos de secagem.....	13
3.3	Matriz do planejamento experimental.....	16
3.3	Estudo da adsorção.....	17
4	CONCLUSÃO.....	22
	REFERÊNCIAS.....	22

APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL NA MODELAGEM MATEMÁTICA NO PROCESSO DE ADSORÇÃO DE POLUENTES TÊXTEIS EM ÁGUAS RESIDUÁRIAS

APPLICATION OF THE EXPERIMENTAL DESIGN TECHNIQUE IN MATHEMATICAL MODELING IN THE ADSORPTION PROCESS OF TEXTILE POLLUTANTS IN WASTEWATER

Leticia de Sena Costa¹
Fernando Fernandes Vieira²

RESUMO

A necessidade de obtenção de práticas sustentáveis no segmento do tratamento de água faz-se cada vez mais presente na atualidade. Com o alto processo de industrialização e urbanização, os riscos de contaminação hídrica vêm tornando-se um dos grandes problemas da sociedade moderna. O processo de adsorção destaca-se dentre as técnicas de remoção de contaminantes de efluentes devido a sua alta eficiência. Neste contexto, o presente estudo apresentou a utilização de um bioadsorvente advindo do mesocarpo da laranja, como uma alternativa de tratamento para remoção de corantes têxteis presentes em efluentes industriais, em especial o corante Azul de Metileno. Diante disso, foi avaliada a secagem do mesocarpo da laranja nas temperaturas de 50°C, 60°C e 70°C, e seu potencial adsorvente de corante têxtil sintético. Utilizou-se um planejamento fatorial do tipo 2³ para verificar a influência das variáveis independentes na quantidade de corante adsorvida (QT) e na redução da concentração de corante no efluente (RED%), os quais, após as análises realizadas apresentaram resultados satisfatórios com 13,28mg/g na quantidade de corante adsorvida e 73,68% de redução da concentração do corante. Neste sentido, conclui-se que o mesocarpo da laranja se demonstrou como um adsorvente de alta eficiência na adsorção de azul de metileno.

Palavras-Chave: planejamento fatorial; adsorção; mesocarpo da laranja; tratamento de efluentes.

ABSTRACT

The need for sustainable practices in the water treatment segment is increasingly present today. With the high industrialization and urbanization process, the risks of water contamination have become one of the major problems of modern society. The adsorption process stands out among the techniques for removing contaminants from effluents due to its high efficiency. In this context, the present study presented the use of a bioadsorbent from orange mesocarp as an alternative treatment for the removal of textile dyes present in industrial effluents. Therefore, the drying of orange mesocarp at temperatures of 50°C, 60°C and 70°C was evaluated, as well as its adsorbent potential for synthetic textile dye. A 2³ factorial design was used to verify the influence of the independent variables on the amount of dye adsorbed (QT) and on the reduction of the dye concentration in the effluent (RED%), which, after the analyses performed, presented

¹ Estudante de Bacharelado em Engenharia Sanitária e Ambiental; Campina Grande, PB; senaleticia2.0@gmail.com;

² Professor do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Estadual da Paraíba; Campina Grande, PB; fernando.desa@servidor.uepb.edu.br.

satisfactory results with 13.28 mg/g in the amount of dye adsorbed and 73.68% reduction in the dye concentration. In this sense, it is concluded that the orange mesocarp proved to be a highly efficient adsorbent in the adsorption of methylene blue.

Keywords: factorial planning; adsorption; orange mesocarp; dye.

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional e o aumento dos processos de industrialização trazem consigo o desequilíbrio do meio ambiente devido a má gestão dos recursos naturais, bem como à geração indiscriminada de resíduos sólidos e efluentes. Esse contexto ressalta a necessidade da busca por alternativas que mitiguem esses efeitos.

Consoante a isto, tem-se especificamente o caso da indústria têxtil, que está presente no mundo todo devido a uma necessidade humana de vestuário e usos utilitários variados como, por exemplo, na decoração, na área hospitalar, militar, entre outros, possuindo assim, um significado importante nas dimensões social, cultural, econômica e política a ponto de influenciar costumes e tendências com consequências no modo de vida em diferentes épocas (FUJITA; JORENTE, 2015).

No entanto, os processos utilizados nesse segmento ocasionam alguns impactos no meio ambiente. A Lei nº 10.165 de 27 de dezembro de 2000, que altera a Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, classifica a indústria têxtil, de vestuário, calçados e artefatos de tecidos como atividades potencialmente poluidoras e utilizadoras de recursos naturais. Segundo Pires (2020), as indústrias têxteis são consideradas as maiores consumidoras de produtos químicos, energia e água do país e a necessidade de utilização de grandes volumes de água em suas etapas de produção faz com que as empresas busquem se instalar em regiões próximas de corpos hídricos, visando a ampla oferta de água. Os seus efluentes são oriundos dos processos de lavagens e tingimentos, carregando consigo altas quantidades de corantes que são nocivos ao ambiente.

De acordo com Brandt (2021), os corantes persistem por longos períodos no ambiente aquático devido a sua alta estabilidade à luz e temperatura, bem como uma alta resistência à degradação ambiental, sendo amplamente utilizados nos processos das indústrias têxteis.

Segundo Silva e Santos (2021) o corante Azul de Metileno (MB - *Methylene Blue*) possui a fórmula química $C_{16}H_{18}ClN_3S_3H_2O$ e é descrito como um corante catiônico solúvel em água, e é um dos que mais se destaca dentre os processos industriais, devido a sua grande aplicabilidade. De acordo com Oliveira, *et al* (2013), muitas vezes ele é utilizado como

composto modelo para a remoção de corantes e contaminantes orgânicos a partir de soluções aquosas.

Silva (2023) afirma que o processo de adsorção está entre os métodos mais economicamente viáveis utilizados na remoção de corantes presentes em efluentes, e diante disso, diversas pesquisas têm se dedicado ao estudo da eficiência de possíveis materiais alternativos com potencial adsorvente para a remoção de contaminantes dos efluentes.

