

III-523 - ADSORVENTES PREPARADOS A PARTIR DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS PARA REMOÇÃO DE CORANTE TÊXTIL: PREPARAÇÃO, SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO

Marta Maria Menezes Bezerra Duarte⁽¹⁾

Professora do magistério superior do Departamento de Engenharia Química (DEQ) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Química Industrial pelo DEQ/UFPE, Mestre e Doutora em Química pelo Departamento de Química Fundamental (DQF) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Bolsista de produtividade do CNPq – PQ2

José Josias Pereira da Silva⁽²⁾

Graduando em Engenharia Química pelo Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco (DEQ/UFPE).

Marina Nunes dos Santos Silva⁽³⁾

Engenheira Química pelo Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco (DEQ/UFPE). Mestranda em Engenharia Química pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Química (PPGEQ) da UFPE.

Giovanna Amaral Jorge Correia Guedes⁽⁴⁾

Química Industrial pelo Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco (DEQ/UFPE). Mestre em Engenharia Química pelo PPGEQ da UFPE e Doutoranda em Engenharia Química pelo PPGEQ da UFPE.

Jean Heliton Lopes dos Santos⁽⁵⁾

Engenheiro Químico pelo Departamento de Engenharia Química (DEQ) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Mestre e Doutor em Engenharia Química pelo PPGEQ da UFPE. Pesquisador Visitante do PRH-30.1 ANP-FINEP/UFPE (Programa dos Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis).

Endereço⁽¹⁾: Rua Prof. Arthur de Sá, S/N - Cidade Universitária - Recife – PE - CEP - 50740-521 – Tel: (81) 21268711 - e-mail: marta.duarte@ufpe.br.

RESUMO

A indústria têxtil brasileira trata-se de uma das cinco maiores do mundo, além de possuir a maior cadeia têxtil completa do Ocidente, segundo a Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção (Abit). Desta forma, o polo têxtil apresenta uma significativa relevância econômica no país. Contudo, os efluentes que contêm corantes, quando descartados sem tratamento adequado, podem causar problemas ambientais devido à sua intensa coloração, baixa biodegradabilidade e alta solubilidade. Devido a estes fatores, esses efluentes são resistentes aos tratamentos convencionais, sendo necessários processos alternativos, como é o caso da adsorção. Diante do exposto, este trabalho propõe avaliar adsorventes preparados a partir de resíduos agroindustriais, visando remover corantes têxteis de meio aquoso. Para isto, soluções do corante Turquesa Reativo Q-G 125 foram preparadas para condução dos experimentos, sendo quantificadas em espectrofotômetro de ultravioleta/visível (UV/Vis) nos comprimentos de onda 337 e 625 nm. Curvas analíticas foram construídas seguindo as diretrizes do INMETRO (2020), demonstrando boa precisão e exatidão do método. Foram avaliados diferentes resíduos, sendo a casca de ovo calcinada (CO) a que apresentou melhor eficiência de remoção do contaminante em estudo. Após a seleção, a CO e seu precursor foram caracterizados pelas técnicas de adsorção/dessorção de N₂, espectrometria na região do infravermelho por transformada de Fourier (FT-IR) e pH do ponto de carga zero (pH_{pcz}). A partir dos ensaios de caracterização foi observado que, após a calcinação, o material sofreu um aumento da área superficial, volume e diâmetro do poro. Além disso, para o FT-IR, não foram observadas mudanças significativas nos espectros da CO e do material *in natura*. A CO apresentou um pH_{pcz} igual a 12,7, indicando uma ampla faixa de pH da solução na qual a superfície fica carregada positivamente, fator este que favorece a adsorção do corante em toda a faixa estudada. Deste modo, verifica-se que a CO apresenta potencial para uso como adsorvente no tratamento do corante têxtil Turquesa Reativo Q-G 125 em meio aquoso, contribuindo para assim com a prática sustentável, uma vez que está sendo utilizado um resíduo para tratar outro.



PALAVRAS-CHAVE: adsorvente; casca de ovo; resíduo agroindustrial; ativação química; ativação física

INTRODUÇÃO

A indústria têxtil brasileira é um setor de alta importância para a sociedade, com atuação de quase 200 anos. Entretanto, cada indústria utiliza etapas e matérias primas distintas, o que gera diferentes tipos de efluentes ^[1]. Normalmente o que é comum entre estes efluentes é a presença de corantes (naturais e sintéticos) ^[2].

