

Influência das condições de aplicação do carvão ativado pulverizado na eficiência de remoção de azul de metileno no tratamento de água em ciclo completo

Influence of powdered activated carbon application conditions on the methylene blue removal in the water treatment in complete cycle

- **Data de entrada:** 17/01/2019
- **Data de aprovação:** 05/06/2019

Tainara Aparecida Biscola^{1*} | Angela Di Bernardo Dantas¹ | Cristina Filomena Pereira Rosa Paschoalato¹ | Fernando Afonso Marrengula¹ | Mateus Ancheschi Roveda Guimarães²

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2020.073>

ORCID ID

Biscola TA  <https://orcid.org/0000-0002-4027-8184>
Dantas ADB  <https://orcid.org/0000-0003-3144-3130>

Paschoalato C  <https://orcid.org/0000-0001-9074-9784>
Marrengula FA  <https://orcid.org/0000-0001-7349-8813>
Guimarães M  <https://orcid.org/0000-0003-0048-225X>

Resumo

A adsorção em carvão ativado pulverizado (CAP) pode ser usada para complementar o tratamento de água em ciclo completo para a remoção de compostos orgânicos em águas superficiais. O objetivo do estudo foi avaliar a influência do tempo de contato e dosagem de dois CAP na remoção do azul de metileno (AZM) no tratamento de água em ciclo completo, sendo um mineral-CAP A e um vegetal umectado-CAP B. Os resultados mostraram que o CAP A, com IAM de 162 mLg^{-1} , resultou em eficiência de 100% de adsorção do AZM apenas com tempos de contato superiores a 60 min e dosagens acima de 20 mgL^{-1} , enquanto o CAP B, com IAM de 59 mLg^{-1} , resultou em adsorção máxima de 85%. Para o tempo de 5 min, que simula a aplicação do CAP na chegada de água bruta na ETA, as eficiências de adsorção com dosagens de 10 a 30 mgL^{-1} com os dois CAP estudados não foram satisfatórias, indicando que a seleção de um CAP não deve ser feita apenas por suas características, mas a partir da execução de ensaios de tratabilidade.

Palavras-chave: Adsorção. Carvão Ativado Pulverizado. Tratamento de Água. Microcontaminantes. Tempo de Contato. Dosagem. Azul de Metileno.

Abstract

The adsorption on powdered activated carbon (PAC) can be used to complement the water treatment in complete cycle for the removal of organic compounds in surface waters. The objective of the study was to evaluate the influence of contact time and dosage of two PACs on the removal of methylene blue (MB) in the water treatment in a complete cycle, being a mineral-PAC A and a moistened vegetable-PAC B. The results showed that PAC A with MBI of 162 mLg^{-1} adsorbed 100% of MB only with contact time greater than 60 min, for dosages above of 20 mgL^{-1} , whereas PAC B with MBI of 59 mLg^{-1} resulted in maximum removal of 85% for dosage of 10 mgL^{-1} . For the 5 min time (PAC application in the raw water arrival at ETA), the adsorption efficiencies with dosages of 10 to 30 mgL^{-1} with the two PACs studied were not satisfactory, indicating that the selection of a PAC should not be made only by its characteristics, but from the execution of treatability tests.

Keywords: Adsorption. Powdered Activated Carbon. Water Treatment. Microcontaminants. Contact Time. Dosage. Blue Methylene.

¹ Universidade de Ribeirão Preto (Unaerp) - Ribeirão Preto - São Paulo - Brasil.

² Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP) - São Carlos - São Paulo - Brasil.

* **Autora correspondente:** tainarabiscola@gmail.com.

1 INTRODUÇÃO

Microcontaminantes, como desreguladores endócrinos, fármacos, produtos de cuidados pessoais e agrotóxicos, dentre outros compostos orgânicos, mesmo em concentrações de nanogramas por litro, têm sido atualmente o grande problema de qualidade das águas, e são decorrentes de fontes poluidoras, destacando-se os esgotos (industriais ou sanitários) tratados ou in natura e que são lançados nas águas dos mananciais. Alguns desses compostos podem causar efeitos toxicológicos, de genotoxicidade e de resistência de bactérias patogênicas. Uma vez que esses contaminantes são passíveis de atingir os mananciais de abastecimento, os sistemas de tratamento de água em ciclo completo não conseguem removê-los, fato comprovado por diversas pesquisas (PASCHOALATO et al., 2008; MARMO et al., 2010). A formação de subprodutos nas etapas de pré e interoxidação também é um problema existente nas Estações de Tratamento de Água (ETA) em ciclo completo, podendo ou não apresentar elevada toxicidade, levando à necessidade de implantar novas tecnologias ou complementar os sistemas já existentes (CHEN et al., 2008; LIMA et al., 2014; 2017).

