



REMOÇÃO DE BISFENOL-A POR ADSORÇÃO – ESTUDO DAS ISOTERMAS DE EQUILÍBRIO

N. K. Haro¹; O. Zanella¹; L. Dembogurski¹; L. A. Féris¹

1-Departamento de Engenharia Química – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Rua Engenheiro Luiz Englert, s/nº - Prédio 12204 – CEP: 90040-040 Porto Alegre - RS –
Brasil
Telefone: (51) 3308-4101– Fax: (51) 3308-3277– Email: nkharo@enq.ufrgs.br

RESUMO: O bisfenol-A (BPA), monômero usado na fabricação de resinas epóxi e de plásticos de policarbonato, é considerado um potente desregulador endócrino que pode provocar diversas doenças. O objetivo deste trabalho foi estudar a remoção de BPA de soluções aquosas através da técnica de adsorção utilizando carvão ativado granular como sólido sorvente. Ensaios de sorção visando encontrar as condições mais adequadas de processo foram realizados considerando o parâmetro tempo de residência. Ainda, isotermas de equilíbrio para este sistema foram construídas. Os dados obtidos mostraram que o tempo de residência que mais favorece o processo foi de 24 h. O modelo de isoterma de sorção que melhor se ajustou os dados experimentais foi o modelo de Sips, o qual forneceu uma acumulação máxima ($q_{máx}$) de 19,92 mg.g⁻¹ de BPA no sorvente.

PALAVRAS-CHAVE: remoção; adsorção; bisfenol-A; carvão ativado.

ABSTRACT: Bisphenol-A (BPA), a monomer used in the manufacture of epoxy resins and polycarbonate plastics is considered a potent endocrine disrupter which causes various diseases. The objective of this work was to study the removal of BPA from aqueous solutions by adsorption technique using granular activated carbon as solid sorbent. Sorption tests were performed aiming to find the best process conditions considering the parameter residence time. Still, equilibrium isotherms for this system were constructed. According to the results of sorption tests, the residence time where the best results were obtained in the process was 24 h. The sorption isotherm model that best fit the experimental data was the Sips model, which provided the maximum accumulation ($q_{máx}$) of 19.92 mg.g⁻¹ of BPA in the sorbent.

KEYWORDS: removal; adsorption; bisphenol-A; activated carbon.

1. INTRODUÇÃO

Numerosos produtos químicos, naturais e sintetizados, podem interferir no sistema endócrino e produzir efeitos adversos em seres humanos e em animais. Estes produtos químicos são conhecidos como desreguladores endócrinos (EDs), sendo encontrados em muitos produtos de uso diário, incluindo alguns plásticos de garrafas, latas de alimentos, detergentes, retardadores de chama, alimentos, brinquedos, cosméticos e pesticidas (Rivas *et al.*, 2008). Os EDs podem simular ou inibir a ação dos hormônios naturais, levando a efeitos adversos na reprodução e desenvolvimento.

Nos homens, a exposição ao ED é associado a problemas de capacidade de reprodução e câncer testicular ou da próstata. Nas mulheres, a função endócrina anormal pode ser associada com aumento do risco de endometriose, cânceres do sistema reprodutivo e endócrino-relacionado, ovulação, função do ovário ou do ciclo menstrual prejudicadas.

Entre os EDs, o Bisfenol-A (BPA) tem recebido grande atenção devido ao seu uso generalizado (Dekant e Völkel, 2008). O bisfenol-A é utilizado para a produção de resinas epóxi e de plástico de policarbonato. Estes plásticos são usados em embalagens de alimentos e



de bebidas; as resinas são utilizadas como vernizes para revestimento de produtos metálicos tais como latas de alimentos, tampas de garrafas e tubos de abastecimento de água. Alguns polímeros utilizados no tratamento dental também contêm bisfenol-A. Este composto ocorre no ambiente como resultado do processo de lixiviação dos produtos finais manufaturados e, a partir deste, podendo estar presente nos vários compartimentos: ar, água, solo, sedimento e biota. Pelo fato do bisfenol-A ser bastante empregado nos processos industriais e também por participar das formulações de produtos de uso doméstico, suas principais fontes no meio ambiente são os efluentes industriais, os esgotos domésticos, bem como os lodos provenientes das estações de tratamento de esgoto (Ghiselli e Jardim, 2007). Yamamoto *et al.* (2001) relataram também a presença de BPA em lixiviados de aterros sanitários em concentrações superiores a 10 mg L^{-1} .

