

796 - AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE ENTRE CARVÕES ATIVADOS GRANULARES COMERCIALIZADOS NO BRASIL E O ÁCIDO PERFLUOROOCETANOSSULFÔNICO (PFOS)

Nayara dos Santos Oliveira⁽¹⁾

Engenheira Química pela Universidade de Brasília (UnB). Mestranda em Tecnologias Ambientais e Recursos Hídricos pela Universidade de Brasília (UnB).

Yovanka Perez Ginoris⁽²⁾

Engenheira Química pelo Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevarria (1995), Havana, Cuba, com mestrado em Biotecnologia Industrial pela Escola de Engenharia de Lorena - Universidade de São Paulo (2001) e doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2006). Professora adjunta do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental e coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade de Brasília.

Endereço⁽¹⁾: Anexo SG-12, Térreo, Campus Universitário Darcy Ribeiro Universidade de Brasília – UnB, CEP: 70.910-900, Brasília/ DF. Tel: +55 (61) 3107-0940 / 98277-9770. E-mail: cristiane_frizzo@yahoo.com.br - Tel: (61) 99115-7467 - e-mail: nayaraoliveir.no@gmail.com

RESUMO

As substâncias per e polifluoroalquílicas (PFAS) são tóxicas, bioacumulativas e possuem alta estabilidade térmica e química, persistindo no meio ambiente por longos períodos. O ácido perfluorooctanossulfônico (PFOS) pertence ao grupo de PFAS. Desde sua classificação como um poluente orgânico persistente na Convenção de Estocolmo em 2009, foi recomendada a proibição do uso de PFOS em seus diversos usos e aplicações. O PFOS está presente em diversos corpos hídricos nacionais e uma das principais vias de contaminação humana é através da ingestão de água. Os processos de tratamento convencional de água não são efetivos para a remoção de PFAS. Em posse de tais constatações, é necessário o desenvolvimento de tecnologias capazes de remover efetivamente esses compostos. A adsorção por carvão ativado é uma técnica viável e o entendimento das características intrínsecas aos materiais adsorventes é essencial para que a eficiência máxima do processo seja alcançada. Este trabalho avalia a relação entre as propriedades físico-químicas do PFOS e as características texturais e químicas de carvões ativados comercializados no Brasil já avaliados em outros estudos de adsorção de microcontaminantes orgânicos. Os carvões ativados nacionais analisados foram produzidos a partir de matérias-primas já utilizadas na literatura, são alcalinos e apresentam características compatíveis com a molécula de PFOS. Para futuros ensaios de adsorção, recomenda-se a utilização de carvões ativados alcalinos mais mesoporosos, produzidos a partir de coco, madeira, milho ou carvões betuminosos, uma vez que esses carvões apresentam características que refletem boa compatibilidade com a molécula de PFOS.

PALAVRAS-CHAVE: PFOS, PFAS, adsorção, carvão ativado.

INTRODUÇÃO

As substâncias per e polifluoroalquílicas (PFAS) são classificadas como contaminantes emergentes e conhecidas como *forever chemicals* (químicos eternos). São compostos que possuem alta estabilidade térmica e química, e, portanto, persistem no meio ambiente. Essas substâncias afetam a saúde humana, causando alterações na imunidade, nas funções cardiovasculares, hepáticas, reprodutivas e no sistema endócrino, além de favorecerem o desenvolvimento de câncer. PFAS são utilizados em pesticidas, surfactantes, espumas de combate a incêndios, painéis antiaderentes, entre outras aplicações.

Os PFAS, ácido perfluorooctanossulfônico (PFOS) e ácido perfluorooctanoico (PFOA), já foram detectados no Lago Paranoá, localizado no Distrito Federal. As amostras coletadas apresentaram 100% de prevalência desses compostos (Abbt-Braun *et al.*, 2014).

Em 2009, na Convenção de Estolcomo, o PFOS foi classificado como uma substância tóxica, persistente e bioacumulativa no ambiente. Face ao risco potencial que essa substância representa à saúde humana e ao meio ambiente, foi recomendado o banimento do uso de PFOS desde sua classificação como POP (poluente orgânico persistente) (United Nations Environment Programme, 2009).

Além disso, as legislações mundiais vêm se tornando cada vez mais restritivas no que tange ao limite aceitável de PFAS em água para consumo humano. Em junho de 2022, a EPA emitiu alertas de saúde sobre o PFOS e o PFOA, sendo os novos limites definidos em água destinada ao consumo humano de 0,02 ng/L e 0,004 ng/L, respectivamente, para PFOS e PFOA. A nível nacional, há um desafio posto no campo de tratamento de água para consumo humano, pois as concentrações de ambas as substâncias estabelecidas pela EPA são baixas e, até o momento, não há resoluções nacionais que restrinjam os limites dessas substâncias no meio ambiente. Soma-se a isso a limitação dos processos de tratamento convencionais de água que não são efetivos na remoção de PFAS, levando à necessidade de avaliar tecnologias de tratamento avançadas efetivas para remoção de PFAS. Diferentes tecnologias têm sido estudadas a fim de remover estas substâncias em águas residuárias e em águas destinadas ao consumo humano, dentre elas, a adsorção é considerada uma tecnologia viável para a remoção de PFOS (Wang *et al.*, 2016; Du *et al.*, 2016; Chen *et al.*, 2017).