Uma das alternativas empregadas nas ETA para a remoção de microcontaminantes é a adsorção em carvão ativado pulverizado (CAP). Essa prática tem sido adotada como complementação ao tratamento em ciclo completo, sendo de fácil implementação em ETAs existentes, cujo principal objetivo é remover compostos odoríferos, toxinas liberadas por cianobactérias, subprodutos organohalogenados, microcontaminantes orgânicos (fármacos, hormônios, agrotóxicos, produtos de cuidados pessoais, etc), sendo que dentre os compostos contaminantes muitos destes não se apresentam na legislação brasileira (PASCHOALATO et al., 2008; KHAH e ANSARI, 2009; MARMO et al., 2010; FERNANDES et al., 2011).

O carvão ativado (CA) é um excelente adsorvente constituído por moléculas de carbono e envolvido por micro, meso e macroporos que são capazes de adsorver moléculas contaminantes de variados tamanhos. A aplicação do CAP nas ETA é geralmente feita sem a realização de estudos de tratabilidade e implantada em sistemas improvisados, prejudicando o sucesso de adsorção, a qual depende de variáveis como o tipo de carvão, as características adsorptivas, tempo de contato, dosagem, ponto de aplicação, pH, molécula do adsorvato e a presença da préoxidação antecedendo à adsorção (ZAGO, 2010).

Para caracterizar o CA, geralmente são determinados os parâmetros número de iodo (NI), índice de azul de metileno (IAM), pH, teor de cinzas, teor de umidade, dentre outros. Para a determinação do IAM, são usados os procedimentos da norma japonesa JIS K 1474/1991, e esse índice pode ser usado como um indicativo do potencial do CAP na adsorção de moléculas com tamanho molecular similar ao azul de metileno, e está relacionado a área superficial dos poros maiores do que 1,5 nm.

É comum a aquisição de CAP nas ETAs pelo menor custo, e sua aplicação se dá geralmente no canal de chegada da água bruta ou na unidade de mistura rápida das ETAs, sem tempo de contato prévio à coagulação, podendo haver redução na taxa de adsorção, devido à interferência de coagulantes, uma vez que na adição do coagulante ocorre a formação de pequenos flocos, saturando rapidamente o carvão (DI BERNARDO et al., 2017). Essa prática pode acarretar a necessidade de aplicação de elevadas dosagens para a eficiência desejada, com aumento significativo do custo operacional, e o aumento da geração de lodo. A implantação de uma unidade de adsorção antecedendo a mistura rápida deve ser estudada antes da implantação da instalação de CAP nas ETA, visto que tempos de contato maiores de adsorção potencializarão a adsorção, com redução tanto do consumo de CAP como da geração de lodo, além

de maior segurança operacional. Neste contexto, foram investigadas as variáveis que exercem influência na capacidade de adsorção do CAP, como a matéria-prima do carvão, a dosagem, o tempo de contato do carvão e o ponto de aplicação, na adsorção da molécula de Azul de Metileno (AZM) em ensaios de bancada de ciclo completo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Equipamentos e Métodos Analíticos

Foram utilizados os equipamentos turbidímetro, espectrofotômetro, potenciômetro e jarteste. Os métodos de medição seguiram o Standard Methods (APHA, 2017), e foram feitas medidas de turbidez, turvação, cor aparente, cor verdadeira, concentração de AZM, pH, metais (ferro, manganês e alumínio totais) e alcalinidade.