O tratamento de BPA tem sido investigado usando uma série de técnicas, entre as quais encontram-se a biodegradação utilizando bactérias (Yamanaka *et al.*, 2008), a coagulação combinada com adsorção (Joseph *et al.*, 2013), a osmose inversa (Bolong *et al.*, 2009), os processos oxidativos avançados como Fenton e sono-Fenton (Ioan *et al.*, 2005), a oxidação eletroquímica (Kuramitz *et al.*, 2001), a fotólise (Chen *et al.*, 2006) e ozonização (Lee *et al.*, 2003).

Outra alternativa técnica para remoção de EDCs é a adsorção. Por se tratar de um processo inespecífico as técnicas de sorção podem ser empregadas em amplos espectros de tratamento, mesmo quando a composição química da corrente não é completamente conhecida (Freeman, 1997). Do ponto de vista ambiental, as técnicas de sorção possuem grande aceitação devido à capacidade dos sólidos sorventes em remover efetivamente poluentes presentes em correntes gasosas ou líquidas.

Uma vasta gama de materiais sólidos tem sido aplicada em processos de separação. No entanto, as tecnologias atuais visam à redução de custos aliada à alta eficiência de operação. Estes sólidos podem ser utilizados uma única vez e descartados, ou utilizados de forma regenerativa em vários ciclos, tornando a técnica atraente e de baixo custo (Féris, 2001). Estudos reportam os adsorventes que estão sendo utilizados na remoção de BPA: carvão ativado em pó e os nanotubos de carbono (Joseph *et al.*, 2013), zeólitas modificadas

por surfactantes (Dong *et al.*, 2010), zeólitas hidrofóbicas (Tsai *et al.*, 2006). As vantagens da utilização de carvão ativado incluem a alta capacidade para remover uma grande variedade de contaminantes orgânicos dissolvidos e inorgânicos (Bautista-Toledo *et al.*, 2005; Corwin e Summers, 2011), sua grande área de superfície, da estrutura dos poros, e estabilidade térmica, o que melhora a sua capacidade para remover contaminantes de vários meios aquosos (Chingombe *et al.*, 2005).

O estudo do equilíbrio de adsorção permite estimar a capacidade do material para adsorver várias moléculas. Este estudo é feito pelas isotermas de adsorção que representam uma relação de equilíbrio entre a quantidade de material sorvido e a concentração na fase fluida a uma temperatura constante.

Um dos modelos teóricos de isotermas mais simples e que considera a sorção em monocamada é a isoterma de Langmuir (Equação 1) (Langmuir, 1918). Esse modelo foi desenvolvido para representar a sorção química em diferentes sítios de sorção. O modelo de Langmuir considera que: a energia de adsorção para cada molécula é igual e independente da cobertura superficial, de modo que a adsorção ocorre apenas em sítios localizados sem interação entre as moléculas adsorvidas; a adsorção das moléculas ocorre sob um número fixo, definido e localizado de sítios, todos energeticamente equivalentes, com capacidade de adsorver apenas uma molécula por vez, e sem que esta interaja com as demais adsorvidas pelos sítios vizinhos, o que equivale a considerar o mesmo calor de adsorção para todos os centros ativos da superfície.

$$q_e = \frac{q_{m\acute{a}x} \cdot K_L \cdot C_e}{1 + K_L \cdot C_e} \quad (01)$$

Onde: q_e quantidade sorvida no equilíbrio, expressa em $(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$; $q_{m\acute{a}x}$ constante de capacidade máxima de sorção, expressa em $(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$; K_L constante de energia de sorção, expressa em $(\text{L} \cdot \text{mg}^{-1})$; e C_e concentração do íon em equilíbrio, expressa em $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$.