Desta forma, em face à necessidade do emprego de tecnologias viáveis que possibilitem a remoção destes micropoluentes emergentes em águas para consumo humano, a adsorção por carvão ativado pode ser considerada uma alternativa. Comparada a outras tecnologias de remoção de microcontaminantes da água, como filtração por membranas e processos oxidativos avançados, a adsorção por carvão ativado é menos onerosa e não é necessária a utilização de reagentes químicos. Logo, definir adequadamente o material adsorvente é essencial, visto que o adsorvente deve apresentar características que favoreçam o processo de adsorção.

OBJETIVO DO TRABALHO

Avaliar a relação entre as propriedades físico-químicas do PFOS e as características texturais e químicas de carvões ativados comercializados no Brasil fornecidos por diferentes empresas.

METODOLOGIA UTILIZADA

A etapa experimental do estudo foi desenvolvida no Laboratório de Saneamento Ambiental do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília.

Os carvões ativados granulares analisados foram gentilmente disponibilizados por três fabricantes diferentes. Foram fornecidos dois carvões de casca de coco e um carvão betuminoso. Carvões ativados produzidos a partir desses materiais foram utilizados nos estudos de Ochoa-Herrera e Sierra-Alvarez (2008), Du *et al.* (2016) e Steigerwald e Ray (2021), os quais alcançaram boa capacidade de adsorção de PFOS.

Para a realização dos ensaios, os carvões ativados granulares (CAG) foram moídos e peneirados em uma peneira de 325 mesh (0,044 mm). Após a moagem e peneiramento, os carvões foram secos em uma estufa a 150 °C durante 3 h. Em seguida, foram armazenados em um dessecador para que atingissem temperatura ambiente. Os CAG foram pesados e suspensões com água ultrapura e livre de CO₂ foram preparadas para a realização dos ensaios.

Os carvões adquiridos foram caracterizados com o intuito de determinar suas propriedades físico-químicas. Foram determinadas características como: Ponto de Carga Zero (pH_{PCZ}) e pH. As especificações fornecidas pelos fabricantes para cada carvão foram inseridas neste trabalho, a fim de relacioná-las às características físicas e químicas de cada carvão determinadas para cada material adsorvente. Os seguintes parâmetros foram fornecidos pelos fabricantes: número de iodo, teor de cinzas, umidade, densidade aparente, densidade de partículas (g/m³) e dureza (%).

pH

O pH foi determinado a partir da aplicação da metodologia da JIS (1992) adaptada por Cambuim (2009). Pesou-se 1,0 g de carvão ativado, este foi adicionado a um erlenmeyer de 200 mL contendo 100 mL de água ultrapura. A mistura foi aquecida e submetida à ebulição por 5 minutos. Após o resfriamento da mistura, em condições de

temperatura ambiente ($\sim 25^{\circ}\text{C}$), adicionou-se 100 mL de água ultrapura. Finalizado esse processo, o pH da suspensão foi medido com o uso de um pHmetro. Os ensaios foram feitos em duplicata.

Ponto de Carga Zero (pH_{PCZ})

O método definido por Park e Regalbuto (1995) foi utilizado para a obtenção do pH_{PCZ} de cada carvão. Para tal foram preparadas soluções aquosas de NaNO_3 (0,1 mol/L), HNO_3 (0,1 mol/L) e NaOH (0,1 mol/L). Em onze erlenmeyers de igual volume, adicionou-se 70 mL de NaNO_3 , o pH foi ajustado para a faixa de 2 a 12. Em seguida, foram adicionadas alíquotas de 2 mL de suspensão de carvão com concentração de 0,05 g/mL. Uma vez preparadas, as soluções foram levadas à agitação por 24 horas, a 200 rpm com a utilização do equipamento Lab Companion SI-600R. Transcorrido o tempo de contato, foi medido o pH final de cada amostra. De posse dos resultados, foi construído um gráfico da diferença entre o $\text{pH}_{\text{inicial}}$ e o pH_{final} , de modo que, o pH_{PCZ} corresponde ao valor de pH_{final} que se mantém constante, ou seja, iguala-se ao $\text{pH}_{\text{inicial}}$. Os ensaios foram realizados em duplicata.