De acordo com Nascimento *et al* (2014), a adsorção é uma operação de transferência de massa, no qual estuda-se a habilidade de certos sólidos em concentrar na sua superfície determinadas substâncias existentes em fluidos líquidos ou gasosos, possibilitando a separação dos componentes desses fluidos.

Segundo Rocha *et al* (2012), alguns materiais adsorventes são utilizados para a remoção de contaminantes dos efluentes têxteis, dentre eles, o carvão ativado é um dos mais empregados devido a sua alta capacidade adsorvente, no entanto, possui um elevado custo industrial. Diante disso, buscando reduzir o alto custo dos processos de adsorção, destaca-se a utilização de materiais alternativos, na remoção de contaminantes orgânicos, como sabugo de milho, bagaço de cana-de-açúcar e mesocarpo de laranja. (Rocha *et al*, 2012).

A laranja do tipo pêra (*Citrus sinensis* L. *osbeck*), possui uma morfologia que se dá pela presença do epicarpo (casca), mesocarpo (albedo) e endocarpo (polpa). O mesocarpo está aderido internamente ao epicarpo, sendo a porção com coloração branca, fibrosa e espessa, e essa fração é a que mais se desenvolve na fruta acumulando substâncias nutritivas, rica em compostos aromáticos, substâncias pécticas, celulose, dentre outros componentes minoritários (Pereira, 2021). Segundo Fiorentin *et al.*, (2010), a produção industrial visando os subprodutos da laranja como sucos e óleos essenciais, gera altos volumes de resíduos sólidos, denominados de bagaço da laranja úmido.

A modelagem matemática do processo de adsorção é uma ferramenta para otimizar a eficiência desse tratamento, permitindo o controle das variáveis envolvidas no processo, como a concentração dos poluentes, o tempo de contato, e a quantidade de adsorvente utilizado. No entanto, a modelagem precisa ser realizada com base em dados experimentais confiáveis. Nesse contexto, para avaliar muitas variáveis simultaneamente garantindo confiabilidade estatística dos resultados, reduzindo o número de experimentos, o planejamento fatorial vem sendo uma opção bastante utilizada nos mais diversos experimentos, gerando dados de forma eficiente e otimizando tempo e os recursos empregados. (Siqueira *et al* 2017).

Portanto, com o objetivo de analisar o processo de remoção de corante têxtil de um efluente sintético contendo o corante azul de metileno, simulando um efluente industrial, por

meio do processo de adsorção e utilizando o mesocarpo da laranja como uma alternativa de material adsorvente, foi analisada a secagem do material em temperaturas diferentes e o seu potencial na remoção do corante, bem como foi empregada a metodologia de planejamento fatorial (2^3), com onze experimentos, sendo três pontos centrais, para otimizar o trabalho, reduzindo o número de experimentos e garantir a confiabilidade para a análise dos resultados.

2 METODOLOGIA

2.1 Preparação do adsorvente

Todos os experimentos foram realizados no Laboratório de Pesquisa em Ciências Ambientais (LAPECA), pertencente ao Centro de Ciências e Tecnologia (CCT), da Universidade Estadual da Paraíba em Campina Grande – PB.

Para a produção da matéria prima adsorvente, utilizou-se o mesocarpo da laranja do tipo pêra (*Citrus sinensis L. osbeck*), que foi cortado em pedaços menores de tamanhos aproximadamente iguais para a realização do procedimento de secagem.

2.1.1 Estudo de secagem do mesocarpo da laranja

Para dar início ao processo de secagem do mesocarpo da laranja, foi realizada a determinação da umidade inicial, através de um determinador de umidade por infravermelho.

Diante disso, a secagem do material foi realizada em estufa com circulação de ar no LAPECA, em três diferentes temperaturas, a 50°C, 60°C e 70°C, com intervalos de pesagem periódicos, até que o material alcançasse o peso de equilíbrio, e após esse processo, todo o material seco foi armazenado em sacos plásticos fechados.

A pesagem dentro do processo de secagem foi realizada em uma média de 5 horas para o alcance do equilíbrio, com intervalos que estão dispostos na tabela abaixo.

Tabela 1 - Intervalo de pesagens do material durante o processo de secagem.

Tempo	Pesagem
1ª hora	5 em 5 minutos
2ª hora	10 em 10 minutos
3ª hora	20 em 20 minutos
A partir da 4ª hora	30 em 30 minutos

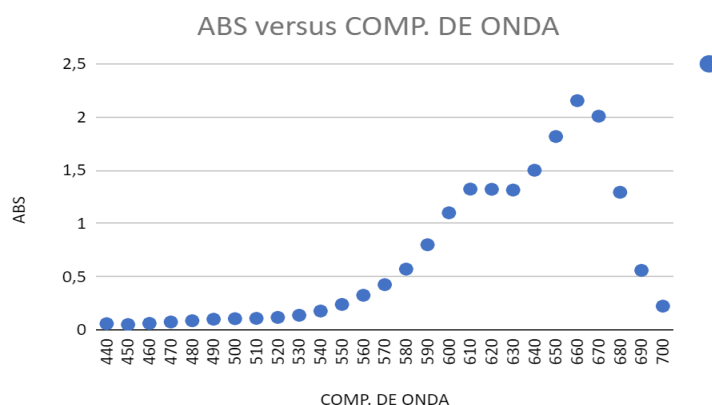
Fonte: Autora (2025).

O material seco foi triturado com o auxílio de um moinho de facas e reservado para ser utilizado durante o processo de adsorção do corante.

2.2 Preparação do adsorvato

Para realizar a preparação do adsorvato, inicialmente, foi preparado um efluente têxtil sintético (ETS) através da dissolução de 50 mg do corante azul de metileno em 1L de água destilada. Para a caracterização desse efluente, foi realizada a varredura do mesmo com o objetivo de determinar o comprimento de onda máximo, onde ocorre o maior valor de absorbância na dissolução. O comprimento de onda utilizado foi o de 660 nanômetros, conforme pode ser observado no gráfico a seguir.

