

# Sorventes utilizados na remoção de Bisfenol A por processos de sorção: uma revisão integrativa

Giovana Andziewski e Elisandra Carolina Martins\*

Universidade Estadual do Paraná. *Campus* de União da Vitória. Praça Coronel Amazonas, S/Nº. Centro. União da Vitória-PR, Brasil (CEP 84600-185). \*E-mail: [elisandra.martins@unespar.edu.br](mailto:elisandra.martins@unespar.edu.br).

**Resumo.** O tratamento ou a remoção de poluentes derivados de processos industriais é de fundamental importância, devido ao crescimento industrial e populacional, que geram um aumento na contaminação de rios, mares e águas subterrâneas por poluentes orgânicos. Alguns desses poluentes são denominados de desreguladores endócrinos. Os desreguladores endócrinos são substâncias de origem animal ou sintética, que causam alterações no sistema endócrino de animais e seres humanos. Entre essas substâncias pode-se destacar o Bisfenol A (BPA). O BPA possui alta atividade estrogênica e pequenas concentrações podem causar graves danos à saúde, infertilidade, aumento de células do câncer de próstata, endometriose, câncer no sistema reprodutor, problemas durante a ovulação, além de causar danos ao sistema cardiovascular e diabetes tipo 2. Desse modo, o presente trabalho teve como objetivo determinar qual o melhor sorvente utilizado na remoção do Bisfenol A, por sorção, a partir de uma revisão integrativa, auxiliando assim, para a diminuição dos impactos ambientais e para a saúde humana causada por este composto. No total foram selecionados 14 artigos, por meio de critérios de inclusão e exclusão pré-determinados. Em cada artigo analisou-se os estudos cinéticos, isotermas de adsorção, capacidade de sorção e regeneração. Os resultados demonstraram que para a maioria dos estudos a Isoterma de Langmuir ajustou-se melhor aos dados obtidos, seguido da Isoterma de Freundlich. A cinética da reação é descrita por um modelo pseudosegunda ordem em todos os artigos, enquanto os estudos de regeneração mostraram eficácia e diminuição da capacidade de sorção após sete ciclos. Além disso, o adsorvente tridimensional (3D) de aerogel de óxido de grafeno reduzido- $\beta$ -ciclodextrina (r-GO-CD) apresentou melhor capacidade sorção, sendo de 308,2 mg/g. Espera-se que este trabalho possa contribuir para a bibliografia de métodos de remoção de Bisfenol A, por sorção, dando suporte e proporcionando uma visão ampla e atualizada para pesquisadores e cientistas que busquem por esse tema.

**Palavras-chave:** Bisfenol A; Degradação; Biodegradação; Sorção; Processos oxidativos avançados.

Recebido  
11/01/2022

Aceito  
20/08/2022

Publicado  
31/08/2022



Acesso aberto



ORCID

0000-0002-5500-5162  
Giovana Andziewski

0000-0001-9519-5709  
Elisandra Carolina  
Martins

**Abstract. *Sorbents used in the removal of Bisphenol a by sorption processes: An integrative review.***

The treatment or removal of pollutants derived from industrial processes is of fundamental importance due to industrial and population growth, which generate an increase in the contamination of rivers, seas and groundwater by organic pollutants. Some of these pollutants are called endocrine disruptors. Endocrine disruptors are substances of animal or synthetic origin that cause changes in the endocrine system of animals and humans. Among these substances, Bisphenol A (BPA) can be highlighted. BPA has high estrogenic activity and small ones can cause serious damage to health, infertility, increase in prostate cancer cells, endometriosis, cancer in the reproductive system, problems during ovulation, in addition to causing damage to the cardiovascular system and type 2 diabetes. Thus, this study aimed to determine the best sorbent used to remove Bisphenol A, by sorption, through an integrative review. Helping to reduce the environmental and human health impacts caused by this compound. In total, 14 articles were selected, using determined inclusion and exclusion criteria. In each article, kinetic studies, adsorption isotherms, sorption capacity and regeneration were analyzed. The results showed that for most studies the Langmuir Isotherm fit better to the obtained data, followed by the Freundlich Isotherm, the reaction kinetics is applied by a pseudosecond order model in all articles, while the previous regeneration and decreased sorption capacity after or seven cycles. Furthermore, the three-dimensional (3D) adsorbent of reduced graphene oxide airgel- $\beta$ -cyclodextrin (r-GO-CD) showed better sorption capacity, being 308.2 mg/g. It is hoped that this work can contribute to the bibliography of methods for removing Bisphenol A by sorption, providing support and providing a broad and up-to-date view for scientists and scientists looking for this topic.

**Keywords:** Bisphenol A; Degradation; Biodegradation; Sorption; Advanced oxidative processes.

## Introdução

O avanço tecnológico ocasionou uma grande utilização e desenvolvimento de diferentes plásticos, que apresentam propriedades como resistência, transparência e alta capacidade térmica, possibilitando diversas aplicações. Entretanto, a grande produção desse material também gera vários problemas no meio ambiente, como a poluição da água, que ocorre devido ao descarte incorreto de resíduos e materiais de diferentes setores. Entre eles, indústrias de papeis, tintas, plásticos e polímeros (Hao, 2020).

O Bisfenol A (BPA) é um poluente orgânico utilizado em grande escala na produção do polímero policarbonato (PC) e resinas epóxis. O policarbonato está presente na fabricação de embalagens de bebidas e alimentos, potes plásticos, garrafas de água, enquanto as resinas epóxis se encontram nas tintas e no revestimento de embalagens de metal, para proteger o alimento da corrosão (Montagner, 2010).

Devido a sua grande utilidade, o BPA passou a ser produzido em grandes quantidades. Em 1993, a sua produção mundial foi de 1.100 toneladas. Já em 2015,

produziu-se 7,7 milhões de toneladas e 8 milhões em 2016. Com uma taxa composta de crescimento anual de 4,8% desde 2016, espera-se que em 2022 sejam produzidas 10,6 milhões de toneladas (Montagner, 2010; Bernardo, 2015; Almeida et al., 2018).

Com a larga escala de produção de BPA e demais materiais derivados desse composto, diversos estudos passaram a ser realizados sobre a sua toxicologia, visto que o BPA migra das embalagens para os alimentos ou bebidas. Pesquisas comprovaram a alta capacidade estrogênica, além de classificá-lo como um desregulador endócrino (DE) (Fontenele et al., 2010).

Os desreguladores endócrinos (DE) são substâncias naturais ou antrópicas capazes de causar alterações no funcionamento saudável do sistema endócrino de animais ou seres humanos. Além disso, o BPA pode causar um aumento da infertilidade de homens e mulheres e o desenvolvimento de células do câncer de próstata ou mama. Sendo relacionado com o aumento de casos de diabetes, obesidade, câncer do sistema reprodutivo, alterações na ovulação e doenças cardiovasculares (Senci, 2015; Teleginski, 2016).

Em ambientes aquáticos, a contaminação de BPA pode ocorrer a partir de estações de tratamentos de esgoto (ETE) de fábricas, principalmente indústrias de plásticos e que utilizam resinas epóxi, por exemplo, fábricas de tinta. Resultando na reprodução desordenada de peixes e alterações na fauna. A contaminação aos seres humanos pode ocorrer pelo consumo de água contaminada ou pela ingestão de animais contaminados (Costa, 2008).

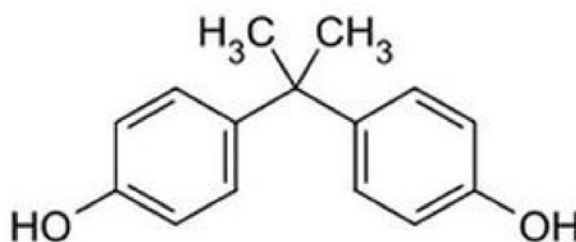
Desta forma, o desenvolvimento de métodos de remoção ou degradação do BPA, que possam ser aplicados em grande escala nos sistemas de tratamento de água, é de fundamental importância. Entre os principais métodos de degradação e/ou remoção do BPA, se encontram os processos oxidativos avançados (POA), a biodegradação e a remoção por sorção.