Turbidez ou turvação são parâmetros expressos em unidades como NTU (Unidade de Turbidez Nefelométrica)/FTU (Unidade de Turbidimétrica de Formazina), sendo que ambas são compatíveis, pois utilizam como padrão primário para calibração a formazina, mas a unidade em FTU é pouco utilizada (USEPA, 1978; SABESP, 1999). De acordo com o Método 180-1 (USEPA, 1993), o uso de diferentes equipamentos para a leitura de turbidez pode diferir significativamente na medida das amostras. A turbidez foi determinada por meio de dois métodos, o nefelométrico e o absorvitivo (turbidimetria) no comprimento de onda de 450 nm. A turbidimetria é o método em que a luz passa através do fluido em um ângulo de 180° do feixe incidente interagindo com as partículas suspensas e as mesmas absorvem a luz, reduzindo a dispersão da radiação em todas as direções, e a nefelometria determina a turbidez em um ângulo de 90° do feixe incidente (USEPA, 1978; MARTINS, 2012). Em função da interferência da coloração do AZM na medição nefelométrica de turbidez, optou-se pelo uso do método absorvitivo em alguns ensaios.

2.2 Caracterização dos Carvões Ativados Pulverizados

Os carvões ativados pulverizados utilizados neste estudo são produtos comerciais fornecidos por uma empresa internacional (A) e uma nacional (B) sendo de origem mineral (betuminoso) e de origem vegetal (pinus), respectivamente. A caracterização das amostras de carvão foi realizada por meio da determinação dos vários parâmetros físico-químicos, como pH (ASTM D-3838), umidade (NBR 12.077), teor de cinzas (NBR 16.586), número de iodo (NI) (ABNT MB-3410) e índice de azul de metileno (IAM) (JIS K 1474/1991), conforme apresentado na metodologia aplicada no trabalho de Biscola (2019). Para o desempenho de adsorção do azul de metileno na obtenção do IAM foi empregada a metodologia da norma JIS K 1474/1991. Para a determinação da massa de azul de metileno adsorvido por massa de carvão ativado, foi utilizada a Eq. 1:

$$Q_e = \frac{(1200 - C_e) \times \left(\frac{25}{1000}\right)}{S} \quad (1)$$

Onde:

Q_e = quantidade de azul de metileno adsorvida (mgg^{-1});

C_e = concentração final remanescente de azul de metileno (mgL^{-1});

S = massa de carvão (g);

1200 = concentração inicial de azul de metileno (mgL^{-1});

25/1000 = volume de azul de metileno (L).

Para a determinação do Índice de azul de metileno na concentração remanescente de 0,24 mgL^{-1} foi utilizada a Eq. 2:

$$\text{IAM} = \frac{Q_e}{C_0} \quad (2)$$

Onde:

IAM = Índice de Azul de Metileno (mLg^{-1});

Q_e = capacidade adsorptiva do azul de metileno para $0,24 \text{ mgL}^{-1}$ (mgg^{-1});
 C_0 = concentração inicial de azul de metileno ($1,2 \text{ gL}^{-1}$).

A isoterma de adsorção foi linearizada conforme modelo matemático de Freundlich, pois em quase todos os casos esse modelo resulta em melhor ajuste dos dados experimentais no tratamento de água (MASSCHELEIN, 1992, p.321-363 apud BRANDÃO e SILVA, 2005, p.424) e aplicada com o intuito de investigar a relação adsorvente/adsorvato e estimar a capacidade máxima adsorptiva que o carvão pode ter em relação ao contaminante. Para a linearização da isoterma foi utilizada a Eq. 3.

$$\log Q_e = \frac{1}{n} \cdot C_e + \log K_f \quad (3)$$

Em que:

Q_e : é a relação entre a quantidade de adsorvato e de adsorvente, expressa em mgg^{-1} ; C_e : é a concentração de adsorvato na condição de equilíbrio, expressa em mgL^{-1} ; K_f e n : são constantes experimentais determinados para um dado sistema adsorvato-adsorvente.

2.3 Preparo e Caracterização da Água de Estudo

A água de estudo foi preparada a partir da mistura de uma suspensão de caulinita com água do poço da Unaerp. A água do poço foi inicialmente desclorada com tiosulfato de sódio e foram acrescidos 2,0 kg de caulín, conforme procedimentos detalhados em Dantas e Di Bernardo (2006). A suspensão de caulinita sedimentou por 48 h, e foi coletado o sobrenadante; a suspensão de caulinita foi misturada com a água do poço desclorada para conferir turbidez até o valor de 100 uT, valor adotado com base no trabalho de Bomfim (2015). Tanto a água do poço como a água de estudo foram caracterizadas pelos parâmetros pH, cor verdadeira, turbidez, alcalinidade, metais (Fe, Al e Mn) e temperatura. Também foi feito o monitoramento da turbidez e da temperatura de $25,0^\circ\text{C} \pm 1$ diariamente.