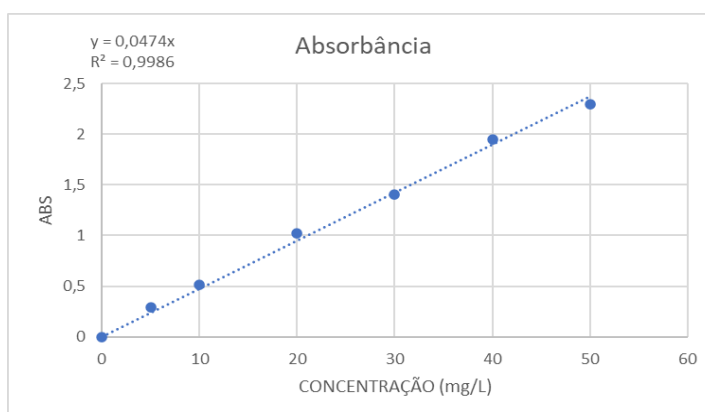
Figura 1 - Absorbância *versus* comprimento de onda.



Fonte: Autora (2025).

Logo após, para realizar a curva de calibração, foram realizadas 6 diluições distintas, sendo essas: 5, 10, 20, 30, 40 e 50 mg.L⁻¹. O gráfico da curva de calibração pode ser visto abaixo. Para obter a absorbância durante a varredura e para a construção da curva de calibração, foi utilizado espectrofotômetro.

Figura 2 - Curva de calibração.



Fonte: Autora (2025).

2.3 Planejamento experimental

Após realizar a secagem do material, o adsorvente obtido foi testado e submetido a diferentes condições operacionais, baseado no planejamento experimental.

Foi realizado o experimento utilizando o material adsorvente resultante da secagem à 60°C. Os valores codificados e reais das variáveis operacionais do experimento de adsorção, podem ser visualizados na tabela abaixo:

Tabela 2 - Variáveis do experimento.

PLANEJAMENTO			
	-1	0	1
MASSA (g)	0,1	0,2	0,3
CONC. (mg/L)	40	60	80
TEMPO (min)	30	45	60

Fonte: Autora (2025).

As variáveis utilizadas no processo foram:

- Massa do adsorvente
- Concentração do corante
- Tempo de contato

Onde: a massa é dada em gramas, a concentração do azul de metileno é dada em miligramas por litro e o tempo de contato em minutos.

Os experimentos de adsorção foram realizados sobre uma mesa agitadora orbital, utilizando-se frascos de Erlenmeyer de 125mL contendo 25 mL da solução de corante produzida. Após o tempo de contato estabelecido, todas as amostras foram levadas para centrifugação por um período de 30 minutos em rotação de 2500rpm, e por fim, através da espectrofotometria as concentrações de corante nas soluções foram determinadas.

A elaboração do planejamento fatorial foi realizada para avaliar e identificar a influência das variáveis experimentais do material sobre duas respostas, a quantidade de azul de metileno

adsorvido por unidade de massa do adsorvente (QT) e a porcentagem da redução da concentração da solução de corante têxtil (RED%), a fim de determinar as melhores condições de trabalho. Tais respostas foram calculadas a partir das equações 1 e 2 a seguir:

$$QT = \frac{V \times (C_0 - C_t)}{m} \quad (1)$$

$$RED\% = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100\% \quad (2)$$

Onde QT é a quantidade de corante adsorvido pelo mesocarpo da laranja (mg/g), RED% é a porcentagem de redução da concentração do corante (%), V é o volume da solução do corante (L), C_0 é a concentração inicial do corante (mg/L), C_t a concentração do corante em um instante de tempo t (mg/L), e m a massa do adsorvente em base seca (g).

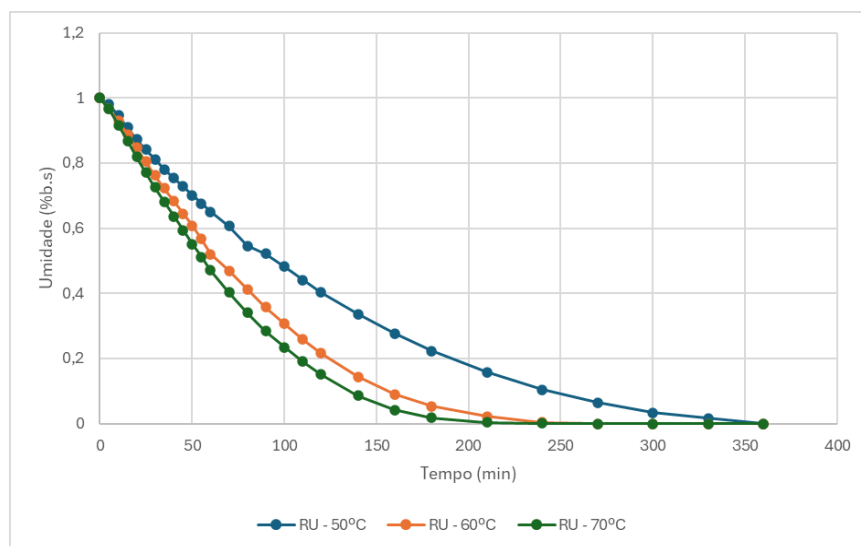
A análise da influência das variáveis independentes foi realizada através do *software* Minitab.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Cinética de secagem do mesocarpo da laranja

A variação de umidade ao longo do tempo durante os experimentos de secagem do mesocarpo da laranja realizados em estufa com recirculação de ar nas três temperaturas de 50°C, 60°C e 70°C pode ser vista na Figura 3 abaixo.

Figura 3 - Curvas de cinética de secagem do mesocarpo da laranja.