Os POA consistem na mineralização de compostos, como consequência da oxidação desses compostos por radicais hidroxilas. Os radicais hidroxilas possuem alto potencial oxidante, conseguindo degradar compostos poluentes, com baixo impacto (Menezes e Longuini, 2017).

A biodegradação consiste no processo de desintegração ou decomposição de materiais ou poluentes por microorganismos, como fungos e bactérias. Alguns exemplos são a biodegradação do BPA por meio de logo granular ou através da bactéria *Sphingomonas bisphenolium* cepa AO1 (Santana, 2018).

Os processos de sorção se destacam devido a sua simplicidade operacional em relação a outros métodos de remoção, o seu custo-benefício e pela ausência da geração de poluentes secundários (Hao, 2020). Tal processo pode ocorrer por meio de adsorção ou absorção. Assim, a adsorção se baseia na concentração do soluto em uma interface ou superfície. Já a absorção, consiste na interpenetração do poluente em outra fase (Santana, 2018).

O BPA possui grupos fenólicos, que são responsáveis pela sua boa reatividade e agem como sítios de adsorção. Portanto, as interações entre o sorvente e o BPA ocorrem por meio de ligações de hidrogênio, interações hidrofóbicas, interações eletrostáticas e interações  $\pi$ - $\pi$  (Haro, 2013). A estrutura molecular do BPA pode ser observada na Figura 1.



**Figura 1.** Estrutura molecular do BPA. Fonte: Teleginski (2016).

Um dos sorventes mais utilizados no processo de sorção é o carvão ativado, devido a sua estabilidade química, alta reatividade superficial, alta capacidade de adsorção e por não gerar lodos ao final do processo. Alguns autores relatam que a partir da adsorção por carvão ativado, é possível atingir até 100% de remoção do Bisfenol A. Entretanto, o carvão ativado com BPA precisa ser armazenado, podendo ser incinerado posteriormente (Santana, 2018).

Além do carvão ativado, outros sorventes são utilizados na remoção do BPA, por exemplo, adsorventes naturais, como o biochar, adsorventes a base de grafeno, diferentes tipos de minerais, carbono, biopolímeros, vermiculita magnética, sílica mesoporosa, compostos de  $\beta$ -ciclodextrina e outros (Kodura et al., 2016; Choong et al., 2019; Haciosmanoğlu et al., 2019; Saleh et al., 2019).

O presente trabalho tem como objetivo identificar, a partir de uma revisão integrativa, qual é o melhor sorvente para a remoção do Bisfenol A, considerando a capacidade de sorção, tempo destinado para o desenvolvimento do método; o mais vantajoso economicamente e se há possibilidade de aplicação do método em grande escala.

## Metodologia

A revisão integrativa é um procedimento de pesquisa que busca coletar dados a partir de uma revisão bibliográfica, que proporciona a tomada de decisões por meio de uma análise criteriosa, realizada em seis fases.

A 1ª fase corresponde à elaboração de uma pergunta norteadora. Etapa considerada a mais importante do trabalho de revisão integrativa. Desse modo, a pergunta norteadora do trabalho é “Qual é o melhor sorvente utilizado na remoção do Bisfenol A, a partir do processo de sorção?”

Na 2ª fase, realizou-se a busca ou amostragem na literatura, utilizando a base de dados *Science Direct* e as palavras chave “removal bisphenol A by sorption”. Foram selecionados artigos publicados entre os anos de 2016 e 2021; trabalhos publicados nos idiomas de português e inglês; textos integrais com disponibilidade online; artigos publicados que abordaram a temática do Bisfenol A, bem como os métodos de degradação e/ou remoção no título ou no resumo e que utilizaram técnicas cromatográficas para a determinação do BPA.

Os artigos que não atenderam aos critérios de inclusão descritos anteriormente foram excluídos. Também foram excluídos artigos de revisão e artigos que não apresentaram estudos das melhores condições analíticas.

A 3ª fase consistiu na coleta de dados. Portanto, selecionaram-se os artigos que tinham relação com a pergunta norteadora, a partir da leitura do título, na sequência a leitura do resumo e posteriormente a leitura do texto na íntegra. Após a seleção, os dados

foram organizados em uma tabela, contendo título, autores, ano de publicação e periódico em que foram publicados.

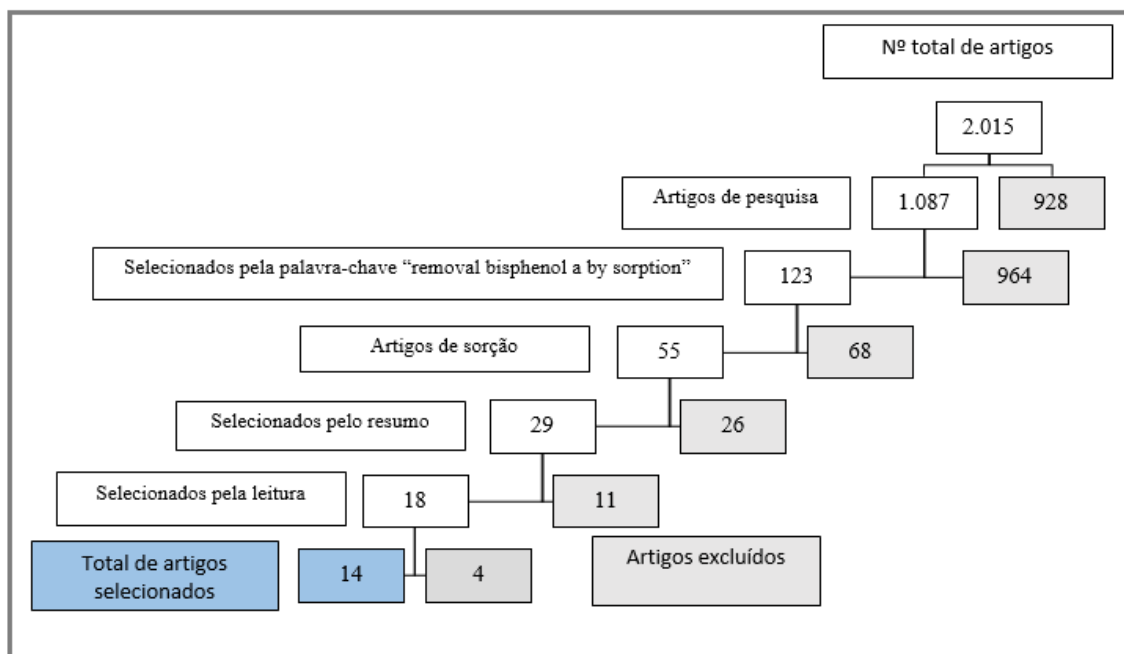
Na 4ª fase realizou-se uma análise crítica dos estudos incluídos, por meio de uma abordagem organizada para examinar com austeridade as semelhanças e particularidades de cada artigo. A 5ª fase se deu pela discussão dos resultados, a partir da interpretação dos resultados obtidos com os diferentes sorventes.

A 6ª e última fase correspondeu à conclusão e apresentação da revisão integrativa, mostrando de maneira clara e específica qual é o melhor sorvente para a remoção do Bisfenol A, considerando a capacidade de sorção, total de ciclos de regeneração e tempo destinado para a obtenção do sorvente. Também foram identificadas as características químicas dos sorventes, relacionando com os sítios de sorção e interação com o BPA, assim como os tipos de isoterma de sorção que melhor se ajustaram com cada sorvente, a cinética envolvida e as melhores condições analíticas (pH, temperatura, força iônica, etc).

## Resultados e discussão

### Remoção do Bisfenol A, a partir do processo de sorção

A sorção é uma forma genérica para se referir tanto aos processos de absorção, como de adsorção. A adsorção se baseia na concentração de um soluto em uma superfície, enquanto a absorção tem como objetivo a interpenetração do soluto em outra fase (Haro, 2013). Entre os diversos tipos de mistura (líquido-líquido, gás-líquido, gás-sólido, líquido-sólido), nas quais pode ocorrer a sorção, destaca-se aqui a sorção de líquidos ou gases em uma fase sólida. Visto que, a sorção em sorventes sólidos possibilita a remoção de poluentes em matrizes gasosas e líquidas, como os sistemas de tratamento de água (Haro, 2013). O total de artigos selecionados em cada etapa está apresentado na Figura 2.