A fim de fundamentar as características ideais dos materiais adsorventes e complementar os resultados das análises das características dos carvões estudados foi realizada uma análise da literatura disponível em livros, artigos, teses, dissertações e trabalhos publicados em anais de congressos. Foram utilizadas palavras-chaves como PFAS, PFOS, adsorção, carvão ativado e remoção.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ácido Perfluorooctanossulfônico (PFOS)

Como pode ser verificado na Figura 1, o PFOS, em sua estrutura, possui uma parte hidrofóbica, representada pela cadeia de ligações entre carbono e flúor, e a parte hidrofílica, onde está localizado o grupo funcional sulfônico ($-\text{SO}_3\text{H}$) (Kempisty e Racz, 2021).

O PFOS é um ácido inerte, encontrado na fase sólida, solúvel em água em uma ampla faixa de valores de pH e apresenta-se na forma aniônica em solução aquosa (Brooke *et al.*, 2004).

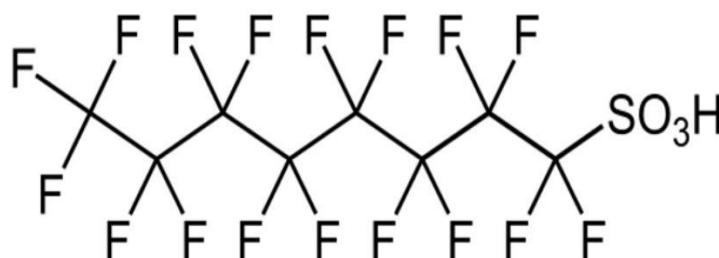


Figura 1: Estrutura química do ácido perfluorooctanossulfônico (PFOS)

Fonte: (Kempisty e Racz, 2021)

As propriedades físico-químicas do PFOS estão resumidas na Tabela 1.

Tabela 1: Propriedades físico-químicas do PFOS e do sal de potássio de PFOS

Fonte: (Pauletto *et al.*, 2022; Zhao *et al.*, 2016, Cheng *et al.*, 2009, EPA, 2012)

Fórmula molecular	Massa molar (g/mol)	Comprimento molecular (nm)	Diâmetro molecular (nm)	Log K_{ow}	pKa	Solubilidade em água (g/L)
$\text{C}_8\text{HF}_{17}\text{O}_3\text{S}$	500,13	-	-	4,49	<1,0	0,601

C ₈ F ₁₇ KO ₃ S	538,22	1,3	0,4	5,26	-3,27	0,570
--	--------	-----	-----	------	-------	-------

As propriedades físico-químicas do PFOS são apresentadas na Tabela 1. A partir dessas, é possível efetuar inferências sobre o comportamento dos carvões e sua capacidade de adsorção de PFOS em meio aquoso.

O valor positivo do Log K_{ow} reflete um caráter hidrofóbico da molécula, enquanto valores negativos refletem caráter hidrofílico. De acordo com a EPA (2012), o PFOS apresenta Log K_{ow} igual a 4,49. Logo, a molécula exibe um caráter hidrofóbico e espera-se que possua maior afinidade por materiais adsorventes cuja superfície apresente predominância de grupos hidrofóbicos.

O pKa permite inferir sobre a força de um ácido, de forma que baixos valores de pKa indicam um caráter ácido mais forte, ou seja, maior poder de dissociação em água comparado a um ácido fraco. De acordo com Cheng *et al.* (2009) o pKa do PFOS é <1,0. Kutsuna e Hori (2008) definiram o pKa do PFOA, o ácido perfluorooctanoico, como 1,3. Desta forma, é possível inferir que, comparado ao PFOA, o PFOS é um ácido mais forte e possui maior grau de dissociação em água. O PFOS, como observado na Tabela 1, possui solubilidade em água, isso o torna uma substância de difícil remoção pelo tratamento convencional de água.

Entender a relação entre o diâmetro da molécula que se pretende remover e o tamanho de poro ideal do material adsorvente é de essencial para definir o adsorvente que será utilizado em processos adsorptivos (Crittenden *et al.*, 2012). Os carvões ativados possuem estrutura porosa. A IUPAC (União Internacional de Química Pura e Aplicada) classifica os poros em macroporos (>500 Å / 50 nm), mesoporos (20-500 Å / 2-50 nm), microporos secundários (8-20 Å / 8-20 nm) e microporos primários (<8 Å / 0,8 nm). Os volumes de mesoporo e de macroporo são fatores importantes para que haja o transporte interno da molécula em direção aos microporos (Chowdhury *et al.*, 2013).

O comprimento molecular do PFOS em sua forma salina, como apresentado na Tabela 1, é 1,3 nm. Moléculas com esse comprimento são adsorvidas com maior potencialidade por carvões que apresentam maior volume de mesoporos. Nos estudos realizados por Chen *et al.* (2011), Chen *et al.* (2017) e Pauletto *et al.* (2022) constatou-se que carvões ativados com essa característica apresentaram elevadas eficiências de remoção de PFOS.