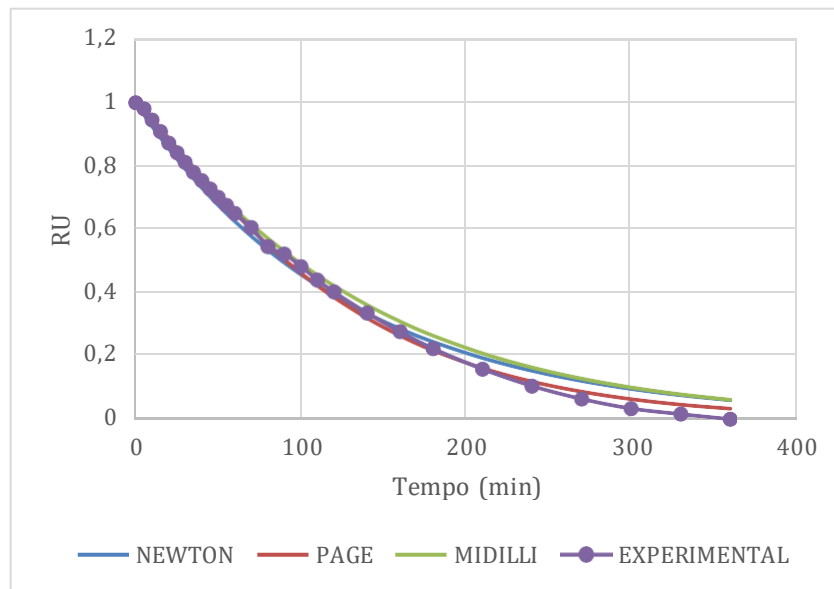
Fonte: Autora (2025).

A partir da análise, é possível verificar que o aumento da temperatura influencia na velocidade do processo, acelerando a secagem do material e tornando mais rápido o alcance do peso de equilíbrio.

3.2 Avaliação dos modelos de secagem

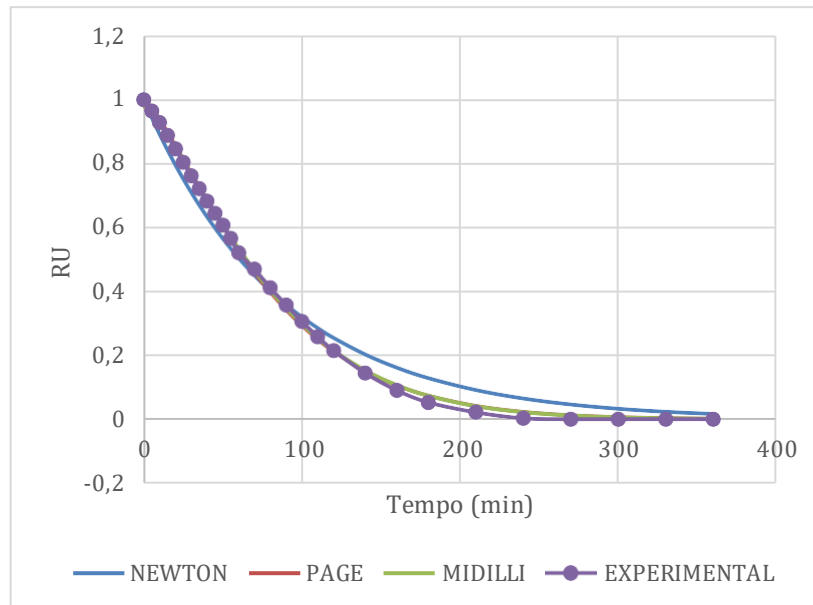
Nas Figuras 4, 5 e 6, respectivamente, pode ser observada a comparação entre os dados experimentais obtidos da cinética de secagem de 50°C, 60°C e 70°C e os dados dos modelos empíricos de Newton, Page e Midilli.

Figura 4 - Modelos de Newton, Page e Midilli ajustados aos dados de secagem do mescarpo da laranja na temperatura de 50°C.



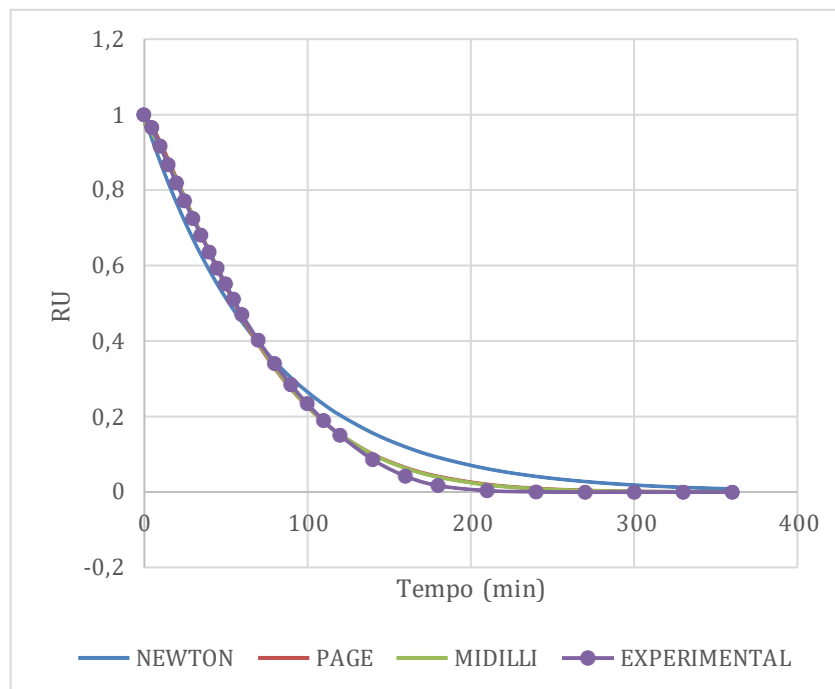
Fonte: Autora (2025).

Figura 5 - Modelos de Newton, Page e Midilli ajustados aos dados de secagem do mescarpo da laranja na temperatura de 60°C.



Fonte: Autora (2025).

