

II-410 – ESTUDO DA TAXA DE ADSORÇÃO DE AMOXICILINA E CAFEÍNA EM CARVÃO ATIVADO GRANULADO E EM PÓ

Paula Laranja Leal de Mattos Pereira

Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental pelo Instituto Federal do Espírito Santo. Mestranda em Saneamento Ambiental pela Universidade Federal de Viçosa.

Marjore Martins dos Santos

Graduanda em Engenharia Sanitária e Ambiental pelo Instituto Federal do Espírito Santo.

Lizandra Broseghini Föeger

Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental pelo Instituto Federal do Espírito Santo. Mestranda em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal do Espírito Santo.

Paola Angélica Dias dos Santos

Técnica em Química pelo Centro Federal de Educação Tecnológica do Espírito Santo. Licenciada em Química e Especialista em Educação Profissional e Tecnológica pelo Instituto Federal do Espírito Santo. Atua como técnica nos laboratórios de ensino e pesquisa em Química no Instituto Federal do Espírito Santo Campus Vitória.

Raquel Machado Borges⁽¹⁾

Bacharel e Mestre em Engenharia Química pela Universidade Federal de Uberlândia. Doutora em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Espírito Santo. Pós-doutoranda em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal do Espírito Santo. Professora do curso de Engenharia Sanitária e Ambiental do Instituto Federal do Espírito Santo.

Endereço⁽¹⁾: Av. Vitória, 1729 – Jucutuquara – Vitória – ES – CEP: 29040-780 - Brasil - Tel: +55 (27) 3331-2237 - e-mail: raquelmb@ifes.edu.br

RESUMO

A presença de compostos farmacêuticos, mesmo que em baixas concentrações, em efluentes domésticos e hospitalares e em corpos d'água, tem sido relatada por diferentes autores. Neste estudo, a amoxicilina e a cafeína foram as substâncias escolhidas para se investigar a variação da taxa de adsorção de fármacos em um adsorvente comercial, em função do tempo de contato de adsorvente-adsorvato e da dosagem do adsorvente. Os adsorventes utilizados foram carvão ativado granulado (CAG) e em pó (CAP). Os experimentos foram realizados utilizando-se soluções preparadas a partir de amostras de amoxicilina e cafeína de pureza analítica, nas concentrações iniciais de 8,8 ppm e 10,3 ppm, respectivamente. As dosagens dos adsorventes CAG e CAP foram 0,5, 1 e 2 g.L⁻¹ e o tempo de contato adsorvato-adsorvente foram 10, 20, 30, 60 e 120 minutos. Os resultados obtidos indicaram efeito positivo do aumento do tempo de contato e da dosagem de adsorvente sobre o desempenho do processo de adsorção, independentemente do tipo de carvão ativado utilizado. A completa remoção de amoxicilina foi atingida utilizando-se 2 g.L⁻¹ de CAP e tempo de contato de 120 minutos. O estudo conduzido com cafeína mostrou que houve remoção superior a 90% do fármaco em apenas 20 minutos de contato e aproximadamente 95% de remoção após 30 minutos, ambos com uso do CAP na dosagem de 1 g.L⁻¹. O aumento do tempo de contato adsorvente-adsorvato, nestas condições e também na dosagem de 2 g.L⁻¹, entretanto, não resultou em melhoria significativa em termos de remoção de cafeína, sugerindo que o equilíbrio químico foi atingido. A análise do comportamento das taxas de adsorção da amoxicilina e cafeína demonstraram que, de forma geral, houve uma queda acentuada da mesma ao longo do tempo de contato adsorvente-adsorvato. O CAP se mostrou sempre mais eficiente em relação CAG no processo de adsorção desse estudo.

PALAVRAS-CHAVE: Adsorção, Amoxicilina, Cafeína, Carvão Ativado

INTRODUÇÃO

Os compostos farmacêuticos, classificados como contaminantes emergentes de origem antropogênica, têm sido encontrados, ainda que em baixas concentrações, em efluentes domésticos e hospitalares, bem como em corpos d'água superficiais (HIRSH et al, 1999). Estudos sobre os efeitos desses contaminantes sobre a saúde humana e de outros organismos a longo prazo têm despertado o interesse de pesquisadores e motivado a investigação

de tecnologias eficientes para a remoção dessas substâncias do meio ambiente (KLAVARIOTI et al, 2009; FATTA et al., 2007).

A amoxicilina é uma penicilina semissintética, pertencente ao grupo dos antibióticos β -lactâmicos, com uso intenso na medicina humana e veterinária (VASCONCELOS, 2011). Embora a atividade biológica dos antibióticos iniba o crescimento de bactérias, estudos apontam que a presença do fármaco em baixas concentrações possibilita o desenvolvimento de linhagens resistentes a essas substâncias (TAMBOSI et al, 2010; COOPER et al, 2008; LONGHIN, 2008). A cafeína, por sua vez, é um alcaloide da família da metilxantina, comumente utilizada como estimulante (SOTELO et al., 2012), além de estar presente em grande quantidade em outros fármacos. Estudos indicam ainda que a cafeína seja também um importante marcador químico de contaminação fecal humana em cursos d'água (LINDEN et al, 2015).

