

ADSORÇÃO DE FENÓIS EM LEITO FIXO DE CARVÃO ATIVADO GRANULAR

Danielle Lacerda Lupetti Ferraz¹, Antonio Carlos Luz Lisboa²

1. Mestranda em Engenharia Química no Departamento de Termofluidodinâmica da Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP (daniellelupetti@hotmail.com)
2. Professor doutor no Departamento de Termofluidodinâmica da Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP. Campinas – Brasil

Data de recebimento: 02/05/2011 - Data de aprovação: 31/05/2011

RESUMO

O aumento do uso dos derivados de petróleo faz com que aumente a capacidade de produção destes derivados e, como consequência, é gerado cada vez mais volume de efluente oriundo do processamento do petróleo, em que os fenóis (fenol, m-cresol, o-cresol, 3,4 dimetilfenol e 2 etilfenol) são os contaminantes que apresentam maior periculosidade nesse efluente. Estudos no campo de tecnologia ambiental têm buscado encontrar processos alternativos para o tratamento de efluentes industriais, entre eles a adsorção. Levando em conta esse aspecto, neste trabalho foi estudado a adsorção do efluente água fenólica (fenóis) por carvão ativado granular em leito fixo. Os carvões ativados utilizados de granulometria 0,605 e 0,855 mm foram dotados de CAG1 e CAG2 respectivamente. Já a coluna de leito fixo construída em vidro possui 28 cm de altura e 1,4 cm de diâmetro interno. Então, para estudo da adsorção foram utilizados conhecimentos referentes às técnicas e métodos de adsorção, ou seja, a caracterização do adsorvente e o conhecimento da dinâmica de adsorção dos componentes em um sistema experimental. As caracterizações dos adsorventes realizadas foram: distribuição granulométrica, densidade real (CAG1 = $1,97 \text{ gcm}^{-3}$; CAG2 = $2,06 \text{ gcm}^{-3}$), densidade *bulk* (CAG1 = $0,49 \text{ gcm}^{-3}$; CAG2 = $0,48 \text{ gcm}^{-3}$), umidade (CAG1 = 7,85%_{mássica}; CAG2 = 8,73%_{mássica}) e pH (CAG1 = 7,77; CAG2 = 7,21). Foi estudado o efeito da vazão de alimentação e a granulometria do carvão ativado pela análise da zona de transferência de massa, nos níveis 0,605 e 0,855 mm para o carvão e de 4 mLmin^{-1} e 10 mLmin^{-1} para a vazão na coluna, mantendo fixo a concentração de fenóis 7600 ppm e pH do efluente igual a 12. Resultados obtidos pelo estudo mostraram que a adsorção de fenóis utilizando carvão ativado granular apresentou boas eficiências, em que a melhor vazão de operação para o processo, ou seja, aquela que apresenta menores resistências difusionais no leito, foi de 4 mLmin^{-1} . Já a adsorção de fenóis sobre os carvões ativados estudados para as diferentes granulometrias não apresenta grande influência no processo e, com isso, pode-se estimar que a difusão nos macroporos do adsorvente não é a etapa limitante para esse processo. A capacidade de adsorção de fenóis por unidade de massa de carvão ativado até o ponto de ruptura e saturação do leito foram $42,6 \text{ mgg}^{-1}$ e $133,6 \text{ mgg}^{-1}$ respectivamente para condição de vazão 4 mLmin^{-1} , granulometria do adsorvente 0,855 mm, pH=12 e concentração de 7600 ppm do efluente.

PALAVRAS-CHAVE: remoção de fenóis, adsorção, carvão ativado, leito fixo.