Quando os efluentes contendo corantes não são tratados de forma adequada e são descartados em corpo receptor, devido a sua baixa biodegradação, podem se acumular no meio ambiente promovendo impactos negativos à flora e fauna aquática. Além disso, possuem efeitos tóxicos nos organismos vivos ^[3].

Com base no exposto, é notória a necessidade de remoção dos corantes dos efluentes têxteis antes do seu descarte em corpo receptor, para minimização dos problemas supracitados ^[4]. Dentre os processos a adsorção utilizando biomassas residuais como precursores para adsorventes, mostra-se como alternativa devido a ser simples quando comparado aos outros processos e sustentável ^[5].

Os resíduos provenientes da transformação de matérias-primas agropecuárias são denominados resíduos agroindustriais. Apesar de parte desses resíduos já serem utilizados como fertilizantes orgânicos ou na alimentação de seres vivos, uma parcela significativa não tem uma destinação adequada ^[6,7]. Diante disso, pesquisadores têm buscado formas sustentáveis de reaproveitar esses materiais, como é o caso da utilização como precursores no preparo de adsorventes como o carvão ativado.

Os carvões ativados produzidos a partir de resíduos agroindustriais apresentam propriedades singulares, como alta porosidade e presença de grupos funcionais em sua superfície que possibilitam a aplicação do material adsorvente na remoção de diferentes contaminantes, incluindo corantes ^[8]. Dentre os resíduos agroindustriais utilizados como precursores na preparação de adsorvente para remoção de corantes, destacam-se a casca de amendoim ^[9], madeira de poda ^[10] e resíduos de pinha ^[11]. Uma alternativa seria a utilização de casca de ovo como adsorvente.

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), foram produzidos 4,2 bilhões de dúzias de ovos no ano de 2023 no Brasil ^[12]. Tendo em vista que a casca de ovo representa cerca de 10% do constituinte do ovo e que em sua maioria são descartadas, a casca do ovo trata-se de um resíduo abundante. Este resíduo é composto em sua maior parte de carbonato de cálcio, que representa cerca de 90% da matéria sólida ^[13]. Apesar da casca de ovo se tratar de um resíduo de grande potencial, uma vez que pode ser utilizado na agricultura, na correção de pH do solo e na alimentação de animais, apresenta uma produção abundante, o que provoca o descarte inadequado no meio ambiente ^[14]. Desta forma, o uso das cascas de ovo como adsorvente evitaria a sua disposição em aterros sanitários, bem como a redução da poluição ambiental ^[15,16]. Portanto, é imperativo abordar de maneira apropriada a gestão desse subproduto, a fim de mitigar os impactos adversos no meio ambiente ^[17].

OBJETIVO

Este trabalho teve como objetivo preparar adsorventes por meio de modificações físicas e/ou químicas, sendo eles: cascas de ovo de galinha calcinadas (CO), cascas de amendoim carbonizadas (AC) e ativadas quimicamente (AA), carvão de madeira de poda de umbauíba (CUM) e eucalipto (CEu) e carvão ativado quimicamente de madeira de poda de umbauíba (AUM) e eucalipto (AEu). Em seguida, realizar um teste preliminar para selecionar o adsorvente com maior capacidade adsorptiva e percentual de remoção do corante têxtil aniônico Turquesa Reativo Q-G 125 em meio aquoso. Por fim, caracterizar o adsorvente selecionado e seu precursor. Desta forma, pretende-se agregar valor a um resíduo que será aplicado para tratar outro resíduo.

MATERIAIS E MÉTODOS

Preparação dos adsorventes: os resíduos casca de amendoim e casca de ovo foram lavados em água corrente, secos a 105°C em uma estufa (Marca: Splabor) por 6 h, triturados em moinhos de facas (Marca: CIENLAB), lavados com água destilada e secos em estufa a 60°C por 6 h. Esses materiais foram denominados de *CA_{in}* e *CO_{in}*, respectivamente. Para produção de *CO*, frações de *CO_{in}* foram calcinados em atmosfera com oxigênio limitado, em mufla (Marca: Quimis), com rampa de aquecimento de 10°C/min, permanecendo a 800°C por 2 h.

