

ESPONJAS DE POLIURETANO COMERCIAIS MODIFICADAS COM POLIPIRROL E ÁCIDO ESTEÁRICO COMO FERRAMENTAS PARA ADSORÇÃO DE CO₂

PÂMELA MACCHION¹; ANDRÉ R. FAJARDO²

¹Universidade Federal de Pelotas (UFPel) – pamelamacchion10@gmail.com

²Universidade Federal de Pelotas (UFPel) – andre.fajardo@ufpel.edu.br

1. INTRODUÇÃO

A intensificação do efeito estufa, causada pela emissão de dióxido de carbono (CO₂) da queima de combustíveis fósseis e agravada pelo desmatamento, que diminui a capacidade das florestas de absorver CO₂, tem gerado mudanças climáticas drásticas em escala global. Consequências como o aumento do nível do mar, a acidificação dos oceanos e eventos climáticos extremos são algumas das mais evidentes desse fenômeno (SHAO et al., 2024). A fim de minimizar tal problema, novas alternativas vêm sendo propostas, incluindo transição para energias renováveis, reflorestamento e economia circular. Nesse contexto, a captura e armazenamento de carbono (CCS) emerge como uma tecnologia promissora, com o potencial de reduzir a concentração de CO₂ na atmosfera. Diante dos métodos existentes de CCS, a adsorção, um processo que envolve a aderência de moléculas de CO₂ à superfície de um material sólido, conhecido como adsorvente, apresenta-se como uma ferramenta interessante para mitigar o excesso desse gás na atmosfera, justamente pela eficácia e baixo custo de operação (POOTHIA et al., 2023).

Novos materiais adsorventes, como carvão ativado e zeólitas, estão sendo estudados como alternativas para a captura de CO₂. Wang et al. (2022) relataram a criação de um aerogel compósito ternário, funcionalizado com amina e dopado com zeólita acidificada. Embora mostre alta eficiência na captura de CO₂, a umidade no ambiente comprometeu a seletividade, devido ao caráter higroscópico da zeólita. Neste contexto, esponjas de poliuretano (PU) utilizadas em ambientes domésticos, emergem como uma opção atrativa devido seu baixo custo, estrutura porosa definida e caráter anfifílico (LI et al., 2022). Apesar das vantagens mencionadas, a esponja PU não se torna seletiva para captura do gás, principalmente em atmosferas úmidas (presença de vapores de água) ou mistas (presença de outros gases), uma vez que a esponja não possui tantos grupos funcionais com afinidade específica pelo CO₂. Para melhorar a seletividade, é necessária a modificação da superfície da esponja. O polipirrol (PPy), um polímero condutor orgânico, se destaca como material promissor para adsorção de CO₂, devido à sua estrutura porosa e rica em nitrogênio, que proporciona alta afinidade por moléculas de CO₂ e favorece interações dipolo-dipolo. Além disso, a presença de elétrons π deslocalizados na cadeia principal do polímero contribui para a polarizabilidade do material, intensificando as forças de van der Waals entre o PPy e o CO₂ (FOORGINEZHAD et al., 2024). Apesar da ótima eficiência de captura do gás, a seletividade da adsorção pode diminuir em ambiente úmidos (FOORGINEZHAD et al., 2024). Para mitigar esse problema, a adição de grupos hidrofóbicos, como o ácido esteárico (SA), conhecido na literatura por aumentar a hidrofobicidade de materiais, pode ser uma solução eficaz.

Diante dos fatos apresentados, este trabalho tem como objetivo investigar a viabilidade da utilização de esponjas de PU revestidas com PPy e modificadas com

SA como adsorvente para a captura de CO₂ em condições úmidas, buscando contribuir para o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e sustentáveis.