ADSORPTION OF PHENOL BY GRANULAR ACTIVATED CARBON FIXED BED

ABSTRACT

The increasing use of petroleum derivative lead to increased production capacity of these derivatives and, consequently, it generated more volume of effluent coming from the processing of petroleum, in which the phenols (phenol, m-cresol, o- cresol, 3,4 dimethylphenol e 2 ethylphenol) are one of the most hazardous contaminants present in wastewater. Studies in the field of environmental technology have tried to find alternative processes for industrial wastewater treatment, including adsorption. Taking this into account, this research studied the adsorption of phenolic water effluent (phenols) by granular activated carbon fixed bed. The activated carbons used for particle size 0,605 0,855 mm and were named with CAG1 and CAG2 respectively. Already a fixed bed column has built in glass 28 cm in height and 1,4 cm in diameter. So to study the adsorption were used knowledge regarding techniques and methods of adsorption, ie, the characterization of the adsorbent and the knowledge of the dynamics of adsorption of components in an experimental system. The characterization of the adsorbents were: particle size distribution, real density (CAG1 = $1,97 \text{ gcm}^{-3}$; CAG2 = $2,06 \text{ gcm}^{-3}$), bulk density (CAG1 = $0,49 \text{ gcm}^{-3}$, CAG2 = $0,48 \text{ gcm}^{-3}$), moisture (CAG1 = 7,85% by weight; CAG2 = 8,73% by weight) and pH (CAG1 = 7,77; CAG2 = 7,21). It was studied the effect of feed rate and particle size of activated carbon for the analysis of the area of mass transfer at the levels 0,605, and 0,855 mm for carbon and 4 mLmin^{-1} and 10 mLmin^{-1} for flow in the bed, maintaining fixed concentration of 7600 ppm phenol and effluent pH of 12. Results from this study showed that the adsorption of phenols using granular activated carbon showed high efficiencies in the best flow ratio for the process, ie one that exhibits lower diffusional resistances in the bed, was 4 mLmin^{-1} . The adsorption of phenols on activated carbons studied for different particle size has not great influence on the process and, therefore, can estimate that the diffusion in the macropores of the adsorbent is not the limiting step for this process. The adsorption capacity of phenol per unit mass of activated carbon to the breaktrough point and saturation of the bed were $42,6 \text{ mgg}^{-1}$ and $133,6 \text{ mgg}^{-1}$ respectively for the condition of flow 4 mLmin^{-1} , adsorbent size 0,605 mm, pH=12 and 7600 ppm concentration of the effluent.

KEYWORDS: removal of phenols, adsorption, activated carbon, fixed bed.

INTRODUÇÃO

A alta demanda de produtos energéticos e não energéticos oriundos do processamento do petróleo fazem com que aumente a produção de efluentes em refinarias. Uma das consequências negativas dessas atividades é a geração de efluentes poluidores que causam problemas ambientais e sociais.

Em uma refinaria são gerados grandes volumes de efluentes em diversas etapas do processo. Dentre os poluentes orgânicos presentes nos efluentes de refinarias de petróleo em concentrações mais elevadas se destacam os fenóis

(fenol, m-cresol, o-cresol, 3,4 dimetilfenol e 2 etilfenol), resíduos que são gerados principalmente pelo processo de craqueamento catalítico (CAVALCANTI et al., 2009).

Esse efluente, definido como água fenólica, que é caracterizado por ser altamente poluidor devido aos compostos fenólicos, classe de contaminantes em destaque recentemente por serem conhecidos por seus efeitos: tóxico, carcinogênico, além de possuir boa solubilidade em água e baixa capacidade de biodegradação (VEERESH; KUMAR; MEHROTRA, 2005; BEKER et al., 2010).

A fim de mitigar os impactos ambientais causados pelo descarte de água fenólica nos corpos receptores, faz-se necessário encaminhar esse efluente para o devido processo de tratamento antes de ser lançada para o meio ambiente.

Existem vários tipos de processos para o tratamento de efluentes industriais que foram desenvolvidos e aperfeiçoados nos últimos anos, com o intuito de reduzir a gravidade da poluição que é gerada quando esses efluentes são lançados para os corpos receptores. Pode-se citar métodos de tratamento comuns para a remoção de hidrocarbonetos aromáticos em efluentes, no caso os fenóis, como, por exemplo: ozonização, processos biológicos e adsorção (DABROWSKI et al., 2010).

A ozonização ainda é um processo de elevado custo pelo grande consumo de energia. Já os processos biológicos apresentam uma grande desvantagem por não ser aplicável para altas concentrações de fenóis, devido a esses compostos apresentarem toxicidade aos micro-organismos (TANCREDI et al., 2004; VEERESH; KUMAR; MEHROTRA, 2005).

Dentre diversas técnicas, a alternativa que tem atraído bastante atenção é a adsorção, pois essa tecnologia apresenta como um método eficiente e econômico no tratamento de efluentes, apresentando uma alta habilidade para adsorver componentes orgânicos, como os fenóis (DABROWSKI et al., 2010).

Diversos pesquisadores estudaram a remoção de fenóis em efluentes oriundos do processamento do petróleo. ZEID et al. (1995) relataram que o processo de adsorção utilizando carvão ativado granular é uma técnica altamente utilizada para o tratamento de efluentes. HANSEN & DAVIES (1994 apud OLIVEIRA; OLIVEIRA, 2000) apresentaram várias técnicas para remoção de compostos aromáticos presentes em águas produzidas, em que a adsorção utilizando carvão ativado granular é uma operação unitária altamente eficiente para adsorver componentes orgânicos presentes em efluentes. DANIEL (2009) também descreveu que a adsorção utilizando carvão ativado granular é uma das técnicas indicadas para a remoção de fenóis.