Na preparação de *AC*, porções de *CA_{in}* foram carbonizadas, em mufla, em rampa de aquecimento de 10°C·min⁻¹, permanecendo a 100°C por 30 min, 200°C por 1 h e 350°C por 1 h. Os *CUM* e *CEU* foram cedidos pela empresa Elephant Indústria Química Eireli, onde a madeira de poda foi carbonizada em fornos elétricos a 500°C por 4 h.

A ativação química dos carvões *CA_{in}*, *CUM* e *CEU* foi realizada utilizando o H₃PO₄ (85%, Marca: Vetec), adicionado na proporção de 5:3 (m/V). A carbonização foi realizada conforme procedimento de *AC*. Em seguida, foi lavado com solução de NaHCO₃ 1% (Marca: FMaia) por imersão, para neutralização do ácido residual. Em seguida, foi lavado com água destilada e seco em estufa à 105°C por 24 h. Todos os adsorventes preparados foram classificados em uma série de peneiras de Tyler com granulometria inferior a 0,09 mm.

Seleção do adsorvente: para seleção do adsorvente, foram realizados ensaios independentes, em triplicata, sob agitação de 100 rpm em mesa agitadora (Marca: IKA KS130 control), utilizando 0,05 g dos adsorventes em 25 mL de solução sob concentração de 50 mg·L⁻¹, por 2 h no pH natural da solução do corante (6,0) a 25 ± 2°C. Em seguida, as amostras foram filtradas em papel de filtro de faixa azul (Marca: UNFIL) e o corante quantificado em curvas analíticas construídas no espectrofotômetro de ultravioleta/visível (UV/Vis) (Marca: TermoScientific, Modelo: Genesys 10S UV-Vis), nos comprimentos 337 e 625nm, validadas conforme Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) (INMETRO, 2020).

O adsorvente foi selecionado com base nos valores do percentual de remoção (%R) e da capacidade adsorptiva (*q*), obtidos por meio das Equações 1 e 2, respectivamente.

$$\%R = \frac{C_0 - C_f}{C_0} \times 100 \quad \text{Equação 1}$$

$$q = \frac{(C_0 - C_f) \times V}{m} \times 100 \quad \text{Equação 2}$$

sendo: *C*₀ e *C*_f (mg·L⁻¹) as concentrações inicial e final do corante na solução, respectivamente; *V* (L) o volume da solução; *m* (g) a massa de adsorvente.

Caracterização do adsorvente: O adsorvente selecionado e seu precursor foram caracterizados pelas técnicas: adsorção/dessorção de nitrogênio, espectrometria na região do infravermelho por transformada de Fourier (FT-IR) e pH do ponto de carga zero (pH_{pcz}).

Visando obter informações acerca da área superficial, diâmetro médio e volume dos poros do adsorvente, foi realizada a técnica de adsorção/dessorção de nitrogênio, utilizando um equipamento Quantachrome, modelo NOVA-2000 a 120°C, sob vácuo, por 6 h. A área superficial específica foi obtida na faixa de pressão relativa (*P/P*₀) entre 0 e 0,3 por meio do método Brunauer, Emmett, Teller (BET). O diâmetro médio e o volume dos poros foram obtidos pelo método Banet, Joyner e Halenda (BJH).

A espectrometria na região do infravermelho por transformada de Fourier foi utilizada no intuito de identificar os grupos funcionais presentes na superfície do adsorvente, a partir da técnica de Refletância Total Atenuada (ATR) em um espectrômetro da marca Perkin Elmer (Spectrum 400). A faixa do infravermelho estudada foi entre 4000 e 500 cm⁻¹ e uma resolução de 4 cm⁻¹. Os dados obtidos foram tratados utilizando o software Origin (Versão 8.5).

