



REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS NO TRATAMENTO DE EFLUENTES

Victor R. Alves¹; Bianca F. Guimarães²; Gabrielly M. Santos²; Lucas G. Costa²; Alam G. Trovó^{2,*}

¹ Universidade Federal de Uberlândia, Instituto de Ciências Agrárias, 38.410-337, Uberlândia-MG

² Universidade Federal de Uberlândia, Instituto de Química, 38.400-902, Uberlândia-MG. *alamtrovo@ufu.br

Palavras-Chave: Adsorção, Economia circular, Manufatura aditiva.

Introdução

O aumento da atividade industrial e da urbanização tem intensificado a geração de rejeitos sólidos e de efluentes contendo elevada matéria orgânica, cor e contaminantes emergentes, o que torna indispensável o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis para o tratamento dessas correntes e para a recuperação de recursos (ESMAEELI et al., 2023). Nesse cenário, a economia circular tem se consolidado como uma estratégia para reduzir a geração e promover a valorização de resíduos por meio da sua reinserção em novos ciclos produtivos (KATHI et al., 2023).

Entre as alternativas propostas, o aproveitamento de sobras industriais como materiais adsorventes tem recebido crescente atenção devido ao baixo custo, à elevada disponibilidade e ao potencial de substituir adsorventes convencionais em processos de tratamento de água e efluentes. Estudos recentes demonstram que resíduos lignocelulósicos e minerais provenientes de processos de papel e celulose podem apresentar propriedades superficiais favoráveis à remoção de compostos orgânicos, corantes, metais e outros contaminantes presentes em matrizes aquosas (MERGBI et al., 2023; ESMAEELI et al., 2023).

A performance desses materiais depende diretamente de suas propriedades físico-químicas, como composição, morfologia, características superficiais e ponto de carga zero (PCZ), os quais influenciam os mecanismos de interação entre adsorvente e adsorbato. Dessa forma, a caracterização desses materiais constitui uma etapa essencial para a seleção de adsorventes alternativos e para o desenvolvimento de tecnologias de tratamento mais eficientes (KUMAR et al., 2021; MERGBI et al., 2023).

Neste contexto, o estudo apresentado aborda a realização de ensaios laboratoriais para determinar a remoção de carbono orgânico e de cor real utilizando resíduos do processo Kraft da indústria de papel e celulose, além da determinação do PCZ desses materiais. Os resultados reportados representam a etapa inicial de um projeto voltado ao desenvolvimento de cartuchos filtrantes produzidos por manufatura aditiva (impressão 3D), incorporando resíduos industriais como meio adsorvente.

Material e Métodos

Os possíveis adsorventes avaliados neste estudo consistiram em resíduos provenientes do processo Kraft da indústria de papel e celulose, denominados Grits (G), Lama de Cal (LC),



Dregs (D) e Cal Queimada (CQ). Esses materiais foram selecionados por serem abundantes e apresentarem elevada alcalinidade, predominância de compostos à base de cálcio e propriedades físico-químicas favoráveis à remoção de contaminantes em matrizes aquosas.

Inicialmente, os resíduos foram secos, homogeneizados e armazenados em recipientes herméticos, visando garantir a uniformidade das amostras e a reprodutibilidade dos ensaios. Em seguida, foi preparada uma solução aquosa de ácido húmico na concentração de $0,1 \text{ g L}^{-1}$, utilizada como efluente sintético para simular a presença de matéria orgânica dissolvida.

Os ensaios de adsorção foram conduzidos utilizando 20 mL da solução de ácido húmico ($0,1 \text{ g L}^{-1}$) na presença de 1 g L^{-1} de cada material adsorvente, sob agitação magnética de 400 rpm por 20 minutos. Após o tempo de equilíbrio, as amostras foram centrifugadas por 20 minutos para separação da fase sólida. O sobrenadante foi utilizado para a determinação do carbono orgânico remanescente pelo método volumétrico de oxirredução (dicromatometria) e da cor real por espectrofotometria UV-Vis, em comprimento de onda de 455 nm, permitindo avaliar a eficiência dos resíduos na remoção de matéria orgânica dissolvida e dos compostos responsáveis pela coloração da solução (KUMAR et al., 2021; ESMAEELI et al., 2023).