Carvões Ativados Granulares

Na Tabela 2 são apresentadas as especificações disponibilizadas pelos fabricantes dos carvões ativados, assim como os parâmetros analisados em laboratório.

Tabela 2: Especificações para cada CAG.

Parâmetro	BETM	COCO1	COCO2
Número de iodo (mg/g)	1004,22	800	812
Teor de cinzas (%)	-	8,0	7,5
Umidade (%)	2,28	8,0	5,8
Densidade Aparente (g/cm ³)	0,5 ± 0,05	-	0,5 ± 0,05
Densidade de partículas (g/m ³)	-	0,2 - 0,75	-
Dureza (%)	95	90	-
pH	9,6	10,0	9,8

pH _{PCZ}	9,06	9,97	8,96
-------------------	------	------	------

pH

Constatou-se a partir dos valores de pH apresentados na Tabela 2 que os três carvões analisados são alcalinos. Os valores de pH obtidos para os três carvões foram próximos, sendo o carvão ativado de casca de coco 1 (COCO1) o que apresentou maior alcalinidade (pH = 10,0).

De acordo com Moreno-Castilla *et al.* (2000), grupos éteres, pironas, amínicos, cromenos e cetonas podem contribuir para as propriedades básicas superficiais de carvões ativados. Provavelmente, grupos funcionais como esses podem estar presentes nas superfícies dos materiais adsorvivos analisados.

A casca de coco é um material lignocelulósico. Em materiais lignocelulósicos podem ser comumente encontrados compostos nitrogenados (como aminas), ácidos graxos, fenóis, taninos e sais minerais. Pereira *et al.* (2018) constataram a presença de grupos funcionais, tais como ésteres, cetonas, aldeídos e ácidos carboxílicos em carvão ativado derivado de casca de coco.

O betume é um material composto por hidrocarbonetos, em sua estrutura predominam as ligações entre C e H. Zago (2010) analisou carvões ativados betuminosos e de casca de coco, e constatou que os grupos funcionais éteres, cetonas e ácidos carboxílicos estão presentes na superfície dos materiais analisados. Os grupos éteres e cetonas, comparados aos ácidos carboxílicos, predominam na superfície.

pH_{PCZ}

Nas Figuras 2, 3 e 4 estão apresentados os gráficos referentes aos resultados dos ensaios de ponto de carga zero dos três carvões ativados comerciais (BETM, COCO1 e COCO2).