Os ensaios para obtenção do pH do ponto de carga zero foram realizados utilizando 0,05 g do adsorvente em 25 mL de água destilada em pH 2 a 13, sob agitação de 300 rpm na mesa agitadora (IKA KS130 control) por 24 h

a temperatura de $25 \pm 1^\circ\text{C}$. Logo após, o pH das soluções foi medido novamente e em seguida, com os dados obtidos, foi plotado o gráfico $\text{pH}_{\text{final}} - \text{pH}_{\text{inicial}}$ versus $\text{pH}_{\text{inicial}}$. O pH do ponto de carga zero (pH_{pcz}) é o valor onde a curva intercepta o eixo das abscissas. Para o ajuste do pH das soluções, com o auxílio de um pHmetro (Quimis, Q488AS), foram utilizadas soluções de NaOH ($0,1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) e HCl ($0,1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) e um pHmetro.

RESULTADOS

Os espectros das varreduras espectrais realizadas, visando à identificação dos comprimentos de onda característicos do corante e se haveria deslocamento destes em diferentes valores de pH da solução, estão apresentados na Figura 1.

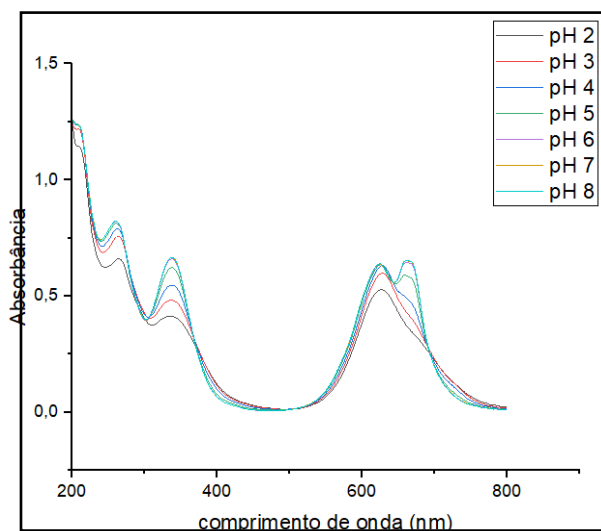


Figura 1: Varredura espectral do corante Turquesa Reativo Q-G 125 em diferentes pH

De forma a verificar se o método utilizado apresenta resultados confiáveis, foi construída curva analítica para quantificação do corante Turquesa Reativo Q-G 125 e avaliados diferentes parâmetros, entre eles: coeficiente de correlação (r), limite de detecção (LD), limite de quantificação (LQ) e coeficiente de variação (CV%). Os resultados obtidos estão dispostos na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros das curvas analíticas para quantificação do corante.

PARÂMETROS	COMPRIMENTOS DE ONDA (λ)	
	337 nm	625 nm
r	0,9998	0,9999
LD ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	0,001	0,001
LQ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	0,003	0,004
CV%	2,8	4,7

Após o preparo dos adsorventes, foram realizados ensaios para selecionar aquele que apresentasse maior capacidade adsorptiva (q) e percentual de remoção (% R) na adsorção do corante Turquesa Reativo Q-G 125. Os resultados estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Resultados para os ensaios da seleção do adsorvente. Condições: $C_0 = 50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; $\text{pH} = 6$; $V.A = 100 \text{ rpm}$; $T = 28 \pm 1^\circ\text{C}$ e $t = 2 \text{ h}$.

ADSORVENTE	$\lambda = 337 \text{ nm}$		$\lambda = 625 \text{ nm}$	
	$q \text{ (mg}\cdot\text{g}^{-1})$	%R	$q \text{ (mg}\cdot\text{g}^{-1})$	%R
Carvão de umbaúba	$11,2 \pm 0,2$	22,4	$12,4 \pm 0,3$	25,3
Carvão ativado de umbaúba	8 ± 3	16,3	10 ± 3	21,3
Casca de ovo calcinada	41 ± 3	81,5	42 ± 3	86,3
Carvão de eucalipto	$8,6 \pm 0,8$	17,1	$9,7 \pm 0,9$	19,7
Carvão ativado de eucalipto	$20,6 \pm 0,9$	41,2	$20,6 \pm 0,9$	41,9
Carvão de amendoim	$21,6 \pm 0,6$	42,9	$22,7 \pm 0,6$	46,1
Carvão ativado de amendoim	$16,8 \pm 0,6$	33,6	$16,8 \pm 0,7$	34,2

Como pode ser constatado na Tabela 2, a casca de ovo calcinada (CO) se mostrou mais eficiente na remoção do contaminante estudado de solução aquosa. A partir disto, foram realizadas as caracterizações de CO e de seu precursor, *COin*. As isotermas de adsorção e dessorção de nitrogênio estão apresentadas na Figura 2.