**Figura 2.** Artigos selecionados, sobre os sorventes utilizados na remoção do BPA por sorção.

Após a seleção dos artigos pelo título (55 ao total), mantendo apenas os que continham as palavras “sorption”, “adsorption” “adsorbent” ou “removal” associadas à palavra “Bisphenol A”, realizou-se a leitura do resumo dos artigos. Observou-se que três artigos não possuíam disponibilidade *online* e 23 artigos excluídos além de não estarem de acordo com os objetivos do trabalho, não apresentaram a caracterização química para o sorvente utilizado, restando 29 artigos.

Por último, realizou-se a leitura na íntegra dos 29 artigos restantes, excluindo 11 artigos que não utilizaram técnicas cromatográficas para determinação do BPA.

Dos 18 artigos restantes, foram excluídos quatro artigos que não discutiram de maneira detalhada o mecanismo de adsorção do BPA, bem como as isotermas e cinética de adsorção. Dessa maneira, sobraram 14 artigos, que foram lidos novamente e discutidos para obter a resposta da pergunta norteadora.

Os artigos selecionados trazem como principais estudos, a caracterização do sorvente desenvolvido e utilizado, o mecanismo de adsorção do BPA, cinética de adsorção, isotermas de absorção e estudos de regeneração e recuperação do sorvente. Na Tabela 1 podem ser visualizados os artigos selecionados, que estudaram a remoção do BPA, por processos de sorção.

**Tabela 1.** Artigos selecionados na base de dados *Science Direct*.

ID	Autoria	Título	Periódico	Ano
1	Koduru et al.	Effective removal of Bisphenol A (BPA) from water using a goethite/activated carbon composite	Process Safety and Environmental Protection	2016
2	Zhou et al.	Adsorption and removal of Bisphenol A, a-Naphthol and b-Naphthol from aqueous solution by Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> @Polyaniline core-shell nanomaterials	Synthetic Metals	2016
3	Huanga et al.	Citric Acid-crosslinked $\beta$ -Cyclodextrin for simultaneous removal of Bisphenol A, methylene blue and copper: The roles of cavity and surface functional groups	Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers	2017
4	Haciosmanoğlu et al.	Adsorptive removal of Bisphenol A from aqueous solutions using phosphonatedlevan	Journal of Hazardous Materials	2019
5	Sun et al.	A novel 3D adsorbent of reduced graphene oxide- $\beta$ -Cyclodextrin aerogel coupled hardness with softness for efficient removal of Bisphenol A	Chemical Engineering Journal	2019
6	Ndagijimana et al.	Optimized synthesis of a core-shell structure activated carbon and its adsorption performance for Bisphenol A	Science of the Total Environment	2019
7	Heo et al.	Enhanced adsorption of Bisphenol A and Sulfamethoxazole by a novel magnetic CuZnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> -biochar composite	Bioresource Technology	2019
8	Prete e Tarley	Bisphenol A adsorption in aqueous medium by investigating organic and inorganic components of hybrid polymer (Polyvinylpyridine/SiO <sub>2</sub> /APTMS)	Chemical Engineering Journal	2019

**Tabela 1.** Continuação.

ID	Autoria	Título	Periódico	Ano
9	Ahamad et al.	N/S doped highly porous magnetic carbon aerogel derived from sugarcane bagasse cellulose for the removal of Bisphenol-A	International Journal of Biological Macromolecules	2019
10	Zhou et al.	Adsorptive removal of Bisphenol A, Chloroxenol, and Carbamazepine from water using a novel $\beta$ -Cyclodextrin polymer	Ecotoxicology and Environmental Safety	2019
11	Luo et al.	Hydrothermal synthesis of MoS <sub>2</sub> with controllable morphologies and its adsorption properties for Bisphenol A	Journal of Saudi Chemical Society	2019
12	Hao et al.	A novel nitrogen-containing covalent organic framework adsorbent for the efficient removal of Bisphenol A from aqueous solution	Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers	2020
13	Jeong et al.	Development of modified mesoporous carbon (CMK-3) for improved adsorption of Bisphenol-A	Chemosphere	2020
14	Hernández-Abreu et al.	Effective adsorption of the endocrine disruptor compound Bisphenol a from water on surface-modified carbon materials	Applied Surface Science	2021

Foram analisados artigos entre os anos de 2016 e 2021, porém, observa-se a grande quantidade de artigos selecionados no ano de 2019, que correspondem a oito artigos. Enquanto, por meio dos critérios de inclusão e exclusão, não foi selecionado nenhum artigo publicado no ano de 2018. Diversos foram os tipos de sorventes utilizados, os quais serão descritos a seguir.

#### **Sorventes utilizados para a sorção do Bisfenol A, e suas principais características**

A adsorção de poluentes em sistemas de tratamento de água pode ser influenciada por diversos fatores, que possuem relação direta com a eficácia do sorvente e do processo. Entre elas estão, as propriedades químicas da solução, propriedades do sorvente e do adsorbato (Alves, 2018).

As propriedades de maior importância do sorvente consistem na sua área superficial, característica e estrutura dos poros, tamanho das partículas e distribuição granulométrica. Sorventes sólidos que apresentam maior área de superfície possuem melhores capacidades de sorção, devido à maior disponibilidade de sítios ativos para a interação com o adsorbato (Alves, 2018). Portanto, o sorvente só é eficaz quando a sua área superficial e os seus poros são maiores que o diâmetro das partículas do adsorbato. As principais características dos sorventes utilizados, nos artigos selecionados, assim como, a sua forma de preparo, estão apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2.** Principais características dos sorventes utilizados e a sua forma de preparo.

ID	Tipo de sorvente	Grupos funcionais	Preparo do sorvente
1	Carvão ativado funcionalizado com óxido de ferro (goethita).	Grupos hidroxila e carboxila	Carvão ativado em pó (PAC) funcionalizado por impregnação de partículas de óxido de ferro (GPAC).
2	Material funcional, $\text{Fe}_3\text{O}_4$ revestido com polianilina ( $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{PANI}$ ).	Grupo benzeno, amino e grupo amina	Inicialmente, microesfera de $\text{Fe}_3\text{O}_4$ foram sintetizadas utilizando um método solvotérmico. Posteriormente, o composto ( $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{PANI}$ ) com estrutura núcleo casca foi preparado por meio de método de automontagem, utilizando $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , solução de ácido clorídrico, água deionizada, monômero de anilina e amônio peroxodissulfato (APS).
3	Ácido cítrico reticulado $\beta$ polímero-ciclodextrina (CA- $\beta$ -CD)	Grupos hidroxilas, grupos carboxilas e grupos éster	Misturou-se 3 g de CA anidro, 6 g de $\beta$ -CD, 1,5 g de $\text{KH}_2\text{PO}_4$ e 135 mL de água ultrapura em um béquer de 800 mL e agitou-se. Aqueceu-se o copo em (140 °C) por 3,5 h sem agitação. Posteriormente resfriou-se até atingir temperatura ambiente. Purificou-se o produto final com água e filtrou-se por sucção a seco a 50 °C.
4	Halomonas Levanfosfonado (PhHL)	Grupos CH e grupos hidroxila	Halomonaslevan (HL) foi microbianamente produzido por Halomonas culturas de smyrnensis e adicionado 4 mL de $\text{PCl}_3$ gota a gota.
5	Adsorvente tridimensional (3D) de aerogel de óxido de grafeno reduzido- $\beta$ -ciclodextrina (r-GO-CD)	Grupos hidroxilas, grupos carbonila, grupos carboxila.	GO foi preparado pelo método modificado de Hummers. O aerogel r-GO foi sintetizado por um processo hidrotérmico de uma etapa. Em resumo, 20 mL de 5 mg.mL <sup>-1</sup> de suspensão homogênea de GO foi primeiramente sonicada por 30 min e então transferida para uma autoclave revestida de Teflon com aquecimento a 180 °C por 6 h. Depois de enxaguar com água por 3 vezes, o produto colunar preto obtido foi liofilizado em um secador de congelamento a vácuo por 48 h para formar o aerogel r-GO. A preparação do aerogel composto r-GO-CD foi basicamente a mesma que a do rGO, exceto que os 20 mL da suspensão GO original (5 mg.mL <sup>-1</sup> ) foi misturado com o monômero $\beta$ -CD (0,5 mg.mL <sup>-1</sup> , 1,0 mg.mL <sup>-1</sup> ou 1,5 mg.mL <sup>-1</sup> ), $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ e CTR em vez de suspensão GO apenas).