OBJETIVO

Dentro desse contexto, o objetivo desse trabalho é estudar a viabilidade técnica do método de adsorção de fenóis (fenol, m-cresol, o-cresol, 3,4 dimetilfenol e 2 etilfenol) em leito fixo utilizando carvão ativado granular. Para isso, foi necessário estudar o efeito da vazão de alimentação na coluna nas condições de 4 mL/min e 10 mL/min e a granulometria do carvão ativado nos níveis 0,605 e 0,855 mm, por meio da análise da ZTM – Zona de Transferência de Massa, além de determinar a capacidade de adsorção do leito, ou seja, da remoção de fenóis por carvão ativado granular.

METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do trabalho, a metodologia a ser utilizada para alcançar o objetivo proposto consta nas seguintes etapas: caracterização do adsorvente, amostragem do efluente, sistema experimental e o estudo de adsorção em leito fixo de carvão ativado granular.

- Caracterização do adsorvente:

O sólido particular (carvão ativado granular) utilizado nos experimentos foi cedido pela empresa Alphacarbo, localizada em Guarapuava, no estado do Paraná. Esse carvão, de número de lote 007, malha 8x30, foi preparado utilizando como material carbonáceo o carvão mineral betuminoso e ativado fisicamente com vapor d'água e oxigênio, pois assim são geradas melhores capacidades de adsorção de compostos orgânicos, além de ser mais aplicáveis a adsorção em fase líquida. Essa capacidade ocorre pela geração de grande porosidade efetiva do carvão (ALHAMED, 2009; BECKER et al., 2010).

Esse adsorvente foi caracterizado fisicamente e quimicamente pelas análises de: distribuição granulométrica, densidade real, densidade *bulk* e pH.

A metodologia utilizada para determinar a distribuição granulométrica foi de acordo com a norma ASTM – *American Society for Testing and Materials*, de denotação D2862-97. Foram utilizadas um conjunto de peneiras vibratórias (Produtest®, fabricado pela Telastem Peneiras para Análise Ltda) de 20 centímetros de diâmetro, com sequências de 9, 12, 16, 24, 32 e 42 *mesh tyler*.

A densidade real do carvão ativado foi determinada utilizando a técnica de picnometria a gás hélio, utilizando um picnômetro de hélio (Micromeritics®, modelo AccuPyc 1330) para determinação do volume e densidade da amostra em estudo. As condições experimentais de pressão, temperatura, massa de carvão ativado, volume da célula e taxa de equilíbrio são 19,5 psig, 27,8°C, 3,85 g, 11,94 cm³ e 0,005 psigmin⁻¹ respectivamente. A massa da amostra introduzida no picnômetro a gás foi obtida utilizando uma balança digital analítica (BEL Engineering®, modelo UMark 210A).

A densidade *bulk*, ou densidade aparente, foi determinada de acordo com a norma ASTM D2864-09, em que uma amostra conhecida de carvão ativado é introduzida em um cilindro, por queda livre. A densidade foi obtida de acordo com a razão da massa de carvão introduzida no cilindro por seu volume ocupado (volume do cilindro). Foi utilizado o equipamento (Seedburo Equipment Co®, modelo 151 Filling Hopper) para determinar o volume ocupado por uma determinada massa de adsorvente, em que essa massa foi obtida por meio de uma balança digital semi-analítica (Gehaka®, modelo BG 4000). A massa do cilindro e o seu volume é 447,40 g e 1000 cm³ respectivamente.

A metodologia empregada para determinar o pH foi baseada na norma ASTM 3838-05. As condições da análise para obter o pH do carvão ativado são: temperatura da mistura 100°C, massa da amostra 10 gramas, volume de água deionizada 100 mL e o tempo utilizado para a fervura do carvão ativado foi de 15 minutos. Para pesar o carvão ativado foi utilizado uma balança digital analítica (BEL Engineering®, modelo UMark 210A) e para agitação e aquecimento da mistura foi

utilizado um agitador magnético com sistema de aquecimento (Nova Ética Produtos e Equipamentos Científicos Ltda[®], modelo 114).

- Amostragem do efluente:

O efluente a ser tratado nesse estudo, ou seja, a água fenólica é proveniente do processo de craqueamento catalítico da REPLAN – Refinaria de Paulínia, conhecida também como Refinaria de Paulínia, sendo a maior refinaria do Brasil.

A REPLAN produz, em média, 30 m³ de água fenólica por dia (informação verbal)¹.

A concentração do fenol será determinada por meio do método de cromatografia líquida de alta eficiência, pois apresenta alta resolução, eficiência e sensibilidade, garantindo melhor confiabilidade resultados. O equipamento utilizado será o cromatógrafo líquido (Metrohm[®], modelo 844 UV/VIS Compact IC), disponibilizado na REPLAN.

- Sistema experimental:

Nos ensaios de adsorção de fenol por carvão ativado granular foi empregado o sistema experimental (Figura 1) constituído, basicamente, de um leito fixo (de vidro) recheado de carvão ativado granular, reservatório de resíduo, coletor de amostras e bomba peristáltica (Masterflex L/S[®], modelo 7524-40).

