



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

SARAH EMANUELLE MORAES SANTOS

**AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE ADSORÇÃO DA CASCA DO OVO PARA
REMOÇÃO DO CORANTE TÊXTIL AMARELO REMAZOL 3RS**

Recife
2023

SARAH EMANUELLE MORAES SANTOS

**AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE ADSORÇÃO DA CASCA DO OVO PARA
REMOÇÃO DO CORANTE TÊXTIL AMARELO REMAZOL 3RS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Coordenação do Curso de Graduação em
Engenharia Química da Universidade Federal
de Pernambuco, como requisito parcial à
obtenção do grau Bacharel em Engenharia
Química.

Orientadora: Prof^a. Dra. Eliane Bezerra de Moraes Medeiros

Recife
2023

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE**

Santos, Sarah Emanuelle Moraes.

Avaliação da capacidade de adsorção da casca do ovo para remoção do corante têxtil Amarelo Remazol 3RS / Sarah Emanuelle Moraes Santos. - Recife, 2023.
53 p. : il., tab.

Orientador(a): Eliane Bezerra de Moraes Medeiros

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Química - Bacharelado, 2023.

1. Adsorção. 2. Corantes. 3. Efluentes têxteis. 4. Casca de ovo. 5. Remazol Amarelo 3RS. I. Medeiros, Eliane Bezerra de Moraes. (Orientação). II. Título.

660 CDD (22.ed.)

SARAH EMANUELLE MORAES SANTOS

**“AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE ADSORÇÃO DA CASCA DO OVO
PARA REMOÇÃO DO CORANTE TÊXTIL AMARELO REMAZOL 3RS”**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do Curso
de Graduação em Engenharia Química
da Universidade Federal de
Pernambuco, como requisito parcial à
obtenção do grau Bacharel em
Engenharia Química.

Aprovada em: 24/07/2023

Orientadora: Profa. Dra. Eliane Bezerra de Moraes Medeiros

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 ELIANE BEZERRA DE MORAES MEDEIROS
Data: 31/07/2023 12:44:40-0300
Verifique em <https://validar.itd.gov.br>

Profa. Dra. Eliane Bezerra de Moraes Medeiros

Universidade Federal de Pernambuco

Documento assinado digitalmente
 NELSON MEDEIROS DE LIMA FILHO
Data: 31/07/2023 20:41:23-0300
Verifique em <https://validar.itd.gov.br>

Prof. Dr. Nelson Medeiros de Lima Filho

Universidade Federal de Pernambuco

Documento assinado digitalmente
 PAULO HENRIQUE MIRANDA DE FARIAS
Data: 31/07/2023 20:49:09-0300
Verifique em <https://validar.itd.gov.br>

Me. Paulo Henrique Miranda de Farias

Universidade Federal de Pernambuco

DEDICATÓRIA

*Aos meus pais,
Pedro e Rivanda*

AGRADECIMENTOS

À Deus, que sempre me sustentou durante essa jornada e sem o qual nada disso teria sido possível.

Aos meus pais, Pedro e Rivanda, pelo apoio incondicional, pelas visitas a Recife, pelas mensagens, ligações e pelo colo que nunca me faltou. Ao meu irmão Pedro, por compartilhar esse momento, nas alegrias, nas frustrações e no cansaço da rotina, sempre me apoiando e me incentivando.

À Profa Dra Eliane Bezerra de Moraes Medeiros, que com sua paciência inigualável me guiou nesse caminho, estando sempre disposta a ajudar e esclarecer as minhas dúvidas.

A todos do Laboratório de Processos Catalíticos (LPC), pelo carinho e suporte imenso, especialmente Chesque e Dayane, por toda ajuda que recebi e pelas valiosas dicas.

Aos meus amigos, que estiveram sempre dispostos a ajudar e comemorar cada pequena conquista. Especialmente à Elaine e Filipe, por todo o incentivo e todas as conversas que me impulsionaram a seguir em frente.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

RESUMO

A indústria têxtil desempenha um papel significativo na economia global e é responsável por uma parcela considerável da poluição de corpos d'água devido à liberação de efluentes contendo corantes. Esses corantes, altamente solúveis em água, representam uma preocupação ambiental devido aos seus efeitos negativos nos ecossistemas aquáticos. A remoção eficiente desses corantes é essencial para mitigar o impacto ambiental e garantir a qualidade da água. Nesse contexto, a utilização de adsorventes naturais e acessíveis economicamente tem sido explorada como uma alternativa sustentável no tratamento de efluentes têxteis. A casca de ovo, um resíduo de fonte doméstica, emerge como um adsorvente promissor devido à sua abundância e composição rica em carbonato de cálcio. A calcinação da casca de ovo resulta em um material poroso com propriedades adsorventes, capaz de interagir com corantes presentes em soluções aquosas. Este estudo investigou a capacidade da casca de ovo calcinada para remoção do corante Amarelo Remazol 3RS. Os parâmetros estudados incluíram dosagem do adsorvente, pH inicial da solução e concentração inicial do corante. Os resultados demonstraram que um aumento na dosagem do adsorvente resultou em maior eficiência de remoção, com uma remoção de 62% alcançada com 4g de adsorvente. Além disso, observou-se que pHs mais elevados favoreceram a adsorção, alcançando-se uma remoção de 59,3% a pH 12 para 2 g do adsorvente. Aumentar a concentração inicial do corante também resultou em maior eficiência de remoção, com uma remoção de 54,33% obtida a uma concentração de 50 mg/L. Os modelos de isotermas de adsorção indicaram um melhor ajuste ao modelo de Freundlich, enquanto a cinética de adsorção seguiu o modelo de pseudo-segunda ordem. Embora a eficiência de remoção não tenha sido alta, com uma eficiência máxima de 62% para 4g de adsorvente, pH 6 e concentração de 50 mg/L, os resultados deste estudo contribuem para o avanço do conhecimento sobre a utilização da casca de ovo calcinada como adsorvente barato e sustentável para remoção de corantes em efluentes têxteis.

Palavras-chave: Adsorção; Corantes; Efluentes têxteis; Casca de ovo; Remazol amarelo 3RS.

ABSTRACT

The textile industry plays a significant role in the global economy and is responsible for a considerable portion of water pollution due to the release of effluents containing dyes. These dyes, highly soluble in water, pose an environmental concern due to their negative effects on aquatic ecosystems. Efficient removal of these dyes is essential to mitigate environmental impact and ensure water quality. In this context, the use of natural and economically accessible adsorbents has been explored as a sustainable alternative in textile effluent treatment. Eggshell, a waste material from domestic sources, emerges as a promising adsorbent due to its abundance and rich composition of calcium carbonate. Calcination of eggshells results in a porous material with adsorptive properties capable of interacting with dyes present in aqueous solutions. This study investigated the capacity of calcined eggshell for the removal of Amarelo Remazol 3RS dye. The studied parameters included adsorbent dosage, initial solution pH, and initial dye concentration. The results demonstrated that increasing the adsorbent dosage led to higher removal efficiency, with a removal of 62% achieved with 4g of adsorbent. Furthermore, it was observed that higher initial pH favored adsorption, reaching a removal of 59.3% at pH 12 for 2g of adsorbent. Increasing the initial dye concentration also resulted in higher removal efficiency, with a removal of 54.33% obtained at a concentration of 50 mg/L. The adsorption isotherm models indicated a better fit to the Freundlich model, while the adsorption kinetics followed the pseudo-second-order model. Although the removal efficiency was not high, with a maximum efficiency of 62% for 4g of adsorbent, pH 6, and a concentration of 50 mg/L, the results of this study contribute to the advancement of knowledge regarding the use of calcined eggshell as an inexpensive and sustainable adsorbent for the removal of dyes in textile effluents.

Keywords: Adsorption; Dyes; Textile effluents; Eggshell; Remazol Yellow 3RS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Fluxo produtivo da Cadeia Têxtil e de Confecção.....	16
Figura 2.	Fórmula estrutural do Amarelo Remazol 3RS.....	18
Figura 3.	Isotermas de adsorção.....	20
Figura 4.	pHmetro Mettler-Toledo utilizado nos experimentos de adsorção.....	27
Figura 5.	Representação do Reator agitado utilizado nos experimentos de adsorção.....	28
Figura 6.	espectrofotômetro UV-Visível utilizado nos experimentos de adsorção.....	29
Figura 7.	Determinação do pH_{PCZ} da casca de ovo calcinada.....	32
Figura 8.	Varredura do Remazol Amarelo 3RS de 200 a 800 nm.....	33
Figura 9.	Curva analítica do Remazol Amarelo 3RS de 0-70 mg/L.....	33
Figura 10.	Efeito da dosagem do adsorvente na eficiência de remoção do corante de 1-4 g de adsorvente	34
Figura 11.	Efeito da dosagem do adsorvente na quantidade de corante adsorvida por grama de adsorvente.....	35
Figura 12.	Comparação visual do efeito da dosagem do adsorvente.....	36
Figura 13.	Efeito do pH inicial na eficiência de remoção do corante para pH de 2-12.....	37
Figura 14.	Comparação visual do efeito do pH inicial.....	38
Figura 15.	Efeito da concentração inicial do corante na eficiência de remoção para soluções de 10-50 mg/L	39

Figura 16. Comparação visual do efeito da concentração inicial do corante.....	39
Figura 17. Isotermas de adsorção do Remazol Amarelo 3RS frente a casca de ovo calcinado - modelos de Freundlich e Langmuir.....	41
Figura 18. Modelos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem para o Remazol Amarelo 3RS.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Reagentes utilizados.....	24
Tabela 2.	Materiais e equipamentos.....	24
Tabela 3.	Parâmetros de equilíbrio da adsorção.....	41
Tabela 4.	Parâmetros cinéticos dos modelos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem.....	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIT	Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção
C_0	Concentração inicial do adsorbato (mg/L)
C_{eq}	Concentração do adsorbato no equilíbrio (mg/L)
DEQ	Departamento de Engenharia Química
K_F	Constante de Freundlich (L/mg)
k_1	Constante de pseudoprimeira ordem (1/min)
K_L	Constante de Langmuir (L/mg)
k_2	Constante de pseudosegunda ordem (g/mg.min)
LPC	Laboratório de Processos Catalíticos
m	Massa (g)
pH_{PCZ}	Potencial hidrogeniônico do ponto de carga zero
PCZ	Ponto de carga zero
$q_{máx}$	Adsorção máxima (mg/g)
q_{eq}	Quantidade adsorvida no equilíbrio (mg/g)
q	Quantidade adsorvida no tempo t (mg/g)
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
V	Volume (L)

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
α	Coeficiente angular da reta
CaO	Óxido de cálcio
CaCO ₃	Carbonato de cálcio
g	Gram
g/mol	Gram por mol
%R	Eficiência de remoção (%)
h	Hora
HCl	Ácido clorídrico
L	Litro
mg/g	Miligrama por grama
mg/L	Miligrama por litro
min	Minuto
mL	Mililitro
NaOH	Hidróxido de sódio
°C	Graus Celsius
pH	Potencial hidrogeniônico
R ²	Coeficiente de correlação
S	Enxofre
t	Tempo
T	Temperatura

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	16
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	INDÚSTRIA TÊXTIL	18
2.2	EFLUENTES TÊXTEIS	19
2.2.1	Corantes têxteis	19
2.2.2	Tratamento de efluentes têxteis	20
2.3	ADSORÇÃO	21
2.3.1	Equilíbrio de adsorção	22
2.3.1.1	<i>Isoterma de Langmuir</i>	24
2.3.2.2	<i>Isoterma de Freudlich</i>	24
2.3.2	Cinética de Adsorção	24
2.4	CASCA DO OVO	25
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1	MATERIAIS E REAGENTES	27
3.2	PREPARAÇÃO DO ADSORVENTE	27
3.2.1	Ponto de carga zero	28
3.3	PREPARAÇÃO DO EFLUENTE SINTÉTICO	29
3.3.1	Curva analítica	29
3.4	ENSAIOS DE ADSORÇÃO EM BATELADA	30
3.4.1	Massa do adsorvente	31
3.4.2	Concentração do corante	31
3.4.3	pH da solução	32
3.5	TRATAMENTO DE DADOS	32
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
4.1	PREPARAÇÃO DOS ENSAIOS	32
4.1.1	Preparação do adsorvente	33
4.1.1.1	<i>Ponto de carga zero (PCZ)</i>	33
4.1.2	Preparação da solução	34
4.2	ESTUDO DA ADSORÇÃO	36
4.2.1	Efeito da dosagem de adsorvente	36
4.2.2	Efeito do pH inicial	38

4.2.3	Efeito da concentração inicial de corante	40
4.2.4	Equilíbrio de adsorção	42
4.2.5	Cinética de adsorção	44
5.	CONCLUSÃO	45
	REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

A indústria têxtil desempenha um papel crucial na economia global, produzindo anualmente cerca de 9,5 milhões de toneladas de produtos. No entanto, esse setor enfrenta um desafio significativo em relação à poluição ambiental, sendo uma das principais fontes de contaminação dos recursos hídricos (KISHOR *et al.*, 2021). Durante o processo de produção têxtil, grandes quantidades de corantes, metais/elementos perigosos e produtos químicos são liberados nos efluentes líquidos, representando uma ameaça tanto para o ecossistema aquático quanto para a saúde humana (KADHOM *et al.*, 2020).