A Isoterma de Freundlich (Equação 2) é a primeira descrição conhecida da relação não ideal e da adsorção reversível e não se restringe à formação de monocamada. Este modelo empírico pode ser aplicado a várias camadas de adsorção e com distribuição não uniforme de calor e a adsorção ocorre em superfícies heterogêneas (Adamson e Gast, 2007). É possível observar na



equação dessa isoterma que não há limite para a capacidade de sorção, pois a quantidade sorvida tende ao infinito quando a concentração da solução aumenta.

$$q_e = K_f \cdot C_e^{\frac{1}{n}} \quad (02)$$

Onde: q_e quantidade sorvida no equilíbrio, expressa em $(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$; K_f capacidade de sorção, expressa em $(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})(\text{L} \cdot \text{mg}^{-1})^{1/n}$; e C_e concentração do íon em equilíbrio, expressa em $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$. K_f e $1/n$ são parâmetros empíricos de Freundlich, que dependem de diversos fatores experimentais e se relacionam com a capacidade de sorção do sorvente e com a intensidade de sorção, respectivamente. O expoente $1/n$ fornece uma indicação se a isoterma é favorável ou desfavorável. Valores de $1/n$ no intervalo $0,1 < 1/n < 1$ representam condições de sorção favorável. Quanto mais próximo de 1 for o valor de $1/n$, mais favorável é o processo de sorção.

A isoterma de Sips (Equação 3) (Sips, 1948) é uma forma combinada das expressões de Langmuir e Freundlich deduzida para prever os sistemas de adsorção heterogênea e contornar a limitação da concentração de adsorbato crescente associado com o modelo da isoterma de Freundlich. Em baixas concentrações de adsorbato, a equação se reduz a isoterma de Freundlich, enquanto que em concentrações elevadas, o modelo prevê uma capacidade de adsorção em monocamada que é característica da isoterma de Langmuir (Foo e Hameed, 2010).

$$q_e = \frac{q_{\text{máx}} \cdot b \cdot C_e^\gamma}{1 + b \cdot C_e^\gamma} \quad (03)$$

Onde: q_e quantidade sorvida no equilíbrio, expressa em $(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$; $q_{\text{máx}}$ constante de capacidade máxima de sorção, expressa em $(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$; b constante de equilíbrio, expressa em $(\text{L} \cdot \text{mg}^{-1})$; C_e concentração do íon em equilíbrio, expressa em $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$, γ é o parâmetro que caracteriza a heterogeneidade do sistema. Se o valor de γ é igual a 1, então a equação será uma equação de Langmuir. Alternativamente, quando C_e ou b se aproximarem de 0, a equação se reduz a isoterma de Freundlich (Dwivedi *et al.*, 2011).

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo determinar as condições mais adequadas para o processo de sorção de BPA em

solução aquosa e obter a isoterma experimental de sorção para este composto.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Especificações dos Reagentes e dos Sorventes

Foi utilizado como sólido sorvente o carvão ativo comercial com granulometria entre 1,4 e 2 mm (Synth) e como sorvato bisfenol-A (Aldrich $\geq 99\%$).

2.2 Solução Sintética de Bisfenol-A

Foi preparada solução estoque de bisfenol-A ($\geq 99\%$ da marca Aldrich) de $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ em álcool metílico P.A. (Nuclear) devido a sua baixa solubilidade em água (Choi *et al.*, 2005). Esta solução estoque foi dissolvida em água destilada e deionizada na concentração de $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ e, a partir desta, foram obtidas as demais soluções utilizadas nos experimentos, realizando as diluições necessárias.

2.3 Ensaios de Sorção

Os ensaios de sorção foram realizados em frascos Schott de vidro de 250 mL com 100 mL de solução de BPA ($70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). Para cada ensaio, o sólido foi introduzido na solução e os parâmetros (pH, concentração de sólido sorvente e tempo de residência) foram aplicados.

2.3.1 Determinação do tempo de residência: Foram realizados experimentos variando o tempo de contato entre a solução de 100 mL de BPA ($70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) e $5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ de sólido sorvente. O pH utilizado foi 6, determinado em estudos anteriores (Haro, 2013). Os frascos foram agitados em tempos pré-determinados (0,08 a 48 h). Após, as soluções foram filtradas e analisadas.