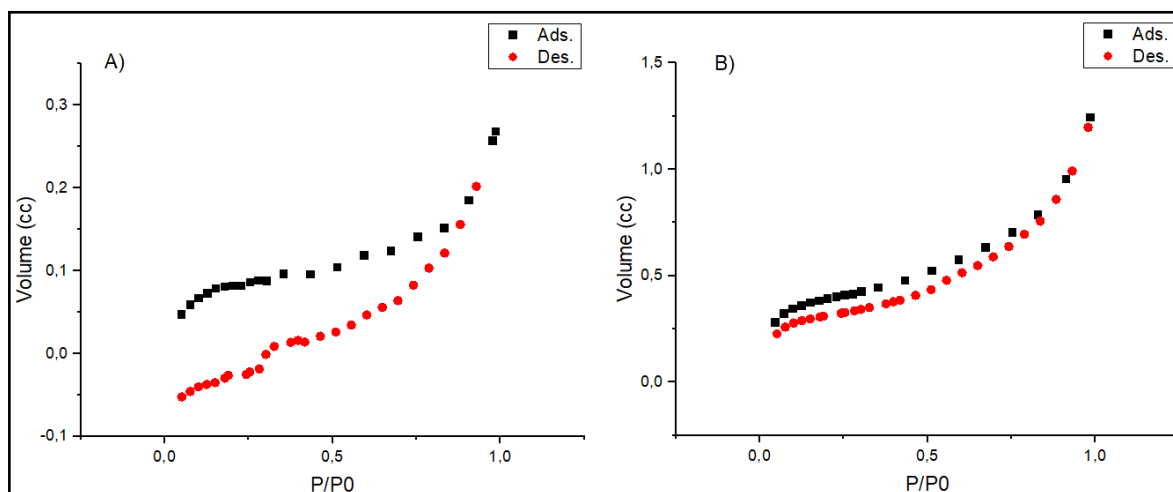


Figura 2: Isoterma de adsorção/dessorção de N_2 para a casca de ovo *in natura* (A) e calcinada (B)

A partir do método de BET e BJH, foi determinada a área superficial, diâmetro médio do poro e volume do poro da casca de ovo *in natura* e calcinada. Os valores obtidos encontram-se expostos na Tabela 3.

Tabela 3: Valores da área superficial específica, diâmetro médio e volume dos poros do CO e seu precursor.

PARÂMETROS	<i>COin</i>	CO
Área superficial ($\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$)	0,3	3,8
Diâmetro médio do poro (nm)	0,001	0,006
Volume dos poros ($\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$)	4,7	6,8

A fim de identificar os grupos funcionais presentes na superfície do adsorvente, foi utilizada a técnica de espectrofotometria na região do infravermelho por transformada de Fourier. Os espectros de FT-IR estão apresentados na Figura 3.

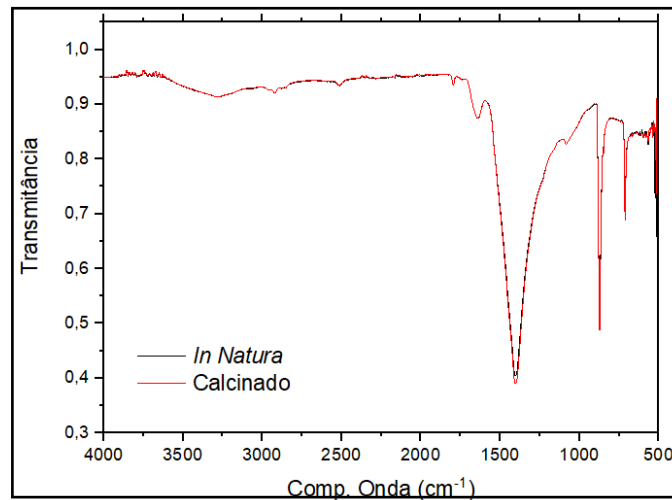


Figura 3: Espectro FT-IR da casca de ovo *in natura* e calcinada

A partir dos espectros de FT-IR foi possível identificar a presença dos grupos funcionais OH, -C=O, -C-OH, -C-O- e SiO-H em ambos os adsorventes. Por fim, foi avaliado o pH de ponto de carga zero (pH_{pcz}) de C, no intuito de identificar o pH cuja carga superficial do adsorvente é nula, sendo ela igual a 12,7, como mostra a Figura 4.