Figura 6 - Modelos de Newton, Page e Midilli ajustados aos dados de secagem do mescarpo da laranja na temperatura de 70°C.



Fonte: Autora (2025).

Observou-se que, principalmente, para as temperaturas de 60°C e 70°C os modelos de Paige e Midilli foram os que apresentaram o melhor ajuste dos dados. Já para a temperatura de 50°C, o modelo de Paige mostrou melhor desempenho.

Os parâmetros encontrados a partir dos resultados experimentais para cada um dos modelos aplicados são apresentados na Tabela 3 a seguir. É importante destacar o coeficiente de secagem k (min^{-1}), que está relacionado a velocidade que a umidade do material é removida ao longo do tempo.

Tabela 3 - Parâmetros dos modelos de secagem do mesocarpo da laranja, a partir dos dados experimentais obtidos para as temperaturas de 50°C, 60°C e 70°C.

Temperatura °C	Modelo	a (adm)	b (adm)	k (min-1)	n (adm)
50	Newton	-	-	0,00783	-
	Page	-	-	0,00371	1,1593
	Midilli	1,00195	0,00	0,00523	1,0672
60	Newton	-	-	0,01140	-
	Page	-	-	0,00331	1,2844
	Midilli	0,97833	0,00	0,00266	1,3251
70	Newton	-	-	0,01325	-
	Page	-	-	0,00381	1,2953
	Midilli	0,97607	0,00	0,00295	1,3460

Fonte: Autora (2025).

Nas tabelas 4, 5 e 6 a seguir, são apresentadas as análises de variância de cada modelo a partir do ajuste das equações matemáticas por regressão não linear dos dados de cinética de secagem do mesocarpo da laranja e o coeficiente de determinação (R^2) com nível de significância de 5%.

Tabela 4 - Análise de variância e coeficiente de determinação dos modelos de Newton, Page e Midilli ajustados para a secagem do mesocarpo da laranja à 50°C.

Modelo	Fonte	Soma dos quadrados	Média dos quadrados	Graus de liberdade	R^2	Valor-F
Newton	Regressão	2,3704	2,3704	1	0,9966	7527,83
	Resíduo	0,00819	0,0003	26	-	-
	Total	2,3786	-	27	-	-
Page	Regressão	2,7552	2,7552	1	0,9979	12111,03
	Resíduo	0,0059	0,0002	26	-	-
	Total	2,7611	-	27	-	-
Midilli	Regressão	2,4603	2,4603	1	0,9993	34782,01
	Resíduo	0,0018	0,00007	26	-	-
	Total	2,4622	-	27	-	-

Fonte: Autora (2025).

Tabela 5 - Análise de variância e coeficiente de determinação dos modelos de Newton, Page e Midilli ajustados para a secagem do mesocarpo da laranja à 60°C.

Modelo	Fonte	<u>Soma dos quadrados</u>	<u>Média dos quadrados</u>	<u>Graus de liberdade</u>	R^2	Valor-F
--------	-------	---------------------------	----------------------------	---------------------------	-------	---------

Newton	Regressão	2,6109	2,6109	1	0,9944	4654,47
	Resíduo	0,0145	0,0005	26	-	-
	Total	2,6255	-	27	-	-
Page	Regressão	3,2476	3,2476	1	0,9992	31947,18
	Resíduo	0,0026	0,0001	26	-	-
	Total	3,2509	-	27	-	-
Midilli	Regressão	3,1781	3,1781	1	0,9994	42913,82
	Resíduo	0,0019	0,00007	26	-	-
	Total	3,1801	-	27	-	-

Fonte: Autora (2025).

Tabela 6 - Análise de variância e coeficiente de determinação dos modelos de Newton, Page e Midilli ajustados para a secagem do mesocarpo da laranja à 70°C.

Modelo	Fonte	Soma dos quadrados	Média dos quadrados	Graus de liberdade	R ²	Valor-F
Newton	Regressão	2,6355	2,6355	1	0,9938	4135,32
	Resíduo	0,0165	0,0006	26	-	-
	Total	2,652	-	27	-	-
Page	Regressão	3,2582	3,2582	1	0,9992	33086,80
	Resíduo	0,0026	0,0001	26	-	-
	Total	3,2608	-	27	-	-
Midilli	Regressão	3,1954	3,1954	1	0,9994	40871,24
	Resíduo	0,00203	0,00008	26	-	-
	Total	3,1975	-	27	-	-

Fonte: Autora (2025).

A partir da análise dos dados, todos os modelos apresentaram resultados satisfatórios, no entanto o modelo de Page e Midilli se destacam, principalmente nas temperaturas de 60°C e 70°C, apresentando os maiores valores do coeficiente de determinação (R²), com resultados bem próximos a 1, representando assim, um excelente ajuste dos modelos aos dados experimentais.

3.3 Matriz do planejamento experimental

O planejamento fatorial foi utilizado no sistema com objetivo de avaliar as variáveis que apresentam efeitos significativos no procedimento e que podem ser ajustadas para melhorar a eficiência do método.

As variáveis utilizadas foram: massa do adsorvente, concentração do azul de metileno e o tempo de concentração, conforme as matrizes codificadas do planejamento experimental junto com os valores da quantidade de corante adsorvido por unidade de massa do adsorvente (QT) e a redução da concentração da solução de corante (RED%), que são apresentadas na Tabela a seguir:

Tabela 7 - Matriz do planejamento experimental.