2.3.2 Isotermas de sorção: Foram realizados experimentos de sorção variando a concentração de bisfenol-A na solução (5,0; 10,0; 20,0; 30,0; 40,0; 60,0; 80,0 e $100,0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). A concentração de sólido sorvente foi $5,0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, pH 6,0 e o tempo de sorção de 150 min para todos os ensaios. Os valores dos parâmetros e dos coeficientes de determinação (R^2) para as isotermas de sorção foram obtidos pelo método dos mínimos quadrados para regressão linear. Empregou-se o programa de planilha eletrônica da



Microsoft® - “Microsoft Office Excel 2010”®. Além disso, a validade dos modelos em reproduzir os dados experimentais foi pelo teste qui-quadrado (χ^2) e pelo desvio padrão amostral (s). Um pequeno valor de χ^2 indica suas semelhanças enquanto que um número maior representa a variação dos dados experimentais (Boulinguez *et al.*, 2008). Estes índices (χ^2 e s) são calculados pelas equações 4 e 5 respectivamente.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(q_{e,calc} - q_{e,exp})^2}{q_{e,exp}} \quad (04)$$

Onde: $q_{e,calc}$ é a quantidade de BPA sorvida no equilíbrio calculada pelo modelo e $q_{e,exp}$ é a quantidade de BPA sorvida no equilíbrio determinada experimentalmente.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (q_{e,exp} - q_{e,calc})^2}{n-1}} \quad (05)$$

Onde: $q_{e,calc}$ é a quantidade de BPA sorvida no equilíbrio calculada pelo modelo, $q_{e,exp}$ é a quantidade de BPA sorvida no equilíbrio determinada experimentalmente e n é o número de pontos experimentais.

2.4 Determinação da Concentração de BPA

A concentração de BPA foi determinada pelo método de espectrofotometria na região do ultravioleta no comprimento de onda de 225 nm (Ioan *et al.*, 2007). A remoção do bisfenol-A foi analisada através da diferença entre a concentração de BPA da solução inicial, e a solução final, já tratada com o sólido sorvente. As equações utilizadas para determinar a concentração de BPA em solução e a porcentagem de remoção estão representadas pelas equações 6 e 7:

$$C = \frac{A}{a} \quad (06)$$

Onde: C é concentração de BPA na amostra, A é absorbância a 225 nm e a coeficiente linear da curva padrão.

$$R = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100 \quad (07)$$

Onde: R é a porcentagem de remoção (%), C_i a concentração inicial e C_f a concentração final.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Determinação do tempo ótimo de sorção

Este estudo foi realizado objetivando determinar o tempo ótimo de residência para o carvão ativado usado na sorção de BPA em solução aquosa, utilizando os parâmetros pH 6,0 e 2,5 g.L⁻¹ de sólido. A Figura 1 apresenta o efeito do tempo de sorção na remoção de BPA.

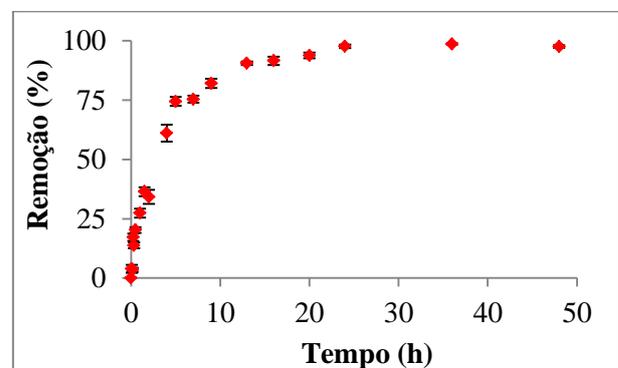


Figura 1. Efeito do tempo de sorção na remoção de BPA. Condições: pH 6,0, concentração de sólido sorvente 5 g.L⁻¹, 100 mL de solução com concentração inicial de 70 mg.L⁻¹ de BPA.

Pode ser observado na Figura 1 que a cinética de remoção de BPA é mais rápida até aproximadamente 10 h e, após esse tempo, a remoção de bisfenol-A cresce lentamente. Isto pode ser explicado por uma análise dos sítios ativos presentes na superfície do carvão (Zanella, 2012). Inicialmente têm-se todos os sítios ativos livres na superfície do carvão resultando em uma rápida sorção. Ao serem ocupados pelo sorbato, estes sítios livres tendem a diminuir, levando ao ponto de saturação do carvão. A saturação estabelece o equilíbrio entre a sorção e a dessorção do BPA no sorvente. É possível identificar também, pela Figura 1, que o equilíbrio foi atingido em 24 h de sorção onde a remoção atingida foi de 97%. Sendo assim, o tempo ótimo para sorção de BPA foi estabelecido em 24 h.