A crescente demanda por produtos têxteis torna o descarte adequado dos resíduos gerados durante a produção uma questão de extrema importância. Quando esses efluentes não são tratados corretamente, podem causar danos significativos ao meio ambiente, resultando na destruição de ecossistemas aquáticos e na contaminação de corpos d'água utilizados para abastecimento humano (AMALINA *et al.*, 2022). Além disso, os corantes presentes nesses efluentes podem causar efeitos adversos, como carcinogênese, irritação da pele e redução da fotossíntese em plantas aquáticas, devido à dificuldade de penetração da luz solar nas camadas mais profundas da água (AMALINA *et al.*, 2022).

Diante dessa problemática, uma variedade de métodos de tratamento tem sido investigada visando minimizar os impactos ambientais causados pelos efluentes têxteis. Entre as abordagens existentes, destacam-se a filtração, oxidação química, eletrocoagulação, remoção eletroquímica, fotocatálise, precipitação química e adsorção (JAWAD *et al.*, 2018). Devido à complexidade e diversidade dos compostos presentes nos efluentes, a combinação de diferentes processos pode ser necessária para garantir a eficiência do tratamento e o atendimento aos parâmetros de qualidade da água estabelecidos. Isso pode ser um processo combinado, onde mais de dois métodos são aplicados em sequência, ou um processo híbrido, onde dois ou mais métodos são aplicados simultaneamente (PAVITHRA *et al.*, 2019).

No campo do tratamento de efluentes têxteis, a adsorção tem despertado grande interesse devido à sua simplicidade, alta eficiência e seletividade (AMALINA *et al.*, 2022). Nesse caso, uma das suas principais linhas de estudo está ligada à remoção de corantes, que podem ser classificados na indústria têxtil de duas formas

principais: Em relação a sua estrutura química, como os corantes azo, antraquinona, metalizados, indigóides, ftalocianinas, sulfurosos e nitrosos, ou em relação a sua forma de uso/aplicação na fibra têxtil, como os corantes reativos, diretos, azóicos, ácidos, a cuba, de enxofre, catiônicos, dispersos, pré-metalizados, solventes ou branqueadores (ZANONI *et al.*, 2016).

No método de adsorção, um adsorvente que se destaca é o carvão ativado, já que o mesmo apresenta uma alta eficiência na remoção de diversos corantes, porém, devido ao seu alto custo, a utilização desse material torna-se limitada (KADHOM *et al.*, 2020). Como resultado, pesquisas recentes têm se concentrado no desenvolvimento de adsorventes alternativos mais acessíveis e eficazes para a remoção desses compostos (SARATALE *et al.*, 2021).

Nesse contexto, a utilização de adsorventes alternativos provenientes de resíduos surge como uma opção promissora. Além de reduzir a quantidade de resíduos descartados, essa abordagem contribui para um tratamento mais sustentável e econômico dos efluentes gerados pelas indústrias têxteis (SARATALE *et al.*, 2021). A casca de ovo, com uma produção anual aproximada de 8,55 milhões de toneladas e baixo custo de obtenção, é um exemplo de resíduo agroindustrial abundante que pode ser utilizado como um adsorvente alternativo (WAHEED *et al.*, 2020).

Portanto, o presente trabalho tem como objetivo geral estudar e analisar a capacidade de adsorção da casca do ovo frente a uma solução aquosa de corante têxtil amarelo remazol 3RS em regime de batelada, verificando a influência de diferentes parâmetros na adsorção. Para atingir esse objetivo, os seguintes objetivos específicos foram delineados:

- Preparar o material adsorvente a partir da casca de ovo;
- Analisar os fatores intervenientes na adsorção do corante: massa do material adsorvente, concentração do corante e pH;
- Avaliar a aplicação de modelos cinéticos e de equilíbrio aos resultados experimentais de adsorção, compreendendo assim o processo;
- Avaliar a remoção de cor do efluente têxtil sintético a partir do processo de adsorção.

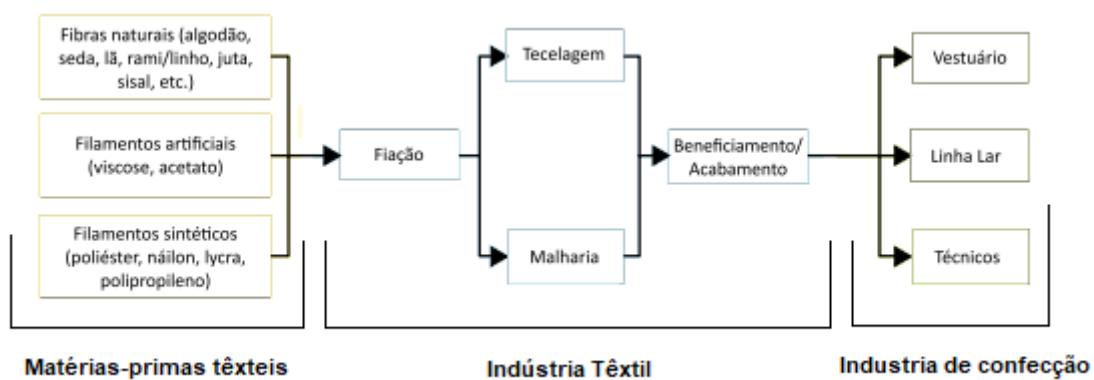
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 INDÚSTRIA TÊXTIL

A indústria têxtil constitui uma das etapas no fluxo produtivo da cadeia têxtil e de confecção, possuindo um importante papel na história da indústria de transformação como um dos setores mais tradicionais e complexos do mundo (MENDES JUNIOR, 2017; ABIT, 2017). No Brasil, o setor têxtil é o 2º maior empregador da indústria de transformação, possuindo 22,5 mil unidades produtivas e 1,34 milhão de empregados formais, além disso, entre os países do ocidente, o Brasil possui a maior cadeia têxtil completa, passando desde a produção das fibras, como plantação de algodão, até os desfiles de moda (ABIT, 2023).

O processo produtivo da cadeia têxtil, esquematizado na Figura 1, é constituído por etapas descontínuas, onde o resultado final de cada etapa constitui o insumo principal da seguinte. Os elos principais desse processo (matérias-primas, indústria têxtil e indústria de confecção) subdividem-se ainda em várias operações conexas, porém, independentes entre si. Essa característica possibilita uma grande flexibilidade na organização da produção, o que consequentemente ocasiona na existência de empresas com diferentes escalas de produção e níveis tecnológicos (MENDES JUNIOR, 2017).

Figura 1 - Fluxo produtivo da Cadeia Têxtil e de Confecção.



Fonte: Adaptado de COSTA *et al*, 2009.

2.2 EFLUENTES TÊXTEIS

A indústria têxtil propriamente dita comprehende a fiação, a tecelagem, a malharia e o beneficiamento, sendo essa última etapa responsável pela geração dos efluentes têxteis.

O beneficiamento engloba todas as etapas de transformação do tecido quanto à aparência, aumento da resistência, toque, capacidade de absorção de água, entre outros (BELTRAME, 2000). Esse beneficiamento pode incluir: Tingimento de fios; Engomagem; Tecelagem; Desengomagem e lavagem; Purga e lavagem; Alvejamento e lavagem; Mercerização; Secagem; Estamparia e lavagem; Tinturaria e lavagem; Acabamento e lavagem e limpezas. Dentre essas, a etapa mais prejudicial devido à grande perda de corantes é o tingimento (OLIVEIRA, 2013).

Os corantes conferem ao efluente uma coloração bem perceptível, o que além de dificultar o processo de fotossíntese nas plantas aquáticas quando liberados sem um tratamento adequado nos corpos d'água, traz também diversos efeitos negativos aos seres vivos devido a sua toxicidade (KHAN *et al.*, 2023). Outro problema em relação a esses efluentes se dá ainda pela grande variação nas concentrações dos corantes após a etapa de tingimento, já que isso vai mudar a depender de fatores como a quantidade de tecido sendo produzido, o tipo de tecido, os produtos químicos utilizados e as tendências sazonais (BEHERA *et al.*, 2021).

2.2.1 Corantes têxteis

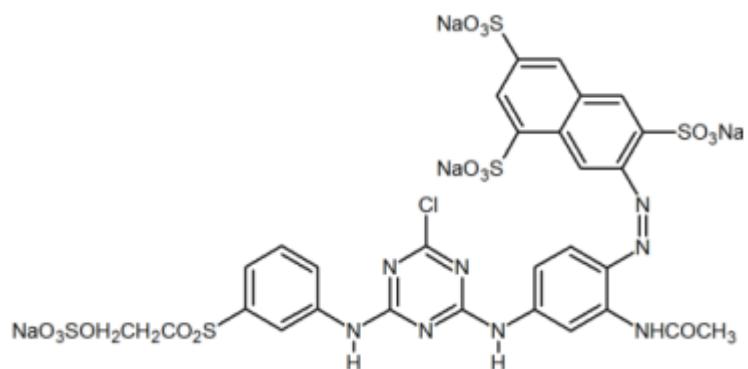
Os corantes são compostos por 3 estruturas básicas: O cromóforo, que é a estrutura responsável por conferir a coloração ao corante, permitindo a absorção na região ultravioleta e visível do espectro, e os grupos auxocromos e anti auxocromicos, que contribuem na diversificação da cor atribuída aos corantes, deslocando a absorção do espectro visível do corante (ZANONI *et al.*, 2016).

Os corantes têxteis sintéticos podem ser classificados de duas formas principais: em relação à sua estrutura química (grupo cromóforo) ou em relação à sua forma de uso/aplicação na fibra têxtil, sendo a classificação baseada na estrutura química a mais adequada, já que, por possuírem características semelhantes, os corantes seriam mais facilmente identificados na indústria têxtil (ZANONI *et al.*, 2016).

Atualmente há cerca de 100.000 corantes comerciais conhecidos (YAGUB *et al.*, 2014) e entre esses uma classe que se destaca no tingimento de fibras têxteis são os corantes azos (KUNZ *et al.*, 2002), caracterizados pela presença de um ou mais grupamentos (-N=N-) como grupo cromóforo ligados a sistemas aromáticos.

Um exemplo de corante azo é o Amarelo Remazol 3RS (Reactive Yellow 176), um corante têxtil aniónico de cor amarelada, cuja fórmula estrutural é mostrada na Figura 2. Sua coloração amarela vibrante o torna bastante atrativo para tingir tecidos e produtos têxteis, podendo proporcionar uma ampla gama de tons amarelos.

Figura 2 – Fórmula estrutural do Amarelo Remazol 3RS.



Fonte: Adaptado de SILVA, 2015.

É importante ressaltar que, apesar de sua ampla utilização, o corante azo Remazol Amarelo 3RS apresenta desafios ambientais e de segurança significativos. Esses corantes azos são conhecidos por suas propriedades tóxicas e carcinogênicas (AMALINA *et al.*, 2022). Quando os efluentes contendo esse corante não recebem tratamento adequado, os resíduos podem ser indiscriminadamente liberados no meio ambiente, acarretando riscos à vida aquática e à saúde humana (KADHOM *et al.*, 2020). Assim, a implementação de métodos eficazes de tratamento para a remoção desses corantes dos efluentes têxteis torna-se crucial para minimizar esses impactos negativos.

2.2.2 Tratamento de efluentes têxteis

O tratamento dos efluentes têxteis é um desafio significativo devido à complexidade dos corantes presentes e aos impactos ambientais que eles podem

causar, por isso, diversos métodos têm sido explorados para o tratamento eficiente desses efluentes (PAVITHRA *et al.*, 2019)

Existem muitas formas de tratamento para os efluentes têxteis, como por exemplo a filtração, oxidação química, eletrocoagulação, remoção eletroquímica, fotocatálise, precipitação química e adsorção (JAWAD *et al.*, 2018), porém, não há um sistema geral de tratamento para efluentes com alta coloração, já que muitas técnicas não são totalmente eficazes ou precisam ser combinadas a fim de aumentar a eficiência do tratamento (PAVITHRA *et al.*, 2019).

Entre os métodos físico-químicos, a adsorção tem se destacado como uma abordagem promissora devido à sua eficiência na remoção de corantes dos efluentes têxteis (AMALINA *et al.*, 2022). A adsorção utiliza materiais adsorventes, como carvão ativado, argilas modificadas e nanomateriais, para atrair e reter os corantes presentes nos efluentes, resultando em uma redução significativa da concentração de corantes (CHAKRABORTY *et al.*, 2011).

