

AEROGÉIS SUSTENTÁVEIS À BASE DE CELULOSE, TANINO E FUMO: MORFOLOGIA E DESEMPENHO NA ADSORÇÃO DE Cu^{2+}

PATRICIA OLIVEIRA SCHMITT¹; LINCOLN AUDREW CORDEIRO²; CAMILA MONTEIRO CHOLANT³; AMANDA MARCELY REIS⁴ ANDRÉ LUIZ MISSIO⁵

¹Universidade Federal de Pelotas – patricia.olimitt@gmail.com

²Universidade Federal de Pelotas – lincolnaudrewcordeiro.lac@gmail.com

³Universidade Federal de Pelotas – camila.scholant@gmail.com

⁴Universidade Federal de Pelotas – amandamarcelereis0707@gmail.com

⁵Universidade Federal de Pelotas – andre.missio@ufpel.edu.br

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a busca por alternativas sustentáveis tem ganhado destaque frente à necessidade de desenvolver materiais de alto desempenho a partir de recursos renováveis e de baixo impacto ambiental. Entre esses materiais, os aerogéis têm despertado grande interesse científico e tecnológico devido às suas propriedades únicas, como elevada porosidade, baixa densidade, grande área superficial e capacidade de funcionalização, características que permitem sua aplicação em diferentes áreas, incluindo remediação ambiental, embalagens biodegradáveis, catálise e sistemas de liberação controlada (Ganesamoorthy et al., 2021). No campo da descontaminação de águas residuais, a utilização de aerogéis como adsorventes apresenta-se como uma estratégia promissora para a remoção de íons metálicos tóxicos, como por exemplo o cobre (Cu^{2+}), cuja presença em concentrações elevadas pode causar sérios riscos ambientais e à saúde humana (Ihsanullah et al., 2022).

A celulose, obtida de fontes lignocelulósicas, destaca-se como matriz estrutural para a formação de aerogéis devido à sua biodegradabilidade, elevada razão superfície-volume e capacidade de formar redes tridimensionais estáveis (Khalil et al, 2020). Associada a ela, o tanino, um polímero natural abundante em grupos fenólicos, oferece forte afinidade química por íons metálicos, ampliando os mecanismos de adsorção (Kavitha & Kandasubramanian, 2020). Já o fumo, um material carbonáceo derivado de biomassa, agrega caráter funcional e potencial de modificação química, além de representar uma alternativa de baixo custo que contribui para a valorização de resíduos (Gonçalves et al., 2023). A integração desses componentes em aerogéis híbridos abre espaço para o desenvolvimento de materiais multifuncionais, capazes de combinar propriedades estruturais e químicas em prol da eficiência na captura seletiva de poluentes metálicos.

Nesse contexto, a produção de aerogéis sustentáveis à base de celulose, tanino e fumo configura uma estratégia inovadora e alinhada aos princípios da economia circular. Além de valorizar matérias-primas de origem natural e resíduos lignocelulósicos, essa abordagem busca gerar soluções ambientalmente responsáveis para desafios atuais relacionados ao tratamento de efluentes. Assim, o presente estudo tem como foco a preparação e caracterização morfológica desses aerogéis, bem como a avaliação de seu desempenho na adsorção de íons de cobre (Cu^{2+}), contribuindo para o avanço no desenvolvimento de materiais sustentáveis e eficientes em processos de remediação ambiental.

2. METODOLOGIA

2.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Foram empregados: polpa branqueada de celulose e folhas de fumo (UFPel), tanino em pó proveniente da casca de *Acacia mearnsii* (TANAC S.A.), e alginato de sódio P.A. (Dinâmica Química Contemporânea).