3.2 Determinação das isotermas de sorção

A isoterma de sorção representa a relação de equilíbrio existente entre o soluto na solução e o sorvato retido no sorvente, a uma determinada temperatura. Na Figura 2 está representada a curva q_e versus C_e com os dados experimentais para a sorção de bisfenol-A em solução aquosa por meio de carvão ativado granular utilizado no processo como sorvente.

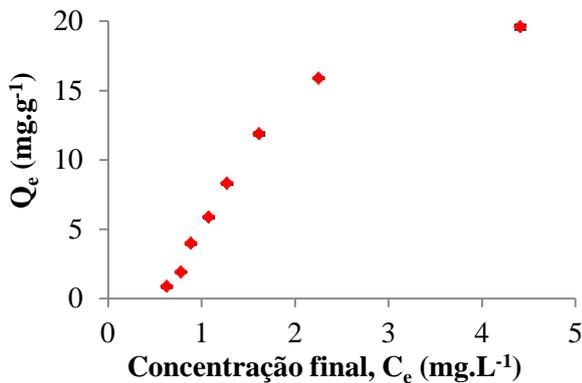


Figura 2. Isoterma de sorção de BPA em carvão ativado. Condições: pH 6,0, tempo de sorção 24 h, concentração de sólido sorvente 5 g.L⁻¹.

De acordo com a Figura 2 é possível verificar que a isoterma apresenta forma côncava em relação ao eixo C_e , indicando, conforme Giles *et al.* (1960) que a sorção é favorável. Nessa geometria, segundo Giles *et al.* (1960), a inclinação não aumenta com o aumento da concentração de soluto na solução, indicando alta afinidade do sorvente pelo soluto. Neste caso, geralmente as moléculas são sorvidas na superfície e, às vezes, apresentam atração intermolecular particularmente forte.

Através das isotermas de sorção é possível, de maneira qualitativa, estimar se a interação dos íons em solução com o sorvente é forte ou fraca, pela análise do formato da curva. Para uma análise quantitativa do processo de sorção, há necessidade de ajustar essa curva através de modelos matemáticos. Assim, com valores dos parâmetros fornecidos por esses modelos, pode-se realizar uma avaliação quantitativa dos dados do processo. Para este estudo, foram utilizados os modelos matemáticos de Langmuir, Freundlich e Sips.

A Figura 3 mostra a comparação entre os valores preditos pelos modelos das isotermas de Freundlich, Langmuir e Sips bem como os dados experimentais do equilíbrio de sorção do BPA.

Para prever se a sorção do BPA em solução aquosa foi favorável ou não, levou-se em consideração a forma da isoterma, os parâmetros estatísticos e os valores das constantes para cada modelo.

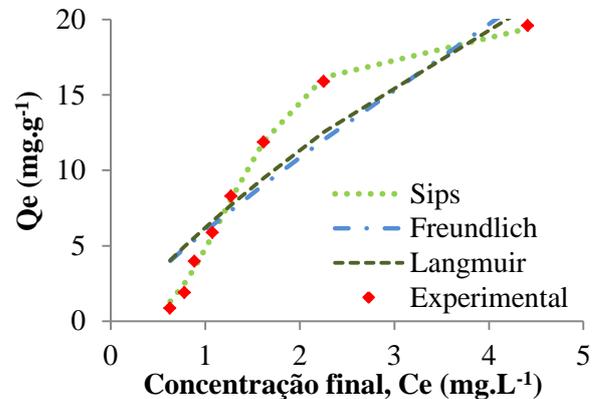


Figura 3. Comparação entre os valores preditos pelos modelos das isotermas de Langmuir, Freundlich e Sips e os dados experimentais de sorção de BPA em carvão ativado.