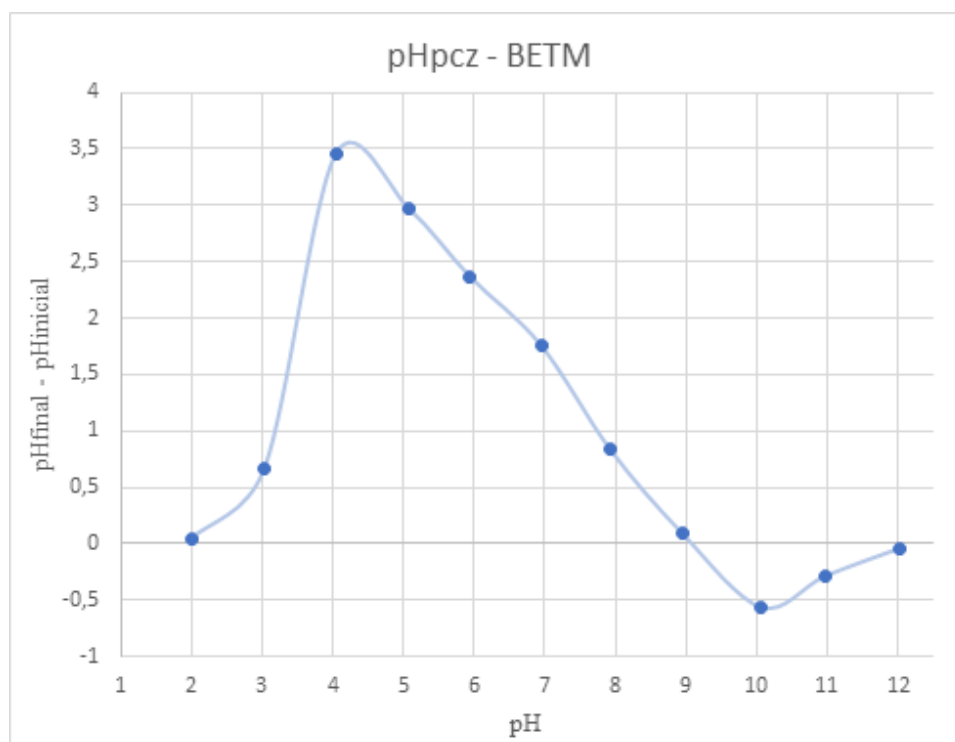


Figura 2: Ponto de Carga Zero – BETM

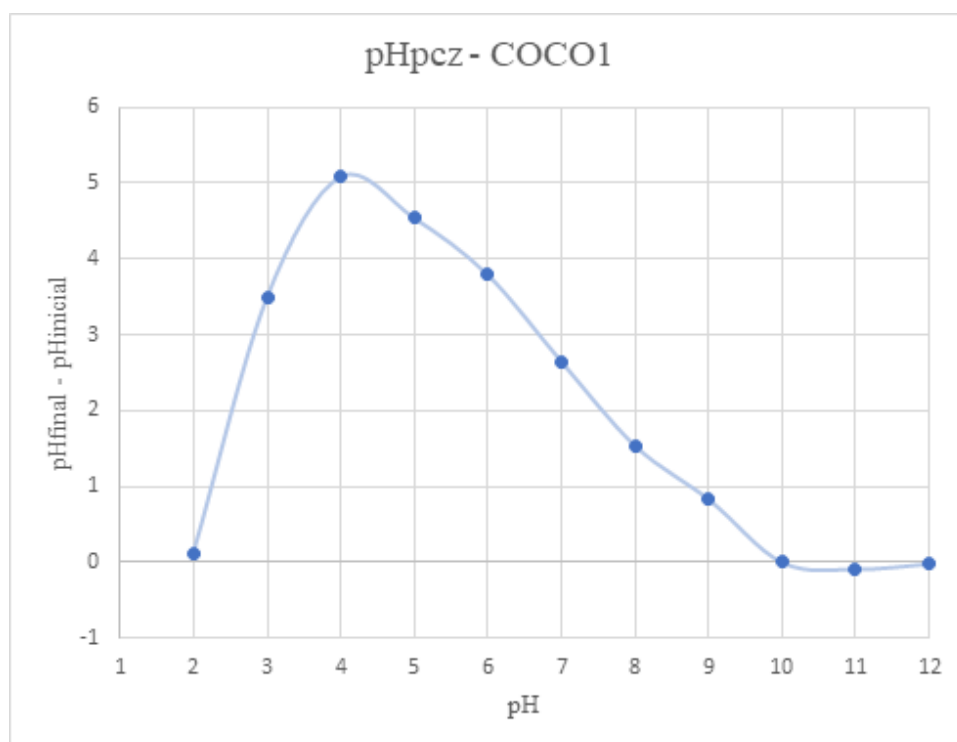


Figura 3: Ponto de Carga Zero – COCO1

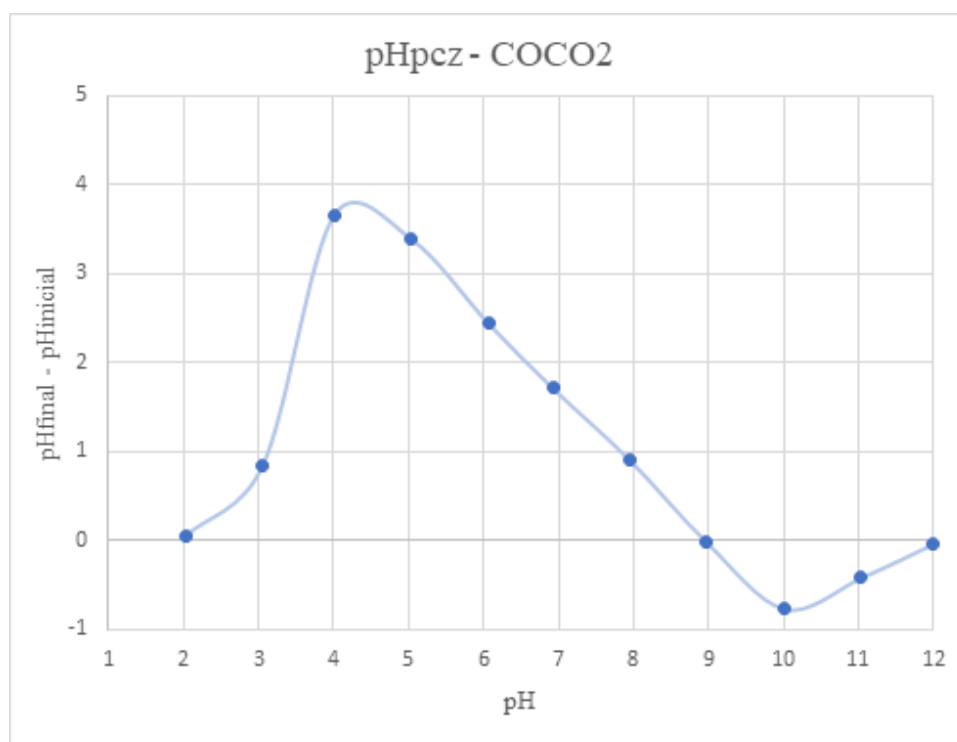


Figura 4. Ponto de Carga Zero – COCO2

Definir o ponto de carga zero (pH_{PCZ}) é importante para que não haja prejuízos ao processo de adsorção, se as cargas do adsorvato e do adsorvente coincidirem, a tendência é que ocorra a repulsão eletrostática. O pH_{PCZ} é o ponto de pH em que a superfície do material possui carga neutra. Para valores acima do pH_{PCZ} , o material adsorvente assume carga de superfície negativa, para valores abaixo do pH_{PCZ} , a carga de superfície do material é positiva.

Na Tabela 2, observa-se que para ambos os carvões é possível trabalhar em uma larga faixa de pH, faixa que garante a carga superficial positiva dos carvões estudados.

O PFOS é solúvel em água, apresenta forma aniônica em solução aquosa, ou seja, em pH próximo à 7,0 infere-se que um percentual considerável deste contaminante se encontra ionizado negativamente. Trabalhar em uma faixa adequada de pH pode favorecer as interações eletrostáticas entre o PFOS e os carvões. Isso posto, é ideal que o pH da água de estudo utilizada nos ensaios de adsorção seja inferior ao pH_{PCZ} dos carvões.

Dentre as especificações fornecidas pelos fabricantes dos carvões, o número de iodo é um indicador relativo da porosidade do material adsorvente. O iodo é acessível aos microporos do carvão, desta forma, o número de iodo está relacionado à microporosidade do material. Da Tabela 2, infere-se que carvão ativado betuminoso (BETM) possui maior volume de microporos.

Interações eletrostáticas e hidrofóbicas são as principais interações que atuam no processo de adsorção de PFAS em diferentes materiais adsorventes (Gagliano *et al.*, 2019).

Materiais adsorventes carregados positivamente e PFAS aniônicos são suscetíveis às ligações eletrostáticas. Por consequência, qualquer mudança de pH pode afetar a eficiência do processo adsorptivo, em virtude da alteração da força iônica (Du *et al.*, 2014). A alteração do pH da solução afeta diretamente as propriedades de superfície do adsorvente e as características de carga da molécula (Liu *et al.*, 2018; Yu *et al.