Além da adsorção, outros métodos como a oxidação avançada, a fotocatálise e a eletrocoagulação também têm sido investigados para o tratamento de efluentes têxteis contendo corantes (FONTANA *et al.*, 2016). A oxidação avançada envolve a utilização de agentes oxidantes poderosos, como o peróxido de hidrogênio, para degradar os corantes presentes nos efluentes (PAULINO *et al.*, 2015). A fotocatálise, por sua vez, utiliza catalisadores como o dióxido de titânio ativado pela luz ultravioleta para degradar os corantes por meio de reações fotoquímicas (FERNANDES, 2021). Já a eletrocoagulação emprega a aplicação de uma corrente elétrica para remover os corantes, promovendo a formação de hidróxidos metálicos que adsorvem e coagulam as partículas presentes nos efluentes (FONTANA *et al.*, 2016).

2.3 ADSORÇÃO

A adsorção é uma operação de transferência de massa que estuda a habilidade, por parte de certos sólidos, em concentrar na sua superfície substâncias existentes em fluidos líquidos ou gasosos, viabilizando uma separação dos componentes desses fluidos. A adsorção pode ainda ser classificada em relação a sua intensidade, podendo ser dividida em adsorção física ou adsorção química (NASCIMENTO *et al.*, 2020).

A diferenciação entre a adsorção física e química está muito ligada a natureza das forças, onde na física a ligação do adsorvato à superfície do adsorvente pode ser atribuída às forças de van der Waals (ligações fracas) e na química essa junção pode ser atribuída a ligações com troca ou partilha de elétrons (ligações fortes) (NASCIMENTO *et al.*, 2020).

Vários fatores podem ainda influenciar no processo de adsorção, como a exemplo da área superficial do adsorvente, tamanho da partícula, tempo de contato, propriedades do adsorvente e adsorbato, temperatura, pH e PCZ. Dentre esses, as principais condições operacionais são temperatura, pH e natureza do solvente (RAMOS, 2009).

2.3.1 Equilíbrio de adsorção

Quando um sistema específico de adsorção de uma substância em uma fase, na superfície de outra fase, possui uma distribuição definida termodinamicamente, pode ser dito que o sistema atingiu o equilíbrio. Uma maneira comum de descrever essa distribuição é pelas Isotermas de adsorção, que expressam a quantidade de substância adsorvida por quantidade de adsorvente (q) como uma função da concentração de adsorbato (C) (RAMOS, 2009). Para calcular o (q) utiliza-se a equação 1.

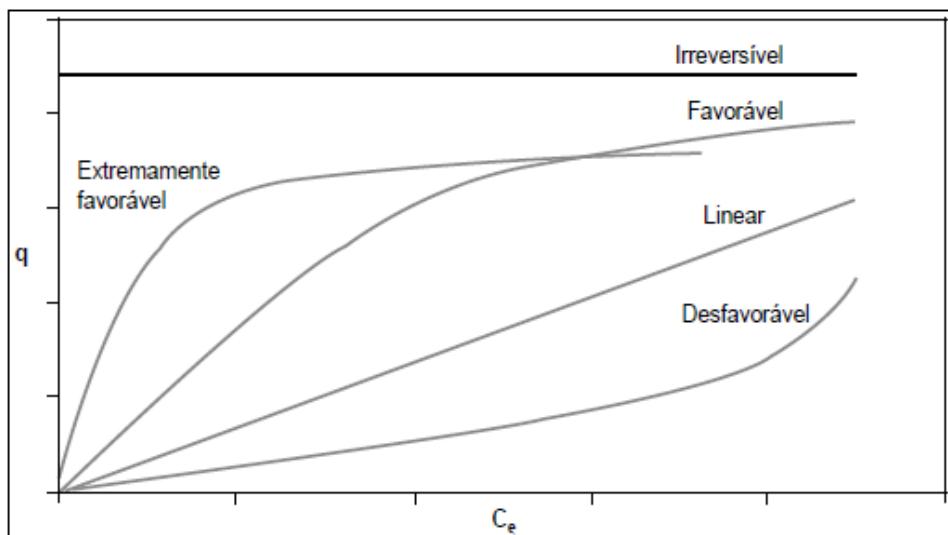
$$q = \frac{(C_0 - C)}{m} \times V \quad (1)$$

Onde q é a quantidade adsorvida no tempo t (mg adsorbato/g adsorvente), C_0 é a concentração inicial da solução de corante (mg/L), C é a concentração da solução de corante no tempo t (mg/L), V é o volume da solução (L) e m é a massa do adsorvente (g).

As isotermas, de forma geral, são diagramas que, em uma determinada temperatura, mostram a variação da concentração de equilíbrio no sólido adsorvente com a concentração da fase fluida. Elas podem ainda fornecer informações importantes sobre a capacidade ou tendência de adsorção a depender de qual forma ela vai possuir, podendo ser extremamente favorável, favorável, linear, desfavorável ou irreversível, onde nesse último caso a quantidade adsorvida é independente da

concentração do adsorvato na fase fluida. As formas que as isotermas podem apresentar são observadas na Figura 3 (NASCIMENTO *et al.*, 2020).

Figura 3 – Isotermas de adsorção.



Fonte: NASCIMENTO *et al.*, 2020.

Além das diferentes formas, existem também diversos modelos de isotermas que podem ser usados para prever e estudar o processo de adsorção, como a exemplo da isoterma de Langmuir e da Isoterma de Freudlich, onde cada uma vai possuir suas próprias premissas, vantagens e desvantagens (RAMOS, 2009).

2.3.1.1 Isoterma de Langmuir

O modelo de Langmuir, representado pela equação 2, é um dos mais utilizados para representação de processos adsorptivos.

Esse modelo baseia-se nos princípios que (i) existe um número definido de sítios e esses possuem energias equivalentes, (ii) as moléculas adsorvidas não interagem com as vizinhas, (iii) a adsorção ocorre em monocamada e (iv) cada sítio comporta somente uma molécula (NASCIMENTO *et al.*, 2020).

$$q_{eq} = \frac{K_L q_{máx} C_{eq}}{1 + K_L C_{eq}} \quad (2)$$

Onde q_{eq} é a quantidade do soluto adsorvido por grama de adsorvente no equilíbrio (mg/g), $q_{máx}$ é a capacidade máxima de adsorção (mg/g), K_L é a constante de interação adsorvato/adsorvente (L/mg) e C_{eq} é a concentração do adsorvato no equilíbrio (mg/L).

2.3.1.2 Isoterma de Freudlich

Sendo um dos primeiros a equacionar, em um modelo com características empíricas, a relação entre a quantidade de material adsorvido e a concentração do material na solução, o modelo de Freudlich pode ser representado pela equação 3.

$$q_{eq} = K_F C_{eq}^{1/n} \quad (3)$$

Onde, q_{eq} é a quantidade de adsorção no equilíbrio (mg/g), C_{eq} é a concentração do adsorvato no equilíbrio (mg/L), $1/n$ é a constante relacionada a heterogeneidade da superfície e K_F é a constante de capacidade de adsorção de Freudlich (L/mg).

Diferentemente do modelo de Langmuir, que se baseia na não interação das moléculas adsorvidas com as vizinhas e na adsorção em monocamadas, o modelo de Freudlich pode ser aplicado em sistemas não ideais, em superfícies heterogêneas e para adsorção em multicamadas (NASCIMENTO *et al.*, 2020).

2.3.2 Cinética de adsorção

De forma geral, a cinética de adsorção é expressa como a taxa de remoção do adsorvato na fase fluida em relação ao tempo (NASCIMENTO *et al.*, 2020). Em princípio, ela pode ser conduzida por diferentes processos: A transferência de massa externa, difusão no poro e difusão na superfície. Esses processos podem ainda ser seriamente afetados por alterações na temperatura, pH, força iônica, concentração inicial do adsorvato, agitação, tamanho das partículas e a distribuição do tamanho dos poros (RAMOS, 2009).

Uma forma de descrever e acompanhar a evolução da concentração de adsorvato na fase sólida com o tempo é por meio de modelos matemáticos. Nesse caso, apesar de poder ser empregado uma ampla quantidade de modelos, os mais utilizados são os empíricos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem (OLIVEIRA, 2013).

O modelo de pseudo-primeira ordem pode ser representado em sua forma diferencial, como mostrado na equação 4 ou pode também ser representado na sua forma expandida, equação 5. Para esse modelo, a adsorção (dq/dt) é linearmente proporcional à diferença entre a quantidade de soluto adsorvida em um determinado momento (q) e a quantidade adsorvida no equilíbrio (q_{eq}) (NASCIMENTO *et al.*, 2020).

$$\frac{dq}{dt} = k_1(q_{eq} - q) \quad (4)$$

$$q = q_e(1 - e^{-k_1 t}) \quad (5)$$

Onde, k_1 é a Constante de equilíbrio de pseudo-primeira ordem (1/s), q é a Capacidade adsorptiva num tempo t (mg/g), q_{eq} é a Capacidade adsorptiva no equilíbrio (mg/g) e t é o Tempo (s).

O modelo de pseudo-segunda ordem, assim como o de pseudo-primeira ordem, pode ser representado em sua forma diferencial, como mostrado na equação 6 ou em sua forma expandida, equação 7.

$$\frac{dq}{dt} = k_2(q_{eq} - q)^2 \quad (6)$$

$$q = \frac{k_2 q_{eq}^2 t}{1 + K_2 q_{eq}^2 t} \quad (7)$$

Onde, k_2 é a Constante de equilíbrio de pseudo-segunda ordem (g/mg.min), q é a Capacidade adsorptiva num tempo t (mg/g), q_{eq} é a Capacidade adsorptiva no equilíbrio (mg/g) e t é o Tempo (s).

2.4 CASCA DO OVO

Com um consumo anual de aproximadamente 1 trilhão de unidades, os ovos são uma das fontes alimentares mais importantes do mundo, porém, o seu alto consumo pode trazer também alguns desafios relacionados aos seus resíduos (KANANI *et al.*, 2020). Entre 1961 e 2016, o aumento na produção mundial de ovos, que saiu de 15 para 81 milhões de toneladas, provocou um aumento na quantidade de resíduos da casca do ovo. Esse aumento significativo é refletido diretamente na

quantidade de resíduos de casca de ovo, que em 2018 estava com uma geração anual de aproximadamente 8,55 milhões de toneladas (WAHEED *et al.*, 2020; KANANI *et al.*, 2020).

Uma das alternativas para minimizar o impacto causado pelo descarte desses resíduos é agregar valor a eles, transformando-os em produtos aproveitáveis e vendáveis. Diante disso, esse resíduo vem sendo aplicado na agricultura, com a finalidade de corrigir o pH em solos ácidos, em suplementos alimentares, como fertilizantes, e também como um adsorvente alternativo (SILVA *et al.*, 2015).

Vários estudos apontam para a eficácia da utilização da casca de ovo como um possível adsorvente para corantes têxteis. Silva *et al.*, 2015 obtiveram uma adsorção máxima de 99,32% do corante azul de metileno ao utilizarem a casca de ovo *in natura*. Os experimentos foram realizados considerando concentrações de 1-9 mg/L e 150 mg de adsorvente, sendo a maior porcentagem de remoção obtida para concentração de 1mg/L, temperatura ambiente e pH natural da solução.

Khalek *et al.*, 2017 observaram a eficiência da casca do ovo *in natura* finamente triturada frente a soluções de corantes aniónicos (Vermelho congo) e catiônicos (Azul de metileno), obtendo uma remoção maior que 95% para o corante catiônico e uma remoção máxima de aproximadamente 88% para o corante aniónico, tendo esse último um remoção mínima de cerca de 49%. Os testes foram feitos para concentrações variando de 50-1000 mg/L e para pH 2-12, sendo as maiores porcentagens de remoções obtidas para as soluções de corante com concentração de 50 mg/L, utilizando 1g de adsorvente, pH natural e temperatura ambiente.

Slimani *et al.*, 2021 estudaram a utilização da casca de ovo calcinada para adsorver os corantes têxteis Alizarin Red S (aniónico) e o Rodamina B (catiônico), constatando, para uma solução de corante com concentração de 20 mg/L, 200mg de adsorvente, temperatura ambiente e pH natural da solução, uma remoção de 93% para a Rodamina B e de 88% para o Alizarin Red S. Os experimentos de Slimani *et al.*, 2021 foram realizados considerando concentrações de 20-50 mg/L para o corante, massa de adsorvente variando de 50-200 mg e pH 2-12.

Outros pesquisadores como Satir; Erol, 2021 estudaram também a adsorção do corante Victoria Blue R (VBR) frente a casca de ovo calcinada, obtendo uma remoção máxima de 97%. Os testes foram feitos para uma concentração de 100 mg/L,

pH 5-10 e massa de adsorvente 0,4 - 0,6 g, sendo a maior porcentagem de remoção obtida para a solução de corante com concentração de 100 mg/L, utilizando 2 g/L de adsorvente, pH 2 e temperatura ambiente.

3 MATERIAS E MÉTODOS

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Processos Catalíticos (LPC) do Departamento de Engenharia Química (DEQ) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), sendo divididos em 4 etapas: Preparação do adsorvente, preparação do efluente sintético, ensaios de adsorção em batelada e tratamento de dados.