Experimento	Massa (g)	Concentração da solução (mg/L)	Tempo (min)	QT (mg/g)	RED (%)
1	0,1	40	30	6,31	63,08
2	0,3	40	30	2,27	68,14
3	0,1	80	30	13,28	66,40
4	0,3	80	30	4,68	70,25
5	0,1	40	60	6,13	61,34
6	0,3	40	60	2,46	73,68
7	0,1	80	60	13,18	65,90
8	0,3	80	60	4,59	68,78
9	0,2	60	45	5,01	66,74
10	0,2	60	45	5,02	66,91
11	0,2	60	45	4,88	65,08

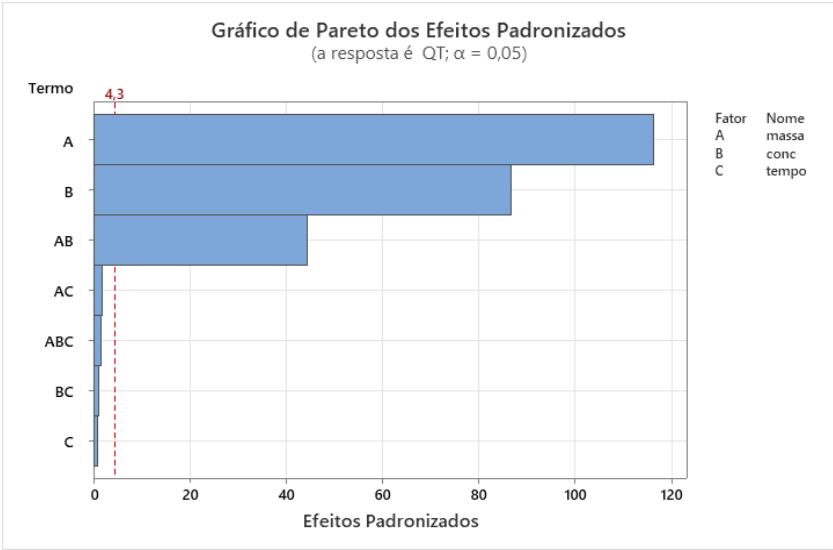
Fonte: Autora (2025).

A partir dos resultados obtidos, é possível observar que o experimento 6, utilizando 0,3 g do adsorvente, uma solução com concentração de 40 mg/L e tempo de contato de 60 minutos foi o que apresentou melhor desempenho na redução da concentração do corante. Já o experimento 3, com 0,1 g do adsorvente, uma solução com concentração de 80 mg/L e tempo de contato de 30 minutos apresentou melhor desempenho na quantidade de corante adsorvido por unidade de massa do adsorvente.

3.3 Estudo da adsorção

É possível observar, de acordo com os gráficos de Pareto a seguir, quais efeitos são estatisticamente significativos. Todos os valores exibidos no gráfico abaixo, que estão à direita do valor P são de alta significância estatística. Nesse contexto, pode-se perceber que para QT (Figura 7), os fatores massa e concentração e a interação entre eles mostraram-se relevantes no processo.

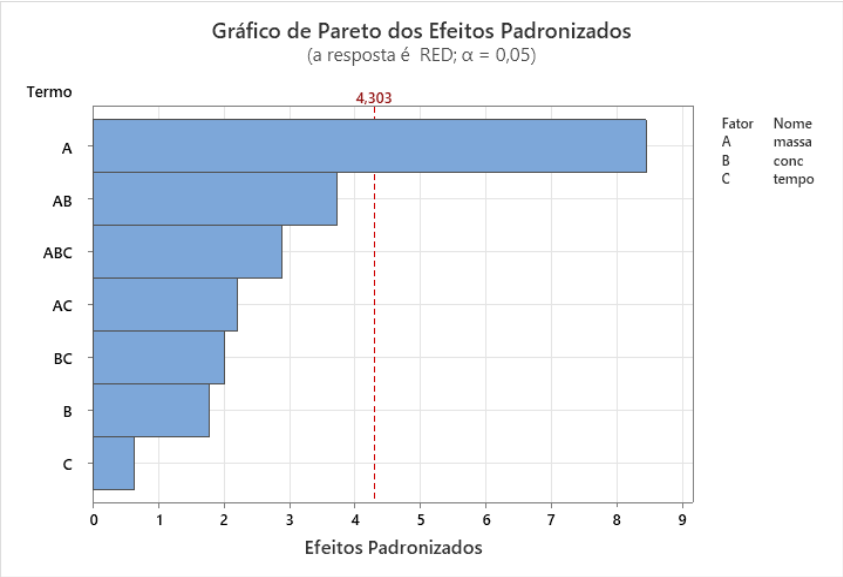
Figura 7 - Gráfico de Pareto (QT).



Fonte: Autora (2025).

Para RED% (Figura 8), apenas a massa apresentou resultado significativo.

Figura 8 - Gráfico de Pareto (RED%).



Fonte: Autora (2025).

A seguir, as tabelas apresentam os valores estimados dos principais fatores envolvidos em QT e RED% e suas respectivas interações. O valor de P indica qual fator ou efeito é significativo, quando o valor de P for menor do que o nível de significância $\alpha = 0,05$ é possível dizer que o efeito é significativo.

Tabela 8 - Efeitos estimados e coeficientes de QT.

Variáveis	Efeitos	Coeficientes	EP Coef.	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante		6,6124	0,0268	247,09	0,000	
(1) Massa	-6,2268	-3,1134	0,0268	-116,34	0,000	1,00
(2) Concentração	4,6400	2,3200	0,0268	86,70	0,000	1,00
(3) Tempo	-0,0470	-0,0235	0,0268	-0,88	0,472	1,00
1*2	-2,3695	-1,1847	0,0268	-44,27	0,001	1,00
1*3	0,0901	0,0451	0,0268	1,68	0,234	1,00
2*3	-0,0523	-0,0262	0,0268	-0,98	0,432	1,00
1*2*3	-0,0892	-0,0446	0,0268	-1,67	0,238	1,00
Pt Ct		-1,6440	0,0512	-32,08	0,001	1,00

Fonte: Autora (2025).

Para QT, é possível observar que os fatores Massa, Concentração e a interação entre elas apresentam efeitos significativos. Já para RED% (tabela 9), apenas a massa mostrou-se estatisticamente significativa.

Tabela 9 - Efeitos estimados e coeficientes de RED%.