Também foi determinado o PCZ dos materiais adsorventes. Para isso, foi utilizado 20 mL de KCl ($0,1 \text{ mol L}^{-1}$) empregando soluções com pH inicial variando de 2 a 12 na presença de $0,1 \text{ g L}^{-1}$ de cada material adsorvente, usando o tempo de equilíbrio de 24 h. O PCZ foi obtido a partir da diferença entre os valores de pH inicial e final das suspensões, permitindo identificar a condição em que a superfície do adsorvente apresenta carga elétrica líquida nula. Esse parâmetro é amplamente utilizado para avaliar a interação eletrostática entre adsorventes e adsorbatos e para prever o comportamento dos materiais em diferentes condições de pH (MERGBI et al., 2023).

Resultados e Discussão

Os resíduos provenientes da indústria de celulose apresentaram comportamentos distintos quanto às suas propriedades físico-químicas, evidenciando potencial para aplicação como materiais adsorventes no tratamento de efluentes. A caracterização contemplou a determinação da remoção de cor real, da remoção de carbono orgânico pelos resíduos e do PCZ, parâmetros essenciais para compreender os mecanismos de adsorção, avaliar o desempenho dos materiais e subsidiar a seleção dos adsorventes mais promissores para aplicações futuras (MERGBI et al., 2023; ESMAEELI et al., 2023).

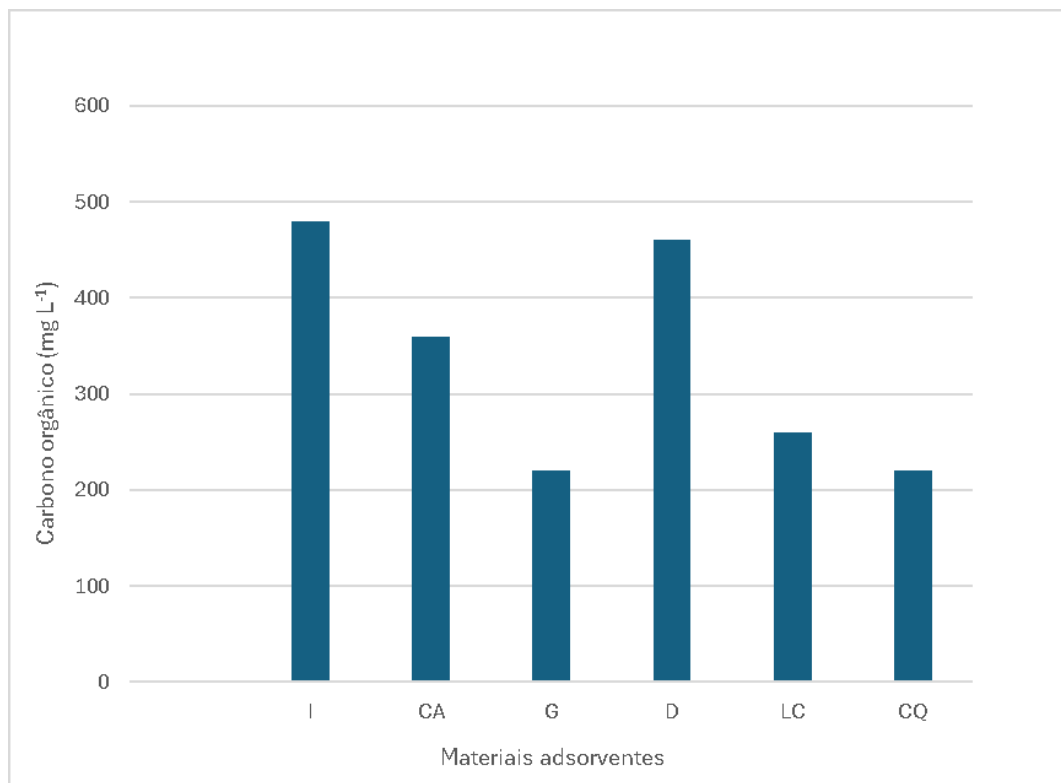


Figura 1. Influência dos materiais adsorventes na remoção de carbono orgânico. Condições iniciais: carbono orgânico= 480 mg L⁻¹; concentração dos materiais adsorventes= 1 g L⁻¹. I: Solução de ácido húmico (0,1 g L⁻¹) inicial. CA: Carvão ativado; G: Grits; D: Dregs; LC: Lama de Cal; CQ: Cal Queimada.