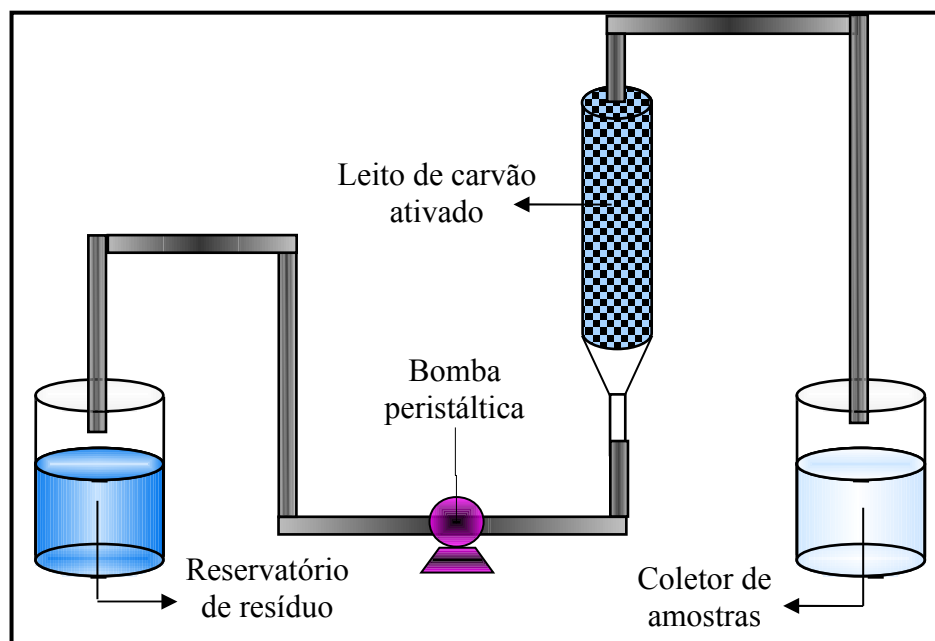


FIGURA 1 – Unidade experimental simplificada de adsorção.

Os valores dos parâmetros fixos que foram utilizados nos ensaios de adsorção estão mostrados no Quadro 1.

¹ Informação obtida por Leonardo Fregolente em reunião, na REPLAN, em novembro de 2009.

QUADRO 1 – Valores dos parâmetros fixos de adsorção utilizados nos experimentos.

Parâmetros	Valores
Diâmetro da coluna de adsorção	14 milímetros
Altura do leito de carvão ativado	28 centímetros
pH da água fenólica	12
Temperatura de adsorção	25°C

- Estudo de adsorção em leito fixo:

A representação cinética dos dados experimentais de ensaios de adsorção na forma de curva de ruptura é característica de sistemas que operam em leito fixo. Na unidade experimental, o fluido a ser tratado (de concentração determinada) foi introduzido continuamente na coluna de adsorção (preenchido de carvão ativado granular) com temperatura conhecida. Essa alimentação ocorreu até que a concentração do adsorbato na saída da coluna alcançasse um valor próximo à concentração de alimentação, ou seja, até a saturação do leito, quando o sistema entra em equilíbrio.

Para estudar o efeito de qualquer fator sobre a resposta, ou seja, o efeito da vazão de alimentação e granulometria do carvão ativado na adsorção de fenóis, foi necessário avaliar a ZTM. O Quadro 2 apresenta os fatores e os seus correspondentes níveis estudados neste trabalho para a adsorção em leito fixo. Os demais parâmetros do processo de adsorção foram mantidos fixos como a temperatura e altura do leito.

QUADRO 2 – Níveis dos fatores de adsorção.

Fatores	Níveis
Vazão de alimentação	4 e 10 mLmin ⁻¹
Diâmetro médio do adsorvente	0,605 e 0,855 mm

Primeiramente, para investigar a vazão nos níveis indicados no Quadro 2, foi utilizado o diâmetro médio do adsorvente em 0,855 mm, como parâmetro fixo. Assim, sabendo-se qual a vazão que melhor representa este estudo (4 ou 10 mLmin⁻¹), foi mantido fixo a vazão e variou-se a granulometria do adsorvente.