*, 2008). Nos estudos desenvolvidos por Chen *et al.* (2017) e Zhou *et al.* (2009), observou-se um decaimento na eficiência de remoção de PFAS quando o pH da solução foi ajustado para um valor maior que o pH_{PCZ} dos adsorventes estudados. Chen *et al.* (2017) avaliaram carvões ativados ($\text{pH}_{\text{PCZ}(\text{cap})} = 3,3$ e $\text{pH}_{\text{PCZ}(\text{cag})} = 5,03$), enquanto Zhou *et al.* (2009) avaliaram montmorilonitas organofilizadas ($\text{pH}_{\text{PCZ}} = 6,6$). Esse decaimento da eficiência pode ser explicado pela repulsão eletrostática que surge a partir da mudança da carga superficial dos adsorventes avaliados.

Como observado na Figura 1, a cadeia de ligações C-F do PFOS apresenta caráter hidrofóbico. A predominância do caráter hidrofóbico desse contaminante é confirmada pelo valor positivo do $\text{Log } K_{\text{ow}}$, 4,49. Já as repulsões eletrostáticas entre o PFOS (em solução uma molécula aniônica) e os adsorventes carregados negativamente podem ser superadas pelas interações hidrofóbicas da cadeia de ligações C-F (Zaggia *et al.*, 2016). Nos trabalhos de Du *et al.* (2014), McCleaf *et al.* (2017) e Rahman *et al.* (2014), comparando às propriedades de PFAS de cadeias curtas e longas em meio aquoso, foi constatado que o caráter hidrofóbico dessas substâncias aumenta à medida que se eleva o comprimento da cadeia de ligações C-F. Substâncias perfluoroalquílicas sulfônicas que apresentam número de carbonos maior que seis em sua cadeia são consideradas PFAS de cadeia longa, menor ou igual a cinco átomos de carbono são consideradas PFAS de cadeia curta (Kempisty e Racz, 2021). Com base nessa classificação, o PFOS é considerado um PFAS de cadeia longa, logo, seu caráter hidrofóbico pode potencializar as interações hidrofóbicas com o adsorvente, superando as interações eletrostáticas.

CONCLUSÃO

A partir do trabalho realizado, conclui-se que:

De acordo com a literatura, carvões alcalinos com predominância de mesoporosos na superfície, produzidos a partir de coco, madeira, milho ou betuminosos apresentaram boa compatibilidade, ou seja, a adsorção de PFOS foi favorecida. Desta forma, recomenda-se a utilização de carvões ativados com essas características em futuros ensaios de adsorção.