Conforme pode ser observado na Figura 1, com exceção do material adsorvente Dregs (D), os demais os materiais adsorventes apresentaram potencial para remoção de carbono orgânico da solução de referência utilizada de ácido húmico (I). As maiores eficiências de remoção foram obtidas para Grits (G) e Cal Queimada (CQ), ambos com aproximadamente 54% de remoção do carbono orgânico. A Lama de Cal (LC) apresentou eficiência intermediária (38%), seguida pela Cal (CA), com 25%, enquanto o material adsorvente D apresentou a menor eficiência (4%) nas condições experimentais avaliadas.

Esses resultados demonstram que a capacidade adsorptiva varia entre os resíduos do processo Kraft, refletindo diferenças em suas propriedades físico-químicas e indicando maior potencial de aplicação para G e CQ em processos de remoção de matéria orgânica. Entretanto, a eficiência de adsorção deve ser interpretada em conjunto com outros parâmetros, como cor real e PCZ, permitindo uma avaliação mais abrangente do desempenho dos materiais (MERGBI et al., 2023).

A redução do carbono orgânico está relacionada à interação entre os compostos orgânicos dissolvidos e a superfície dos adsorventes. Entretanto, a eficiência do processo não depende exclusivamente desse parâmetro, sendo influenciada também por características como área superficial, distribuição de poros, composição mineralógica, grupos funcionais e carga superficial dos materiais (MERGBI et al., 2023). Dessa forma, a avaliação do carbono orgânico deve ser interpretada em conjunto com os resultados de cor real e ponto de carga zero, permitindo uma caracterização mais abrangente do potencial adsorativo dos resíduos estudados.