3.1 MATERIAIS E REAGENTES

Na Tabela 1 são apresentados os reagentes utilizados no procedimento experimental. Já na Tabela 2 estão listados os materiais e equipamentos de laboratório utilizados.

Tabela 1 – Reagentes utilizados.

Materiais	Marca
Remazol Amarelo 3RS	Dystar
Ácido Clorídrico (37%)	CRQ
Hidróxido de sódio P.A. (97%)	Sigma
Casca de ovo	Origem doméstica

Fonte: Autora, 2023.

Tabela 2 – Materiais e equipamentos.

Equipamentos	Marca	Modelo
Espectrofotômetro UV/VIS	Varian	Cary 50 BIO
Reator agitado em vidro	-	-
Poroso	-	-
Vidrarias	-	-
pHmetro	Mettler Toledo	-
Termômetro	-	-
Mesa agitadora (Shaker)	Marconi	MA-420
Mufla	Elektro	Linn Elektro therm

Fonte: Autora, 2023.

3.2 PREPARAÇÃO DO ADSORVENTE

As cascas de ovo foram coletadas de fonte doméstica. Inicialmente, a amostra foi lavada utilizando água morna para remoção das membranas e, em seguida, enxaguada utilizando água corrente. Após esse processo, o material foi seco ao ar, triturado e peneirado, utilizando para isso uma malha de 60 mesh. Em seguida, as cascas secas e trituradas foram lavadas com água destilada e secas em uma estufa a 105°C por 24 horas.

Após a secagem, as cascas de ovo trituradas foram pesadas e submetidas à calcinação. O processo de calcinação foi realizado em uma mufla a uma temperatura de 900°C por 3 horas. Ao fim da calcinação a casca de ovo foi devidamente armazenada em um recipiente fechado até o momento de uso, a fim de evitar qualquer umidificação do material.

3.2.1 Ponto de carga Zero

O ponto de carga zero (PCZ) de um adsorvente é o valor de pH no qual, em sua superfície, a densidade de cargas positivas (H^+) é igual a densidade de cargas negativas (OH^-), sendo assim, se o valor de pH da solução estiver abaixo ou acima desse valor, haverá um favorecimento na adsorção de uma das cargas.

Para determinação desse ponto foi utilizada uma adaptação da metodologia denominada por Regalbuto *et al.*, 2014 como “experimento dos 11 pontos”. Para isso, foi pesado aproximadamente 50 mg do adsorvente e adicionado aos mesmos 50 mL de solução com valores de pH variando de 2 a 11. Para ajustar o pH foram utilizadas soluções 0,1M de NaOH ou HCl. Esse ensaio foi realizado em bêqueres de 250 mL, os quais foram transferidos para a mesa Agitadora - Incubadora (Shaker) (Marconi, MA-420) sob agitação de 100 rpm, por 24 horas.

Depois de 24 horas de equilíbrio, o pH final foi medido com o auxílio de um pHmetro Mettler-Toledo (Figura 4). Após esse processo, foi mensurada a diferença entre o pH final e inicial ($\Delta pH = pH_{Final} - pH_{Inicial}$), e um gráfico $\Delta pH = f(pH_{Inicial})$ foi plotado. O ponto em que a curva cruzou o eixo da abscissa ($y = 0$) foi tomado como o ponto de carga zero, no caso, o ponto em que a carga superficial do material é nula.

Figura 4 – pHmetro Mettler-Toledo utilizado nos experimentos de adsorção



Fonte: Autora, 2023.

3.3 PREPARAÇÃO DO EFLUENTE SINTÉTICO

Foi preparada uma solução mãe na concentração de 1000 mg/L pesando 0,5 g de amarelo Remazol 3RS em uma balança analítica, o qual foi posteriormente diluído em água destilada, completando o volume até aferição em um balão volumétrico de 500 mL. A partir desta solução foram feitas as diluições para as concentrações utilizadas em cada experimento.

3.3.1 Curva analítica

A análise quantitativa do corante foi realizada através da espectroscopia UV/VIS. Nesse caso, foi necessário construir uma curva analítica para o corante amarelo Remazol 3RS, permitindo que a concentração fosse determinada por meio de sua relação com a absorbância, segundo a lei Beer-Lambert.

A Lei Beer-Lambert, válida apenas para soluções diluídas, relaciona a concentração da solução com a absorbância da mesma, seguindo a equação 8. Em casos onde as medidas são feitas em condições de caminho óptico constante, se tem uma relação linear entre A e C, representada pela equação 9, onde o α é o coeficiente angular da reta obtida no gráfico (Absorbância x Concentração).

$$A = (\alpha \times b) \times C \quad (8)$$

$$A = \alpha \times C \quad (9)$$

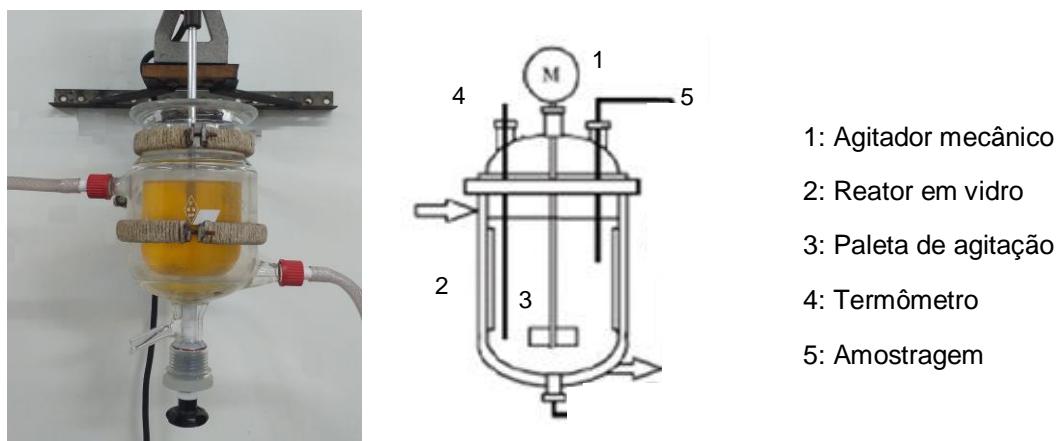
Onde A é a absorbância, α é a absorvidade molar (L/mol.cm), b é o caminho óptico (cm), C é a concentração (mol/L) e α é o coeficiente angular da reta.

Inicialmente foi feita uma varredura utilizando o espectrofotômetro, a fim de descobrir o comprimento de onda ideal para análise do corante e, após isso, foram analisadas em triplicata uma série de concentrações conhecidas do corante (0-70 mg/L) para construção do gráfico (Absorbância x Concentração).

3.4 ENSAIOS DE ADSORÇÃO EM BATELADA

Os ensaios foram realizados em um reator agitado, representado na Figura 5, utilizando 750 mL da solução de corante, onde a influência de variáveis como a concentração do corante, massa do adsorvente e pHs da solução foram analisadas.

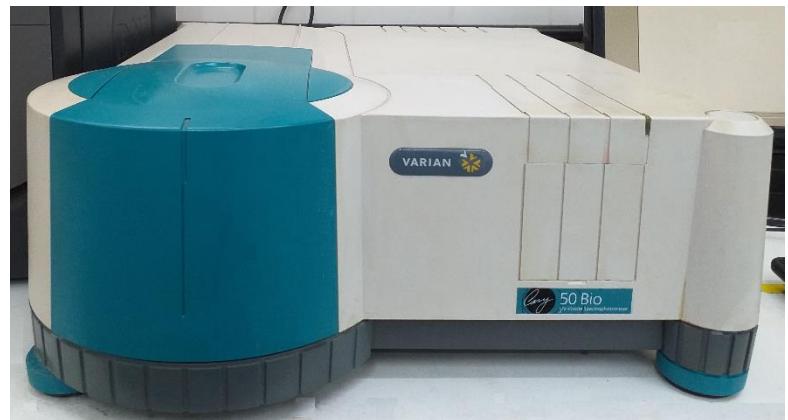
Figura 5 – Representação do Reator agitado utilizado nos experimentos de adsorção.



Fonte: Autora, 2023.

Para todas as variáveis estudadas, ao final do processo adsorvente, foram retiradas amostras da fase líquida utilizando um filtro poroso e, em seguida, foi feita uma análise quantitativa das amostras pelo espectrofotômetro UV-Visível (Figura 6) para determinação da concentração final na fase líquida.

Figura 6 - Espectrofotômetro UV-Visível utilizado nos experimentos de adsorção.



Fonte: Autora, 2023.

Para cálculo da eficiência de remoção do corante foi utilizada a equação 10.

$$\%R = \frac{(C_0 - C_{eq})}{C_0} \times 100 \quad (10)$$

Onde %R é a eficiência de remoção, C_0 é a concentração inicial da solução de corante (mg/L) e C_{eq} é a concentração da solução de corante no equilíbrio (mg/L).

E para o cálculo da quantidade adsorvida, foi utilizada a equação 1, explicitada na fundamentação teórica.

3.4.1 Massa do adsorvente

Para o estudo da influência da massa do adsorvente, foram realizados ensaios em batelada variando a quantidade de adsorvente de 1g - 4,0g em 750 ml de solução.

Para cada ensaio a concentração inicial do corante foi fixada em 50 mg/L, a temperatura utilizada foi a ambiente (30°C), o pH foi o natural da solução e o tempo de adsorção foi fixado em 90 min.

3.4.2 Concentração do corante

Para o estudo da influência da concentração do corante, foram preparadas 750 ml de soluções com concentrações de corante variando de 10 mg/L a 50 mg/L, em intervalos de 10 mg/L.

Para cada ensaio a massa de adsorvente utilizado foi 2g, a temperatura foi a ambiente (30°C), o pH foi o natural da solução e o tempo de adsorção foi fixado em 90 min.

3.4.3 pH da solução

Para o estudo da influência do pH da solução, foram realizados ensaios em batelada, variando o pH inicial para 2, 4, 6, 8, 10 e 12. Para fazer o ajuste do pH foram utilizadas soluções 0,1M de NaOH (pH básico) e HCl (pH ácido).

Para cada ensaio foram utilizados 750 ml de solução, onde a concentração inicial do corante foi fixada em 50 mg/L, a temperatura utilizada foi a ambiente, a massa de adsorvente foi fixada e o tempo de adsorção também foi fixado em 90 min.

3.5 TRATAMENTO DE DADOS

A partir dos dados obtidos nos experimentos, foram feitos testes de modelos de isotermas (Langmuir e Freudlich) e foi feita a modelagem cinética pelos modelos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem.

Para o ajuste matemático, tanto do equilíbrio quanto da cinética adsorptiva, foi utilizado o software OriginPro 8.5, nesse caso, os modelos foram avaliados considerando o Coeficiente de Correlação (R^2) e Chi-quadrado (χ^2) obtidos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 PREPARAÇÃO DOS ENSAIOS

Antes de iniciar os ensaios, foi feita a preparação do adsorvente e à análise do seu ponto de carga zero. A solução de corante foi preparada conforme descrito na metodologia, e em seguida foi realizada a análise do seu comprimento de onda ótimo e a construção da curva analítica

4.1.1 Preparação do adsorvente

As cascas de ovo, coletadas de fonte doméstica, tiveram as suas membranas parcialmente removidas e em seguida foram secas, trituradas e peneiradas para que tivessem uma granulometria de 60 mesh. Após esse processo o material foi calcinado, conforme descrito na metodologia.

As cascas foram pesadas em uma balança analítica antes e depois de passar pelo processo de calcinação na mufla, obtendo uma massa inicial de 346,790 g e uma massa final de 155,072 g.

Segundo Rodrigues; Ávila, 2017, a casca do ovo possui em sua composição água, matéria orgânica referente a membrana, carbonato de cálcio (CaCO_3) e uma pequena quantidade de ferro nas cascas de ovo marrom, sendo o CaCO_3 responsável por 78 a 90% da composição total.

Nesse caso, a massa perdida (191,718 g) durante o processo de calcinação é referente a evaporação da água (25° a 100°C) e decomposição da matéria orgânica (250° a 600°C), havendo ainda durante esse processo a decomposição térmica do CaCO_3 , promovendo a liberação de CO_2 e formação de CaO (800°C a 900°C), conforme a equação 11.