2.4 Ensaios de Tratabilidade

Foram feitas quatro séries de ensaios em jarreste e filtros de laboratório de areia, nos quais foram variadas as condições de coagulação. A água de estudo foi fortificada com azul de metileno para investigar a eficiência do carvão ativado na adsorção do azul de metileno. A Fig. 1 mostra o fluxograma dos ensaios de tratabilidade com a água de estudo.

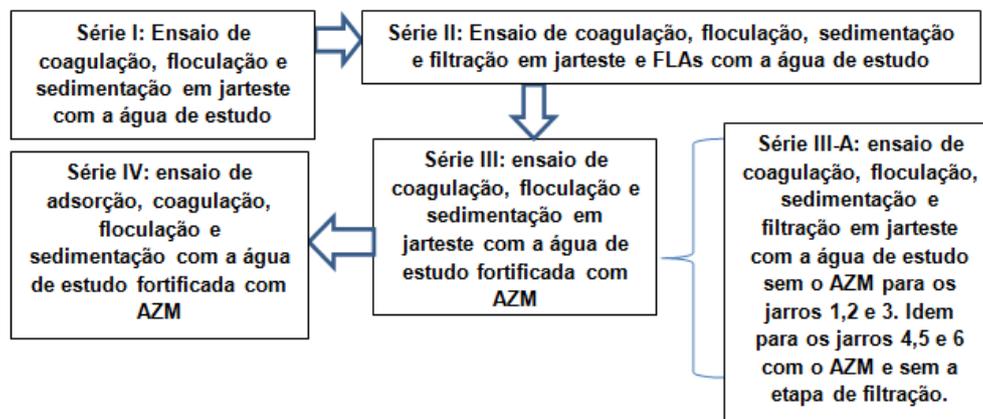


Figura 1: Fluxograma dos ensaios de tratabilidade com a água de estudo

2.4.1 Ensaio da Série I

Nos ensaios da Série I foi avaliada a eficiência de clarificação da água de estudo após coagulação, floculação e sedimentação. Utilizou-se o hidróxido de sódio como alcalinizante (dosagens entre 2 e 10 mgL⁻¹) e o policloreto de alumínio (PAC) como coagulante (dosagens entre 20 e 70 mgL⁻¹ do produto comercial líquido com 10-12% Al₂O₃). Os parâmetros de execução do ensaio foram tempo de mistura rápida (Tmr): 10 s; gradiente de mistura rápida (Gmr): 1000 s⁻¹; tempo de floculação (Tf): 20 min; gradiente de floculação (Gf): 30 s⁻¹; velocidade de sedimentação 1 (Vs1): 3,5 cmmin⁻¹; velocidade de sedimentação 2 (Vs2): 1,4 cmmin⁻¹. Os parâmetros medidos foram pH da água coagulada e turbidez da água decantada. Foram construídos diagramas de coagulação para as duas velocidades de sedimentação e selecionados seis pontos, os quais foram repetidos para a confirmação dos resultados. Os critérios para a seleção das melhores condições de coagulação (dosagem de coagulantes x pH de coagulação) foram: obtenção de turbidez da água decantada inferior a 5,0 uT e/ou aplicação das menores dosagens de produtos químicos (PAC e NaOH).

2.4.2 Ensaio da Série II

Após realizar o ensaio da Série I e identificar as melhores condições de coagulação, os ensaios de coagulação, floculação e sedimentação foram repetidos, acrescida a etapa de filtração em FLA (Filtros de Laboratório de Areia) ao término da sedimentação. Nos ensaios de coagulação, floculação, sedimentação e filtração, foram usadas as condições de coagulação selecionadas na Série I (pontos de 1 a 6), com os mesmos parâmetros de execução do ensaio da Série I, e Filtração em FLA com: taxa de filtração de 60 m³.m⁻².d⁻¹; tempo de coleta de 15 min e areia tipo I (grãos de areia entre 0,30 e 0,59 mm). Os parâmetros

medidos foram pH da água coagulada; turbidez da água decantada; turbidez, turvação, metais (ferro total, alumínio total, manganês total) e cor aparente da água filtrada.