2.2 PRODUÇÃO DOS AEROGÉIS

As suspensões de celulose (2%), celulose com tanino (3%) e fumo (4%) foram processadas em moinho de ultra processamento (1750 rpm, 20 passes) e misturadas a alginato de sódio (2,2% p/v). Após a agitação, as soluções produzidas foram de aerogéis de celulose, celulose com tanino e fumo, depois moldadas em formas de silicone (2 cm³), congeladas e liofilizadas por 72 h. Os aerogéis obtidos foram caracterizados por microscopia óptica (40×) e avaliados quanto à adsorção de cobre em solução de CuCl₂ (5 g/L), com quantificação do residual por espectroscopia UV-Vis.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ANÁLISE MORFOLÓGICA

A morfologia superficial dos aerogéis A1, A2, A3, A4 e A5 foi analisada por imagens macroscópicas representativas das amostras (Figura 1). As imagens microscópicas (a,b,c) revelam diferenças significativas na estrutura interna dos aerogéis, atribuídas à composição dos materiais utilizados e suas interações durante o processo de gelificação e secagem (Figura 1).

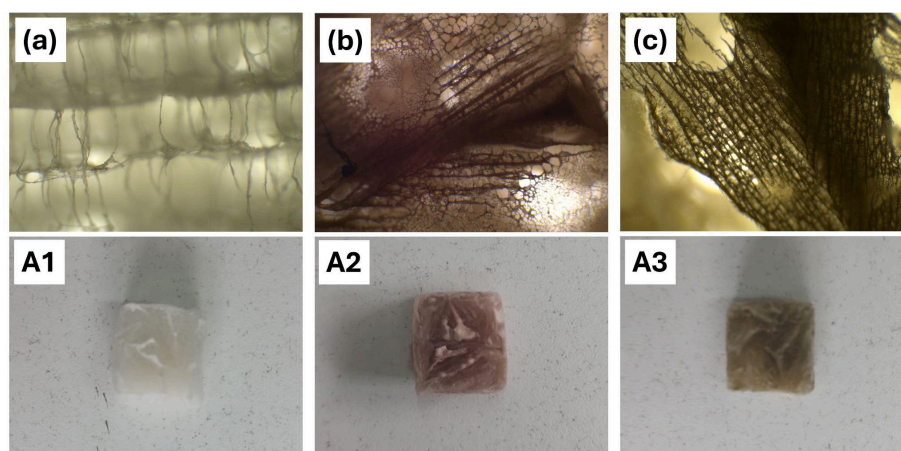


Figura 1- Morfologia de diferentes formulações de aerogéis, onde representa: a) A1; b) A2; c) A3; d) A4; e) A5

A amostra de celulose (A1) apresentou uma morfologia com estrutura porosa bem distribuída, paredes finas e orientação ordenada, típica de materiais ricos em celulose com poucos componentes interferentes. Na amostra celulose + tanino (A2), observa-se uma estrutura mais compacta e com regiões mais escuras na microscopia, indicando maior densidade e possíveis interações entre os grupos fenólicos do tanino e as fibras de celulose. Por fim, a amostra de fumo (A3) apresentou uma rede mais entrelaçada e densa, um aspecto superficial mais rugoso, com textura visualmente complexa. Essa morfologia é compatível com a heterogeneidade da biomassa utilizada, composta por diversos constituintes lignocelulósicos.

3.2 CAPACIDADE DE ADSORÇÃO DE Cu^{2+}

A eficiência na remoção do metal pesado das soluções de nitrato de cobre II foi diretamente influenciada pela composição dos aerogéis (Figura 2).