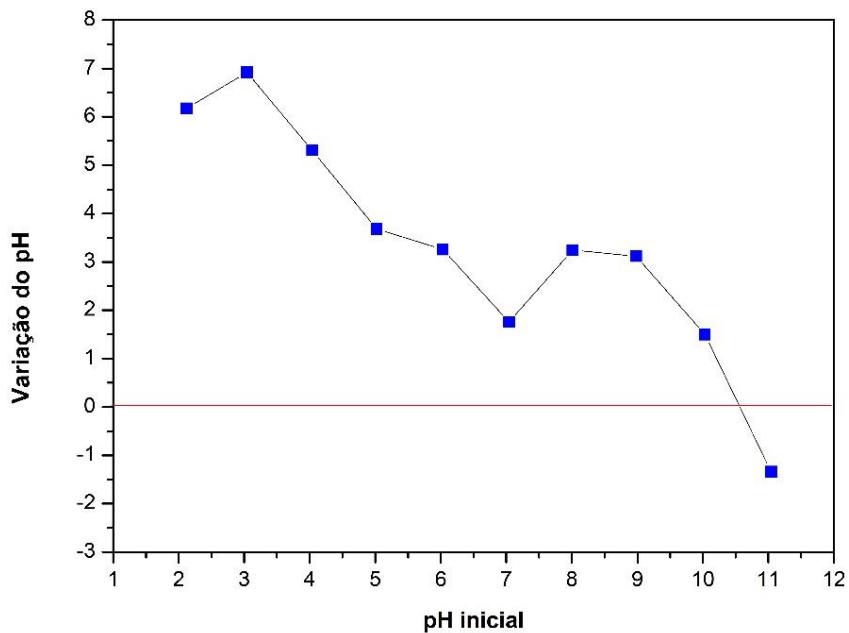


4.1.1.1 Ponto de carga zero (PCZ)

Para a determinação do ponto de carga zero da casca de ovo calcinada foi seguido o procedimento descrito na metodologia, sendo possível plotar um gráfico da

variação do pH ($\Delta\text{pH} = \text{pH}_{\text{Final}} - \text{pH}_{\text{Início}}$) em relação ao pH inicial das amostras. O gráfico pode ser observado na Figura 7.

Figura 7 – Determinação do pH_{PCZ} da casca de ovo calcinada.



Fonte: Autora, 2023.

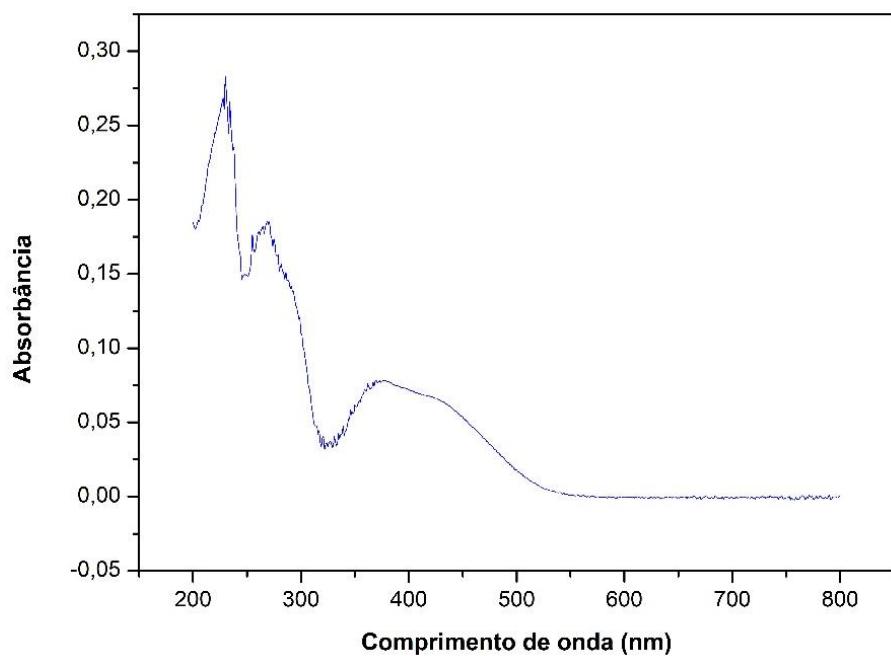
A partir do gráfico é possível determinar o pH_{PCZ} como o pH no ponto onde a curva cruza o eixo da abscissa ($\text{pH}_{\text{PCZ}} = 10,56$) e, como o material obtido após a calcinação trata-se de um óxido básico (CaO), um sólido branco pouco solúvel em água e que gera soluções com elevado pH de aproximadamente 12,8, o resultado não está longe do esperado (MIRANDA *et al.*, 2019). Slimani *et al.*, 2021 também encontrou um resultado similar, obtendo um pH_{PCZ} de 10,2 para a casca de ovo calcinada.

A determinação do pH_{PCZ} é fundamental para prever como será o processo de adsorção, já que para pHs menores que 10,56 vai haver uma carga superficial positiva no adsorvente, favorecendo a adsorção de corantes aniónicos e para pHs maiores que 10,56 a carga superficial será negativa, favorecendo a adsorção de corantes catiônicos.

4.1.2 Preparação da solução

Após preparar a solução mãe com o corante Amarelo Remazol 3RS, foi feita a varredura de uma amostra diluída para obtenção de um comprimento de onda adequado para as análises. A varredura da solução, feita de 200 nm até 800 nm, pode ser observada na Figura 8.

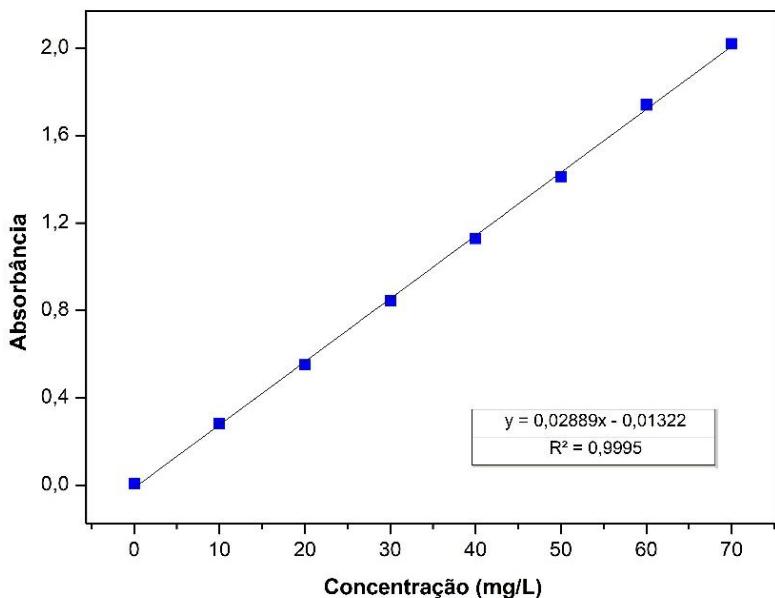
Figura 8 – Varredura do Remazol Amarelo 3RS de 200 a 800 nm.



Fonte: Autora, 2023.

Após escolher o comprimento de onda que apresentou a maior absorção ($\lambda = 230$ nm), foi construída uma curva analítica para obtenção das concentrações finais nos ensaios adsortivos. A curva analítica pode ser observada na Figura 9.

Figura 9 – Curva analítica do Remazol Amarelo 3RS de 0-70 mg/L.



Fonte: Autora, 2023.

A partir da curva analítica pode-se calcular, por regressão linear, a relação entre absorbância e concentração do Remazol Amarelo 3RS em uma solução (α) e com isso calcular as concentrações finais seguindo a equação 9, explicitada na metodologia.

4.2 ESTUDO DE ADSORÇÃO

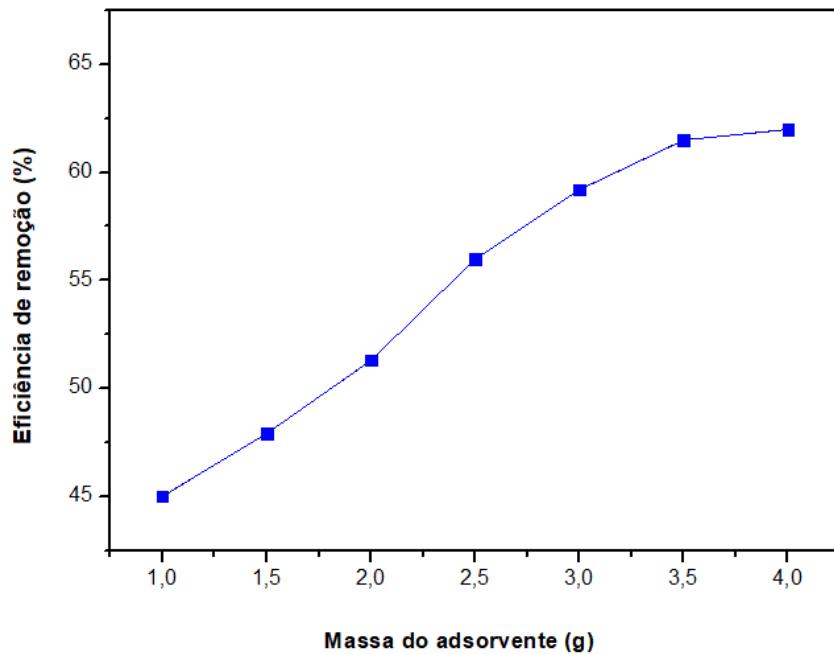
Para esse estudo, foi utilizado o corante sintético Remazol amarelo 3RS como adsorvato para determinar a capacidade adsorptiva da casca de ovo calcinada.

Foram analisadas a influência de variáveis como a concentração inicial do corante, massa do adsorvente e pHs da solução. Além disso, foram realizados também estudos cinéticos e de equilíbrio para o sistema.

4.2.1 Efeito da dosagem de adsorvente

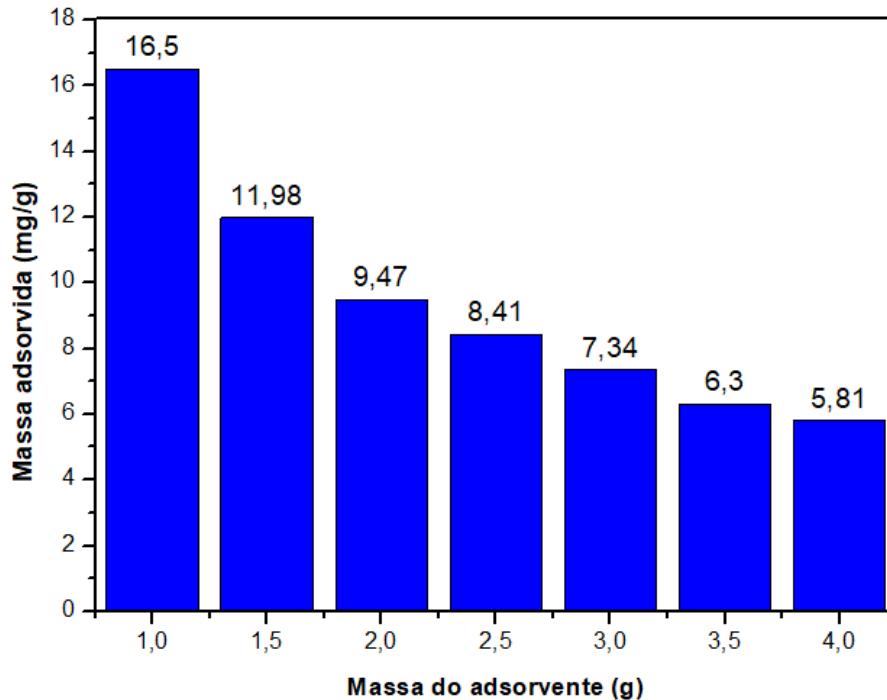
Para esse estudo foi utilizado uma quantidade de adsorvente variando de 1-4 g em 750 mL de solução do corante com concentração de 50 mg/L. A temperatura escolhida foi a ambiente (30°C), o pH foi o natural da solução (6) e o tempo de contato foi fixado em 90 min. Os resultados encontrados podem ser observados nas Figuras 10 e 11.

Figura 10 – Efeito da dosagem do adsorvente na eficiência de remoção do corante.



Fonte: Autora, 2023.

Figura 11 – Efeito da dosagem do adsorvente na quantidade de corante adsorvida por grama de adsorvente.



Fonte: Autora, 2023.