Tabela 2. Continuação.

ID	Tipo de sorvente	Grupos Funcionais	Preparo do sorvente
6	Carvão ativado com estrutura núcleo casca (CSAC)	Não apresentou	A casca cerâmica sintetizada a partir da mistura de caulinita (400 malhas) e cinza volante de carvão.
7	Biochar CuZnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> magnético	Grupos carboxila e grupos hidroxila	CZF foi sintetizado com 40% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 25% ZnO e 35% CuO e CZF-biochar foi sintetizado por um processo hidrotérmico fácil de um recipiente.
8	Polímeros híbridos orgânico-inorgânicos: Polivinilpiridina/SiO <sub>2</sub> /AP TMS (ácido); Polivinilpiridina/SiO <sub>2</sub> (4:1); Polivinilpiridina/SiO <sub>2</sub> (2:1); Polivinilpiridina	Grupos funcionais do monômero 4-vinilpirida.	A polivinilpiridina foi sintetizada pela mistura de 40,0 mmol de 4-VP (monômero funcional orgânico) com 40,0 mL de ACN (solvente porogênico).
9	Aerogel magnético de carbono dopado com N/S (bagaço de cana de açúcar e tiouréia)	Grupos hidroxila, carboxílico, amino e tiol	O bagaço extraído da cana de açúcar foi lavado com água destilada e tratado com solução de NaOH a 2%, novamente lavado e seco. O pó resultante foi então tratado com NaClO <sub>2</sub> na presença de CH <sub>3</sub> COOH por 2 h, para remover a lignina. A mistura resultante foi lavada várias vezes com água destilada e depois seco sob vácuo por 24 h. Posteriormente, adicionou-se a mistura 10 g de pó de celulose seca, disperso em 30 mL de solução aquosa, 5 g de FeCl <sub>3</sub> e 3 g de tiouréia.
10	Polímero de ciclodextrina (β-CDP)	Grupos hidroxilas	Substituição nucleofílica de tetrafluorotereftalonitrila (TFP) e β-CD
11	MoS <sub>2</sub> materiais com diferentes morfologias	Trabalho não apresentou mecanismo de sorção	Método hidrotérmico simples sob condição ácida usando o óxido de molibdênio (MoO <sub>3</sub> ) e tiocianato de potássio (KSCN)
12	Adsorvente de estrutura orgânica covalente contendo nitrogênio: Pytta-Dva-COF	Grupos funcionais contendo C e N	Foram adicionados Dva (0,4 mM) e PyTTA (0,2 mM) a um 5,5 mL de butanol/o-diclorobenzeno/ácido acético 6 M. Posteriormente a mistura foi congelado em -196 °C (banho de N <sub>2</sub> líquido), circulada três vezes e selados por chama. Em seguida, a mistura foi aquecida durante três dias a 100 °C em condições de selagem. O produto obtido foi isolado por centrifugação, enxaguado e seco sob vácuo a 50 °C durante 12 h.

**Tabela 2.** Continuação.

ID	Tipo de sorvente	Grupos Funcionais	Preparo do sorvente
13	Carbono mesoporoso modificado (MCMK-3)	Grupos carboxila e hidroxila	Sintetizou-se o CMK-3 usando SBA-15 como modelo. 1,0 g do CMK-3 resultante é oxidado em 100 mL de 5 M HNO <sub>3</sub> solução aquosa a 40 °C por 7 h, para obtenção do MCMK-3.
14	Carvão ativado por KLP (lignina Kruft) e xerogel de carbono (RFX) sintetizado por resorcinol-reação de policondensação de formaldeído	KLP: grupos anidridos e fenólico RFX: grupos anidridos e lactona	O carvão ativado KLP foi obtido por ativação química (impregnação) de lignina Kraft usando solução de H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> . O xerogel de carbono (RFX) foi sintetizado por resorcinol-reação de policondensação de formaldeído.

De acordo com a Tabela 2, pode-se observar que a maioria dos sorventes possui os grupos funcionais hidroxila, carbonila e carboxila. Além de grupos amino, amina e grupos éster.

Os grupos funcionais de cada sorvente também devem ser levados em consideração, visto que é por meio deles que ocorrem as interações com o adsorbato. A ligação entre o sorvente e o adsorbato se dá por meio dos sítios ativos presentes nos grupos funcionais dos sorventes, resultando em interações eletrostáticas, químicas, ligação de hidrogênio, forças de dispersão e Van Der Waals e forças hidrofóbicas.

#### **Mecanismo de adsorção do BPA com os sorventes estudados, e os efeitos do pH e da temperatura**

O mecanismo de adsorção de um adsorbato em um adsorvente ocorre em quatro etapas principais. A primeira etapa consiste no transporte do soluto da fase líquida para a camada limite. A segunda etapa consiste na difusão da camada limite para a superfície sólida (difusão externa). Posteriormente, ocorre a difusão da superfície sólida para os poros (difusão intrapartícula); e por último, a adsorção do adsorbato nos poros (Hernandez-Abreu et al., 2020).

Em experimentos de adsorção em batelada, que é o caso da maioria dos artigos selecionados neste trabalho, o mecanismo não é controlado pela primeira e última etapa. Portanto, o mecanismo de sorção é controlado pela difusão da camada limite para a superfície sólida (difusão externa) ou pela difusão intrapartícula (Hernandez-Abreu et al., 2020).

Além disso, os mecanismos de sorção de poluentes orgânicos como o BPA, incluem principalmente interações eletrostáticas, interações  $\pi$ - $\pi$ , ligações de hidrogênio e interações hidrofóbicas. As interações  $\pi$ - $\pi$  ocorrem como um mecanismo primário no processo de sorção do BPA. As interações eletrostáticas, sofrem influências das cargas do adsorbato e adsorvente e do pH da solução, podendo auxiliar no processo de sorção, no caso de serem interações atrativas, ou diminuir a sorção, se forem interações repulsivas (Ndagijimana et al., 2019).

Em relação ao adsorvente, tem-se que, para valores de pH inferiores ao ponto de carga zero (PCZ), a superfície apresenta carga positiva, ao contrário, se o valor de pH for maior que o PCZ, a superfície apresenta carga negativa (McBride, 1994; Sparks, 2003). O PCZ é definido como o pH em que a carga líquida da superfície é igual a zero.

O BPA ( $pK_a = 9,59-11,30$ ) é uma molécula neutra, que sofre duas desprotonações entre pH 9,6 e 10,2. Porém, essas desprotonações podem começar a ocorrer em pH 8 e 9.

Assim, em valores de pH acima de 9,0, o BPA apresenta carga negativa, pois se encontra na forma desprotonada (Ndagijimana et al., 2019).

Quando a superfície (adsorvente) possui a mesma carga do adsorvato, as interações eletrostáticas são repulsivas e quando adsorvente e adsorvato apresentam cargas opostas, ocorrem interações atrativas. O que explica os resultados obtidos por Ahamad et al. (2019) e Ndagijimana et al. (2019). Ahamad et al. (2019) observaram a diminuição da sorção quando o pH da solução aumentou de 7 para 10, o que pode ser explicado devido à formação de bisfenolato, íon aniônico, resultando em repulsão eletrostática. Além de que, valores elevados de pH podem enfraquecer as interações hidrofóbicas e as ligações de hidrogênio (Sun et al., 2019; Hernández-Abreu et al., 2021).