2. METODOLOGIA

Modificação das esponjas de PU: A esponja comercial foi cortada em pequenos pedaços (0,50 x 0,50 x 1,00 cm), lavada com uma solução de etanol/H₂O (3:7 v/v) por 1 h e seca em estufa a 50 °C por 24 h, visando a obtenção de um material limpo e livre de resíduos. Em seguida, a esponja PU limpa foi colocada em um balão de fundo redondo contendo 35 mL de HCl (1 M) e 5 mL de uma solução de FeCl₃ (0,1 mol/L) e deixada sob agitação por 0,5 h em banho de gelo a 4 °C. Após, foi adicionado 0,35 mL de pirrol na mistura reacional e deixada sob agitação durante 12 h. Após as 12 h, as esponjas foram retiradas e lavadas com água deionizada e colocadas em uma solução de SA (0,1 mol/L) por 2 h. Por fim, as esponjas PU modificadas (PU-PPy/SA) foram lavadas com etanol e colocadas para secar a 50 °C por 24 h.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi realizada a análise de Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) para identificar os grupos funcionais e possíveis interações moleculares entre o material precursor e os modificantes. O espectro da amostra PU revelou bandas característica desta classe de polímeros. A banda em 3368 cm⁻¹ é atribuída ao estiramento da ligação N-H, presente nos grupos ureia das cadeias de PU. As bandas em 2968 e 2853 cm⁻¹ são típicas do estiramento das ligações C-H, presentes na cadeia carbônica do polímero (KRAITAPEA et al., 2016). Após a modificação com PPy, houve um alargamento da banda de estiramento N-H em 3368 cm⁻¹, indicando um aumento nas interações físicas entre o PU e o PPy. Essa observação sugere a formação de ligações de hidrogênio e/ou interações hidrofóbicas entre os polímeros (SATRIA et al., 2023). Adicionalmente, o aumento nas intensidades das bandas em 2968 e 2853 cm⁻¹, típicas de estiramentos C-H, podem confirmar a incorporação do PPy na matriz do PU. Por fim, o espectro do material PU/PPy/SA revelou um aumento na intensidade da banda em 3362 cm⁻¹, característica do estiramento O-H e N-H. Essa intensificação e alargamento da banda pode ser atribuída à presença de grupos O-H do grupo carboxílico (-COOH) do SA que contribui para a formação de ligações de hidrogênio entre PU/PPy e SA. Ainda, o aumento nas intensidades das bandas em 2917 e 2848 cm⁻¹ típicas dos estiramentos C-H assimétrico e simétrico, respectivamente, confirmam a incorporação do SA e a presença de grupos CH₂ e CH₃ em sua cadeia carbônica (FAN et al., 2022).

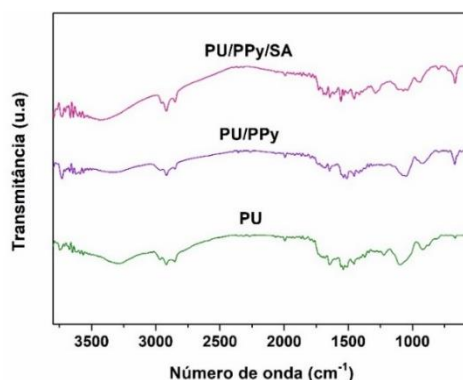


Figura 1. Espectros de FTIR para esponja PU, PU/PPy e PU/PPy/SA.

Com o objetivo de identificar os padrões de perda de massa dos materiais sintetizados e seus precursores, foi realizada a análise termogravimétrica (TGA), que consiste na análise de decomposição térmica dos materiais, em conjunto com a sua primeira derivada (DTG). Conforme a Figura 2, a amostra PU apresentou dois estágios de perda de massa. Entre 235 e 323 °C, houve o primeiro estágio de perda de massa de aproximadamente 26%, relacionado à degradação térmica de grupos laterais do PU. Já no segundo estágio na faixa de 326 a 413 °C, houve uma perda de 63%, indicando a decomposição das cadeias de PU. Para a amostra PU/PPy foi observado três estágios de perda de massa. No primeiro estágio, na faixa de 281 a 292 °C, houve uma perda de massa de 13% equivalente a remoção de moléculas dopantes da estrutura do PPy. Já entre 292 e 347 °C, credita-se que a decomposição de 77% da massa corresponde a degradação das cadeias PPy. Ainda, na faixa de 428 a 451 °C, houve mais um estágio de perda de massa de 6%, que corresponde a decomposição das cadeias de PU (SATRIA et al., 2023). Por fim, para a amostra PU/PPy/SA, houve três perdas de massa. Entre 160 a 243 °C, houve o primeiro estágio de perda de 7% da massa que pode corresponder à pirólise do SA. Já o segundo estágio de perda foi de aproximadamente 21% na faixa de 250 a 318 °C, o que pode estar relacionado tanto a decomposição das cadeias laterais do PU, bem como a remoção das moléculas dopantes da estrutura do PPy. O último estágio exibiu perda de 52% de massa entre as temperaturas 325 a 404 °C. Aqui, houve decomposição das cadeias de PU e PPy. Esses resultados evidenciam as modificações realizadas na esponja de PU (YAZDANI et al., 2024).

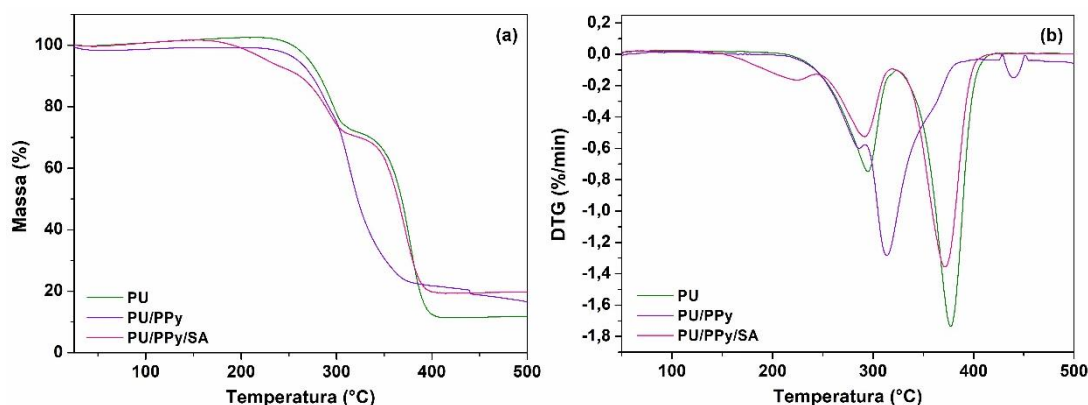


Figura 2. Curvas de (a) TGA e (b) DTG para esponja PU, PU/PPy e PU/PPy/SA.