É possível verificar na Figura 3 que a isoterma de Sips foi o modelo que melhor se ajustou graficamente aos dados experimentais. Entretanto, é necessário analisar também os parâmetros e os dados estatísticos obtidos para cada isoterma (Langmuir, Freundlich e Sips) a fim de concluir qual o modelo que melhor se ajusta aos dados experimentais. Os valores estimados dos parâmetros das isotermas de Langmuir, Freundlich e Sips e os valores da análise estatística para a sorção do bisfenol-A em solução aquosa são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros das isotermas de Freundlich, Langmuir e Sips e análise estatística para a sorção de BPA em carvão ativado.

| | Freundlich | Langmuir | Sips |
|-------------------|------------|-------------------------|-------------------------|
| k_f | 5,957 | $q_{máx}$ 68,293 | $q_{máx}$ 19,923 |
| n | 1,156 | K_L 0,100 | b 0,698 |
| R^2 | 0,849 | R^2 0,870 | R^2 0,997 |
| s | 2,620 | s 2,430 | s 0,371 |
| Erro (χ^2) | 0,705 | Erro (χ^2) 0,606 | Erro (χ^2) 0,014 |

De acordo com o modelo de Freundlich, o equilíbrio nunca é atingido, uma vez que modelo é baseado em equações empíricas, onde não há limites para a capacidade de sorção com o aumento da concentração de sorvato na solução. Neste caso, devido ao fato dos experimentos não terem atingido o equilíbrio, este modelo pode explicar a



sorção no sistema estudado. De acordo com Giles *et al.* (1960), a análise do termo $1/n$ da equação de Freundlich indica que: quando $n > 1$, a curva q_e versus C_e apresentará forma côncava em relação ao eixo das abscissas, sendo assim, a isoterma é satisfatória à sorção; quando $n = 1$, q_e apresentará forma linear com a variação de C_e , este caso não foi observado experimentalmente nas condições aplicadas neste estudo; quando $n < 1$ a isoterma apresentará forma convexa em relação ao eixo das abscissas e é caracterizada como desfavorável.

Treybal (1981) demonstrou, através de cálculos matemáticos, que, quando n (constante empírica de Freundlich) está entre 1 e 10, a sorção será favorável. Portanto, o parâmetro n de Freundlich está relacionado com a intensidade da interação do sorbato com o sorvente. Como o valor de n obtido neste trabalho é igual a 1,156 (vide Tabela 1), o processo é favorável.

Considerando os valores obtidos de R^2 , desvio padrão (s) e erro experimental (χ^2) (vide Tabela 1) verifica-se que o modelo de Freundlich não se ajustou a nenhum dos parâmetros de forma satisfatória. Para o modelo de Freundlich, o valor do coeficiente de determinação (R^2) foi 0,849, desvio padrão de 2,620 e erro de 0,750.

Analisando os dados para a isoterma de Langmuir é possível verificar pela Tabela 1 que o modelo não representa de forma significativa e quantitativa um modelo matemático apropriado para os dados experimentais deste trabalho. Os dados obtidos pelo modelo de Langmuir foram 0,870; 2,430 e 0,606 para R^2 , s e χ^2 respectivamente. Ainda, é importante destacar que o valor de K_L (constante de energia de sorção ou afinidade) indica a afinidade entre o sorvente e o sorvato e, também, se o processo é favorável. Conforme demonstrado através de equações matemáticas por Langmuir (1918), K_L depende da massa molar do sorvato envolvido no processo de sorção, do tempo e temperatura do sistema bem como do número de espaços elementares por m^2 da superfície do sorvente, ou seja, o número de moléculas sorvidas não pode exceder o número de espaços elementares (sítios ativos), exceto pela formação de camadas adicionais.

A literatura indica que, de maneira geral, os valores da constante K_L para sorção de compostos orgânicos são menores que 1 L.mg^{-1} (Durson *et al.*, 2005; Bautista-Toledo *et al.*, 2005; Sui *et al.*, 2011; Da Luz, 2012). Logo, com base nos valores de K_L

obtidos por diversos autores, o valor de K_L igual a $0,100 \text{ L.mg}^{-1}$ obtido neste estudo indica boa afinidade e alta energia de sorção.