Para determinar as melhores condições de operação dos ensaios de adsorção, avalia-se o comprimento da ZTM, que é determinado, segundo GEANKOPLIS (1993), por meio da Equação 1. Ainda, quando a coluna é operada com mínimas resistências difusionais, têm-se pequenos comprimentos de ZTM.

$$ZTM = (1 - \tau)H_t \quad (1)$$

em que H_t refere-se à altura total do leito [cm] e τ é o tempo adimensional, como mostrado na Equação 2.

$$\tau = \frac{t_u}{t_{sat}} \quad (2)$$

sendo t_u e t_{sat} definidos, respectivamente, nas Equações 3 e 4:

$$t_u = \int_0^{t_b} \left(1 - \frac{C_b}{C_{entrada}} \right) dt \quad (3)$$

$$t_{sat} = \int_0^{t_r} \left(1 - \frac{C_r}{C_{entrada}} \right) dt \quad (4)$$

em que t_u é o tempo útil de remoção do adsorbato na solução [min], t_b é o tempo até o ponto de ruptura [min], t_{sat} é o tempo de saturação do leito (equilíbrio de adsorção) [min], t_r é o tempo de remoção total [min], C_b é a concentração do adsorbato em solução na saída da coluna em relação ao ponto de ruptura [mgL^{-3}], C_r é a concentração do adsorbato em solução na saída da coluna em relação ao tempo de remoção total [mgL^{-1}] e $C_{entrada}$ é a concentração do adsorbato em solução na entrada da coluna [mgL^{-1}].

Segundo GEANKOPLIS (1993), a ZTM delineia uma extensão do leito de adsorção em que a concentração passa do ponto de ruptura para o ponto de saturação e, quanto menor a extensão da ZTM, mais próximo da idealidade, indicando menor resistência difusional e, portanto, mais favorável é o processo de adsorção.

Após o processo de determinação da melhor vazão de operação e diâmetro médio do adsorvente por meio da avaliação da ZTM pela construção da curva de ruptura, foi necessário obter a capacidade de adsorção do leito, ou seja, a capacidade de adsorção de fenóis por unidade de massa de carvão ativado até o ponto de ruptura e saturação do leito.

Para o cálculo da quantidade de adsorbato adsorvida, foi necessário realizar um balanço material na coluna, em que a massa de adsorbato adsorvida no carvão ativado é equivalente a diferença entre a massa de adsorbato total retido no leito e a massa de adsorbato na fase aquosa no interior da coluna. Assim, esse balanço está representado pelas Equações 5 e 6 em relação até o ponto de ruptura e saturação respectivamente.

$$q_u = \frac{C_{entrada} Q}{1000 m_{sa}} \int_0^{t_b} \left(1 - \frac{C_b}{C_{entrada}} \right) dt \quad (5)$$

$$q_{sat} = \frac{C_{entrada} Q}{1000 m_{sa}} \int_0^{t_r} \left(1 - \frac{C_r}{C_{entrada}} \right) dt \quad (6)$$

em que q_u é quantidade de adsorbato adsorvida até o ponto de ruptura [mgg^{-1}], $C_{entrada}$ é a concentração do adsorbato em solução na entrada da coluna [mgL^{-1}], Q é a vazão volumétrica da água fenólica [mLmin^{-1}], m_{sa} é a massa seca de adsorvente [g], t_b é o tempo até o ponto de ruptura [min], C_b é a concentração do adsorbato em solução na saída da coluna em relação ao ponto de ruptura [mgL^{-1}], q_{sat} é quantidade de adsorbato adsorvida até o ponto de saturação [mgg^{-1}], t_r é o tempo até a remoção total [min] e C_r é a concentração do adsorbato em solução na saída da coluna em relação ao ponto de remoção total [mgL^{-1}].

RESULTADOS E DISCUSSÃO

- Caracterização do adsorvente:

A distribuição granulométrica obtida para o carvão ativado granular 8x30 utilizado está apresentada na Tabela 1.

TABELA 1 – Distribuição granulométrica do carvão ativado.

Série tyler	Abertura [mm]	Abertura média [mm]	Material retido [% mássica]	Material acumulado de grossos [% mássica]	Material acumulado de finos [% mássica]
+9	+2,00	2,400	15,0	15,0	85,0
-9 +12	+2,00 -1,40	1,700	38,4	53,5	46,6
-12 +16	+1,40 -1,00	1,200	24,2	77,6	22,4
-16 +24	+1,00 -0,71	0,855	16,0	93,6	6,4
-24 +32	+0,71 -0,50	0,605	4,8	98,4	1,7
-32 +42	+0,50 -0,35	0,425	0,8	99,2	0,8
-42	+0,35	0,300	0,8	100,0	0,0

A análise granulométrica, além de classificar o tamanho das partículas sólidas presentes em um material, determina a frequência com que ocorrem em uma determinada faixa granulométrica e define a faixa granulométrica do carvão a ser utilizada nas demais análises de caracterizações e ensaios de adsorção. Assim, foi utilizado os carvões ativados granulares de 0,605 e 0,855 milímetro de diâmetro. O carvão de granulometria 0,605 mm foi denominado de CAG1 e o de granulometria 0,855 mm foi denominado e CAG2.

A Tabela 2 apresenta os resultados das caracterizações do CAG1 e CAG2.

TABELA 2 – Resultados das análises de caracterização do adsorvente.