Além disso, a hidrofobicidade do material foi avaliada qualitativamente. A esponja PU geralmente apresenta um caráter anfífilo, característica que contribui para seu uso previsto (por exemplo, uso doméstico). No entanto, a introdução do PPy embora contribua para aumentar a hidrofobicidade do material, pode não ser suficiente para conferir as propriedades hidrofóbicas desejadas em determinadas aplicações (FOORGINEZHAD et al., 2024). A modificação com ácidos graxos, como o SA, visa dotar o material de propriedades hidrofóbicas, ou seja, de repulsão à água. Essa característica é fundamental para garantir a eficiência da adsorção de CO₂ em ambientes com alta umidade, uma vez que a água pode competir com o CO₂ pelos sítios de adsorção. Ao tornar o material mais hidrofóbico, aumenta-se a seletividade para o CO₂, tornando-o uma opção promissora para aplicações em

processos de captura de carbono, como em processos industriais ou em sistemas de captura direta do ar.

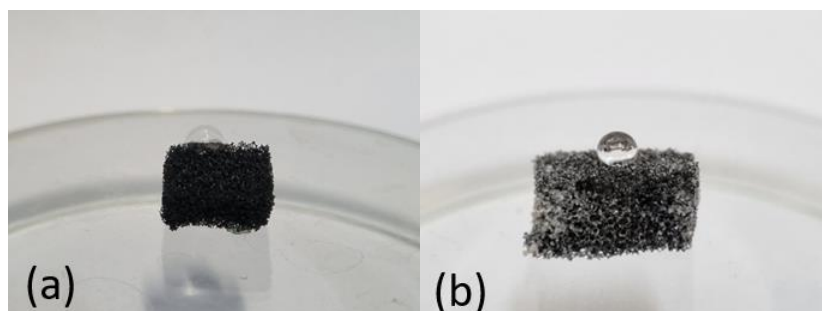


Figura 3. Gota de água repousada sobre a superfície das amostras **(a)** PU/PPy e **(b)** PU/PPy/SA.

4. CONCLUSÕES

Neste estudo, para melhorar a capacidade de adsorção de CO₂ nas esponjas comerciais de PU, o material foi modificado com o polímero PPY e o ácido graxo SA. Os resultados indicaram que, além da interação entre o PPY e o SA na estrutura da esponja, confirmada por FTIR, as modificações aumentaram a hidrofobicidade, alcançando um dos objetivos iniciais. Como próximos passos, o material será caracterizado mais detalhadamente, assim como sua eficácia na adsorção do CO₂ será avaliada.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- FAN, S. et al. Fabrication of polypyrrole coated superhydrophobic surfaces for effective oil/water separation. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 19, p. 4337-4349, 2022.
- FOORGINEZHAD, S. et al. Activated porous carbon derived from sawdust for CO₂ capture. **Materials Chemistry and Physics**, v. 317, p. 129177, 2024.
- KRAITAPEA, N. et al. Influence of recycled polyurethane polyol on the properties of flexible polyurethane foams. **Energy Procedia**, v. 89, p. 186-197, 2016.
- LI, S. et al. Hydrophobic Ti₃C₂Tx/PU sponge prepared from commercial amphiphilic PU sponge for oil/water separation with ultrahigh flux. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 10, p. 108542, 2022.
- POOTHIA, T. et al. A comprehensive review on CO₂ capture and storage (CCS) technology in global scenario. **AIP Conference Proceedings**, v.2521, p. 030013, 2023.
- SATRIA, M. et al. Synthesis of Superhydrophobic/Superoleophilic stearic acid and Polymer-modified magnetic polyurethane for Oil-Water Separation: Effect of polymeric nature. *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 629, p. 522-534, 2023.
- SHAO, J. et al. Unlocking the potential of N-doped porous Carbon: Facile synthesis and superior CO₂ adsorption performance. **Separation and Purification Technology**, v. 333, p. 125891, 2024.
- WANG, J. et al. Adsorption of CO₂ by a novel zeolite doped amine modified ternary aerogels. **Environmental Research**, v. 214, p. 113855, 2022.
- YAZDANI McCORD, M. R. et al. Polypyrrole-modified flax fiber sponge impregnated with fatty acids as bio-based form-stable phase change materials for enhanced thermal energy storage and conversion. **Journal of Energy Storage**, v. 81, p. 110363, 2024.