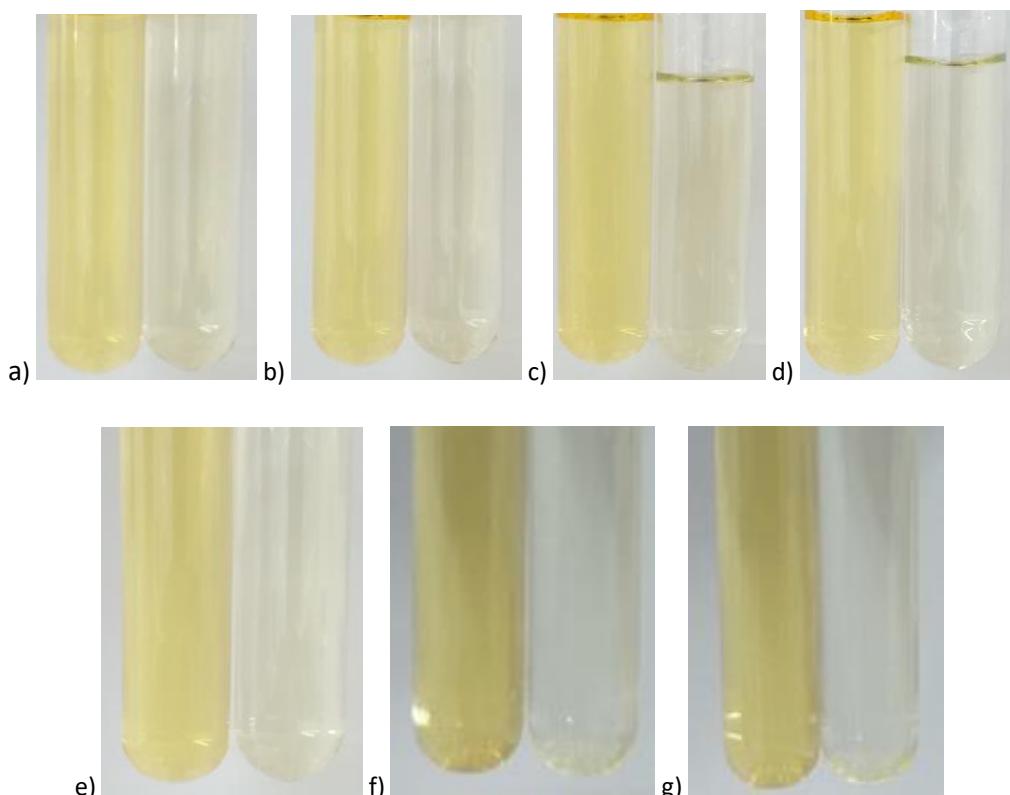
Como pode ser observado na Figura 10, ao aumentar a dosagem de adsorvente, houve também um aumento na eficiência de remoção do corante, passando de 45% com 1g para 62% com 4g. É possível perceber ainda que de 3,5g

para 4g não houve um aumento significativo na eficiência de remoção, indicando um efeito platô para a adição de adsorvente.

Na Figura 11, é possível perceber que, apesar de haver um aumento na eficiência de remoção do corante, há uma diminuição na quantidade de corante adsorvido por grama de adsorvente. Slimani *et al.*, 2021 também encontraram resultados semelhantes ao estudar o efeito da quantidade de adsorvente de casca de ovo em soluções de Rhodamine B e Alizarin Red S, esse comportamento indicaria então uma agregação ou aglomeração das partículas de adsorvente, o que ocasionaria em diminuição da área superficial disponível para adsorção.

A Figura 12 mostra a comparação visual entre os experimentos realizados com diferentes dosagens de adsorvente. É possível observar que, mesmo com uma remoção de apenas 45% (Figura 10.a), visualmente há uma diferença significativa na coloração. É possível ainda perceber que entre 45% e 62% de remoção, as soluções tratadas apresentam colorações bem semelhantes.

Figura 12 – Comparação visual do efeito da dosagem do adsorvente. a) 1g; b) 1,5g; c) 2g; d) 2,5g; e) 3g; f) 3,5g e g) 4g.



Fonte: Autora, 2023.

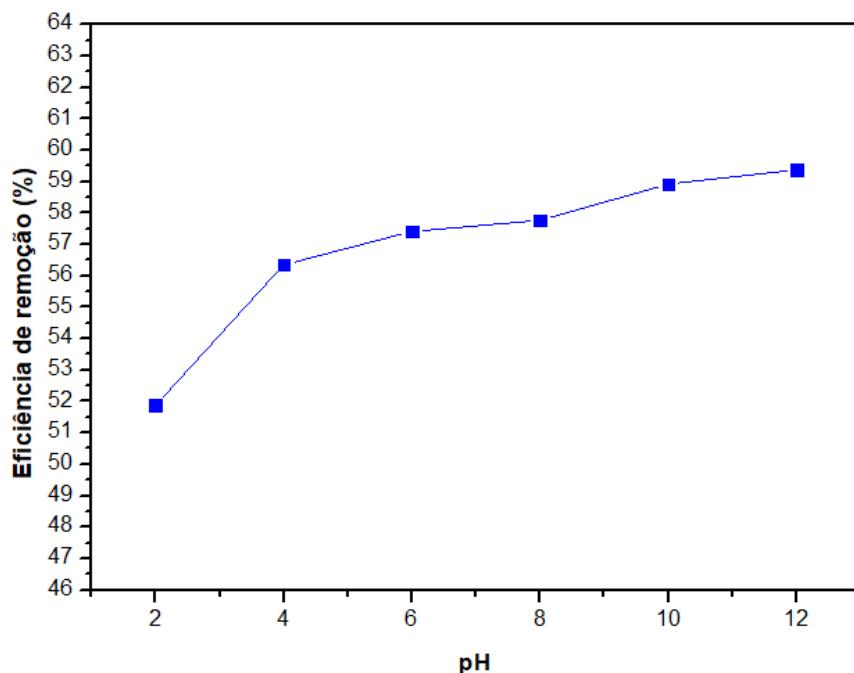
Um comportamento similar também foi reportado por Parvin *et al.*, 2019, que sugeriram que o aumento na eficiência de remoção poderia ser atribuído a uma maior área superficial disponível do material, consequentemente indicando um maior número de sítios ativos para adsorção.

4.2.2 Efeito do pH Inicial

Seguindo o procedimento descrito na metodologia, para esse estudo foram utilizados 750 ml de uma solução do corante 50 mg/L, com o pH variando de 2 a 12. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 13.

A temperatura selecionada para o experimento foi ambiente (30°C), com um tempo de contato fixado em 90 minutos e a quantidade de adsorvente utilizada foi de 2g. Essa quantidade foi escolhida devido ao estudo da cinética de adsorção, uma vez que ao utilizar uma quantidade maior de adsorvente, não foi possível acompanhar adequadamente os pontos do gráfico devido à rápida velocidade com que o sistema alcançava o equilíbrio.

Figura 13 – Efeito do pH inicial na eficiência de remoção do corante para pH de 2-12.



Fonte: Autora, 2023.

Como pode ser observado na Figura 13, há um aumento na eficiência de remoção do corante com o aumento do pH inicial da solução, passando de 51,8% a um pH 2 para 59,3% a um pH 12.

Os resultados obtidos para o efeito do pH são contraditórios aos observados em outros estudos (SLIMANI *et al.*, 2021; SILVA, 2015; SARATALE *et al.*, 2021). Por se tratar de um corante aniónico, o Remazol Amarelo 3RS possui carga negativa, sendo assim, era esperado que a pHs abaixo do ponto de carga zero (10,56) o sistema apresentasse melhores resultados em relação a eficiência de remoção do corante.

Uma das possíveis causas para esse fenômeno é a tendência que o óxido de cálcio vai ter de aumentar o pH do meio, seja para correção da acidez em solos ou neutralização de soluções ácidas (SONG *et al.*, 2022; FELTRE, 2008). Nesse caso, ao colocar o adsorvente, que é composto majoritariamente de óxido de cálcio, em uma solução ajustada com o ácido clorídrico (soluções com $2 \leq \text{pH} \leq 6$), o CaO iria reagir com o HCl (FELTRE, 2008), diminuindo a quantidade de adsorvente disponível e, consequentemente, a quantidade de corante removido.

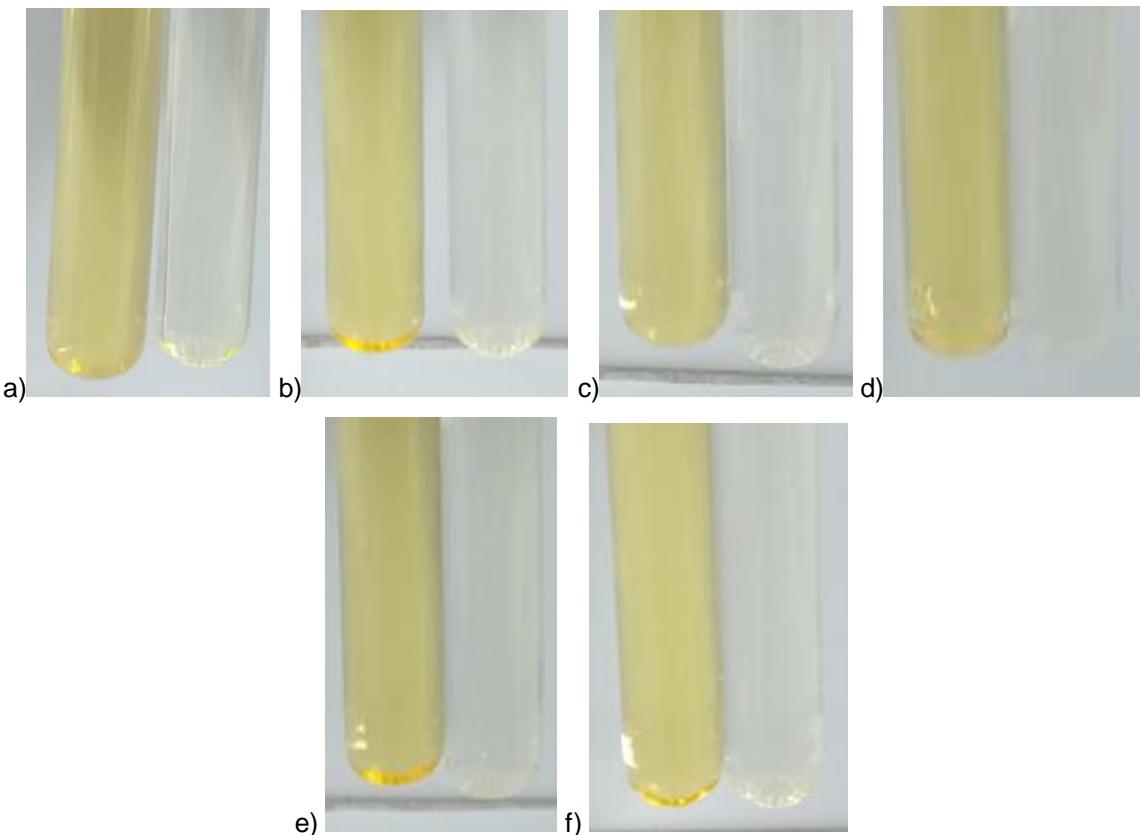
A Equação 12 está representando a reação do óxido de cálcio com o ácido clorídrico para as soluções de corante ajustadas.



Sendo assim, para um pH menor que o pH_{PCZ} , o óxido que cálcio estaria, pelo princípio de Le Chatelier, tentando compensar as cargas positivas, o que diminuiria a disponibilidade do adsorvente, ocasionando também em uma diminuição da adsorção.

A Figura 14 mostra a comparação visual entre os experimentos realizados com diferentes pHs iniciais. É possível observar que com uma remoção entre 51,8% a 59,3%, para uma concentração inicial de 50 mg/L, já há uma diferença significativa na coloração final.

Figura 14 – Comparação visual do efeito do pH inicial. a)pH 2; b)pH 4; c)pH 6; d)pH 8; e)pH 10 e f)pH 12.



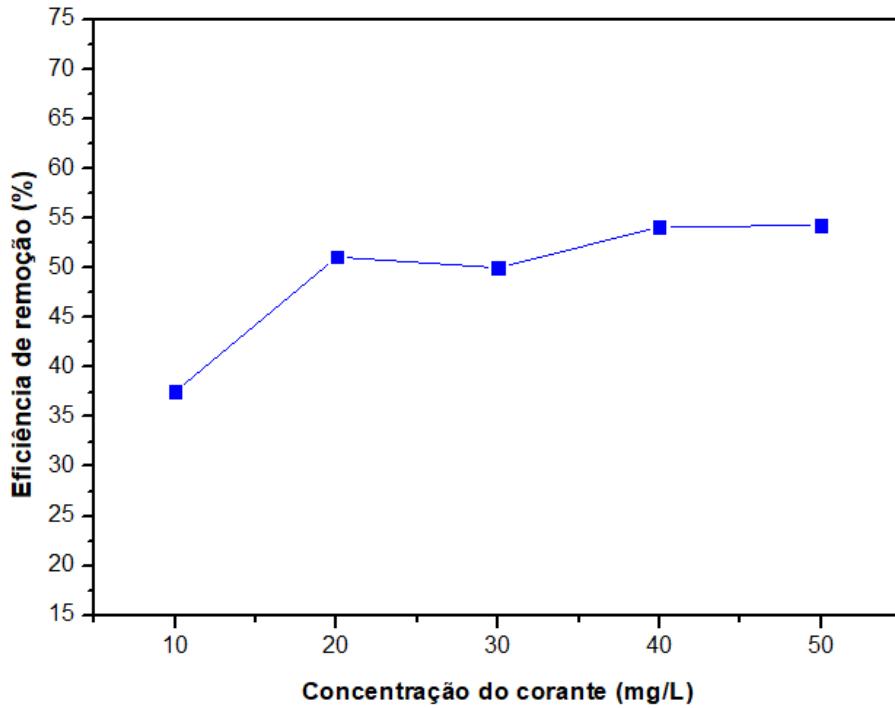
Fonte: Autora, 2023.