Dentre os diversos processos de tratamentos existentes, a adsorção tem sido largamente utilizada para a remoção de diversos poluentes presentes na água, em especial aqueles que não são facilmente biodegradáveis, como os fármacos. O processo de adsorção é considerado uma operação de transferência de massa, uma vez que um constituinte, denominado adsorvato, é transferido da fase líquida para uma fase sólida (adsorvente). (TCHOBANOGLIOUS et al, 2016). Ainda segundo os autores, os adsorventes a base de carvão são os mais utilizados para a adsorção de contaminantes em função do seu custo relativamente baixo e de sua elevada superfície específica, que resulta em alta capacidade de adsorção. Os autores estimam a superfície específica do CAG entre 700 e 1300 $\text{m}^2.\text{g}^{-1}$ e do CAP entre 800 e 1800 $\text{m}^2.\text{g}^{-1}$.

A capacidade de adsorção de um adsorvente ($\text{mg}.\text{g}^{-1}$) pode ser estimada, via de regra, por meio da relação entre a quantidade de adsorvato removida (mg) e a massa de adsorvente utilizada (g) (MOUSSAVI et al, 2013; SILVA, 2012). A capacidade máxima de adsorção, neste caso, pode ser estimada quando se alcança as condições de equilíbrio.

A cinética de adsorção, por sua vez, descreve a velocidade com as quais as moléculas do adsorvato são adsorvidas pelo adsorvente. Esta velocidade depende das características físico-químicas do adsorvato (natureza do adsorvato, peso molecular, solubilidade), do adsorvente (natureza, estrutura dos poros) e da solução (pH, temperatura e concentração) (SILVA, 2012). A cinética de adsorção é de fundamental importância para o projeto de sistemas de tratamento, pois pode-se determinar o tempo de equilíbrio e a velocidade em que ocorre a adsorção.

Existem diversos modelos cinéticos que podem ser utilizados para descrever a adsorção do adsorvato em um adsorvente, sendo os modelos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem amplamente utilizados (MOUSSAVI et al, 2013; PUTRA et al, 2009). No entanto, de forma simplificada, a taxa de adsorção instantânea (em $\text{mg}.\text{g}^{-1}.\text{h}^{-1}$) pode ser estimada por meio da relação entre a quantidade de adsorvato adsorvido (em mg) pela quantidade de adsorvente utilizada (em g) em determinado tempo de contato (em h). Ortiz e colaboradores (2003) expressam essa mesma relação como a constante de velocidade de adsorção (em $\text{mg}.\text{g}^{-1}.\text{min}^{-1}$) ao investigarem a adsorção de compostos orgânicos em resíduos de magnetita.

O objetivo deste trabalho foi estudar a variação da taxa de adsorção para os fármacos amoxicilina e cafeína em carvão ativado granulado e em pó, em função do tempo de contato adsorvente-adsorvato e da dosagem de adsorvente, de forma a contribuir para a tomada de decisão sobre as condições operacionais ideais do processo de adsorção.

MATERIAIS E MÉTODOS

O preparo das soluções de amoxicilina e de cafeína foi realizado a partir de amostras de pureza analítica, adquiridas em farmácias de manipulação e solubilizadas em água ultrapura até concentração de 100 ppm. A varredura espectrofotométrica dos fármacos foi realizada por meio do espectrofotômetro UV-Vis Agilent Technologies®, modelo Cary 60 UV-Vis, na faixa de 200 a 800 nm. Após identificação dos respectivos comprimentos de onda de maior absorvância da amoxicilina e da cafeína, soluções com diferentes concentrações dos fármacos foram preparadas para a construção das curvas padrão de calibração. Tais concentrações, no entanto, foram definidas de modo que não fossem alcançadas absorvâncias maiores que 1,

pois regiões onde a absorvância é muito grande levam a desvios da lei de Beer-Lambert, não se mantendo uma relação linear entre a absorvância e a concentração (OLIVEIRA, et al. 2004).

Os ensaios experimentais de adsorção foram conduzidos com carvão ativado nas formas granulado (Dinâmica Química Contemporânea Ltda), denominado CAG, e em pó (Êxodo Científica), denominado CAP. Os tempos de contato entre adsorvente e adsorvato foram de 10, 20, 30, 60 e 120 minutos (DRAMAN et al., 2015; RIBEIRO et al., 2011). Para cada tempo de contato, três dosagens de adsorvente por volume de amostra foram testadas: 0,5g.L⁻¹, 1g.L⁻¹ e 2 g.L⁻¹ (ASTM, 2008). Em cada ensaio experimental, 100 mL da solução de amoxicilina (concentração inicial de 8,8 ppm) ou de cafeína (concentração inicial de 10,3 ppm) foram adicionados em um erlenmeyer de 250 mL, o qual, após adição do adsorvente na dosagem especificada, foi submetido à agitação magnética a 260 rpm. Após a realização dos ensaios, as amostras foram submetidas à filtração em membrana filtrante de acetato de celulose de porosidade de 0,45 µm (Sartorius Stedim Biotech), visando à separação da amostra tratada do adsorvente em suspensão na massa líquida. Para tanto, testes prévios confirmaram ausência de retenção dos fármacos na membrana filtrante. Seguidamente, as concentrações residuais dos fármacos foram analisadas pelo método espectrofotométrico.