2.4.3 Ensaio da Série III

Foi feito nesta etapa o ensaio de coagulação, floculação e sedimentação, utilizando a água de estudo fortificada com AZM (Azul de Metileno). A concentração de contaminação foi definida com base na capacidade máxima de adsorção do composto orgânico obtida com o CAP A. Foi feita a caracterização da água de estudo após a fortificação, e para a execução do ensaio foram adotados os mesmos parâmetros listados da Série II, mas a coleta de água decantada foi feita apenas para a velocidade de sedimentação 2 (Vs2). Os parâmetros medidos foram: pH da água coagulada; turbidez e turvação na Vs2. Dos seis pontos selecionados e reproduzidos da Série I, somente um foi escolhido a partir do menor valor de turbidez e turvação da água decantada coletada na velocidade de sedimentação 1,4 cmmin⁻¹ (Vs2).

2.4.3.1 Ensaio da Série III-A

Após determinadas as dosagens de coagulante e alcalinizante no ensaio da Série III, foi executado um ensaio em triplicata. Nos jarros 1, 2 e 3 foi realizado o ensaio da água de estudo sem o AZM (coagulação, floculação, sedimentação e filtração) nas mesmas condições de execução do ensaio da Série II. Os parâmetros medidos foram pH da água coagulada e turbidez das águas decantada e filtrada (para as duas velocidades de sedimentação, Vs1 e Vs2). Nos jarros 4, 5 e 6 foi realizado o ensaio da água de estudo fortificada com AZM (coagulação, floculação e sedimentação) e mesmas condições de execução do ensaio da Série III, porém coletadas amostras de água decantada para as duas velocidades de sedimentação. Os parâmetros medidos foram pH da água

coagulada e turbidez da água decantada, e também foram feitas as medidas de concentração de AZM das amostras de água decantada.

2.4.3.2 Ensaio da Série IV

Foram efetuados os ensaios de adsorção, coagulação, floculação e sedimentação em jarreste. As dosagens de hidróxido de sódio, de PAC e a concentração de AZM foram definidas na Série III. Foram estabelecidas dosagens de CAP entre 10 e 30 mgL⁻¹. Os parâmetros de execução foram: tempo de adsorção (Tad): 5 a 120 min, Tmr (10 s), Gmr (100 s⁻¹), Vs2 (1,4 cmmin⁻¹), Gf (40 s⁻¹), TF (15 min) e Taxa de Filtração (60 m³/m²/dia). Após a etapa de sedimentação, as amostras foram centrifugadas. Os parâmetros medidos foram pH da água coagulada, turvação e concentração de

AZM para as amostras de água decantada coletadas com a Vs2 (após centrifugação). Para o entendimento da influência do tempo de contato e da dosagem do carvão na eficiência de remoção do AZM, foi feito o planejamento dos experimentos utilizando o software Protimiza Experimental Design. Os ensaios foram realizados em Delineamento de Faces Centradas (DFC) aplicável à Metodologia de Superfície de Resposta para otimizar as variáveis tempo de contato e dosagem de carvão ativado pulverizado. A análise estatística avaliou o desempenho de adsorção sobre os efeitos de cada variável estudada na concentração final de AZM da água decantada. A Tabela 1 apresenta os níveis fatoriais mínimo (-1) e máximo (+1) e ponto central (0) considerando a variação da dosagem de carvão ativado de 10 a 30 mgL⁻¹ e tempo de contato de 5 a 120 min.

Tabela 1: Níveis fatoriais de variação de dosagem e tempo de contato para ambos os carvões ativados

Fator	Unidade	Símbolo	-1	0	+1
Dosagem	mgL ⁻¹	X1	10	20	30
Tempo de contato	min	X2	5	62,5	120

Os valores das dosagens de carvão ativado e dos tempos de contato adotados no experimento se justificam por serem viáveis e comuns nas aplicações em ETAs em escala real. O tempo de 5 min simula a aplicação do CAP na entrada da ETA em ciclo completo e o 120 min, considerando a implantação de uma câmara de adsorção ou simulando uma condição de aplicação na adutora de água bruta.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Caracterização dos carvões ativados pulverizados

A Tabela 2 apresenta os resultados da caracterização de ambos os carvões ativados estudados.