Variáveis	Efeitos	Coeficientes	EP Coef.	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante		67,196	0,357	187,98	0,000	
(1) Massa	6,032	3,016	0,357	8,44	0,014	1,00
(2) Concentração	1,273	0,636	0,357	1,78	0,217	1,00
(3) Tempo	0,458	0,229	0,357	0,64	0,588	1,00
1*2	-2,668	-1,334	0,357	-3,73	0,065	1,00
1*3	1,577	0,789	0,357	2,21	0,158	1,00
2*3	-1,443	-0,721	0,357	-2,02	0,181	1,00
1*2*3	-2,063	-1,031	0,357	-2,88	0,102	1,00

Pt Ct	-0,953	0,684	-1,39	0,298	1,00
-------	--------	-------	-------	-------	------

Fonte: Autora (2025).

Com base nos efeitos significativos observados anteriormente, foi possível estabelecer um modelo matemático linear tanto para QT quanto para RED%, que são mostrados nas equações abaixo:

$$QT = -0,8 - 1,0a_1 + 0,225a_2 - 0,020a_3 - 0,525a_1a_2 + 0,12a_1a_3 + 0,00021a_2a_3 - 0,0015a_1a_2a_3$$

Onde:

a_1 = Massa do adsorvente

a_2 = Concentração do corante

a_3 = Tempo de contato

$$RED\% = 67,11 - 46,3a_1 - 0,036a_2 - 0,358a_3 - 0,880a_1a_2 + 2,588a_1a_3 + 0,00447a_2a_3 - 0,0344a_1a_2a_3$$

Onde:

a_1 = Massa do adsorvente

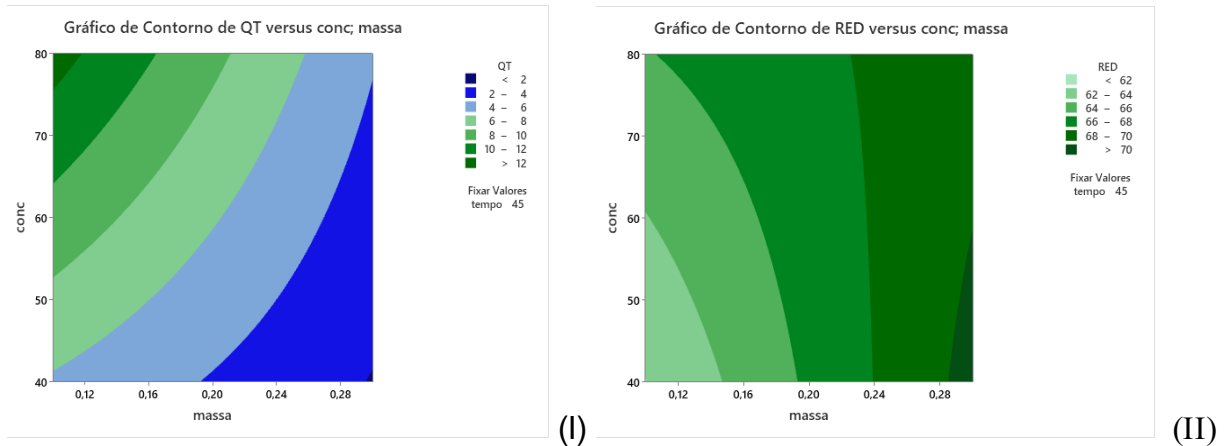
a_2 = Concentração do corante

a_3 = Tempo

A partir dos gráficos de contorno apresentados a seguir, é possível analisar as melhores condições dos fatores com relação a quantidade de corante adsorvido e a redução da concentração de corante na solução.

A figura 9 (I), mostra que para atingir uma maior quantidade de corante adsorvido, faz-se necessário uma menor quantidade de massa do adsorvente e valores mais elevados de concentração. Já na figura 9 (II), pode-se perceber que com valores mais elevados de massa do adsorvente e menores concentrações do corante, serão obtidos maiores valores de redução de azul de metileno.

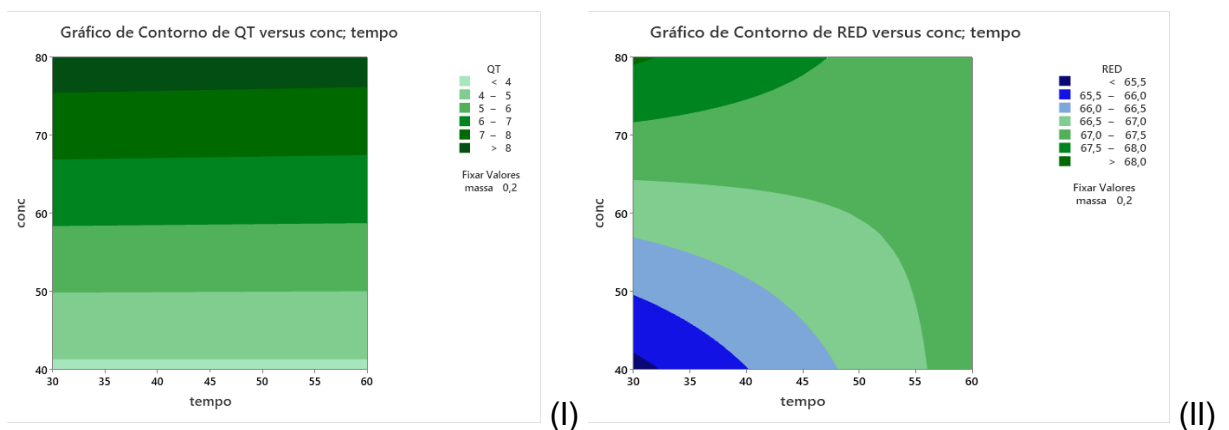
Figura 9 - Gráfico de contorno para as variáveis dependentes QT (I) e RED% (II), analisando as interações entre concentração e massa.



Fonte: Autora (2025).