Ndagijimana et al. (2019) em seus estudos de adsorção do BPA em carvão ativado com estrutura núcleo-casca (CSAC), observaram uma estabilidade na porcentagem de sorção na faixa de pH entre 2,0 e 7,0, seguida de um decréscimo a partir de pH 8,0. O que pode ser explicado pelo efeito de carga. Segundo esses autores, quando o pH da solução é igual ao PCZ (1,88), possivelmente são favorecidas as interações  $\pi - \pi$ , visto que, nesse caso a carga da superfície é zero. Na faixa de pH entre 2,0 e 7,0, grande parte do BPA ainda se encontra na forma molecular, ocorrendo adsorção possivelmente pela interação de van der Waals, propriedades hidrofóbicas e interação de dispersão  $\pi - \pi$ . Em pH inferior a 1,88, o adsorvente é positivamente carregado, enquanto o BPA se encontra na sua forma neutra, indicando que a adsorção ocorre por ligações de hidrogênio e/ou interações de Van der Waals. E, em valores de pH acima de 8,0 tanto o adsorvente, como o BPA estão na forma aniônica. Portanto, tem-se interações eletrostáticas repulsivas que resultam na diminuição da capacidade de sorção.

Desta forma, o BPA apresenta melhor capacidade de sorção entre pH ácido e neutro e levemente básico, que se deve ao fato do BPA ser uma molécula neutra nessa faixa de pH. Como observado por Haciosmanoğlu et al. (2019), Hao et al. (2019), Luo et al. (2019) e Jeong et al. (2020), que obtiveram melhor capacidade de sorção entre pH 3,0 e 8,0. Entre pH 2,0 e 7,0 foram observados melhores capacidades de sorção em Zhou et al. (2016), Ahamad et al. (2019), Ndagijimana et al. (2019), Sun et al. (2019) e Hernández-Abreu et al. (2021) para o sorvente KLP, enquanto, apenas Huang et al. (2019), Jeong et al. (2020) e Hernández-Abreu et al. (2021), para o sorvente RFX, apresentaram melhor capacidade de sorção em pH ácido e até pH 10,0, e Koduro et al. (2016) obteve melhor capacidade de sorção entre pH 3,0 e 12,0, concluindo que o pH não afetou significativamente o processo de sorção, utilizando o carvão ativado funcionalizado com óxido de ferro, como sorvente.

Com relação ao efeito da temperatura, Koduro et al. (2016), Ahamad et al. (2019), Haciosmanoğlu et al. (2019), Heo et al. (2019), Ndagijimana et al. (2019) e Sun et al. (2019) descreveram o processo de sorção do BPA como endotérmico, portanto, a capacidade de sorção do poluente, aumenta com o aumento da temperatura. O que ocorre devido ao aumento da interação entre o sorvato e a superfície do sorvente. O que também pode ocorrer é o aumento no tamanho dos poros e a formação de novos sítios ativos devido ao aumento da temperatura (Ndagijimana et al., 2019).

Entretanto, Hao et al. (2019), Luo et al. (2019) e Jeong et al. (2020) descreveram o processo de sorção do BPA como um processo exotérmico. De acordo com Luo et al. (2019), para sorventes como o  $\text{MoS}_2$ , o aumento da temperatura causou uma diminuição na capacidade de sorção, indicando que nesse caso o processo seria exotérmico, mesmo causando uma diminuição da viscosidade da solução e do tempo para atingir o equilíbrio de sorção.

### **Tempo necessário para atingir o equilíbrio químico no processo de sorção do BPA**

O equilíbrio de adsorção do BPA nos artigos selecionados foi adequado aos Modelos Isotérmicos de Langmuir, Freundlich, Dual-Site, Langmuir-Freundlich e Sips, visto que a isoterma de adsorção estabelece um equilíbrio entre a concentração da fase fluida e a concentração no adsorvente, em temperatura específica (Masel, 1996).

O equilíbrio é determinado por algumas características, como a natureza do sólido, os sítios ativos presentes, a distribuição de poros e a natureza do adsorbato, que incluem as suas interações, dipolo, forma e tamanho molecular (Masel, 1996).

O tempo necessário para atingir o equilíbrio de adsorção nos artigos selecionados variou entre 30 min e 48 h. Os trabalhos que levaram mais tempo para atingir o equilíbrio foram os artigos ID 6 (540 a 600 min) e ID 14, que levou 24 h para o sorvente RFX e 48 h para o sorvente KLP.

A maioria dos artigos apresentou tempo aproximado para obtenção do equilíbrio de adsorção, que variou entre 3 h e 6 h. Prete e Tarly (2019), que desenvolveram quatro sorventes diferentes utilizando polivinilpiridina, obtiveram equilíbrio de adsorção de 30 min para os sorventes polivinilpiridina/SiO<sub>2</sub> (2:1) e polivinilpiridina/SiO<sub>2</sub>/APTMS. Enquanto os artigos ID 1, 2, 3, 4, 5 e 12 levaram 3h20min, 5 h, 4 h, 5 h, 5 h e 4 h, respectivamente.

Entre os artigos que conseguiram atingir o equilíbrio de adsorção em menor tempo estão os ID 9, 10 e 11 com 2 h. Seguido do artigo ID 8, desenvolvido por Prete e Tarly (2019) que atingiu equilíbrio em 40 min para o sorvente polivinilpiridina/SiO<sub>2</sub>. Por último, pode-se citar os artigos ID 7 e 8 que atingiram equilíbrio em apenas 30 min, para os sorventes Biochar CuZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> magnético e polivinilpiridina.

### **Efeito da força iônica no processo de sorção do BPA**

A adsorção do BPA pode ser ligeiramente afetada pela força iônica, o que se deve a dois fatores, o efeito de triagem eletrostática e ao efeito *salting-out*. Primeiramente, ocorre o efeito chamado de efeito de triagem eletrostática da carga superficial, que é gerado pelo aumento da força iônica, o que facilita as interações entre o adsorbato e adsorvente (Ndagijimana et al., 2019).

Posteriormente, o aumento da força iônica gera o efeito *salting-out*, que causa uma diminuição da solubilidade do BPA, aumentando sua hidrofobicidade e consequentemente, sua sorção pelo adsorvente. Porém, o aumento da força iônica também pode causar o efeito de compressa, que seria a ocupação de sítios ativos do sorvente, impedindo a adsorção do BPA, como relatado por Ndagijimana et al. (2019).

Koduro et al. (2016), Zhou et al. (2016), Sun et al. (2019), Zhou et al. (2019) e Hernández-Abreu et al. (2021) também realizaram estudos de força iônica. Porém, diferentemente de Ndagijimana et al. (2019), ambos descreveram que a força iônica não teve influência significativa na capacidade de sorção do sorvente.

De acordo com Sun et al. (2019), a influência da força iônica na adsorção do BPA foi pouco significativa devido a molécula do BPA ser neutra nas condições testadas e a força iônica não pôde afetar a eletrônica do BPA. Desse modo, a adsorção de BPA em r-GO-CD foi estável sob diferentes concentrações de NaCl.

Além disso, apenas Sun et al. (2019) abordaram a aplicação ambiental. Concluindo que o sorvente estudado possui potencial para ser aplicado em sistemas de tratamento de água, baseado nos resultados obtidos nos estudos de força iônica, pH e regeneração dos sorventes.

### Estudos da cinética, isotermas de adsorção e informações sobre a capacidade de adsorção e regeneração dos adsorventes

Entre os tópicos analisados em cada artigo, encontram-se os estudos de cinética, isotermas de adsorção, a capacidade de sorção e a regeneração do adsorvente. A cinética de adsorção consiste na relação entre a taxa de remoção do poluente ou adsorbato do meio aquoso e o tempo (Alves, 2018).