A capacidade de adsorção do adsorvente, ou seja, a massa de fármaco adsorvido por massa de adsorvente empregado, pode ser estimada por meio da equação (1), em que q_t representa a capacidade de adsorção do fármaco (em mg.g⁻¹), C_0 representa a concentração do fármaco no tempo t_0 (em mg.L⁻¹), C_t representa a concentração do fármaco no tempo t (em mg.L⁻¹), V representa o volume da solução (em L) e m representa a massa de adsorvente (em g).

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t) \cdot V}{m} \quad \text{equação (1)}$$

A derivada da equação (1) no tempo t fornece a estimativa da taxa de adsorção r_t (em mg.(g.h)⁻¹), conforme ilustra a equação (2), em que D representa a dosagem de adsorvente (em g.L⁻¹) e t representa o tempo de contato adsorvente-adsorvato (em h).

$$r_t = \frac{dq_t}{dt} = \frac{d}{dt} \left[\frac{(C_0 - C_t) \cdot V}{m} \right] = \frac{(C_0 - C_t)}{D \cdot t} \quad \text{equação (2)}$$

Após a obtenção dos resultados de adsorção, as eficiências de remoção dos contaminantes (em %) e as taxas de adsorção (em mg.(g.h)⁻¹) foram estimadas para cada intervalo de tempo adotado.

RESULTADOS

Os resultados da varredura espectrofotométrica indicaram máxima absorvância da amoxicilina pura (100%) no comprimento de onda de 228,9 nm e máxima absorvância da cafeína pura (100%) a 273,9 nm. Relatos apresentados na literatura identificaram os comprimentos de onda de máxima absorvância da amoxicilina entre 228,3 e 272 nm (WENG et al, 2014; LONGHIN, 2008) e da cafeína entre 272 e 273 nm (LINDEN et al, 2015; GALHETAS et al, 2014), indicando coerência dos valores obtidos com a literatura.

Os comprimentos de onda obtidos foram, portanto, utilizados para a construção das curvas padrão de calibração para a amoxicilina e para a cafeína, apresentadas nas figuras 1 e 2, respectivamente. As equações (3) e (4) apresentam as equações das retas obtidas a partir da regressão linear de cada conjunto de dados e os coeficientes de correlação para as soluções de amoxicilina e cafeína, respectivamente. Nas curvas, C e A representam a concentração de amoxicilina (ou cafeína) na amostra (ppm) e sua absorvância no comprimento de onda analítico, respectivamente.

$$A = 0,0254 C + 0,08846 \quad (R^2=0,99717) \quad \text{equação (3)}$$

$$A = 0,0500 C - 0,01115 \quad (R^2=0,99981) \quad \text{equação (4)}$$

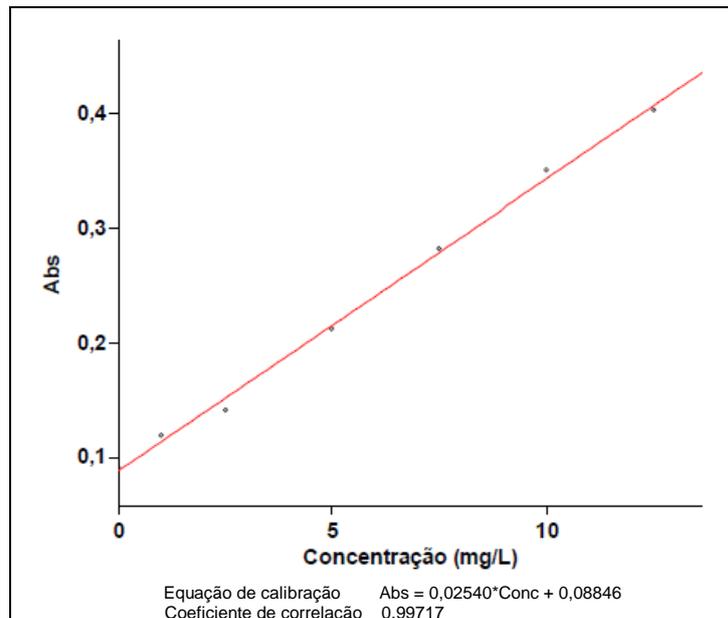


Figura 1: Curva padrão de calibração da amoxicilina a 228,9 nm. Fonte: Dados da pesquisa.

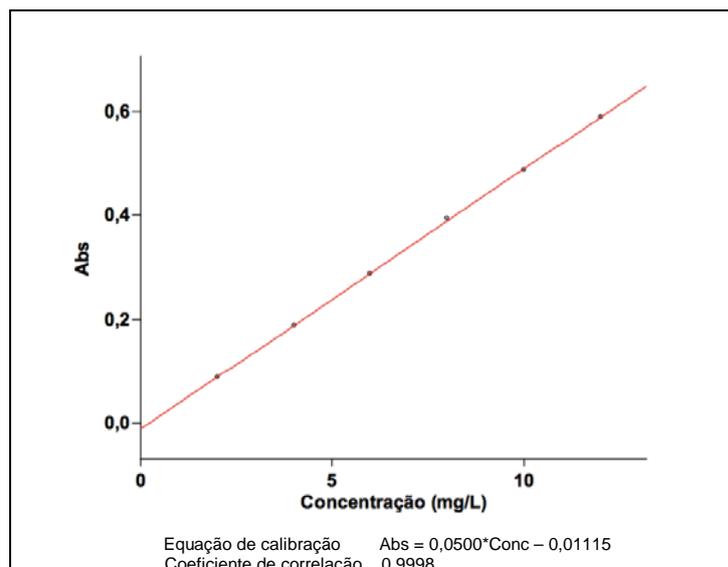


Figura 2: Curva padrão de calibração da cafeína a 273,9 nm. Fonte: Dados da pesquisa.