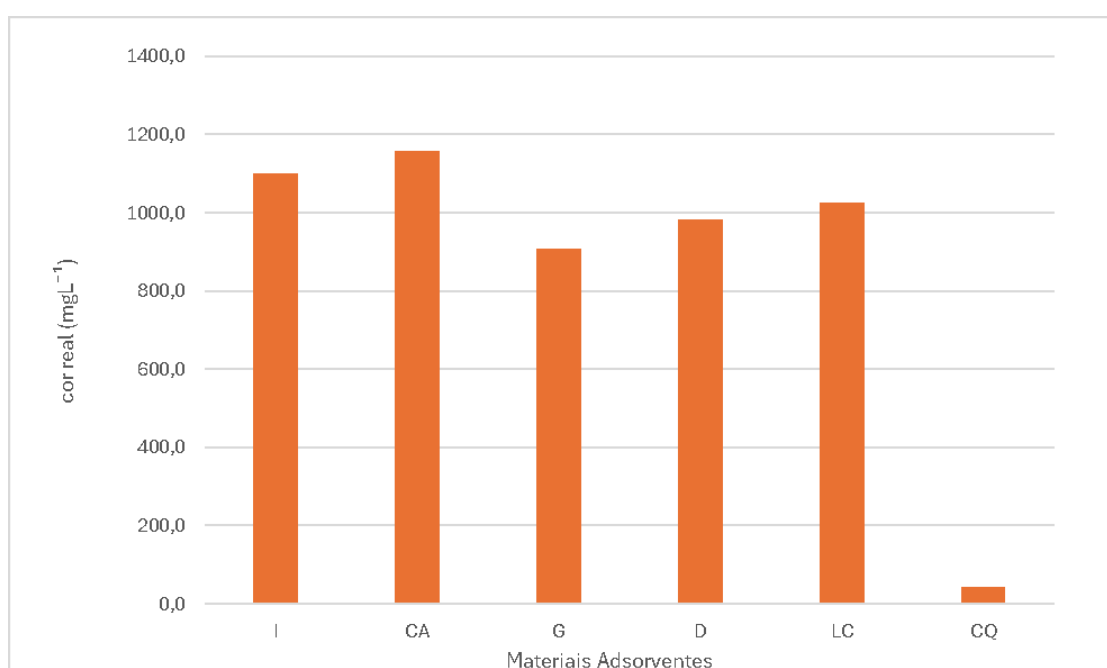


Figura 2. Gráfico de cor real removida pelos resíduos. Condições iniciais: Cor real= 1099 mg L⁻¹; concentração dos materiais adsorventes= 1 g L⁻¹. I: Solução de ácido húmico (0,1 g L⁻¹) inicial. CA: Carvão ativado; G: Grits; D: Dregs; LC: Lama de Cal; CQ: Cal Queimada.

A solução de referência (I) apresentou cor real de aproximadamente 1099 mg Pt-Co L⁻¹ antes da aplicação dos materiais adsorventes. Após o tratamento, observou-se redução da cor em diferentes intensidades, evidenciando a capacidade dos materiais em remover compostos responsáveis pela coloração da solução. A CQ apresentou o melhor desempenho, reduzindo a cor real para aproximadamente 42 mg Pt-Co L⁻¹, correspondendo a cerca de 96% de remoção. Os demais materiais apresentaram eficiências de remoção de cor entre 7% e 18%, indicando menor capacidade de remoção da matéria orgânica cromófora. Em contrapartida, a amostra de CA apresentou aumento de aproximadamente 5% na cor em relação ao controle (I), comportamento que pode ser atribuído à dissolução de compostos presentes no próprio resíduo durante o ensaio, elevando a concentração de substâncias responsáveis pela coloração da solução.

A remoção da cor está associada à adsorção de substâncias húmicas presentes na solução, sendo um importante indicador do desempenho de materiais adsorventes em processos de tratamento de água e efluentes (KUMAR et al., 2021; ESMAEELI et al., 2023). Tais resultados demonstram o elevado potencial do resíduo CQ como material adsorvente, o qual será utilizado em estudos posteriores. Entretanto, a eficiência da adsorção também depende das propriedades superficiais dos materiais e das condições do meio, especialmente do pH de operação. Nesse contexto, a determinação do PCZ torna-se fundamental para compreender a influência da carga superficial dos resíduos sobre os mecanismos de adsorção e explicar as diferenças de desempenho observadas entre os materiais avaliados.

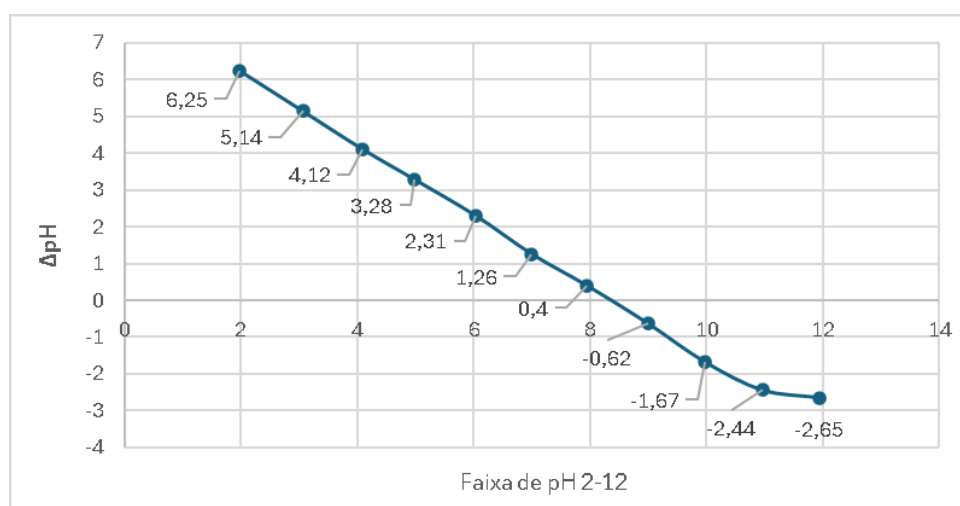


Figura 3. Ponto de carga zero (PCZ) da Lama de Cal (1 g L^{-1}) em 20 mL de KCl ($0,1 \text{ mol L}^{-1}$).