Análise	Resultados	
	CAG1	CAG2
Densidade real	1,97 gcm ⁻³	2,06 gcm ⁻³
Densidade aparente	0,49 gcm ⁻³	0,48 gcm ⁻³
pH	7,77	7,21

- Amostragem do efluente:

A concentração do fenol presente no efluente água fenólica foi determinada por meio do método de cromatografia líquida de alta eficiência, indicando 7600 ppm.

- Estudo de adsorção em leito fixo:

Para construção da curva de ruptura nas vazões a serem investigadas (4 e 10 mLmin⁻¹) foi necessário determinar a concentração de fenol na saída da coluna com o tempo. Os valores dos dados experimentais obtidos estão descritos pelas curvas de ruptura nas diferentes vazões de operação, como mostrado na Figura 2.

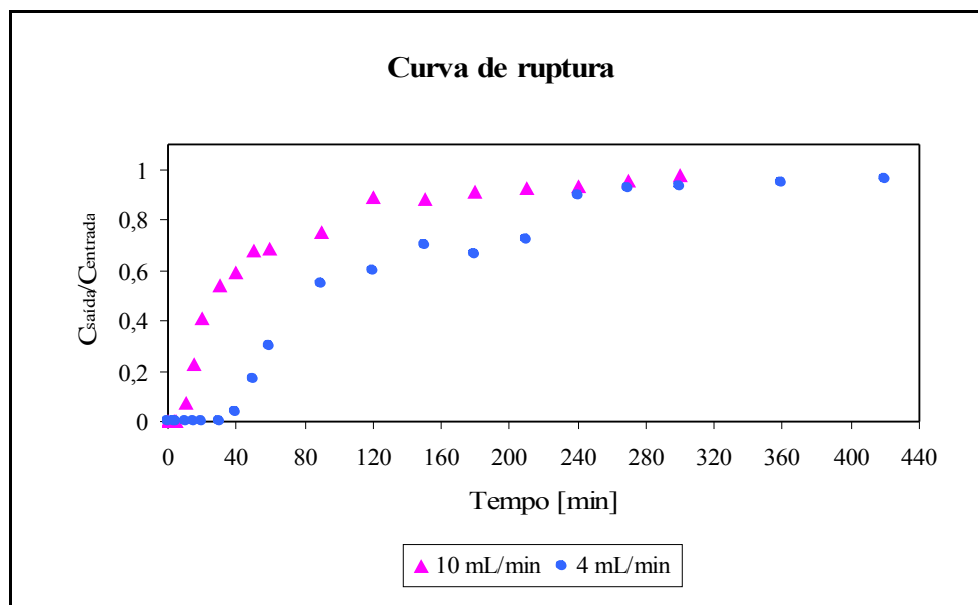


FIGURA 2 – Curva de ruptura obtida no experimento à temperatura de 25 °C, 7600 ppm e diâmetro médio do adsorvente em 0,855 mm.

Por meio da Figura 2, é possível dizer que as curvas de ruptura apresentam diferentes comportamentos, indicando uma grande influência da vazão nas resistências à difusão do fluido no leito.

A Tabela 3 apresenta os valores calculados de ZTM, a partir das Equações 1, 2, 3 e 4, e dos resultados obtidos pela Figura 2.

TABELA 3 – Tempo útil, de saturação, adimensional e ZTM para as vazões estudadas.

Vazão [mL min ⁻¹]	Tempo útil (t_u) [min]	Tempo de saturação (t_{sat}) [min]	Tempo adimensional (τ)	ZTM [cm]
4	39,75	132,52	0,30	19,60
10	9,82	60,70	0,16	23,47

Observando os resultados obtidos como mostrado na Tabela 3, é possível dizer que a melhor vazão de operação para remoção de fenóis por carvão ativado granular é 4 mLmin⁻¹, uma vez que para essa vazão foi obtido uma menor ZTM em relação a vazão de 10 mLmin⁻¹. Ainda, quando se trabalha com a vazão de 10 mLmin⁻¹, o fluido não tem tempo de residência suficiente para que a adsorção ocorra de forma mais favorável.

A partir desse resultado, fixou-se a vazão de operação de 4 mLmin⁻¹ para avaliar a granulometria do carvão ativado em relação ao CAG1 e CAG2.

Os valores dos resultados experimentais obtidos estão descritos pelas curvas de ruptura nas granulometrias do carvão ativado, como mostrado na Figura 3.