Os resultados dos ensaios experimentais de adsorção utilizando carvão ativado nas formas granulado e em pó, sob diferentes dosagens e tempos de contato encontram-se apresentados a seguir. O desempenho do processo em termos de eficiência de remoção dos fármacos é apresentado no eixo principal dos gráficos, enquanto a estimativa da taxa de adsorção é apresentada no eixo secundário, ambos em função do tempo de contato.

Os resultados de adsorção de amoxicilina com o uso do CAP indicam que eficiências superiores a 80% foram atingidas após 1 hora de contato, sob a dosagem de 1g.L^{-1} , e após apenas 20 minutos sob dosagem de 2g.L^{-1} , conforme apresentam a tabela 1 e a figura 3. No entanto, a completa remoção do fármaco foi atingida somente com 2 horas de contato, na dosagem de 2g.L^{-1} . O desempenho do processo com a dosagem de $0,5\text{g.L}^{-1}$ ficou nitidamente aquém dos demais, apresentando eficiência de 67% após 2 horas de tempo de contato. A adsorção de amoxicilina com o uso do CAG mostrou-se mais lenta para todas as dosagens, quando comparada à adsorção com o CAP, conforme apresentam a tabela 2 e a figura 4. Apenas após 2 horas de tempo de contato e sob a dosagem de 2g.L^{-1} atingiu-se aproximadamente 74% de eficiência de remoção. Nas dosagens de $0,5\text{g.L}^{-1}$ e 1g.L^{-1} , as eficiências observadas após 2 horas de contato foram de apenas 30% e 51%, respectivamente.

Tabela 1: Concentração residual de amoxicilina e taxa de adsorção sob diferentes tempos de contato e dosagens de CAP.

AMOXICILINA - CAP									
t	0,5 g.L ⁻¹			1 g.L ⁻¹			2 g.L ⁻¹		
	C _t	E	r _t	C _t	E	r _t	C _t	E	r _t
0	8,8	-	-	8,8	-	-	8,8	-	-
10	6,7	23,9	25,2	4,8	45,5	24,0	2,5	71,6	18,9
20	5,8	34,1	18,0	3,5	60,2	15,9	1,5	83,0	11,0
30	5,2	40,9	14,4	3,2	63,6	11,2	0,6	93,2	8,2
60	4,3	51,1	9,0	1,5	83,0	7,3	0,2	97,7	4,3
120	2,9	67,1	5,9	0,4	95,5	4,2	0,0	100,0	2,2

Observações:
 C_t: concentração de amoxicilina na solução (ppm)
 E: eficiência de remoção de amoxicilina (%)
 r_t: taxas de adsorção de amoxicilina (mg.(g.h)⁻¹)
 t: tempo de contato (min)

Fonte: Dados da pesquisa.

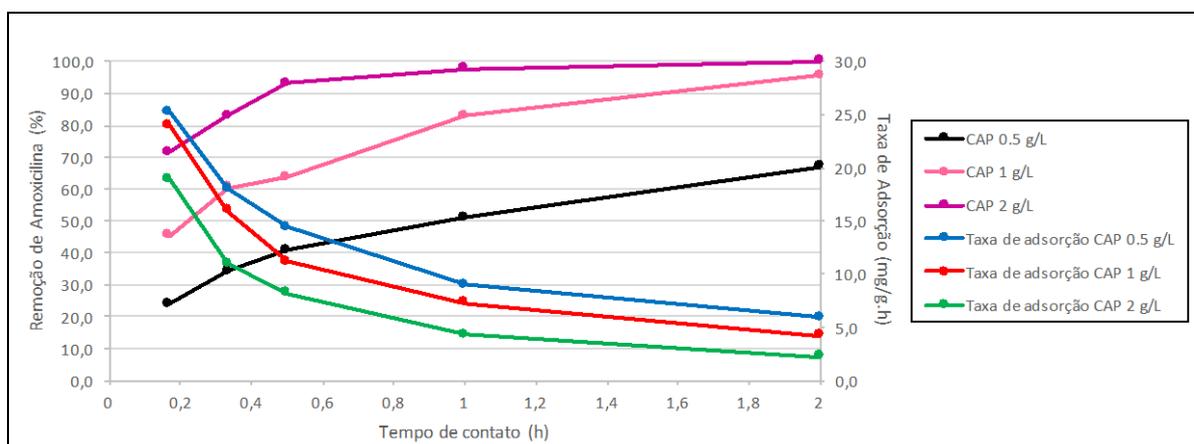


Figura 3: Eficiência de remoção de amoxicilina (%) e taxa de adsorção (mg.(g.h)⁻¹) usando CAP como adsorvente. Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 2: Concentração residual de amoxicilina e taxa de adsorção sob diferentes tempos de contato e dosagens de CAG.