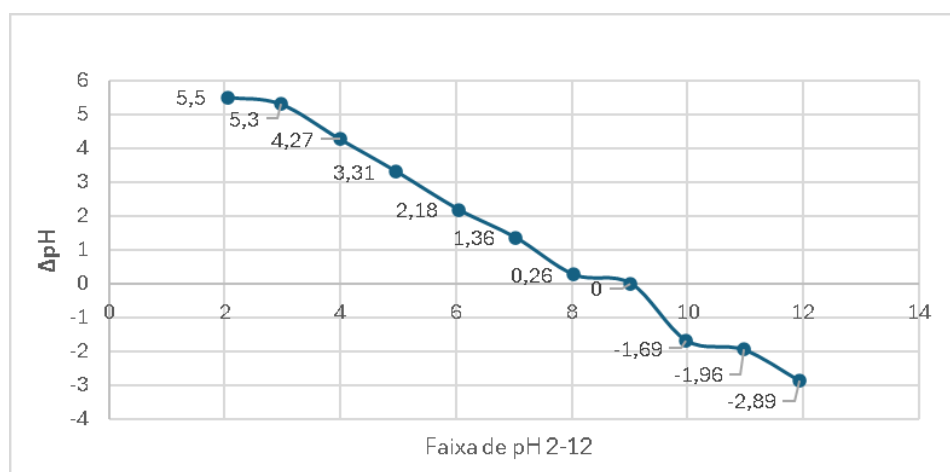


Figura 4. Ponto de carga zero (PCZ) da Cal Queimada (1 g L^{-1}) em 20 mL de KCl ($0,1 \text{ mol L}^{-1}$).

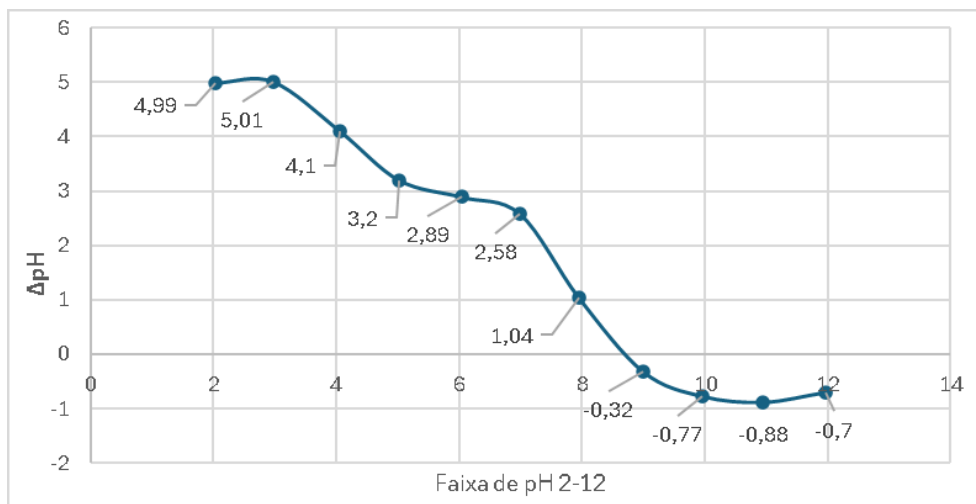


Figura 5. Ponto de carga zero (PCZ) do Grits (1 g L^{-1}) em 20 mL de KCl ($0,1 \text{ mol L}^{-1}$).

As curvas de PCZ demonstraram comportamento semelhante para os três resíduos avaliados. A LC apresentou PCZ próximo de 8,4, a CQ aproximadamente 9,0 e os G cerca de 8,8. Esses resultados evidenciam o caráter básico dos resíduos provenientes do processo Kraft, comportamento atribuído à elevada presença de compostos à base de cálcio, como carbonatos, óxidos e hidróxidos, responsáveis pela alcalinidade desses materiais e pelo seu potencial de interação com contaminantes em solução (ESMAEELI et al., 2023; KATHI et al., 2023). Valores elevados de PCZ indicam que, em pH inferiores a aproximadamente 8–9, a superfície dos resíduos apresenta predominância de cargas positivas, favorecendo a adsorção de espécies aniônicas. Em valores superiores ao PCZ, ocorre predominância de cargas negativas, tornando os materiais potencialmente mais eficientes na adsorção de espécies catiônicas. Estudos recentes ressaltam que o PCZ constitui um dos principais parâmetros para prever o desempenho de adsorventes em diferentes condições de pH, influenciando diretamente os mecanismos de interação eletrostática entre adsorvente e adsorbato (MERGBI et al., 2023; KUMAR et al., 2021). Considerando que muitos efluentes industriais apresentam pH próximo da neutralidade, os resíduos estudados demonstram potencial para aplicação como adsorventes, especialmente em sistemas cuja operação permita o controle do pH.