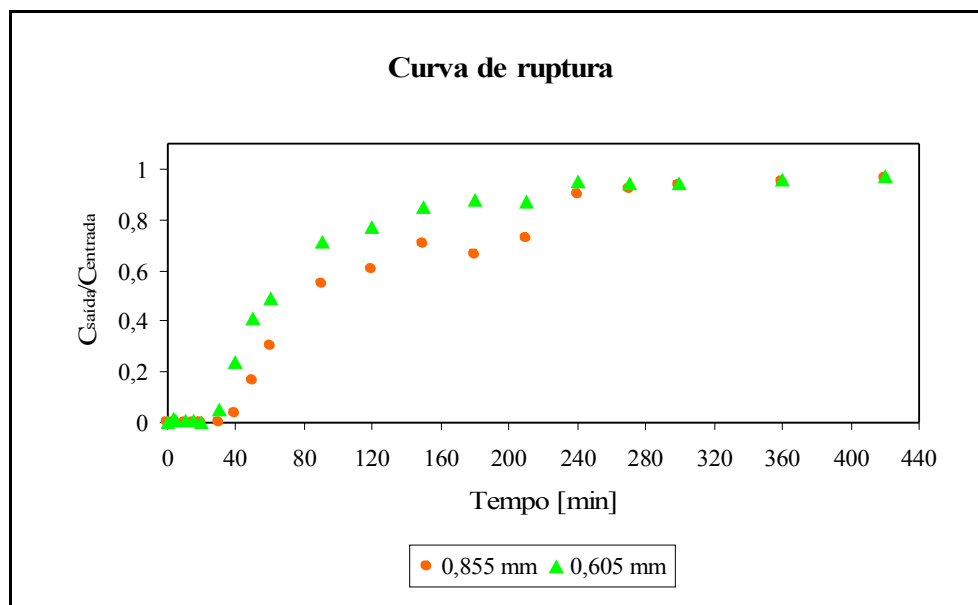


FIGURA 3 – Curva de ruptura obtida no experimento à 25°C, 7600 ppm e vazão 4 mLmin⁻¹.

Como pode ser observado nas curvas da Figura 3, é possível dizer que a adsorção de fenóis sobre os carvões ativados estudados para as diferentes granulometrias não apresenta grande influência no processo e, com isso, pode-se estimar que a difusão nos macroporos do adsorvente não é a etapa limitante para esse processo de adsorção, uma vez que as curvas estão relativamente postas próximas, mesmo variando a granulometria do carvão. Isso por ser explicado também pelo fato que, por meio da Tabela 4, as ZTM obtidas para cada granulometria apresentaram valores muito próximos.

TABELA 4 – Tempo útil, de saturação, adimensional e ZTM para as granulometrias estudadas.

Granulometria do adsorvente [mm]	Tempo útil (t_u) [min]	Tempo de saturação (t_{sat}) [min]	Tempo adimensional (τ)	ZTM [cm]
0,605	29,60	92,78	0,32	19,07
0,855	39,75	132,52	0,30	19,60

Já a capacidade de adsorção do leito, ou seja, as capacidades de adsorbato adsorvida para cada grama de adsorvente foram obtidas pelas equações 5 e 6, além dos dados obtidos pelos experimentos, ou seja, em que foi obtido melhores resultados em relação à vazão de alimentação (4 mLmin⁻¹) e granulometria do adsorvente (0,605 mm). Os resultados estão apresentados na Tabela 5.

TABELA 5 – Capacidade de adsorção do leito.

Capacidade de adsorção	Resultado [mgg ⁻¹]
Ponto de ruptura	42,6
Ponto de saturação	133,6

CONCLUSÕES

É possível concluir que o carvão ativado estudado apresentou características (físicas e química) de acordo com a maioria dos carvões ativados deste grupo. Para o sistema de adsorção em leito fixo, a avaliação da ZTM para as vazões de 4 mLmin⁻¹ e 10 mLmin⁻¹ foi de fundamental importância, visto que a vazão de 4 mLmin⁻¹ apresentou menor resistência à difusão no leito e que para a vazão de 10 mLmin⁻¹ o tempo de residência é insuficiente para que ocorra uma adsorção mais favorável. As curvas de ruptura comprovaram que, com o aumento da vazão, o ponto de ruptura e o ponto de saturação apresentam valores menores. Em relação as granulometrias do carvão ativado estudadas (0,605 e 0,855 mm) a adsorção não apresentou grande influência sobre os diferentes diâmetro médio do adsorvente, visto que as curvas de ruptura estão relativamente próximas mesmo tendo variado a granulometria do carvão, além dos valores das ZTM também apresentarem próximos. Já o valor obtido referente a quantidade de fenol total adsorvida até o ponto de ruptura e saturação foi de 42,6 mgg⁻¹ e 133,6 mgg⁻¹ respectivamente, indicando que o processo de adsorção é aplicável para o tratamento da água fenólica em questão. Ainda, considerando as etapas executadas neste trabalho e nas condições experimentais descritas, o sistema de adsorção em leito fixo utilizando carvão ativado granular foi eficiente na remoção de fenol em todas as combinações de variáveis de processo.

AGRADECIMENTOS

À UNICAMP e a REPLAN pelo apoio para realização do projeto.