AMOXICILINA - CAG									
t	0,5 g.L ⁻¹			1 g.L ⁻¹			2 g.L ⁻¹		
	C _t	E	r _t	C _t	E	r _t	C _t	E	r _t
0	8,8	-	-	8,8	-	-	8,8	-	-
10	8,5	3,4	3,6	8,0	9,1	4,8	7,4	15,9	4,2
20	8,0	9,1	4,8	7,7	12,5	3,3	6,3	28,4	3,8
30	7,9	10,2	3,6	7,1	19,3	3,4	5,5	37,5	3,3
60	7,3	17,1	3,0	5,9	33,0	2,9	3,6	59,1	2,6
120	6,2	29,6	2,6	4,3	51,1	2,3	2,3	73,9	1,6

Observações:
 C_t: concentração de amoxicilina na solução (ppm)
 E: eficiência de remoção de amoxicilina (%)
 r_t: taxas de adsorção de amoxicilina (mg.(g.h)⁻¹)
 t: tempo de contato (min)

Fonte: Dados da pesquisa.

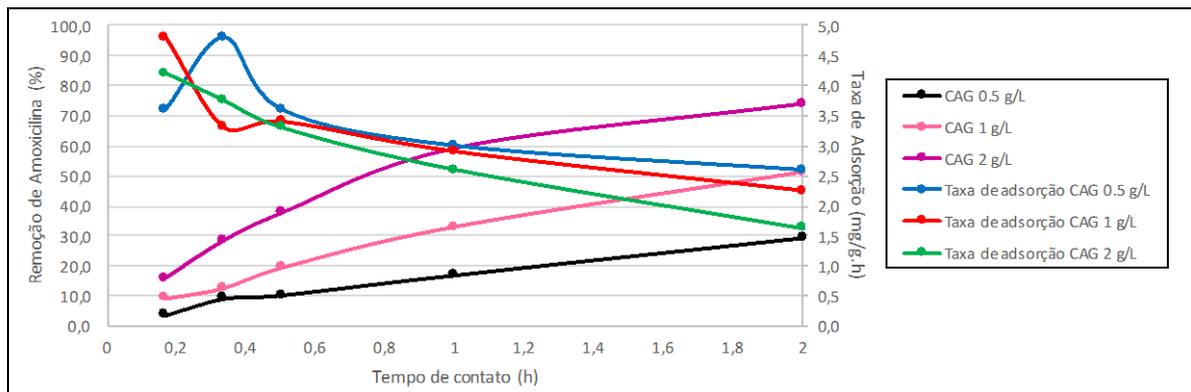


Figura 4: Eficiência de remoção de amoxicilina (%) e taxa de adsorção (mg.(g.h)⁻¹) usando CAG como adsorvente. Fonte: Dados da pesquisa.

As taxas de adsorção de amoxicilina estimadas para cada intervalo de tempo avaliado (figuras 3 e 4), apresentam de forma geral, valores decrescentes em função do tempo de contato, com exceção de um comportamento atípico registrado para a dosagem de 0,5 g.L⁻¹ de CAG e tempo de contato de 20 minutos (figura 4). Comparativamente, notam-se taxas de adsorção (ou velocidade de adsorção) nitidamente mais elevadas no início do processo para os ensaios realizados com CAP, em relação ao CAG.

No processo de remoção de amoxicilina com uso do CAP, a taxa de adsorção inicial atinge valor máximo de 25,2 mg.(g.h)⁻¹ na dosagem de 0,5 g.L⁻¹, enquanto com o uso do CAG atinge a taxa máxima de 4,8 mg.(g.h)⁻¹, na dosagem de 1,0 g.L⁻¹. A despeito da condição inicial consideravelmente mais favorável para a adsorção com CAP, cabe ressaltar que as taxas de adsorção diminuem bruscamente com o aumento do tempo de contato e praticamente se igualam àquelas observadas com o uso do CAG nas mesmas condições operacionais. A despeito da condição inicial consideravelmente mais favorável para a adsorção com CAP, cabe ressaltar que as taxas de adsorção diminuem bruscamente com o aumento do tempo de contato e praticamente se igualam àquelas observadas com o uso do CAG nas mesmas condições operacionais.

O desempenho do processo de adsorção de cafeína, medido em termos de eficiência de remoção (%), assim como a taxa de adsorção do fármaco estimadas para cada tempo de contato estão apresentados nas tabelas 3 e 4 e ainda nas figuras 5 e 6. Os resultados obtidos para a cafeína ilustram, assim como para a amoxicilina, um desempenho superior do CAP em relação ao CAG na adsorção do fármaco.

Tabela 3: Concentração residual de amoxicilina e taxa de adsorção sob diferentes tempos de contato e dosagens de CAP.