O processo de remoção pode ocorrer pela transferência de massa externa, quando o adsorbato passa da fase líquida para a superfície do adsorvente. Quando ocorre a interpenetração dentro dos poros do adsorvente ou adsorção ao longo da superfície dos poros do adsorvente, o processo é chamado de difusão de moléculas. Quando a adsorção ocorre em fase aquosa, normalmente são utilizados os modelos de pseudoprimeira ordem, pseudosegunda ordem e o modelo de difusão intrapartícula (Alves, 2018).

As isotermas de adsorção possibilitam determinar a capacidade de adsorção do sorvente e representam o equilíbrio entre o adsorbato na fase fluida e nas partículas do adsorvente, em temperatura específica. No processo de adsorção, o poluente possui tendência em sair do meio aquoso para a superfície do sorvente, até atingir uma concentração constante de soluto na fase aquosa. Com o sistema em equilíbrio é possível determinar a capacidade de adsorção do sorvente utilizado (Haro, 2013).

Informações sobre a cinética de sorção, isotermas que melhor se ajustaram para cada sorvente, assim como a capacidade de sorção e quantidade de ciclos de regeneração, são apresentadas na Tabela 3.

**Tabela 3.** Principais informações sobre o processo de sorção do BPA, com cada sorvente.

ID	Concentração inicial de BPA	Isoterma	Capacidade de sorção	Regeneração
1	100 mg.L <sup>-1</sup>	Freundlich	GPAC15: 42,8 mg.g <sup>-1</sup> GPAC30: 45,7 mg.g <sup>-1</sup> GPAC45: 52,7 mg.g <sup>-1</sup>	Não apresenta ciclos
2	2 mg.L <sup>-1</sup>	Langmuir	23,1 mg.g <sup>-1</sup>	Não apresenta ciclos
3	10 a 400 mg.L <sup>-1</sup>	Langmuir	83,0 mg.g <sup>-1</sup>	80% de eficácia após cinco ciclos
4	1 a 280 mg.L <sup>-1</sup>	Sips	126,6 mg.g <sup>-1</sup>	Eficácia diminuiu 28,6% após o terceiro ciclo
5	0,01 a 1 mg.L <sup>-1</sup>	Langmuir	380,2 mg.g <sup>-1</sup>	Eficácia acima de 90% após cinco ciclos
6	100 mg.L <sup>-1</sup>	Freundlich	28,50 mg.g <sup>-1</sup>	Seis ciclos de regeneração
7	1 a 80 mg.L <sup>-1</sup>	Langmuir	263,2 mg.g <sup>-1</sup>	Quatro ciclos de regeneração
8	25 a 350 mg.L <sup>-1</sup>	Dual-Site Langmuir Freundlich	Q <sub>e</sub> = 170,0 mg.g <sup>-1</sup> Q <sub>e</sub> = 232,0 mg.g <sup>-1</sup> Q <sub>e</sub> = 160,0 mg.g <sup>-1</sup> Q <sub>e</sub> = 295,0 mg.g <sup>-1</sup>	Não apresenta ciclos
9	10 a 250 mg.L <sup>-1</sup>	Langmuir	199,8 mg.g <sup>-1</sup>	Eficiente até o sexto ciclo, onde os valores de adsorção foram 99,5%, 95,8%, 80,1% e 21,9%
10	25 a 350 mg.L <sup>-1</sup>	Langmuir	164,4 mg.g <sup>-1</sup>	Eficácia de remoção do BPA foi de 98,1% após cinco ciclos
11	20 mg.L <sup>-1</sup>	Langmuir	25,9 mg.g <sup>-1</sup>	Não apresenta ciclos

**Tabela 3.** Principais informações sobre o processo de sorção do BPA, com cada sorvente.

ID	Concentração inicial de BPA	Isoterma	Capacidade de sorção	Regeneração
12	10 a 100 mg.L <sup>-1</sup>	Langmuir	285,0 mg.g <sup>-1</sup>	Sete ciclos de regeneração
13	20 a 100 mg.L <sup>-1</sup>	Langmuir	238,0 mg.g <sup>-1</sup>	Não apresenta ciclos
14	100 mg.L <sup>-1</sup>	Langmuir (DSL)	KLP: 220,0mg.g <sup>-1</sup> RFX: 78,0mg.g <sup>-1</sup>	Não apresenta ciclos

O Modelo de Isoterma de Langmuir baseia-se na sorção em monocamada. Sua curva inicial é voltada para baixo, o que demonstra que a disponibilidade dos sítios ativos dá-se pelo aumento da concentração na solução. Já o Modelo de Freundlich reconhece que a sorção dá-se em multicamadas. Além de poder ser aplicado em meio adsorvente de superfície heterogênea, que apresenta diferente distribuição de energia e de calor nos sítios de adsorção (Alves, 2018).

Entre as isotermas utilizadas nos artigos selecionados, estão os Modelos de Freundlich, Langmuir, Dual-Site, Langmuir-Freundlich e Sips. Porém, a Isoterma de Langmuir adaptou-se melhor aos resultados obtidos, com exceção para os artigos ID 1, 4, 6 e 8.

Em relação aos grupos funcionais presentes nos sorventes, os que se ajustaram melhor a isoterma de Langmuir, possuem os grupos hidroxila, carboxila, carbonila e amina, exceto para o sorvente de carvão ativado por KLP e o xerogel de carbono, desenvolvido por Hernández-Abreu et al (2021), que apresenta grupos anidridos, fenólicos e lactonana.

Outro ponto importante é a influência da concentração inicial de BPA. Haciosmanoğlu et al. (2019), Heo et al. (2019), Prete e Tarly (2019), Ahamad et al. (2019), Zhou et al. (2019), Hao et al. (2019) e Jeong et al. (2020) realizaram estudos com diferentes concentração inicial de BPA, sendo de 1 a 280 mg.L<sup>-1</sup>, 1 a 80 mg.L<sup>-1</sup>, 25 a 350 mg.L<sup>-1</sup>, 10 a 250 mg.L<sup>-1</sup>, 25 a 350 mg.L<sup>-1</sup>, 10 a 100 mg.L<sup>-1</sup> e 20 a 100 mg.L<sup>-1</sup>, respectivamente. A variação das concentrações de BPA auxilia nos estudos de aplicação do sorvente em grande escala, visto as diferentes concentrações que podem ser encontradas nos sistemas de tratamento de água. Tornando-se necessário observar o comportamento do sorvente e a sua capacidade de sorção em pequenas e grandes concentrações (Zhou et al., 2016; Prete e Tarly, 2019).

Com o aumento da concentração inicial de BPA pode ocorrer uma diminuição da capacidade de sorção, que se deve a insuficiência de sítios ativos causados pelo aumento da concentração inicial de adsorbato (Ndagijimana et al., 2019). Mas de acordo com a Tabela 3, podem ser observados trabalhos que obtiveram baixas capacidades de sorção, utilizando pequenas concentrações iniciais de BPA, por exemplo, os artigos ID 2 e 11, com concentração inicial de 2 mg.L<sup>-1</sup> e 20 mg.L<sup>-1</sup>, respectivamente.

Além dos estudos de isotermas e a influência das concentrações iniciais de BPA analisou-se os estudos cinéticos e observou-se que todos os trabalhos apresentaram melhor adaptação dos resultados ao modelo cinético de pseudo segunda ordem, o que pode ser justificado pelo grande número de sítios ativos nos sorvente utilizados (Ndagijimana et al., 2019).

As melhores capacidades de sorção foram para os artigos identificados como 5 (380,2 mg.g<sup>-1</sup>), 8 (295 mg.g<sup>-1</sup>), 12 (285 mg.g<sup>-1</sup>) e 7 (263,2 mg.g<sup>-1</sup>). Os adsorventes estudados em cada artigo foram o adsorvente tridimensional (3D) de aerogel de óxido de grafeno reduzido-β-ciclodextrina (r-GO-CD), Polivinilpiridina, adsorvente de estrutura orgânica covalente contendo nitrogênio, Pytta-Dva-COF e Biochar CuZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> magnético, respectivamente.