4.2.3 Efeito da concentração inicial de corante

Para esse estudo foram utilizados 750ml de soluções de corante com concentrações variando de 10-50 mg/L. A temperatura escolhida foi a ambiente (30°C), o tempo de contato foi fixado em 90 min. Nesse caso, foi adotado o pH natural da solução (6) e também foi fixada a quantidade de adsorvente em 2g. Ao tentar utilizar 4g de adsorvente (valor ótimo) e um meio mais ácido, a cinética não pôde ser adequadamente acompanhada devido a rapidez em que o sistema entrou em equilíbrio. Por esse motivo, optou-se por manter a condição com 2g de adsorvente e pH natural para possibilitar uma melhor observação e análise da cinética de adsorção.

Os resultados obtidos nos experimentos estão apresentados na Figura 15.

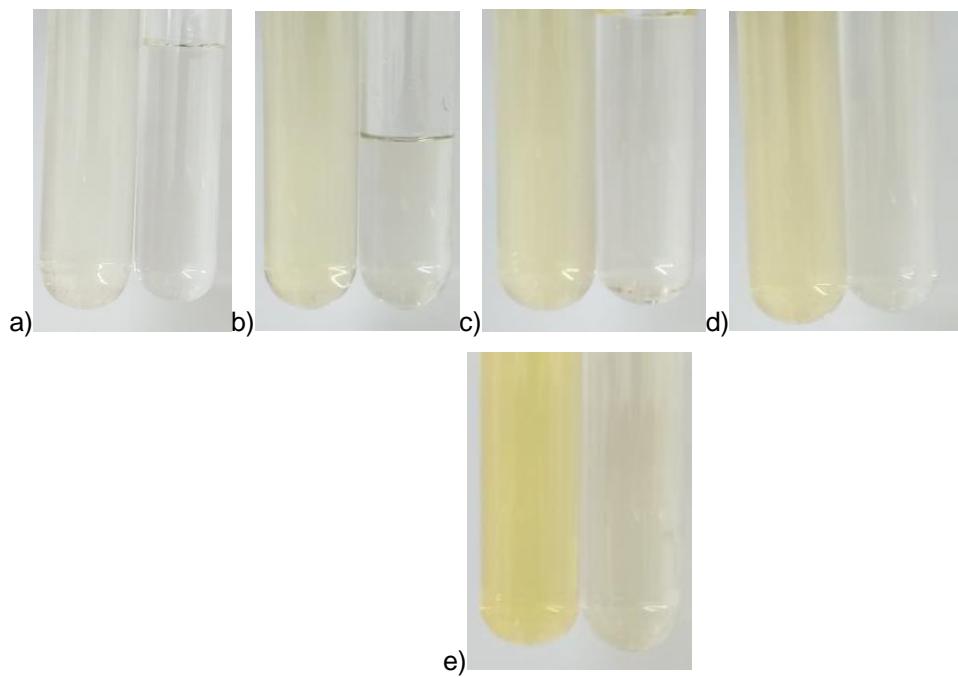
Figura 15 – Efeito da concentração inicial do corante na eficiência de remoção do corante para soluções de 10-50 mg/L.



Fonte: Autora, 2023.

Como pode ser observado na Figura 15, há um aumento na eficiência de remoção com o aumento da concentração inicial do corante, passando de 37,5% a uma concentração de 10 mg/L para 54,33% a uma concentração de 50 mg/L. A Figura 16 mostra a comparação visual entre os experimentos realizados com diferentes concentrações iniciais.

Figura 16 – Comparação visual do efeito da concentração inicial do corante. a) 10 mg/L; b) 20 mg/L; c) 30 mg/L; d) 40 mg/L; e) 50 mg/L.



Fonte: Autora, 2023.

Esse aumento na eficiência de remoção pode ser explicado pela maior força motriz no sistema, já que a diferença na concentração do composto na fase líquida e na superfície do adsorvente (fase sólida) impulsiona para que a transferência de massa ocorra de forma mais rápida e atinja também sítios ativos mais profundos (BARROS, 2020).

Outros autores também observaram comportamentos semelhantes ao aumentar a concentração do corante, porém, também é importante ressaltar que suas eficiências de remoção foram consideravelmente maiores, chegando a um máximo de 97% para a casca de ovo calcinada frente ao VBR, 99,32% para a casca de ovo calcinada frente ao azul de metileno, 88% para a casca de ovo *in natura* finamente triturada frente ao Congo Red, 95% para a casca de ovo *in natura* utilizando o corante Rodamina B e 94% para a casca de ovo *in natura* frente ao corante Alizarin Red S (SLIMANI *et al.*, 2021; SATIR; EROL, 2021; KHALEK *et al.*, 2017).

Para o carvão ativado, o VBR apresentou uma remoção máxima de 98%, o Azul de metileno 95%, o Congo Red 96,76%, a Rodamina B apresentou 97% de remoção e o Alizarin Red S ficou com uma máxima de 100% de remoção (SILVA *et al.*, 2018; LACERDA *et al.*, 2015; SRINIVAS *et al.*, 2017; KUMAR *et al.*, 2013; BHOMICK *et al.*, 2020). Comparando ainda esses resultados, obtidos pela utilização

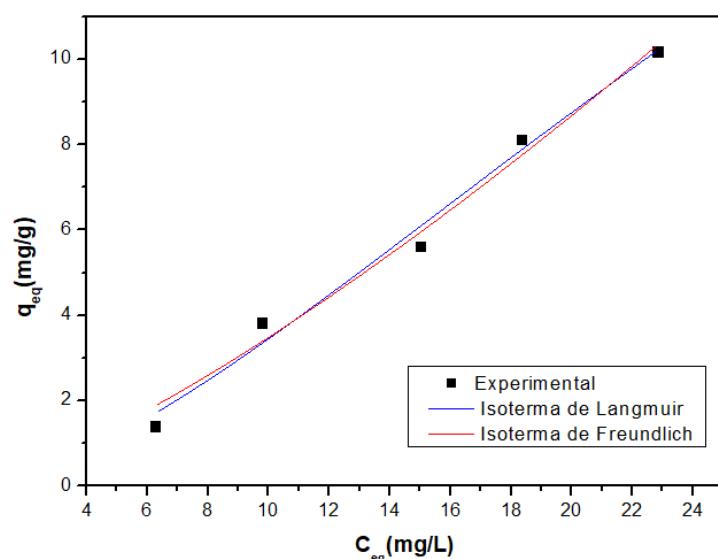
da casca de ovo como adsorvente, com os resultados de remoções obtidas, para os mesmos corantes, utilizando o carvão ativado como adsorvente, é possível notar que apesar da casca de ovo apresentar uma eficiência levemente menor, ela ainda está bem próxima dos valores obtidos e possui uma alta porcentagem de remoção, indicando que o material poderia ser um ótimo substituinte para o carvão na remediação de efluentes têxteis.

4.2.4 Equilíbrio de adsorção

O estudo do equilíbrio de adsorção é de extrema importância para obtenção de informações relevantes sobre o projeto e análise de um processo de separação por adsorção (NASCIMENTO *et al.*, 2020). Tendo isso como base, foram utilizados dois modelos para fazer o ajuste dos dados experimentais, o modelo de Langmuir e o modelo de Freundlich, cada um trazendo as suas suposições e particularidades, conforme apresentado na seção 3.3.1.

Para essa análise foram utilizadas soluções com concentrações de 10-50 mg/L e as mesmas condições experimentais da determinação do efeito da concentração inicial do corante na seção 4.2.3. Os dados obtidos para o q_{eq} e c_{eq} foram ajustados segundo os modelos escolhidos utilizando o software OriginPro 8.5 e estão apresentados na Figura 17.

Figura 17 – Isotermas de adsorção do Remazol Amarelo 3RS frente a casca de ovo calcinado - modelos de Freundlich e Langmuir.



Fonte: Autora, 2023.

A partir do ajuste com o software também foi possível obter os parâmetros para cada modelo e o Coeficiente de Correlação (R^2) e Chi-quadrado (χ^2), estando estes explicitados na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros de equilíbrio da adsorção

Modelo	$q_{\text{máx}} (\text{mg/g})$	$k (\text{L/mg})$	$1/n$	R^2	χ^2
Langmuir	33,046	0,0027	-	0,9749	0,2998
Freudlich	-	0,1673	1,318	0,9847	0,2300

Fonte: Autora, 2023.

Analizando a Figura 17 e a Tabela 3, observa-se que o modelo de Freudlich obteve o ajuste mais satisfatório, uma vez que teve o maior R^2 e menor χ^2 . Segundo a Tabela 3 também é possível concluir que a adsorção do corante Remazol Amarelo 3RS na casca de ovo calcinada é favorável, visto que o valor de $1/n$ foi maior que 1 (NASCIMENTO *et al.*, 2020).

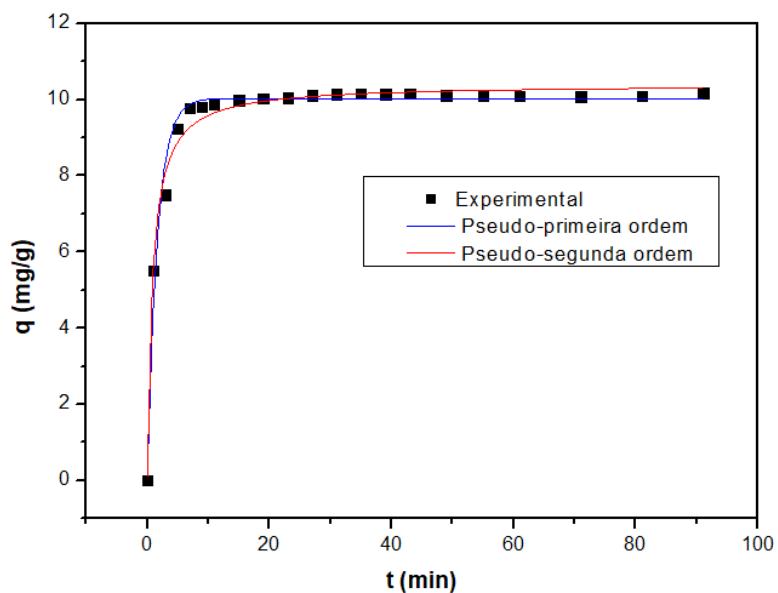
Além disso, ao observar a tendência das isotermas na Figura 17, que podem fornecer informações sobre a capacidade ou tendência de adsorção a depender de qual forma ela vai possuir, foi visto que a adsorção do corante Amarelo Remazol 3RS poderia ser considerada desfavorável, como visto na Figura 3 da seção 2.3.1. Isso poderia ser explicado pela pequena quantidade de pontos, sendo necessário a construção de um gráfico mais robusto para uma melhor avaliação visual do comportamento adsortivo pela tendência da isoterma.

4.4.5 Cinética de adsorção

Por último, foi realizado um estudo sobre a cinética de adsorção, que vai descrever a taxa de remoção do adsorvato na fase fluida ao longo do tempo (NASCIMENTO *et al.*, 2020). Para acompanhar a evolução da concentração do adsorvato na fase sólida, foram aplicados modelos matemáticos, mais especificamente os modelos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem que são os mais utilizados (OLIVEIRA, 2013).

Para essa análise foi empregada uma solução com 50 mg/L de corante, seguindo as mesmas condições experimentais da determinação do efeito da concentração inicial do corante na seção 4.2.3. Os dados obtidos para o decaimento da concentração ao longo do tempo foram ajustados aos modelos utilizando o software OriginPro 8.5. Os resultados desses ajustes estão apresentados na Figura 18.

Figura 18 – Modelos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem para o Remazol Amarelo 3RS.



Fonte: Autora, 2023.

A partir do ajuste com o software também foi possível obter os parâmetros para os modelos (K e q) e o Coeficiente de Correlação (R^2) e Chi-quadrado (χ^2), estando estes apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros cinéticos dos modelos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem.

Modelo	K	Q	R^2	χ^2
Pseudo-primeira ordem	$0,6028 \pm 0,0433 \text{ min}^{-1}$	$10,0352 \pm 0,0787$	0,9815	0,1051
Pseudo-segunda ordem	$0,8499 \pm 0,0092 \text{ mg/g.min}$	$10,4038 \pm 0,0711$	0,9898	0,0579

Fonte: Autora, 2023.

Analisando os termos de R^2 e χ^2 , vemos que o modelo de pseudo-segunda ordem foi o que melhor se ajustou aos dados. Khalek *et al.*, 2017 também obteveram resultados similares para a adsorção do corante aniónico Vermelho congo frente a casca de ovo *in natura*, onde foi observado um melhor ajuste da cinética pelo modelo de pseudo-segunda ordem. O mesmo padrão foi encontrado para a casca de ovo calcinada, onde Borhade e Kale, 2017 observaram um melhor ajuste no modelo de pseudo-segunda ordem para os corantes Rhodamine B, Eriochrome black T e Murexide.

5 CONCLUSÃO

Em conclusão, este trabalho investigou a capacidade de adsorção da casca de ovo calcinada para a remoção do corante Amarelo Remazol 3RS em efluentes têxteis. Através da metodologia empregada, que envolveu a coleta, lavagem, secagem, Trituração e calcinação da casca de ovo, foi possível obter um adsorvente composto principalmente por óxido de cálcio (CaO).