CAFEÍNA - CAP									
t	0,5 g.L ⁻¹			1 g.L ⁻¹			2 g.L ⁻¹		
	C _t	E	r _t	C _t	E	r _t	C _t	E	r _t
0	10,3	-	-	10,30	-	-	10,30	-	-
10	5,3	48,5	60,0	2,0	80,6	49,8	0,7	93,2	28,8
20	2,7	73,8	15,6	0,9	91,3	3,3	0,6	94,2	0,2
30	2,7	73,8	0,0	0,6	94,2	0,6	0,5	95,1	0,1
60	1,4	86,4	2,6	0,5	95,1	0,1	0,5	95,1	0,0
120	0,7	93,2	0,7	0,5	95,1	0,0	0,5	95,1	0,0

Observações:

C_t: concentração de cafeína na solução (ppm)

E: eficiência de remoção de cafeína (%)

r_t: taxas de adsorção de cafeína (mg.(g.h)⁻¹)

t: tempo de contato (min)

Fonte: Dados da pesquisa.

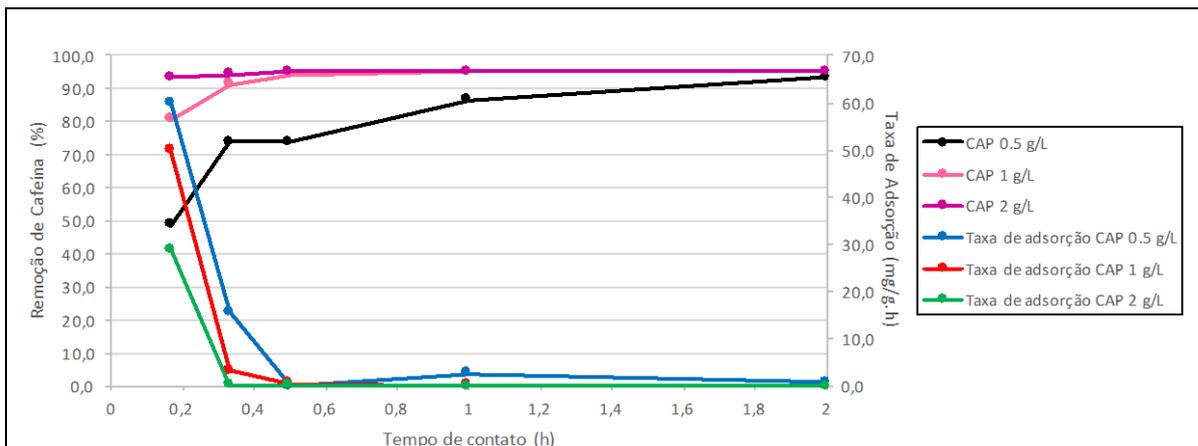


Figura 5: Eficiência de remoção de cafeína (%) e taxa de adsorção ($\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$) usando CAP como adsorvente. Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 4: Concentração residual de amoxicilina e taxa de adsorção sob diferentes tempos de contato e dosagens de CAG.

CAFEÍNA - CAG									
	0,5 g.L ⁻¹			1 g.L ⁻¹			2 g.L ⁻¹		
	C _t	E	r _t	C _t	E	r _t	C _t	E	r _t
t									
0	10,3	-	-	10,3	-	-	10,3	-	-
10	9,4	8,7	10,8	8,7	15,5	9,6	6,8	34,0	10,5
20	8,7	15,5	4,2	7,8	24,3	2,7	4,9	52,4	2,9
30	7,9	23,3	3,2	6,7	35,0	2,2	3,8	63,1	1,1
60	6,3	38,8	3,2	3,5	66,0	3,2	1,1	89,3	1,4
120	3,4	70,0	2,9	1,1	89,3	1,2	0,5	95,2	0,2

Observações:

C_t: concentração de cafeína na solução (ppm)

E: eficiência de remoção de cafeína (%)

r_t: taxas de adsorção de cafeína ($\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$)

t: tempo de contato (min)

Fonte: Dados da pesquisa.

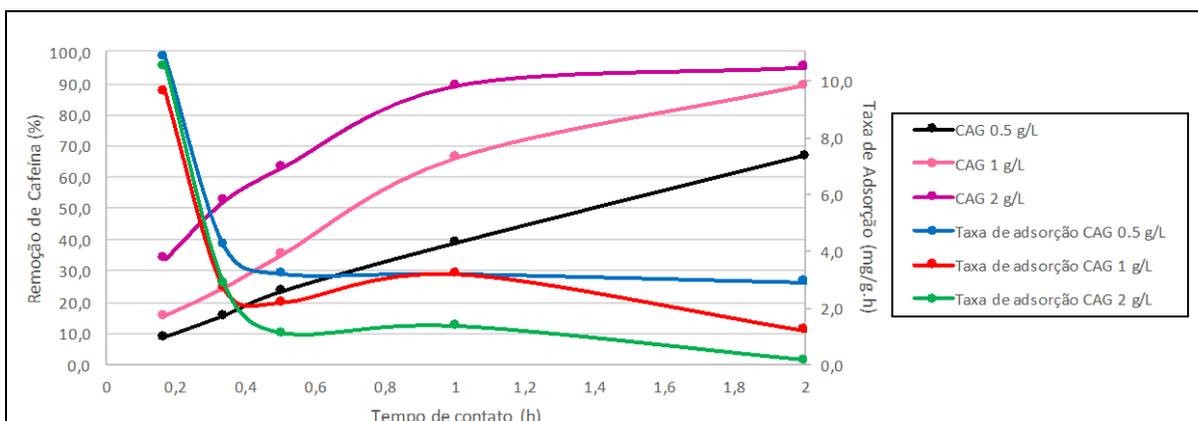


Figura 6: Eficiência de remoção de cafeína (%) e taxa de adsorção ($\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$) usando CAG como adsorvente. Fonte: Dados da pesquisa.