Os resultados obtidos mostram que o melhor ajuste aos dados experimentais foi dado pelo modelo de Sips, pois esse apresentou maior coeficiente de determinação (0,997), menor desvio em relação os dados experimentais (0,371) e menor erro (0,014) quando comparado aos modelos de Freundlich e Langmuir. Tal resultado indica que em baixas concentrações de BPA, os dados experimentais seguem a isoterma de Freundlich, enquanto que, para concentrações elevadas de BPA, a capacidade de adsorção ocorre em monocamada, o que caracteriza a isoterma de Langmuir. O valor de γ do modelo de Sips pode ser usado como um indicador da heterogeneidade de superfície. Esse parâmetro (γ) diminui com o aumento dessa heterogeneidade (Liu *et al.* 2010). O valor de γ maior que um sugere que sua superfície tornou-se mais homogênea, o que pode ser confirmado pelo melhor ajuste do modelo de Langmuir (R^2 igual a 0,870) do que o de Freundlich (R^2 igual a 0,849).

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram obtidos dados experimentais para sorção de bisfenol-A, empregando-se como sólido sorvente carvão comercial ativado com a finalidade de estudar o equilíbrio de adsorção através das isotermas de sorção.

De acordo com os resultados dos testes de sorção, o tempo de residência mais adequado encontrado foi 24 h, onde foram obtidos os melhores resultados no processo.

O melhor ajuste das isotermas foi obtido pelo modelo de Sips indicando que, para baixas concentrações de BPA, os dados experimentais seguem a isoterma de Freundlich, enquanto que para concentrações mais elevadas do adsorbato, os dados experimentais seguem a isoterma de Langmuir.

5. REFERÊNCIAS

ADAMSON, A. W.; GAST, A. P. *Physical Chemistry of Surfaces*. New York: John Wiley & Sons, 1997.



- BAUTISTA-TOLEDO, I.; FERRO-GARCÍA, M. A.; RIVERA-UTRILLA, J.; MORENO-CASTILLA, C.; VEGAS FERNÁNDEZ, F. J. Bisphenol a removal from water by activated carbon. Effects of carbon characteristics and solution chemistry. **Environ. Sci. Technol.**, v. 39, p. 6246–6250, 2005.
- BOLONG, N.; ISMAIL, A. F.; SALIM, M. R.; MATSUURA, T.A. Review of the effects of emerging contaminants in wastewater and options for their removal. **Desalination**, v. 239, p. 229–246, 2009.
- BOULINGUIEZ, B.; LE CLOIREC, P.; WOLBERT, D. Revisiting the determination of Langmuir parameters application to tetrahydrothiophene adsorption onto activated carbon. **Langmuir**, v. 24, p. 6420–6424, 2008.
- CHEN, P. J.; LINDEN, K. G.; HINTON, D. E.; KASHIWADA, S.; ROSENFELDT, E. J.; KULLMAN, S. W. Biological assessment of bisphenol a degradation in water following direct photolysis and UV advanced oxidation. **Chemosphere**, v. 65, p. 1094–1102, 2006.
- CHINGOMBE, P.; SAHA, B.; WAKEMAN, R. J. Surface modification and characterisation of a coal-based activated carbon. **Carbon**, v. 43, p. 3132–3143, 2005.
- CORWIN, C. J., SUMMERS, R. S. Adsorption and desorption of trace organic contaminants from granular activated carbon adsorbents after intermittent loading and throughout backwash cycles. **Water Res.**, v. 45, p. 417–426, 2011.
- Da LUZ, A. D. Aplicação de coluna de adsorção em leito fixo para a remoção de compostos BTX multicomponentes presentes em efluentes petroquímicos. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, 193 p., 2012.
- DEKANT, W.; VÖLKEL, W. Human exposure to bisphenol A by biomonitoring: methods, results and assessment of environmental exposures. **Toxicol. Appl. Pharm.**, v. 228, p. 114–134, 2008.
- DONG, YL.; WU, D.; CHEN, X.; LIN, Y. Adsorption of bisphenol A from water by surfactant-modified zeolite. **J. Colloid Interf. Sci.**, v. 348, p. 585–590, 2010.
- DURSUN, G.; ÇIÇEK, H.; DURSUN, A. Y. Adsorption of phenol from aqueous solution by using carbonised beet pulp. **J. Hazard. Mater.**, v. B125, p. 175–182, 2005.
- DWIVEDI, A. D.; DUBEY, S. P.; GOPAL, K., SILLANPÄÄ, M. Strengthening adsorptive amelioration: Isotherm modeling in liquid phase surface complexation of Pb (II) and Cd (II) ions. **Desalination**, v. 267, p. 25–33, 2011.
- FÉRIS, L.A. Aproveitamento de um subproduto do beneficiamento do carvão mineral na remoção de poluentes por sorção-flotação FAD. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 176p., 2001.
- FOO, K.Y.; HAMEED, B.H. Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. **Chem. Eng. J.**, v. 156, p. 2–10, 2010.
- FREEMAN, H. M. Standard Handbook of Hazardous Waste Treatment and Disposal. New York: McGraw-Hill, 1997.
- GHISELLI, G.; JARDIM, W. F. Interferentes endócrinos no ambiente. **Quim. Nova**, v. 30, n. 3, p. 695–706, 2007.
- GILES, C.H; MACEWANS, T.H; NAKHWA, N; SMITH, D. Studies in adsorption. Part XI. A system of classification of solution adsorption isotherms, and its use in diagnosis of adsorption mechanisms and in measurement of specific areas of solids. **J. Chem. Soc.**, p. 3973–3993, 1960
- HARO, N. K. Remoção de bisfenol-A por adsorção. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 120 p., 2013.
- IOAN, I.; WILSON, S.; LUNDANES, E.; NECULAI, A. Comparison of Fenton and sono-Fenton bisphenol A degradation. **J. Hazard. Mater.**, v. 142, p. 559–563, 2007.
- JOSEPH, L.; BOATENG, L. K.; FLORA, J. R.V.; PARK, Y.; SON, A.; BADAWY, M.; YOON, Y. Removal of bisphenol A and 17 α -ethinyl estradiol by combined coagulation and adsorption using carbon nanomaterials and powdered activated carbon. **Sep. Purif. Technol.**, v. 107, p. 37–47, 2013.
- KURAMITZ, H.; NAKATA, Y.; KAWASAKI, M.; TANAKA, S. Electrochemical oxidation of bisphenol a. Application to the removal of bisphenol A using a carbon fiber electrode. **Chemosphere**, v. 45, p. 37–43, 2001.