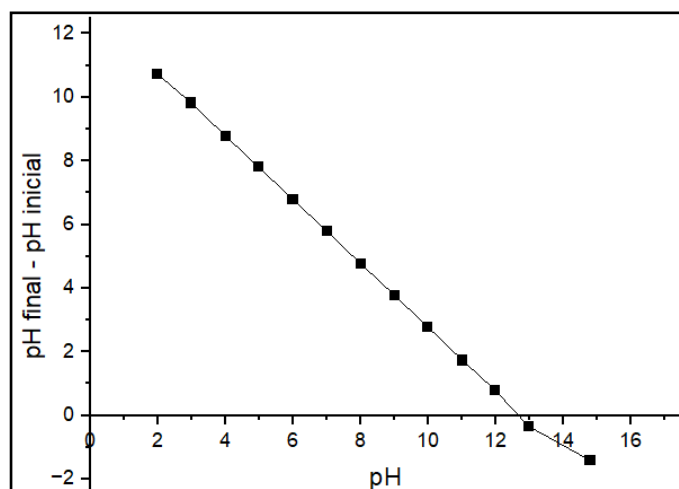


Figura 4: pH do ponto de carga zero (pH_{pcz}) para casca de ovo calcinada a 800°C.

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Como pode ser observado na Figura 1, não houve um deslocamento dos comprimentos de onda característicos do corante (337 e 625 nm) ao variar o pH da solução, sendo observado apenas um aumento na intensidade desses picos à medida que o pH da solução aumentava. Desta forma, foi possível construir a curva analítica no pH 6, natural da solução.

Conforme apresentado na Tabela 1, os resultados obtidos indicam que as curvas apresentam boa precisão confiabilidade para quantificação do corante Turquesa Reativo Q-G 125, de acordo com INMETRO (2020) ^[18].



Desta forma, as curvas foram utilizadas para quantificação do corante antes e após cada ensaio de seleção do adsorvente.

Com base nos resultados obtidos no teste preliminar, apresentados na Tabela 2, todos os materiais preparados apresentaram capacidade de adsorver o corante Turquesa Reativo Q-G 125 do meio aquoso. No entanto, a casca de ovo calcinada (CO) se destacou, apresentando maiores valores de capacidade adsorvativa e percentual de remoção.

Pela caracterização através das isotermas de adsorção/dessorção de nitrogênio de CO e seu precursor, apresentados na Figura 2, pode-se observar que tanto CO quanto CO_{in} apresentam isoterma do tipo III, de acordo com a IUPAC [19]. A presença desse tipo de isoterma ocorre quando as interações adsorvato-adsorvato são mais intensas do que as interações adsorvato-adsorvente. Também foi possível notar que ambos os materiais apresentaram o fenômeno de histerese que está relacionado à condensação capilar nos mesoporos [20].

Além disso, as alças de histerese não se fecharam, mesmo em pressões relativamente baixas. Este fato se deve à inflexibilidade do material, indicando que o aumento da pressão resulta em sua deformação, o que leva à retenção do nitrogênio, impedindo sua liberação em condições de baixa pressão [21].

Com base na Tabela 3 foi observado que após a calcinação da casca de ovo houve um aumento na área superficial de 0,3 a 3,8 m²·g⁻¹, no diâmetro médio dos poros de 0,001 a 0,006 nm, e no volume dos poros de 4,7 a 6,8, o que favorece a adsorção.

A análise dos espectros de FT-IR, mostrados na Figura 3, não revelou diferença significativa entre CO_{in} e CO. Ambos os espectros apresentaram uma banda entre 2800 e 3200 cm⁻¹, indicando a presença de grupos -OH livres, possivelmente devido à presença de água. O pico nas proximidades de 1630 cm⁻¹ corresponde à existência dos grupos -C=O e -C-OH. A banda na faixa de 1250–1550 cm⁻¹, juntamente com os picos em 1112, 750 e 688 cm⁻¹ correspondem aos modos vibracionais assimétricos de C-O para CaCO₃. O pico em 706 cm⁻¹ está relacionado à vibração SiO-H para a casca de ovo [22,23,24].