Conforme apresentado na tabela 3 e na figura 5, o uso do CAP resultou em eficiência superior a 90% após 10 minutos de contato sob a dosagem de 2 g.L⁻¹, após 20 minutos de contato sob a dosagem de 1 g.L⁻¹ e após 2 horas de contato sob a dosagem de 0,5 g.L⁻¹. Adicionalmente, o comportamento das curvas de remoção de cafeína sob as dosagens de 1,0 e 2,0 g.L⁻¹ com o uso do CAP (figura 5) sugere que o sistema entrou em

equilíbrio ao se atingir a eficiência de remoção de 95,1% (correspondente à concentração residual de cafeína de 0,5 ppm). Os resultados obtidos usando-se o adsorvente CAG apresentados na tabela 4 e na figura 6, no entanto, apresentaram-se inferiores em termos de desempenho do processo de adsorção. Somente após o tempo de contato de 1 hora e sob dosagem de 2 g.L⁻¹ foi atingida uma eficiência próxima a 90%, enquanto eficiência similar sob a dosagem de 1 g.L⁻¹ somente foi atingida após tempo de contato de 2 horas. O comportamento da curva representativa da dosagem de 2 g.L⁻¹ reforça a hipótese de equilíbrio do processo ao se atingir a concentração residual de cafeína de 0,5 ppm.

As curvas ilustrativas do comportamento das taxas de adsorção de cafeína, apresentadas nas figuras 5 e 6, ilustram decaimentos acentuados nos primeiros 30 minutos de tratamento, independentemente da dosagem e do tipo de adsorvente. No entanto, em valores absolutos, as taxas de adsorção (ou velocidade de adsorção) nos ensaios realizados com CAP são consideravelmente superiores àquelas estimadas nos ensaios realizados com CAG. No processo de remoção de cafeína com uso do CAP, a taxa de adsorção inicial atinge valor máximo de 60,0 mg.(g.h)⁻¹ na dosagem de 0,5 g.L⁻¹, enquanto com o uso do CAG atinge a taxa máxima de 10,8 mg.(g.h)⁻¹, também na dosagem de 0,5 g.L⁻¹. Nota-se, pela figura 5, que a taxa de adsorção é nula quando o sistema hipoteticamente atinge o equilíbrio com o uso do CAP. Com dinâmica notadamente mais lenta, embora longe de atingir as condições de equilíbrio, as baixas taxas de adsorção com o uso do CAG após os 30 minutos iniciais revelam que o processo de adsorção continua ocorrendo, porém com baixa velocidade.

CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada a aplicação do processo de adsorção em carvão ativado granulado e em pó para a remoção de amoxicilina e cafeína em águas. Para tanto, o desempenho do processo foi avaliado em função do tempo de contato adsorvente-adsorvato e da dosagem do adsorvente. Para ambos os fármacos, o carvão ativado em pó (CAP) se mostrou mais eficiente que o carvão ativado granulado (CAG) no processo de adsorção, sugerindo que a maior superfície específica do primeiro contribuiu positivamente para a melhor resposta do tratamento. Em termos de aplicação do processo de adsorção em larga escala, entretanto, sugere-se avaliar os demais fatores de impacto sobre o custo operacional da planta, tais como o gerenciamento do resíduo oriundo do processo de separação do CAP da massa líquida.

O estudo da taxa de adsorção instantânea, também interpretada como velocidade de adsorção, comprovou que, de forma geral, ocorre uma queda acentuada do valor absoluto desta ao longo do tempo de contato adsorvente-adsorvato e que, para a maioria dos ensaios realizados, esta queda ocorre de forma significativa nos primeiros 30 minutos do processo. Adicionalmente, os resultados obtidos em alguns dos testes sugerem, por exemplo, que a taxa de adsorção tende a se anular à medida que o processo tende ao equilíbrio químico. O conhecimento desta dinâmica pode ser de grande auxílio para o dimensionamento dos sistemas de tratamento, contribuindo por exemplo, para melhor definição da carga hidráulica, dosagem de adsorvente e demais parâmetros de projeto, com vistas a sua viabilidade técnica e econômica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS- ASTM. D3860-98 Standard practice for determination of adsorptive capacity of activated carbon by aqueous phase isotherm technique. Filadélfia, 2008.
1. COOPER, E. R.; SIEWICKI, T. C.; PHILLIPS, K. Preliminary risk assessment database and risk ranking of pharmaceuticals in the environment. **Science of the Total Environment**, v. 398, p.26–33, 2008.
2. DRAMAN, S. F. S.; BATRA'AZMAN, I. A.; MOHD, N. Removal of paracetamol from aqueous solution by dried cellulose and activated carbon. **ARNP-JEAS**, v. 10, n. 20, nov. 2015.
3. FATTA, D.; NIKOLAOU A.; ACHILLEOS A.; MERIC S. Analytical methods for tracing pharmaceutical residues in water and wastewater. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, v. 26, n. 6, p.515–533, 2007.
4. GALHETAS, M.; MESTRE, A. S.; PINTO, M.L.; GULYRUTLU, I.; LOPES, H.; CARVALHO, A. P. Chars from gasification of coal and pine activated with K₂CO₃: acetaminophen and caffeine adsorption from aqueous solutions. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 433, p. 94 -103, 2014.
5. HIRSCH, R.; TERNES, T.; HABERERA, K.; KRATZ, K.L. Occurrence of antibiotics in the aquatic environment. **Science of The Total Environment**, v. 225, n. 1-2, p. 109-118, 1999.