Enquanto as menores capacidades de sorção foram para os artigos identificados como 1 (42,8 mg.g<sup>-1</sup>), 2 (23,0947 mg.g<sup>-1</sup>), 6 (28,50 mg.g<sup>-1</sup>) e 11 (25,94 mg.g<sup>-1</sup>). Os adsorventes estudados em cada artigo foram carvão ativado funcionalizado com óxido de ferro (goethita), material funcional Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> revestido com polianilina (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@PANI), carvão ativado com estrutura núcleo casca (CSAC) e MoS<sub>2</sub> materiais com diferentes morfologias.

Entre os artigos que apresentaram menor capacidade de sorção, o sorvente carvão ativado funcionalizado com óxido de ferro (goethita) possui grupos funcionais semelhantes aos sorventes que apresentaram maior capacidade de sorção, como grupos hidroxila e carboxila. Não sendo possível fazer uma relação entre os grupos funcionais e a capacidade de sorção do adsorvente. Mesmo que o material funcional Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> revestido com polianilina (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@PANI) possua grupos funcionais como amina, benzeno e amino, os quais não são comuns para os outros sorventes.

O adsorvente tridimensional (3D) de aerogel de óxido de grafeno reduzido-β-ciclodextrina (r-GO-CD), apresentou alta capacidade de sorção (308,2 mg.g<sup>-1</sup>), 90% de eficácia após cinco ciclos de regeneração e atingiu equilíbrio de adsorção em 5 h, sendo assim, aparentemente, um dos mais vantajosos em relação aos demais sorventes. Seguido do adsorvente de Polivinilpiridina que não apresentou estudos de regeneração, mas apresentou alta capacidade sorção (295,0 mg.g<sup>-1</sup>), e do sorvente Pytta-Dva-COF (285,0 mg.g<sup>-1</sup>) que apresentou sete ciclos de regeneração, porém, sua capacidade de sorção caiu para 14% em relação ao primeiro ciclo.

A análise da área de superfície específica (SSA) sugeriu que o composto r-GO-CD possui uma estrutura porosa melhorada, com espaços porosos na média de 2-10 nm, com um diâmetro de 6,3 nm. Enquanto o seu processo de automontagem foi relacionado como um colchão de molas, em que as nanofolhas duras de óxido de grafeno (GO) seriam o colchão e os polímeros β-CD macios seriam as molas. Portanto, o sorvente possui dureza combinada com suavidade, o que evitou o empilhamento de nanofolhas de GO, melhorando sua flexibilidade, sendo possível obter um aerogel poroso e estável, o que proporcionou excelente superfície para remover BPA em diferentes concentrações.

Além disso, o r-GO-CD é formado por β-ciclodextrina, que é uma espécie de maltooligosacarídeos cíclicos, formada por amido, através da ação da enzima microbiana ciclodextrinaglicosiltransferase (CGTase) que transforma o amido em diferentes tipos de ciclodextrina. A β-ciclodextrina é formada por sete unidades de D-glicose que se unem através de ligações -1,4, resultando em uma estrutura macrocíclica. O que possibilita a formação de complexos com moléculas hidrofóbicas, devido a esse arranjo resultar em uma superfície externa de caráter hidrofílica e uma cavidade hidrofóbica (Cucolo, 2009).

Em relação ao preparo do adsorvente tridimensional (3D) de aerogel de óxido de grafeno reduzido-β-ciclodextrina (r-GO-CD) é necessário sintetizá-lo em etapas, o que demanda um pouco de tempo. Inicialmente se prepara o óxido de grafeno (GO), na sequência o aerogel r-GO e por último o aerogel composto r-GO-DC. Sendo necessário no final da etapa, um congelamento de 48 h, para formar o r-GO.

Já o adsorvente de Polivinilpiridina é um polímero híbrido originado por meio de compostos orgânicos e inorgânicos, que consegue obter a estabilidade térmica e química dos materiais inorgânicos e ao mesmo tempo obter a flexibilidade e funcionalidade de polímeros orgânicos, resultando em um sorvente estável em ampla faixa de pH e com diferente grau de hidrofiliidade. Além do mais, neste caso a adsorção do BPA se deve aos grupos funcionais do monômero 4-vinilpiridina (4-VP), utilizado no desenvolvimento da polivinilpiridina. Desse modo, quanto maior a proporção de 4-VP no sorvente, maior a capacidade de sorção e menor tempo para atingir o equilíbrio de adsorção, o que se deve ao aumento de sítios ativos (Prete e Tarly, 2019).

Enquanto o sorvente Pytta-Dva-COF foi desenvolvido por meio de reação térmica de solvente, formando ligações duplas entre carbono e nitrogênio, possibilitando ao

sorvente atingir alta capacidade de sorção e sete ciclos de regeneração, que tiveram uma diminuição na capacidade de sorção conforme o aumento no número de ciclos.

Portando, entre os sorventes apresentados, o adsorvente tridimensional (3D) de aerogel de óxido de grafeno reduzido- $\beta$ -ciclodextrina (r-GO-CD), o adsorvente de estrutura orgânica covalente contendo nitrogênio: Pytta-Dva-COF e o adsorvente de polivinilpiridinase destacam entre os sorventes analisados neste trabalho. Entre eles, apenas o adsorvente de polivinilpiridina não apresenta estudos sobre a capacidade de regeneração, enquanto o adsorvente tridimensional (3D) de aerogel de óxido de grafeno reduzido- $\beta$ -ciclodextrina (r-GO-CD) obteve 90% de eficácia mesmo após cinco ciclos de recuperabilidade e o sorvente Pytta-Dva-COF teve uma diminuição de até 14% na sua capacidade de sorção em até sete ciclos de regeneração.

## Conclusão

De maneira geral, os resultados obtidos pelos autores foram melhores ajustados ao modelo cinético de pseudosegunda ordem e ao Modelo de Isotermas de Langmuir. Enquanto as melhores condições experimentais para a sorção de BPA foram encontradas entre pH 2,0 e 8,0, devido as desprotonações sofridas pelo poluente em pH acima de 8,0, o que ocasiona repulsão eletrostática. Também se analisou a influência da temperatura, observando que a maioria dos trabalhos descreveu a adsorção do BPA como um processo endotérmico, enquanto três autores descreveram como um processo exotérmico. Além disso, estudos realizados sobre a força iônica não demonstraram influência significativa na capacidade de sorção, exceto para Ndagijimana et al. (2019).

O sorvente que apresentou os melhores resultados foi o adsorvente tridimensional (3D) de aerogel de óxido de grafeno reduzido- $\beta$ -ciclodextrina (r-GO-CD) com capacidade sorção de 380,2 mg/g, com 90% de eficácia em até cinco ciclos de regeneração, e possibilidade de aplicação em grande escala.

Algumas informações importantes não foram relatadas nos artigos, como fatores econômicos para o desenvolvimento dos sorventes. Além de explicações mais aprofundadas sobre a aplicação do sorvente em sistemas de tratamento de água, por exemplo, quando aplicar, em qual etapa do tratamento e quais processos precisam ser realizados inicialmente.

Desse modo, pesquisas futuras podem ser desenvolvidas de modo a suprir as lacunas encontradas durante o desenvolvimento desse trabalho. Levando em consideração as possibilidades de aplicação dos sorventes desenvolvidos e as interações que podem sofrer em sistemas de tratamento de água.

## Conflito de interesses

As autoras declaram não haver conflito de interesses.

## Referências

- Ahamad, T.; Naushad, M.; Ruksana, Alhabarah, A. N.; Alshehri, S. M. N/S doped highly porous magnetic carbon aerogel derived from sugarcane bagasse cellulose for the removal of Bisphenol-A. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 132, p. 1031-1038, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.04.004>
- Almeida, S.; Raposo, A.; Gonzáles, M. A.; Carrascosa, A. Bisphenol A: Food exposure and impact on human health. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 17, p. 1503-1517, 2018. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12388>



Alves, A. C. F. **Avaliação da remoção de Bisfenol-A por adsorção em carvão ativado produzido da borra de café**. Goiânia: Universidade Federal de Goiás, 2018. (Dissertação de mestrado).