Com relação à interação da concentração com o tempo, é possível verificar que com a diminuição do tempo e a elevação da concentração do corante, ocorre um leve aumento em QT, quase insignificante na figura 10 (I), tendo em vista que o tempo não se mostrou uma variável estatisticamente significativa conforme foi visualizado no gráficos de Pareto apresentados anteriormente, e para a variável da redução da concentração do corante (RED%) na figura 10 (II), com tempos mais curtos e concentrações mais elevadas, é possível observar melhores resultados de redução da concentração.

Figura 10 - Gráfico de contorno para as variáveis dependentes QT (I) e RED% (II), analisando as interações entre concentração e tempo.



Fonte: Autora (2025).

4 CONCLUSÃO

Diante da problemática exposta, que trata sobre o descarte incorreto de efluentes com altas concentrações de corantes e seus impactos ambientais, o presente estudo teve como objetivo a avaliação do mesocarpo da laranja como material adsorvente alternativo na remoção do corante azul de metileno, através da aplicação da metodologia de planejamento fatorial na elaboração dos experimentos.

A utilização do planejamento fatorial permitiu avaliar a influência das iterações entre fatores nos resultados dos ensaios de adsorção. A sua eficiência foi analisada a partir da influência da massa do mesocarpo da laranja, como adsorvente, da concentração do corante azul de metileno e do tempo de contato entre o adsorvente e o adsorvato nas variáveis QT e RED%. Para a secagem do mesocarpo da laranja, observou-se um melhor desempenho dos modelos de Page e Midilli nas temperaturas de 60°C e 70°C, com altos valores de R^2 e do Valor – F, conseguindo se aproximar de 1, garantindo um bom ajuste aos dados experimentais.

Diante das análises realizadas, é possível observar os resultados positivos da utilização do mesocarpo da laranja como material adsorvente, tendo em vista a presença de altos valores na redução da concentração do corante em tempos curtos, e que a utilização de pequenas quantidades de massa do adsorvente em altas concentrações de corante conseguem trazer bons resultados na quantidade de corante adsorvido, onde os maiores valores obtidos foram 13,28 mg/g em QT e 73,68% de remoção do corante, podendo, assim, considerar o mesocarpo da laranja um bioadsorvente eficiente, reforçando ainda o potencial do uso materiais alternativos em tecnologias de tratamento de efluentes.

REFERÊNCIAS

BRANDT, Karen. Ecotoxicidade aquática de efluentes industriais têxteis que utilizam corantes em seus processos. **XXIX Congresso de iniciação científica UNICAMP**, 2021.

Disponível em: < <https://prp.unicamp.br/inscricao-congresso/resumos/2021P18921A36418O250.pdf> > Acesso em: Novembro de 2024.

BRASIL, Lei no 10.165, de 27 de dezembro de 2000. Altera a Lei no 6.938, de 31 de agosto de 1981, que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. 2000. Disponível em: <

https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/110165.htm > Acesso em: Novembro de 2024.

FIorentin, Leila D. et al. Isotermas de sorção do resíduo agroindustrial bagaço de laranja. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, p. 653-659, 2010.

Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000600012>. Acesso em: Maio de 2025.

NASCIMENTO, Ketyla Karla Rodrigues do. **Avaliação da remoção de corante têxtil presente em solução aquosa utilizando casca de laranja como adsorvente natural**. 88 p. Dissertação de mestrado. Programa de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, UEPB, 2018. Disponível em: <http://tede.bc.uepb.edu.br/jspui/handle/tede/3030>. Acesso em: Setembro de 2024.

NASCIMENTO, RF d et al. Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais. 2014.

OLIVEIRA, Silze Pires; SILVA, Weber Lara Lima da; VIANA, Rúbia Ribeiro. Avaliação da capacidade de adsorção do corante azul de metileno em soluções aquosas em caulinita natural e intercalada com acetato de potássio. **Cerâmica**, v. 59, p. 338-344, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132013000200021>. Acesso em: Setembro de 2024.

PEREIRA, Mariana dos Santos. **Desenvolvimento de metodologia de secagem do bagaço de laranja para viabilização de sua comercialização**. 2021. 77 p. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais e Bioprocessos, USP, 2021. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/214955>. Acesso em: Maio de 2025.

PIRES, Vinicius da Silva. **Avaliação da remoção da cor do efluente têxtil através do processo de adsorção com carvão ativado proveniente de folhas de Abacateiro (Persea americana Mill.)** 55p. Trabalho de conclusão de curso. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/204655> Acesso em: Novembro de 2024.

ROCHA, Otidene Rossiter Sá da et al. Avaliação do processo adsorptivo utilizando mesocarpo de coco verde para remoção do corante cinza reativo BF-2R. **Química nova**, v. 35, p. 1369-1374, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422012000700016>. Acesso em: Agosto de 2024.

SILVA, Gabriel Sagais. **Adsorção de corante químico em carvão ativado: um estudo estatístico**. 51p. Trabalho de conclusão de curso. Departamento de Engenharia Civil. Instituto Federal do Tocantins, 2023. Disponível em: <https://portal.ifto.edu.br/palmas/campus->

[palmas/ensino/biblioteca/Acervo/trabalhos-academicos/engenharia-civil/2023/gabriel-sagais-silva.pdf](#)> Acesso em: Novembro de 2024.

SILVA, Marcelo Bacci da; SANTOS, João Henrique Pain dos. Adsorção do azul de metileno utilizando casca de arroz. *In*: MARTINS, Ernaine Rosa. **Engenharia de Produção: Gestão de qualidade, produção e operações**. DOI: 10.37885/210805754, Crossref, 2021, p. 41-59. Disponível em: <https://www.editoracientifica.com.br/books/chapter/210805754>. Acesso em: Agosto de 2024.

SIQUEIRA, Danilo Diniz et al. Otimização da funcionalização de um polímero biodegradável utilizando planejamento fatorial. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 12, n. 3, p. 192-8, 2017. Disponível em: <https://remap.revistas.ufcg.edu.br/index.php/remap/article/view/635/436>> Acesso em: Novembro de 2024.