6. KLAVARIOTI, M.; MANTZAVINOS, D.; KASSINOS, D. Removal of residual pharmaceuticals from aqueous systems by advanced oxidation processes. **Environment International**, v. 35, n. 2, p. 402–417, 2009.
7. LINDEN, R.; ANTUNES, M. V.; HEIZELMANN, L. S.; FLECK, J.D.; STAGGEMEIER, R.; FABRES, R. B.; VECCHIA, A.D.; NASCIMENTO, C.A.; SPILKI, F.R. Caffeine as an indicator of human fecal contamination in the Sinos River: a preliminary study. **Brazilian Journal of Biology**, v.75, n.2, p. 81-84, 2015.
8. LONGHIN, S. R.; **Estudo da degradação dos antibióticos beta lactâmicos amoxicilina e ampicilina e avaliação da toxicidade e biodegradabilidade de seus produtos**. 2008. 176 f. Dissertação (Doutorado em Química) –Universidade de Brasília, Brasília, 2008.
9. MOUSSAVI, G.; ALAHABADI, A.; YAGHMAEIAN, K.; ESKANDARI, M. Preparation, characterization and adsorption potential of the NH₄-Cl-induced activated carbon for the removal of amoxicillin antibiotic from water. **Chemical Engineering Journal**, v. 217, p.119-128, 2013.
10. OLIVEIRA, F. C. C., SOUZA, A. T. P. C., DIAS, J. A., DIAS, S. C. L., RUBIM, J. C. A escolha da faixa espectral no uso combinado de métodos espectroscópicos e quimiométricos. **Química Nova**, v. 27, n. 2, p. 218-225, 2004.
11. ORTIZ, N.; SUSCA, C.; DE OLIVEIRA, K. M. R.; BRESSIANI, J. C. Estudo da estabilidade química da magnetita utilizada como adsorvedor na remoção de compostos orgânicos de soluções. **Cerâmica**, v. 49, n. 312, p. 216-222, 2003.
12. PUTRA, E. K.; PRANOWO, R.; SUNARSO, J.; INDRASWATI, N.; ISMADJI, S. Performance of activated carbon and bentonite for adsorption of amoxicillin from wastewater: Mechanisms, isotherms and kinetics. **Water Research**, v. 43, n. 9, p. 2419-2430, 2009.
13. RIBEIRO, A. V. F. N.; BELISÁRIO, M.; GALAZZI, R. M.; BALTHAZAR, D.C.; PEREIRA, M. G.; RIBEIRO, J. N. Evaluation of two bioadsorbents for removing paracetamol from aqueous media. **Electronic Journal of Biotechnology**, v. 14, n. 6, 2011.
14. SILVA, N. C.; **Remoção de Antibióticos da Água Por Meio do Processo de Adsorção em Carvão Ativado**. 2012. 97 f. Dissertação (Mestrado em Química de Materiais)- Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2012.
15. SOTELO, J. L.; RODRÍGUEZ, A.; ÁLVAREZ, S.; GARCÍA, J. Removal of caffeine and diclofenac on activated carbon in fixed bed column. **Chem. Eng. Res. Des.**, v. 90, p.967-974, 2012.
16. TAMBOSI, J.L.; YAMANAKA, L.Y.; JOSÉ, H.J.; MOREIRA, R.F.P.M. Recent Research data on removal of pharmaceuticals from sewage treatment plants (STP). **Química Nova**, v. 33, p. 411-420, 2010.
17. TCHOBANOGLIOUS, G.; STENSEL, H. D.; TSUCHIHASHI, R.; BURTON, F.; ABU-ORF, M.; BOWDEN, G.; PFRANG, W. Metcalf & Eddy. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos**. Tradução: Ivanildo Hespagnol, José Carlos Mierzwa. 5 ed. Porto Alegre, AMGH, 2016. 1980p.
18. VASCONCELOS, O. M. S. **Degradação do antibiótico amoxicilina em efluente de indústria farmacêutica**. 2011. 136 f. Tese (Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos)- Universidade de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.
19. WENG, X.; SUN, Q.; LIN, S.; CHEN, Z.; MEGHARAJ, M.; NAIDU, R. Enhancement of catalytic degradation of amoxicillin in aqueous solution using clay supported bimetallic Fe/Ni nanoparticles. **Chemosphere**, v. 103, p.80–85, 2014.