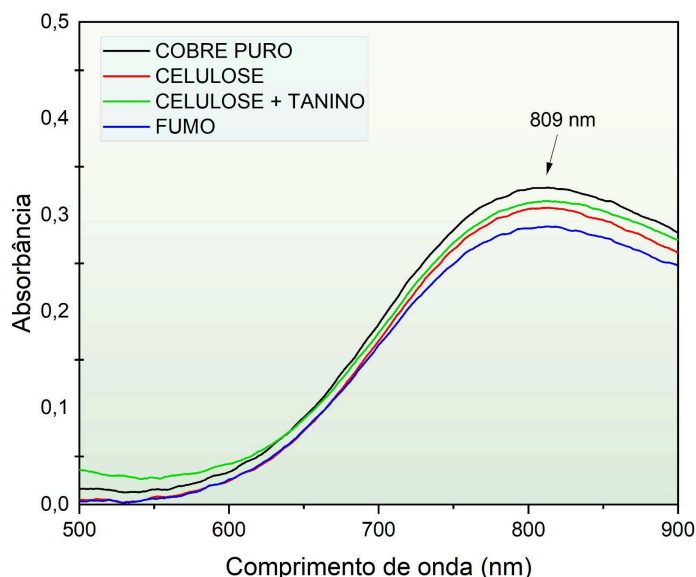


Figura 2 - Bandas no espectro UV-visível após adsorção de aerogéis

A solução controle, sem aerogel, apresentou uma absorbância máxima de 0,353 na região de ~800 nm, característica dos íons Cu^{2+} em solução, validando a estabilidade do método espectrofotométrico aplicado. Após o contato com os aerogéis, observou-se uma redução na intensidade de absorbância, indicando remoção parcial do cobre.

O espectro do aerogel de fumo apresentou a menor absorbância entre as amostras, seguido pelo aerogel de celulose pura. O aerogel de celulose com tanino apresentou a maior absorbância residual entre os adsorventes testados, sugerindo menor capacidade de remoção de Cu^{2+} . Esses resultados evidenciam que a composição da matriz influencia diretamente na resposta espectral dos efluentes tratados.

Esses resultados sugerem que a composição da matriz adsorvente influencia diretamente na eficiência de remoção de Cu^{2+} , sendo que a

incorporação do uso de fumo contribuiu para maior redução da concentração residual do metal, podendo ser usando para purificação em água (Yong et al., 2020). Por outro lado, a celulose com tanino isolada demonstrou menor capacidade de adsorção.

4. CONCLUSÕES

Nesse sentido, os resultados obtidos neste trabalho evidenciaram que a formulação de aerogéis a partir de celulose, tanino e fumo resultou em materiais com morfologia e capacidade de interação com íons metálicos em solução. O aerogel de fumo, além de oferecer estrutura superficial mais densa e complexa, também foi o que apresentou maior eficiência de adsorção. A amostra de celulose pura resultou em material mais poroso e homogêneo, sendo atribuído ao desempenho intermediário. Por sua vez, a incorporação de tanino à celulose conferiu coloração mais escura e foi a que apresentou maior compactação estrutural, mas com menores eficiências de remoção do cobre. Assim, esse trabalho pode contribuir para avanços na produção de materiais voltados à remediação de efluentes de forma mais sustentável, o que se adere às linhas da bioeconomia e da economia circular dos resíduos agroindustriais.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ganesamoorthy, R., Kumar, V., Kumar, R., Kushwaha, O., & Mamane, H. (2021). Aerogéis para tratamento de água: uma revisão. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129713>.
- Ihsanullah, I., Sajid, M., Khan, S., & Bilal, M. (2022). Adsorventes à base de aerogel como materiais emergentes para a remoção de metais pesados da água: Progresso, desafios e perspectivas. *Tecnologia de Separação e Purificação*. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.120923>.
- Khalil, H., Adnan, A., Yahya, E., Olaiya, N., Safrida, S., Hossain, M., Balakrishnan, V., Gopakumar, D., Abdullah, C., Oyekanmi, A., & Pasquini, D. (2020). Uma revisão sobre aerogéis à base de nanofibras de celulose vegetal para aplicações biomédicas. *Polímeros*, 12. <https://doi.org/10.3390/polym12081759>.
- Kavitha, V., & Kandasubramanian, B. (2020). Taninos para tratamento de águas residuais. *SN Applied Sciences*, 2, 1-21. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2879-9>.
- Gonçalves, A., Zimmermann, J., Schwantes, D., De Oliveira, V., Dudczak, F., Tarley, C., Prete, M., & Snak, A. (2023). Reciclagem de resíduos de tabaco no desenvolvimento de carvão ativado de ultra-alta área superficial. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.105965>.
- Yong, J., Wen, Y., Wang, Z., Zhang, S., & Guo, M. (2020). Fabricação ecológica de um aerogel econômico à base de nanofibras de celulose para aplicações multifuncionais na remoção de Cu(II) e poluentes orgânicos. *Journal of Cleaner Production*, 255, 120276. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120276>.