Para realização dos experimentos e análise dos parâmetros relevantes, foram feitos ensaios de adsorção em batelada, sendo as concentrações do corante Amarelo Remazol 3RS determinadas por espectroscopia UV/VIS. Os resultados obtidos revelaram que a dosagem do adsorvente, o pH inicial da solução e a concentração inicial do corante são fatores cruciais que influenciam a eficiência de remoção.

Ao aumentar a dosagem do adsorvente, observou-se um aumento significativo na eficiência de remoção do corante, alcançando uma remoção de 62% com 4g de adsorvente. Além disso, verificou-se que diferentemente do esperado, pHs mais elevados favorecem a adsorção do corante, resultando em uma remoção de 59,3% a pH 12. O aumento da concentração inicial do corante também contribuiu para uma maior eficiência de remoção, chegando em 54,33% para a concentração de 50 mg/L.

Os modelos de isotermas de adsorção mostraram que o modelo de Freundlich se ajustou melhor aos dados experimentais, indicando uma adsorção favorável. Quanto à cinética de adsorção, o modelo de pseudo-segunda ordem foi o que melhor descreveu o processo de remoção do corante.

Embora os resultados obtidos não tenham atingido eficiências de remoção muito altas quando comparado a outros trabalhos, com uma eficiência máxima de 62% para 4g de adsorvente, pH 6 e concentração de 50 mg/L, este estudo contribui para o avanço do conhecimento sobre a utilização da casca de ovo calcinada como um adsorvente de baixo custo e sustentável para a remoção de corantes em efluentes têxteis.

No entanto, é importante ressaltar que mais estudos são necessários para aprimorar a eficiência de remoção e avaliar a viabilidade da aplicação em escala industrial. Estratégias como modificação da superfície do adsorvente, otimização das condições de adsorção e estudos de reutilização do adsorvente podem ser exploradas

para aprimorar ainda mais os resultados obtidos. Além da sua aplicação para remediação de efluentes têxteis, também poderia ser avaliada, por se tratar de um material natural, a sua aplicabilidade na indústria de alimentos, analisando possíveis tratamentos.

A utilização da casca de ovo calcinada como adsorvente mostra-se promissora e abre caminho para futuras pesquisas e aplicações, contribuindo para a preservação do meio ambiente.

REFERÊNCIAS

- AMALINA, F.; RAZAK, A. S. A.; KRISHNAN, S.; ZULARISAM, A. W.; NASRULLAH, M. Dyes removal from textile wastewater by agricultural waste as an absorbent – A review. **Cleaner Waste Systems**, v. 3, n. June, p. 100051, 2022.
- ABIT – Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção, disponível em: <<https://www.abit.org.br/cont/perfil-do-setor>>, consultado em 25/06/2023.
- ABIT, Associação Brasileira Da Indústria Têxtil e De Confecção. **O setor têxtil e de confecção e os desafios da sustentabilidade**. Brasília: Cni – Confederação Nacional da Indústria, 2017.
- BARROS, D. M. **Estudo da remoção do corante têxtil amarelo Remazol 3RS pelo biopolímero quitosana**. Recife-PE, Engenharia química, Universidade Federal de Pernambuco, 2020. Trabalho de conclusão de curso.
- BEHERA, M.; NAYAK, J.; BANERJEE, S.; CHAKRABORTTY, S.; TRIPATHY, S. K. A review on the treatment of textile industry waste effluents towards the development of efficient mitigation strategy: An integrated system design approach. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 4, p. 105277, 2021.
- BORHADE, A. V.; KALE, A. S. Calcined eggshell as a cost effective material for removal of dyes from aqueous solution. **Applied Water Science**, v. 7, n. 8, p. 4255–4268, 2017.
- BHOMICK, P. C.; SUPONG, A.; BARUAH, M.; PONGENER, C.; GOGOI, C.; SINHA, D. Alizarin Red S adsorption onto biomass-based activated carbon: optimization of adsorption process parameters using Taguchi experimental design. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 17, n. 2, p. 1137–1148, 2020.
- CHAKRABORTY, S.; CHOWDHURY, S.; DAS SAHA, P. Adsorption of Crystal Violet from aqueous solution onto NaOH-modified rice husk. **Carbohydrate Polymers**, v. 86, n. 4, p. 1533–1541, 2011.
- COSTA, A. C. R.; ROCHA, E. R. P. **Panorama da cadeia produtiva têxtil e de confecções e a questão da inovação**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 29, p. 159–202, mar., 2009
- FELTRE, R. A. **Química Geral 1**. 7º Edição. São Paulo: Moderna, 2008.
- FONTANA, K. B.; CHAVES, E. S.; SANCHEZ, J. D. S.; WATANABE, E. R. L. R.; PIETROBELLINI, J. M. T. A.; LENZI, G. G. Textile dye removal from aqueous solutions by malt bagasse: Isotherm, kinetic and thermodynamic studies. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 124, p. 329–336, 2016.
- JAWAD, A. H.; KADHUM, A. M.; NGOH, Y. S. Applicability of dragon fruit (*Hylocereus polyrhizus*) peels as low-cost biosorbent for adsorption of methylene blue from

aqueous solution: Kinetics, equilibrium and thermodynamics studies. **Desalination and Water Treatment**, v. 109, n. May, p. 231–240, 2018.

KADHOM, M.; ALBAYATI, N.; ALALWAN, H.; AL-FURAIJI, M. Removal of dyes by agricultural waste. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 16, n. April, p. 100259, 2020.

KANANI, F.; HEIDARI, M. D.; GILROYED, B. H.; PELLETIER, N. Waste valorization technology options for the egg and broiler industries: A review and recommendations. **Journal of Cleaner Production**, v. 262, p. 121129, 2020.

KHALEK, M. A. A.; RAHMAN, M. K. A.; FRANCIS, A. A. Exploring the adsorption behavior of cationic and anionic dyes on industrial waste shells of egg. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 5, n. 1, p. 319–327, 2017.

KHAN, W. U.; AHMED, S.; DHOBLE, Y.; MADHAV, S. A critical review of hazardous waste generation from textile industries and associated ecological impacts. **Journal of the Indian Chemical Society**, v. 100, n. 1, p. 100829, 2023.

KISHOR, R.; PURCHASE, D.; SARATALE, G. D.; SARATALE, R. G.; FERREIRA, L. F. R.; BILAL, M.; CHANDRA, R.; BHARAGAVA, R. N. Ecotoxicological and health concerns of persistent coloring pollutants of textile industry wastewater and treatment approaches for environmental safety. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 2, p. 105012, 2021.

KUMAR, M.; TAMILARASAN, R.; SIVAKUMAR, V. Adsorption of Victoria blue by carbon/Ba/alginate beads: Kinetics, thermodynamics and isotherm studies. **Carbohydrate Polymers**, v. 98, n. 1, p. 505–513, 2013.

KUNZ, A.; PERALTA-ZAMORA, P.; DE MORAES, S. G.; DURÁN, N. Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis. **Química Nova**, v. 25, n. 1, p. 78–82, 2002.

LACERDA, V. S.; SOTELO, J. B.; GUIMARÃES, A. C.; NAVARRO, S. H.; BÁSCONES, M. S.; GRACIA, L. M. N.; RAMOS, P. M.; GIL, J. M. Rhodamine B removal with activated carbons obtained from lignocellulosic waste. **Journal of Environmental Management**, v. 155, n. March, p. 67–76, 2015

MENDES JUNIOR, B. DE OLIVEIRA. Setor têxtil. **Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste - Etene**, p. 1–18, 2017.

MIRANDA, I. DE S.; SANTOS, C. DA S.; MENDES, M. H. DE S.; MIRANDA, A. M. S. Utilizando resíduos como ferramenta para educação ambiental e o ensino da química. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, v. 10, n. 07, p. 70–86, 2019.

NASCIMENTO, R. F.; LIMA, A. C. A.; VIDAL, C. B.; MELO, D. Q.; RAULINO, G. S. C. **Adsorção: Aspectos teóricos e aplicações ambientais**. 2º ed. Fortaleza, Imprensa Universitária UFC, 2020.

OLIVEIRA, S. P. D. **Remoção do corante azul reativo 5G utilizando o adsorvente comercial DOWEX OPTIPORE SD-2.** Toledo-PR, Engenharia química, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2013. Dissertação (Mestrado).

PAULINO, T. R. S.; ARAÚJO, R. DOS S.; SALGADO, B. C. B. Study of advanced oxidation of basic dyes by Fenton reaction (Fe²⁺/H₂O₂). **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 20, n. 3, p. 347–352, 2015.

PARVIN, S.; BISWAS, B. K.; RAHMAN, M. A.; RAHMAN, M. H.; ANIK, M. S.; UDDIN, M. R. Study on adsorption of Congo red onto chemically modified egg shell membrane. **Chemosphere**, v. 236, 2019.

PAVITHRA, K. G.; KUMAR, P. S.; JAIKUMAR, V.; RAJAN, P. S. Removal of Colorants from Wastewater : A Review on Sources and Treatment. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, n. March, 2019.

RAMOS, J. E. T. **Estudo de equilíbrio e cinética de adsorção em resinas de troca iônica aplicado à separação cromatográfica contínua de frutose e glicose do xarope de caju.** Fortaleza – CE, Engenharia química, Universidade Federal do Ceará, 2009. Dissertação (Mestrado)

REGALBUTO, J; ROBLES, J. The Engineering of Pt/Carbon Catalyst Preparation. **Progress Report**, p. 14, 2004.

RODRIGUES, A. S.; ÁVILA, S. G. Physical chemistry characterization of chicken eggshell and its utilization as source for production of calcium compounds. **Revista Virtual de Química**, v. 9, n. 2, p. 596–607, 2017.

SARATALE, R. G.; SUN, Q.; MUNAGAPATI, V. S.; SARATALE, G. D.; PARK, J.; KIM, D. S. The use of eggshell membrane for the treatment of dye-containing wastewater: Batch, kinetics and reusability studies. **Chemosphere**, v. 281, n. October 2020, 2021.

SATIR, I. T.; EROL, K. Calcined Eggshell for the Removal of Victoria Blue R Dye from Wastewater Medium by Adsorption. **JOTCSA**, v. 8, n. 1, p. 47–56, 2021.

SILVA, E. C. **Remoção de azo-corantes de efluente aquoso modelo por adsorção em carvão ativado.** Recife-PE, Engenharia química, Universidade Federal de Pernambuco, 2015. Tese (Doutorado)

SILVA, E. O.; SANTOS, M. C.; ANDRADE, T. D.; DE ARAÚJO, E. B.; ZOTTIS, R.; DE ALMEIDA, A. R. F. Cinética de Adsorção do Azul de Metileno por Carvão Ativado Obtido da Palha de Azevém. **10º Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão - SIEPE**, p. 6–11, 2018.

SILVA, D. F. P. DA; PEREIRA, A. L. DA S.; BASTOS, A. DE C.; ROWE, R. V. A. Reaproveitamento do resíduo da casca de ovo na adsorção de azul de metileno. **ANAIIS DO FÓRUM DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO UNIFUNEC**, v. v. 6, n. 6, p. 4–7, 2015.

SLIMANI, R.; OUAHABI, I. EL; BENKADDOUR, S.; HIYANE, H.; ESSOUFFY, M.;

ACHOUR, Y.; ANTRI, S. EL; LAZAR, S.; HADDAD, M. EL. Removal Efficiency of Textile Dyes from Aqueous Solutions Using Calcined Waste of Eggshells as Eco-friendly Adsorbent: Kinetic and Thermodynamic Studies. **Chemical and Biochemical Engineering Quarterly** v. 35, n. 1, p. 43–56, 2021.

SONG, Y.; LI, H.; GAN, X.; ZHANG, M.; XUE, M.; LI, J. Comparative Experimental Study on Calcium Oxide, Calcium Hydroxide, and Calcium Carbonate Solidified Zinc-Contaminated Red Clay. **Geofluids**, v. 2022, 2022.

SRINIVAS, M. K.; PRABHU, K. B.; GUNDECHA, A.; DEVIKA, U. Statistical analysis of congo red dye removal using sawdust activated carbon. **International Journal of Applied Engineering Research**, v. 12, n. 19, p. 8788–8804, 2017.

VERMA, N.; KUMAR, V.; BANSAL, M. C. Utilization of Egg Shell Waste in Cellulase Production by *Neurospora crassa* under Wheat Bran-Based Solid State Fermentation. **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 21, n. 2, p. 491–497, 2012.

WAHEED, M.; YOUSAF, M.; SHEHZAD, A.; INAM-UR-RAHEEM, M.; KHAN, M. K. I.; KHAN, M. R.; AHMAD, N.; ABDULLAH; AADIL, R. M. Channelling eggshell waste to valuable and utilizable products: A comprehensive review. **Trends in Food Science and Technology**, v. 106, n. September, p. 78–90, 2020.

YAGUB, M. T. et al. Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*. Elsevier, 2014.

ZANONI, M. V. B.; YAMANAKA, H. **Corantes caracterização química, toxicológica, métodos de detecção e tratamento**. 1^a ed. São Paulo, Cultura acadêmica, 2016.