LANGMUIR, I. The adsorption of gases on plane surfaces on glass, mica and platinum. **J. AM. Chem. Soc.**, v. 40, p. 1361-1403, 1918.

LEE, J.; PARK, H.; YOON, J. Ozonation characteristics of bisphenol a in water. **Environ. Technol.**, v. 24, p. 241-248, 2003.

LIU, G.; MAB, J.; LI, X.; QINB, Q. Adsorption of bisphenol A from aqueous solution onto activated carbons with different modification treatments. **J. Hazard. Mater.**, v. 164, p. 1275-1280, 2009.

RIVAS, F. J.; ENCINAS, A.; ACEDO, B.; BELTRÁN, F. J. Mineralization of bisphenol A by advanced oxidation processes. **J. Chem. Technol. Biot.**, v. 84, n. 4, p. 589-594, 2008.

SIPS, R. Combined form of Langmuir and Freundlich equations. **J. Chem. Phys.**, v. 16, p. 490-495, 1948.

SUI, Q.; HUANG, J.; LIU, Y.; CHANG, X.; JI, G.; DENG, S.; XIE, T.; YU, G. Rapid removal of bisphenol A on highly ordered mesoporous carbon. **J. Environ. Sci.**, v. 23, p. 177-182, 2011.

TSAI, W. T.; HSU, H.; SU, T.; LIN, K.; LIN, C. Adsorption characteristics of bisphenol-a in aqueous solutions onto hydrophobic zeolite. **J. Colloid Interf. Sci.**, v. 299, p. 513-519, 2006.

YAMAMOTO, T.; YASUHARA, A.; SHIRAIISHI, H.; NAKASUGI, O. Bisphenol A in hazardous waste landfill leachates. **Chemosphere**, v. 42, p. 415-418, 2001.

YAMANAKA, H.; MORIYOSHI, K.; OHMOTO, T.; OHE, T.; SAKAI, K. Efficient microbial degradation of bisphenol a in the presence of activated carbon. **J. Biosci. Bioeng.**, v. 105, n. 2, p. 157-160, 2008.

ZANELLA, O. Sorção de nitrato em carvão ativado tratado com CaCl_2 : estudo de ciclos de sorção/regeneração. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do SUL, 135 p., 2012.