Tabela 2: Resultados da caracterização dos carvões ativados pulverizados

CAP	pH	Umidade (%)	Cinzas (%)	Índice de Azul de Metileno (mLg ⁻¹)	Número de lodo (mgg ⁻¹)
A	6,78	3,07	6,89	162	1182,76
B	9,25	30,04	5,67	59	855,95

Os resultados indicaram que o CAP A resultou natureza ácida, enquanto o CAP B caráter básico. Segundo Toledo et al. (2005), o sucesso da adsorção está nas cargas opostas entre adsorvente e adsorvato, pois quando essas cargas são iguais a capacidade adsortiva é prejudicada, ocorrendo a repulsão eletrostática. Na análise do teor de umidade, o CAP A apresentou valor dentro do limite

máximo estabelecido pela norma NBR 12.077 com 3,07%, enquanto o CAP B revelou valor superior a 30% por se tratar de um CAP comercial umectado. Por se tratar de um pó extremamente inflamável, a grande vantagem do CAP umectado em ETAs é a redução dos riscos de incêndio e explosão. Sua aquisição é comum, e geralmente sua compra ocorre quando a ETA não possui as instalações de armazenamento adequadas.

Percebe-se que o teor de cinzas dos carvões resultou baixo, com quantidade mínima de matéria inorgânica. Outras pesquisas mostram resultados de teor de cinzas elevados de acordo com os trabalhos de Bernardo et al. (1997) com 15,5%, LOPES et al. (2013) com 15,20% e ALVES et al. (2015) com 13,75%. Para carvões ativados comerciais, é recomendado teor de cinzas inferior a 15% (BERNARDO et al., 1997).

Sabendo-se que o iodo possui diâmetro molecular de aproximadamente 0,27 nm, o NI está relacionado com a capacidade do carvão em adsorver moléculas de tamanho menores do que 1 nm em seus microporos (KURODA et al., 2005; BRANDÃO E SILVA, 2006; LEAL et al., 2013; DI BERNARDO et al., 2017). O limite mínimo do número de iodo estabelecido pela AWWA standards (1991) para CAP é de 500 mgg^{-1} , enquanto para a norma EB-2133 o valor limite mínimo é de 600 mgg^{-1} . Observa-se que ambos os CAPs atenderam ao limite exigido conforme as normas citadas, apresentando valores superiores a 800 mgg^{-1} . O carvão com maior NI foi o CAP A,

indicando uma possível maior capacidade em adsorver moléculas orgânicas microporosas em relação ao CAP B, resultado encontrado nos trabalhos de Zago (2010), Martinez et al. (2011) e Pozzetti et al. (2013). Zago (2010) analisou diferentes tipos de CAPs no teste de número de iodo e concluiu que o CAP betuminoso revelou maior adsorção de moléculas em seus microporos em comparação com o CAP vegetal. De acordo com o trabalho de Pozzetti et al. (2013), os autores investigaram a eficiência dos CAPs betuminoso e de pinus na remoção de lixiviado e caracterizaram esses carvões utilizando o parâmetro IAM. Os pesquisadores concluíram que o carvão mineral (betuminoso) teve melhor capacidade adsorptiva em relação ao carvão de origem vegetal (pinus), resultando em valores máximos de 142 e 134 mLg^{-1} , respectivamente. No estudo de Martinez et al. (2011), foi obtido IAM de 120 mLg^{-1} com o carvão ativado vegetal (babaçu). O CAP A resultou em maior capacidade adsorptiva em relação ao estudo de Pozzetti et al. (2013) e o CAP B baixa capacidade adsorptiva em relação à pesquisa de Pozzetti et al. (2013) e Martinez et al. (2011). O CAP A apresentou maior IAM em relação ao CAP B, revelando maior capacidade em adsorver moléculas com estrutura molecular similar ao AZM. Quando comparados os resultados obtidos com os da literatura, os carvões apresentaram índice de azul de metileno inferiores ao proposto pela literatura marroquina de 180 mLg^{-1} (BAÇAUI, 2001). As isotermas de adsorção do AZM obtidas são representadas pelas Figs. 2 e 3.