Os carvões nacionais analisados são alcalinos, foram produzidos a partir de matérias-primas já utilizadas na literatura e apresentam características compatíveis com a molécula de PFOS. Os três carvões analisados podem ser utilizados em processo adsorptivo em meio aquoso com valor de pH abaixo de 9,0. Essa faixa garantirá a carga superficial positiva dos adsorventes, favorecendo as interações eletrostáticas com o PFOS no processo de adsorção. Recomenda-se que o pH da solução seja inferior ao pH_{PCZ} do material adsorvente.

De acordo com a literatura consultada, as interações hidrofóbicas e eletrostáticas governam o processo de adsorção de PFAS em meio aquoso. Desta forma, atenção deve ser dada às condições experimentais utilizadas nos ensaios de adsorção.

Por fim, os carvões ativados estudados são uma alternativa viável para estudos futuros de adsorção. A partir do desenvolvimento deste estudo espera-se contribuir com o fornecimento de informações para as prestadoras de serviço e companhias de saneamento acerca da compatibilidade entre carvões ativados, produzidos nacionalmente tanto de forma pulverizada como granular, e o PFOS.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abbt-Braun, G.; Börnick, H.; Brandão, C. C. S.; Cavalcanti, C. B. G.; Cavalcanti, C. P.; Frimmel, F. H.; Majewsky, M.; Steiniger, B.; Tröster, M.; Worch, E. (2014). "Water quality of tropical reservoirs in a changing world - the case of Lake Paranoá, Brasília, Brazil" In: Lorz, Carsten; Makeschin, Franz e Weiss, Holger (eds.) *Integrated Water Resource Management in Brazil*. IWA Publishing, Londres, UK., 73–95p.
2. Brooke, D., Footitt, A., Nwaogu, T.A., (2004) "Environmental Risk Evaluation Report: Perfluorooctane Sulfonate (PFOS)" In: UK Environment Agency, Rotherham.
3. Cambuim, K.B. (2009). Carvão de endocarpo de coco da baía ativado quimicamente com H₃PO₄ e fisicamente com vapor d'água: produção, caracterização e aplicações. Tese de Doutorado, Universidade Federal da Paraíba, 137p.
4. Chen, W., Zhang, X., Mamadiev, M., Wang, Z. (2017) "Sorption of perfluorooctane sulfonate and perfluorooctanoate on polyacrylonitrile fiber-derived activated carbon fibers: in comparison with activated carbon" In: *Royal Society of Chemistry*, 7, 927–938p.
5. Chen, X., Xia, X., Wang, X., Qiao, J., Chen, H. (2011) "A comparative study on sorption of perfluorooctane sulfonate (PFOS) by chars, ash and carbon nanotubes" In: *Chemosphere*, 83, 1313–1319p.
6. Cheng, J., Psillakis, E., Hoffmann, M. R., Colussi, A. J. (2009) "Acid Dissociation versus Molecular Association of Perfluoroalkyl Oxoacids: Environmental Implications. In: *The Journal of Physical Chemistry A*, 113 (29), 8152–8156p.
7. Chowdhury, Z.K., Summers, R.S., Westerhoff G.P., Leto, B.J., Nowack, K.O., Corwin, C.J. (2013) "Activated Carbon Solutions for Improving Water Quality." In: *American Water Works Association*, 353p.
8. Du, Z., Deng, S., Liu, D., Yao, X., Wang, Y., Lu, X., Wang, B., Huang, J., Wang, Y., Xing, B., Yu, G. (2016) "Efficient adsorption of PFOS and F53B from chrome plating wastewater and their subsequent degradation in the regeneration process" In: *Chemical Engineering Journal*, 290, 405–413p.
9. Gagliano, E., Sgroi, M., Falciglia, P. P., Vagliasindi, F. G. A., Rocco, P. (2019) "Removal of poly- and perfluoroalkyl substances (PFAS) from water by adsorption: Role of PFAS chain length, effect of organic matter and challenges in adsorbent regeneration" In: *Water Research*, 171, 11538.
10. International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC). *Compendium of Chemical Terminology*, 2nd ed, (the "Gold Book"). Compiled by A. D. McNaught and A. Wilkinson. Blackwell Scientific Publications, Oxford (1997). In: Online version (2019) <https://goldbook.iupac.org/terms/view/M03853>.
11. Kempisty, D.M., Racz, L. (2021). "Forever Chemicals – Environmental, Economic, and Social Equity Concerns with PFAS in the Environment". In: *Environmental and Occupational Health Series*, CRC Press, 361p.
12. Kutsuna, S. Hori, H. (2008). "Experimental determination of Henry's law constant of perfluorooctanoic acid (PFOA) at 298 K by means of an inert-gas stripping method with a helical plate". In: *Atmospheric Environment*, 42, 8883–8892p.
13. Liu, L., Liu, Y., Li, C., Ji, R., Tian, X. (2018) "Improved sorption of perfluorooctanoic acid on carbon nanotubes hybridized by metal oxide nanoparticles" In: *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 15507–15517p.
14. McCleaf, P., Englund, S., Ostlund, A., Lindegren, K., Wiberg, K., Ahrens, L. (2017) "Removal efficiency of multiple poly- and perfluoroalkyl substances (PFASs) in drinking water using granular activated carbon (GAC) and anion exchange (AE) column tests" In: *Water Research*, 120, 77–87p.
15. Moreno-Castilla, C., Lopez-Ramón, M.V., Carrasco-Marín, F. (2000) "Changes in surface chemistry of activated carbons by wet oxidation" In: *Carbon*, 38(14), 1995–2001.
16. Ochoa-Herrera, V., Sierra-Alvarez, R. (2008) "Removal of perfluorinated surfactants by sorption onto granular activated carbon, zeolite and sludge" In: *Chemosphere*, 72, 1588–1593p.