Por fim, de acordo com o valor do pH_{pcz} igual a 12,7 para a casca de ovo calcinada (CO), apresentado na Figura 4, constata-se que a superfície do material apresenta uma predominância de carga positiva em praticamente toda a faixa de pH avaliada, exceto para valores iguais ou superiores ao pH_{pcz}. Deste modo, a CO apresenta maior afinidade com compostos aniônicos, ou seja, substâncias com cargas negativas são adsorvidos com maior facilidade, como é o caso do corante Turquesa Reativo Q-G 125.

CONCLUSÃO

Entre os sete adsorventes preparados, a casca de ovo calcinada a 800°C foi a que apresentou maior capacidade adsorvativa e percentual de remoção. Foi observado um aumento da área superficial, volume e diâmetro do poro após calcinação, características que favorecem o processo adsorvativo. No entanto, não foram identificadas diferenças significativas nos espectros de FT-IR do material calcinado e *in natura*. De acordo com o valor obtido para o pH_{pcz}, CO possui uma ampla faixa de pH da solução com a superfície carregada positivamente, o que favoreceu a adsorção do corante, que é aniônico.

Portanto, pode-se concluir que CO tem potencial para ser utilizada como adsorvente no tratamento do corante têxtil Turquesa Reativo Q-G 125 em meio aquoso. Além disso, o uso de um adsorvente preparado a partir de resíduos agroindustrial possibilita a sua reintegração na cadeia produtiva.

Para trabalhos futuros, recomenda-se estudar as condições operacionais, tais como: pH inicial da solução do corante, relação massa do adsorvente/volume de solução e velocidade de agitação, no intuito de obter um maior desempenho no processo adsorvativo. Bem como, avaliar a evolução cinética e o equilíbrio de adsorção.



AGRADECIMENTOS

O trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), da Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de PE (FACEPE), do Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Núcleo de Química Analítica Avançada de Pernambuco - NUQAAPE (FACEPE, processo APQ-0346-1.06/14) e FADE/UFPE.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- RAMOS, M.; LIMA, J.; AQUINO, S.; AGUIAR, A. A critical analysis of the alternative treatments applied to effluents from Brazilian textile industries. *Journal of Water Process Engineering*, v. 43, p. 102273, 2021.
- SLAMA, H.; BOUKET, A.; POURHASSAN, Z.; ALENEZI, F.; SILINI, A.; SILINI, H.; OSZAKO, TOMASZ.; LUPTAKOVA, L.; GOLINSKA, P.; BELBAHRI, L. Diversity of Synthetic Dyes from Textile Industries, Discharge Impacts and Treatment Methods. *Applied Sciences*, v. 11, p. 1. 2021.
- CASTRILLÓN, L.; CARMONA, M.; LÓPEZ, C.; LÓPEZ, F.; URIBE, B.; ROCA, J. Treatment of water from the textile industry contaminated with indigo dye: A hybrid approach combining bioremediation and nanofiltration for sustainable reuse. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, v. 8, p. 100498, 2023.
- ALEEM, M.; CAO, J.; LI, C.; RASHID, H.; WU, Y.; NAWAZ, M.; ABBAS, M.; AKARAM, M. Coagulation- and Adsorption-Based Environmental Impact Assessment and Textile Effluent Treatment. *Water, Air, & Soil Pollution*, v. 231, p. 1, 2020.
- RASHID, R.; SHAFIQ, I.; AKHTER, P.; IQBAL, M.; HUSSAIN, M. A state-of-the-art review on wastewater treatment techniques: the effectiveness of adsorption method. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 28, p. 9050-9066, 2021.
- MARRA, F.; MAFFIA, A.; CANINO, F.; GRECO, C.; MALLAMACI, C.; ADELE, M. Effects of fertilizer produced from agro-industrial wastes on the quality of two different soils. *Archives of Agronomy and Soil Science*, v.69, p.3600-3618, 2023.
- LOUIS, A.C.F.; VENKATACHALAM, S. Energy eficiente process for valorization of corn cob as a source for nanocrystalline cellulose and hemicellulose production. *International Journal of Biological Macromolecules*, v.163, p.260-269, 2020.
- HUSIEN, S.; EL-TAWEEL, R.M.; SALIM, A.I.; FAHIM, I.S.; SAID, L.A.; RADWAN, A.G. Review of activated carbon adsorbent material for textile dyes removal: Preparation, and modelling. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, v. 5, p. 100-325, 2022.
- AJAB, H.; NAYAB, D.; MANNAN, A.; WASEEM, A.; JAFRY, A.T.; YAQUB, A. Comparative analysis of the equilibrium, kinetics, and characterization of the mechanism of rapid adsorption of Congo red on nano-biosorbents based on agricultural waste in industrial effluents. *Journal of Environmental Management*, v.358, 120863, 2024.
- CÁRDENAS-AGUIAR, E.; GASCÓ, G; LADO, M.; MÉNDEZ, A.; PAZ-FERREIRO, J.; PAZ-GONZÁLEZ, A. New insights into the production, characterization and potential uses of vineyard pruning waste biochars. *Waste Management*, v.171, p.452-462,2023.
- MAHAJAN, P.; JASPAL, D.; MALVIYA, A. Adsorption of dyes using custard apple and wood apple waste: A review. *Journal of the Indian Chemical Society*, v. 100, 100948, 2023.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). POG – Produção de Ovos de Galinha. 2024. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9216>>. Acesso em: 03 jun.2024.
- URJINTSEREN, P.; BYAMBAA, J. Determination of egg shell structure and mineral composition using *SEM-EDS* and identification the possibility to produce fertilizer. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, v.12, 2024.
- SALDANHA, R.B.; DA ROCHA, C.G.; CAICEDO, A.M.L.; CONSOLI, N.C. Technical and environmental performance of eggshell lime for soil stabilization. *Construction and Buildings Materials*, v.298, 123648, 2021.