REFERÊNCIAS

ALHAMED, Y A. Adsorption kinetics and performance of packed bed adsorber for phenol removal using activated carbon from dates' stones. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 170, n. 2-3, p. 763-770, 2009. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6TGF-4W91PXV-6&_user=972058&_coverDate=10%2F30%2F2009&_alid=1222302213&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_cdi=5253&_sort=r&_docanchor=&view=c&_ct=11&_acct=C000049648&_version=1&_urlVersion=0&_userid=972058&md5=34863389c23ed2ec edaf9eee54265249>. Acesso em: 14 jan. 2010.

BEKER, U. et al. Adsorption of phenol by activated carbon: Influence of activation methods and solution pH. **Energy Conversion and Management**, Amsterdam, v. 51, n. 2, p. 235-240, 2010. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V2P-4XP8T1C-1&_user=972058&_coverDate=02%2F28%2F2010&_alid=1222309543&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_cdi=5708&_sort=r&_docanchor=&view=c&_ct=2420&_acct=C000049648&_version=1&_urlVersion=0&_userid=972058&md5=8bb1bb63f796a3 d9ed4ea727a1c883ea>. Acesso em: 14 jan. 2010.

CAVALCANTI et al. Preparação e utilização de uma argila esmectítica organofílica como adsorvente de fenol. **Quím. Nova**, São Paulo, v. 32, n. 8, p. 2051-2057, 2009. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422009000800013&script=sci_arttext>. Acesso em: 14 jan. 2009.

DABROWSKI, A. et al. Adsorption of phenolic compounds by activated carbon – a critical review. **Chemosphere**, Amsterdam, v. 58, n. 8, p. 1049-1070, 2010. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V74-4DW34K6-3&_user=10&_coverDate=02%2F01%2F2005&_alid=1379900262&_rdoc=4&_fmt=high&_orig=search&_cdi=5832&_sort=r&_docanchor=&view=c&_ct=5911&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=3ce145a528f6248eab2c57b7da3f033d>. Acesso em: 18 abr 2010.

DANIEL, C.I. L. **Remoção do fenol em solução aquosa por adsorção em carvão ativado**. 2009. 157f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química e Bioquímica) – Departamento de Química, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2009. Disponível em: <http://run.unl.pt/bitstream/10362/2067/1/Daniel_2009.pdf>. Acesso em: 14 jan. 2010.

GEANKOPLIS, C. J. **Transport Process and Unit Operations**. 3. ed., New Jersey: PTR Prentice Hall, 1993.

OLIVEIRA, R.C.G.; OLIVEIRA, M.C. K. Remoção de contaminantes tóxicos dos efluentes líquidos oriundos da atividade de produção de petróleo no mar. **Boletim técnico PETROBRAS**, Rio de Janeiro, n. 43, p. 129-136, jun. 2000. Disponível em: <http://www2.petrobras.com.br/tecnologia2/ing/boletim_tecnico/v43_n2_abr-jun-2000/pdf/Remocao7.pdf>. Acesso em: 12 out. 2009.

TANCREDI, N.; MEDERO, N.; MOLLER, F.; PIRIZ, J.; PLADA, C.; CORDERO, T. Phenol adsorption onto powdered and granular activated carbon, prepared from Eucalyptuswood. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 279, n. 2, p. 357–363, 2004. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6WHR-4D9D82N-1&_user=972058&_coverDate=11%2F15%2F2004&_alid=1733073886&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_origin=search&_zone=rslt_list_item&_cdi=6857&_sort=r&_st=13&_docanchor=&view=c&_ct=2849&_acct=C000049648&_version=1&_urlVersion=0&_userid=972058&md5=9dea3fdef340109e638d773bf13de517&searchtype=a>. Acesso em: 05 set. 2009.

VEERESH, G. S.; KUMAR, P.; MEHROTRA, I. Treatment of phenol and cresols in upflow anaerobic blanket (UASB) process: a review. **Water Research**. Amsterdam, v. 39, n. 1, p. 159-170, 2005. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V73-4DWHHW5-2&_user=972058&_coverDate=01%2F01%2F2005&_alid=1733069775&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_origin=search&_zone=rslt_list_item&_cdi=5831&_sort=r&_st=13&_docanchor=&view=c&_ct=5320&_acct=C000049648&_version=1&_urlVersion>

=0&_userid=972058&md5=74a864147792d070f2dfbfc1c7ee260&searchtype=a>.
Acesso em: 18 abr 2010.

ZEID, N. Abu et al. Activated Carbon Adsorption in Oxidizing Environments. **Water Research**, Amsterdam, v. 29, n. 2, p. 653-660, 1995. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V73-3YKKHC7-BY&_user=10&_coverDate=02%2F28%2F1995&_alid=1195684318&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_cdi=5831&_sort=r&_docanchor=&view=c&_ct=3685&_acct=C00050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=3941cb8776ec2e7da386c37fc04c68d6>. Acesso em: 4 fev. 2010.