17. Park, J., Regalbuto, J.R. (1995) "A Simple, Accurate Determination of Oxide PZC and the Strong Buffering Effect of Oxide Surfaces at Incipient Wetness" In: *Journal of Colloid and Interface Science*, 175, 239-252p.
18. Pauletto, P.S., Florent, M., Bandosz, T.J. (2022) "Insight into the mechanism of perfluorooctanesulfonic acid adsorption on highly porous media: Sizes of hydrophobic pores and the extent of multilayer formation" In: *Carbon*, 191, 535-545p.
19. Pereira, N.M.S., Santos, M.C.E., Campos, L.M.A., Lima, S.B., Silva, M.L.A. (2018) "Síntese e caracterização de catalisadores baseados em óxido de ferro suportados em carvão ativado derivado da casca do coco verde" In: *XXII Congresso Brasileiro de Engenharia Química*.
20. Rahman, M.F., Peldszus, S., Anderson, W.B. (2014) "Behaviour and fate of per-fluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in drinking water treatment: a review" In: *Water Research*, 50, 318-340p.
21. Rattanaoudom, R., Visvanathan, C., Boontanon, S. K. (2012) "Removal of Concentrated PFOS and PFOA in Synthetic Industrial Wastewater by Powder Activated Carbon and Hydrotalcite" In: *Journal of Water Sustainability*, 4, 245-258p.
22. Steigerwald, J. M., Ray, J. R. (2021) "Adsorption behavior of perfluorooctanesulfonate (PFOS) onto activated spent coffee grounds biochar in synthetic wastewater effluente" In: *Journal of Hazardous Materials Letters*, 100025.
23. United Nations Environment Programme (2009). The Stockholm Convention. In: <http://chm.pops.int/TheConvention/ThePOPs/TheNewPOPs/tabid/2511/Default.aspx>.
24. United States Environmental Protection Agency (EPA) (2012) "Estimation Program Interface (TM) for Microsoft Windows, v4.11" Washington, DC.
25. United States Environmental Protection Agency (EPA) (2022) "Lifetime Drinking Water Health Advisories for Four Perfluoroalkyl Substances" In: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2022-06-21/pdf/2022-13158.pdf>.
26. Wang, B., Lee, L.S., Wei, C., Fu, H., Zheng, S., Xu, Z., Zhu, D. (2016) "Covalent triazine-based framework: A promising adsorbent for removal of perfluoroalkyl acids from aqueous solution," In: *Environmental Pollution*, 216, 884-892p.
27. Yu, Q., Deng, S., Yu, G. (2008) "Selective removal of perfluorooctane sulfonate from aqueous solution using chitosan-based molecularly imprinted polymer adsorbents" In: *Water Research*, 42, 3089-3097p.
28. Yu, Q., Zhang, R., Deng, S., Huang, J., Yu, G. (2009) "Sorption of perfluorooctane sulfonate and perfluorooctanoate on activated carbons and resin: Kinetic and isotherm study" In: *Water Research*, 43, 1150-1158p.
29. Zaggia, A., Conte, L., Falletti, L., Fant, M., Chiorboli, A. (2016) "Use of strong anionexchange resins for the removal of perfluoroalkylated substances from contaminated drinking water in batch and continuous pilot plants" In: *Water Research*, 91, 137-146p.
30. Zago, J.F. (2010). *Influência das Características Físico-Químicas de Carvões Ativados na Adsorção de Saxitoxinas*. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, 182p.
31. Zhou, Q., Yu, Q., Zhang, Q., Yu, G., Deng, S., He, H., Huang, J. (2009) "Sorption of perfluorooctane sulfonate on organo-montmorillonites" In: *Chemosphere*, 78, 688-694p.