15. LACA, A.; LACA, A.; DÍAZ, M. Eggshell waste as catalyst: a review. *Journal of Environmental Management*, v.197, p.351-359, 2017.
16. GOLI, J.; SAHU, O. Development of heterogeneous alkali catalyst from waste chicken eggshell for biodiesel production. *Renewable Energy*, v.128, p.142-154, 2018.
17. WAHEED, M.; YOUSAF, M.; SHEHZAD, A.; RAHEEM, M.; KHAN, M.; KHAN, M.; AHMAD, N.; ABDULLAH.; AADIL, R. Channelling eggshell waste to valuable and utilizable products: A comprehensive review. *Trends in Food Science & Technology*, v. 106, p. 78-90, 2020.
18. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO). Orientação sobre validação de métodos analíticos: documento de carácter orientativo. DOQ-CGCRE-008 Revisão 09. p. 7-19, 2020.
19. THOMMES, M.; KANEKO, K.; NEIMARK, A.V.; OLIVIER, J.P.; RODRIGUEZ-REINOSO, F.; ROUQUEROL, J.; SING, K.S.W. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, v. 87, p. 1051–1069, 2015.
20. RASHIDI, N. A.; YUSUP, S. Potential of palm kernel shell as activated carbon precursors through single stage activation technique for carbon dioxide adsorption. *Journal of Cleaner Production*, v. 168, p. 474–486, 2017.
21. LINGLING, Q.; XU, T.; ZHAOFENG, W.; XINSHAN, P. Pore characterization of different types of coal from coal and gas outburst disaster sites using low temperature nitrogen adsorption approach. *International Journal of Mining Science and Technology*, v. 27, n. 2, p. 371–377, 2017.
22. ELETTA, O.; AJAYI, O.; OGUNLEYE, O.O.; AKPAN, I.C. Adsorption of cyanide from aqueous solution using calcinated eggshells: equilibrium and optimisation studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v.4, p.1367-1375, 2016.
23. ELKADY, M.F.; IBRAHIM, A.M.; EL-LATIF, M.M.A. Assessment of the adsorption kinetics, equilibrium and thermodynamic for the potential removal of reactive red dye using eggshell biocomposite beads. *Desalination*, v.278, p.412-423, 2011.
24. WITON, T. Characterization of calcium oxide derived from waste eggshell and its application as CO₂ sorbent. *Ceramics International*, v.37, p.3291-3298, 2011.