Assim, os resultados deste trabalho constituem uma etapa inicial da pesquisa e demonstram que os resíduos avaliados apresentam características compatíveis com sua utilização como adsorventes alternativos. Além de contribuir para a redução da disposição desses materiais em aterros industriais, sua aplicação em sistemas de tratamento favorece a valorização de subprodutos do processo Kraft e está alinhada aos princípios da economia circular, promovendo o reaproveitamento de resíduos e o desenvolvimento de tecnologias mais sustentáveis para o tratamento de efluentes (KATHI et al., 2023; ESMAEELI et al., 2023). As informações obtidas nesta etapa servirão de base para ensaios de adsorção em diferentes



condições operacionais e para o desenvolvimento de cartuchos filtrantes produzidos por impressão 3D.

Conclusões

Os resultados deste trabalho mostraram que os resíduos provenientes do processo Kraft da indústria de celulose apresentam características físico-químicas compatíveis para a sua utilização como materiais adsorventes. A caracterização desses resíduos por meio da determinação do ponto de carga zero evidenciou seu caráter básico, enquanto os ensaios utilizando solução de ácido húmico como efluente simulado permitiram avaliar sua capacidade de material adsorvente na remoção de carbono orgânico e de cor real.

Entre os materiais avaliados, a Cal Queimada destacou-se por apresentar a maior remoção de cor real e carbono orgânico. Em paralelo, o Grits também apresentou alta eficiência de remoção de carbono orgânico. Estes resultados indicam o maior potencial desses materiais para aplicação em processos de adsorção. Os elevados valores de ponto de carga zero também indicam que esses resíduos possuem potencial para aplicação em sistemas de tratamento cuja eficiência seja influenciada pelas condições de pH do meio.

Dessa forma, os objetivos propostos para esta etapa da pesquisa foram alcançados, permitindo identificar os resíduos Lama de Cal, Grits e Cal Queimada mais promissores para aplicações futuras. Como continuidade do trabalho, serão realizados ensaios de adsorção com diferentes contaminantes e condições operacionais, visando à incorporação dos materiais de melhor desempenho em cartuchos filtrantes produzidos por impressão 3D. Essa abordagem contribui para a valorização de resíduos da indústria de celulose, fortalece os princípios da economia circular e favorece o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis para o tratamento de efluentes.

Agradecimentos

FAPEMIG, CAPES, CNPq, LAMIQ-UFU, LaQAmb e Empreendedorismo Ambiental UFU.

Referências

- ESMAEELI, A.; AKBARI, A.; KHOSRAVI, M.; et al. A Comprehensive Review on Pulp and Paper Industries Wastewater Treatment Advances. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 62, n. 22, p. 8119–8145, 2023.
- KATHI, S. K.; CHOWDHARY, P.; BHATIA, S. K.; et al. Wastewater and sludge valorisation: a novel approach for treatment and resource recovery to achieve circular economy concept. *Frontiers in Chemical Engineering*, v. 5, Article 1129783, 2023.
- KUMAR, A.; SRIVASTAVA, N.; GERA, P. Removal of color from pulp and paper mill wastewater: methods and techniques – A review. *Journal of Environmental Management*, v. 298, Article 113527, 2021.
- MERGBI, M.; EL BOURAIE, M.; EL MOUKRIE, K.; et al. Valorization of lignocellulosic biomass into sustainable materials for adsorption and photocatalytic applications in water and air remediation. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 30, p. 74544–74574, 2023.