Bernardo, P. E. M.; Navas, S. A.; Murata, L. T. F.; Alcântara, M. R. S. Bisfenol A: o uso em embalagens para alimentos, exposição e toxicidade: uma revisão. **Instituto Adolfo Lutz**, v. 74, n. 1, p. 1-11, 2015. <https://doi.org/10.53393/rial.2015.v74.33380>

Choong, C. E.; Ibrahim, S.; Brasirun, W. J. Mesoporous silica from batik sludge impregnated with aluminum hydroxide for the removal of Bisphenol A and Ibuprofen. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 541, 1217, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.01.071>

Costa, L. A. **Desenvolvimento e validação de metodologia de análise de Bisfenol A em amostras de águas naturais por CG-EM**. Campo Grande: Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, 2008. (Dissertação de mestrado).

Cucolo, G. R. **Produção de ciclodextrinas a partir de amidos de diferentes fontes vegetais e seu emprego na inclusão molecular de aroma cítrico**. Rio Claro: Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho", 2009. (Tese de doutorado).

Fontenele, E. G. P.; Martins, M. R. A.; Quidute, A. R. P.; Júnior, R. M. M. Contaminantes ambientais e os interferentes endócrinos. **Arquivo Brasileiro de Endocrinologia**, v. 54, n. 1, p. 6-16, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0004-27302010000100003>

Guerald, C. C. T. **Degração do Bisfenol A na presença de ácido tioglicólico: estudo da influência do parâmetros de processo em reator batelada com recirculação empregando-se o Processo Foto-Fenton**. São Caetano do Sul: Escola de Engenharia Mauá, 2014. (Dissertação de mestrado)

Haciosmanoğlu, G. G.; Doğruel, T.; Genç, S.; Oner, E. T.; Can, Z. S. Adsorptive removal of Bisphenol A from aqueous solutions using phosphonatedlevan. **Journal of Hazardous Materials**, v. 374, p. 43-49, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.04.015>

Hao, J.; Zhang, Q.; Liu, Y.; Chen, P.; Zheng, X.; Zhuang Liu, H.; Liuma, G.; Lv, W. A novel nitrogen-containing covalent organic framework adsorbent for the efficient removal of Bisphenol A from aqueous solution. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 113, p. 204-213, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2020.08.016>

Haro, N. K. **Remoção de Bisfenol A por adsorção**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013. (Dissertação de mestrado).

Heo, J.; Yoon, Y.; Lee, G.; Kim, Y.; Min, J. H. P. C. Enhanced adsorption of Bisphenol A and Sulfamethoxazole by a novel magnetic CuZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-biochar composite. **Bioresource Technology**, v. 281, p. 179-187, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.02.091>

Hernández-Abreu, A. B.; Alvarez-Torrellas, S.; Rocha, R. P.; Pereira, M. F. R.; Agueda, V. I.; Delgado, J. A.; Larriba, M.; García, J.; Figueiredo, J. L. Enhanced removal of the endocrine disruptor compound Bisphenol A by adsorption onto green-carbon materials. Effect of real effluents on the adsorption process. **Journal of Environmental Management**, v. 266, 110604, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110604>

Hernández-Abreu, A. B.; Alvarez-Torrellas, S.; Rocha, R. P.; Pereira, M. F. R.; Agueda, V. I.; Delgado, J. A.; Larriba, M.; García, J.; Figueiredo, J. L. Effective adsorption of the endocrine disruptor compound Bisphenol A from water on surface-modified carbon materials. **Applied Surface Science**, v. 552, 149513, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.149513>

- Huanga, W.; Hu, Y.; Li, Y.; Zhou, Y.; Niu, D.; Lei, Z.; Zhang, Z. Citric acid-crosslinked  $\beta$ -cyclodextrin for simultaneous removal of Bisphenol A, methylene blue and copper: The roles of cavity and surface functional groups. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 82, p. 189-197, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2017.11.021>
- Jeong, Y.; Cui, M.; Choi, J.; Lee, Y.; Kim, K.; Younggyu, F.; Khim, J. Development of modified mesoporous carbon (CMK-3) for improved adsorption of Bisphenol-A. **Chemosphere**, v. 238, 124559, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124559>
- Koduru, J. R.; Lingamdinne, L. P.; Singh, J.; Choo, K-H. Effective removal of Bisphenol A (BPA) from water using a goethite/activated carbon composite. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 466, p. 101-112, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.06.038>
- Luo, L.; Shi, M.; Zhao, S.; Tan, W.; Lin, X.; Wang, H.; Jiang, F. Hydrothermal synthesis of  $\text{MoS}_2$  with controllable morphologies and its adsorption properties for Bisphenol A. **Journal of Saudi Chemical Society**, v. 23 p. 762-773, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2019.01.005>
- Masel, R. I. **Principles of adsorption and reaction on solid surfaces**. Urbana: John Wiley & Sons, 1996. v. 3.
- McBride, M. B. **Environmental chemistry of soils**. New York: Oxford University Press, 1994.
- Menezes, A. M.; Longuini, M. D. **Degradação de Bisfenol A por fotocatalise heterogênea utilizando dióxido de titânio imobilizado em alginato**. Ponta Grossa: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017. (Monografia de graduação).
- Montagner, É. **Determinação de Bisfenol A em água: uma investigação na Cidade de Campo Grande-MS**. Araraquara: Universidade Estadual Paulista, 2010. (Tese de doutorado).
- Ndagijimana, P.; Liu, X.; Li, Z.; Yu, G.; Wang, Y. Optimized synthesis of a core-shell structure activated carbon and its adsorption performance for Bisphenol A. **Science of the Total Environment**, v. 689, p. 457-468, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.235>
- Prete, M. C.; Tarley, C. R. T. Bisphenol A adsorption in aqueous medium by investigating organic and inorganic components of hybrid polymer (polyvinylpyridine/ $\text{SiO}_2$ /APTMS). **Chemical Engineering Journal**, v. 367, p. 102-114, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.02.133>
- Saleh, T. A.; Tuzen, M.; Sari, A. Magnetic vermiculite-modified by poly(trimesoyl chloride-melamine) as a sorbent for enhanced removal of Bisphenol A. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 7, 103436, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103436>
- Santana, F. S. **Isolamento de bactérias degradadoras do Bisfenol A do Sistema Estuarino de Santos**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2018. (Dissertação de mestrado).
- Senci, R. A. **Efeitos do Bisfenol A: um desregulador endócrino**. Assis: Instituto Municipal de Ensino Superior de Assis, 2015. (Monografia de graduação).
- Sparks, D. L. **Environmental soil chemistry**. USA: Elsevier Science, 2003.

Sun, Z.; Zhaob, L.; Liu, C.; Zhen, Y.; Zhang, W.; Ma, J. A novel 3D adsorbent of reduced graphene oxide- $\beta$ -cyclodextrin aerogel coupled hardness with softness for efficient removal of Bisphenol A. **Chemical Engineering Journal**, v. 372, p. 896-904, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.04.217>

Teleginski, L. **Determinação de Bisfenol A em água mineral armazenado em garrações de policarbonato**. Ponta Grossa: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016. (Monografia de graduação).

Zhou, O.; Wang, Y.; Xiao, J.; Fan, H. Adsorption and removal of Bisphenol A,  $\alpha$ -naphthol and  $\beta$ -naphthol from aqueous solution by  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ @Polyaniline core-shell nanomaterials. **Synthetic Metals**, v. 103, p. 87-96, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.06.038>

Zhou, Y.; Cheng, G.; Chen, K.; Lu, J.; Lei, J.; Pu, S. Adsorptive removal of Bisphenol A, chloroxylenol, and carbamazepine from water using a novel  $\beta$ -Cyclodextrin polymer. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 170, p. 278-285, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.11.117>



Informação da Licença: Este é um artigo Open Access distribuído sob os termos da Licença Creative Commons Attribution, que permite uso irrestrito, distribuição e reprodução em qualquer meio, desde que a obra original seja devidamente citada.