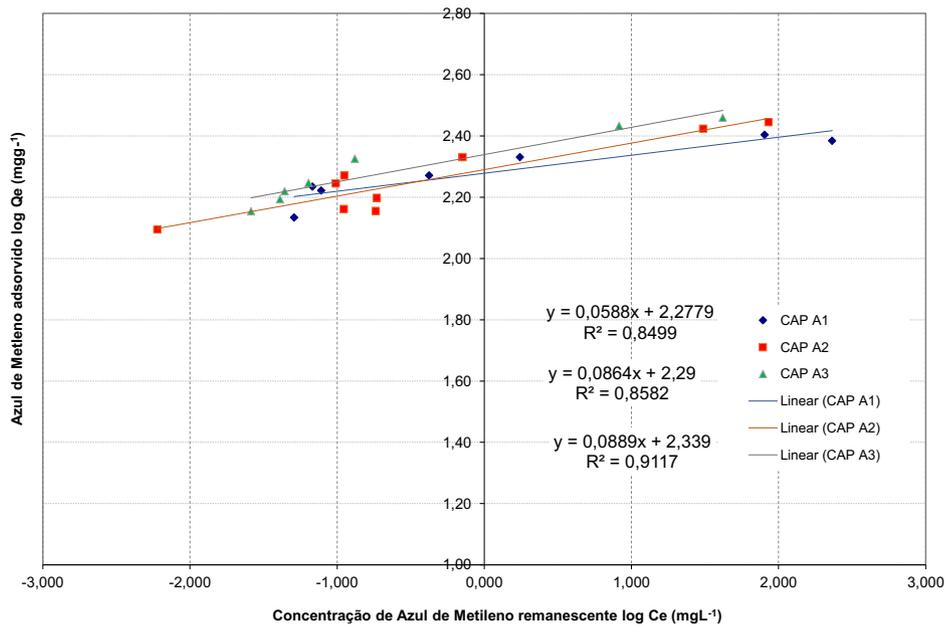


Figura 2: Isoterma de adsorção do azul de metileno para o CAP A

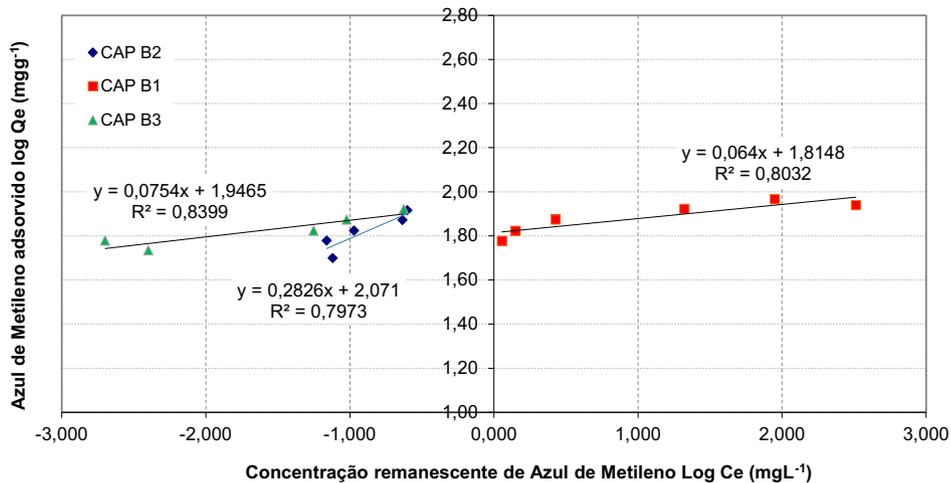


Figura 3: Isoterma de adsorção do azul de metileno para o CAP B

Os parâmetros cinéticos de linearização de ambos os CAPs podem ser observados na Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros cinéticos de linearização para os carvões ativados pulverizados

CAP	1/n	Kf (mgg ⁻¹)
A	0,078	200,96
B	0,141	90,50

A constante de equilíbrio de Freundlich, Kf, indica a capacidade adsorvativa e n é uma constante que indica a afinidade do adsorvato pela superfície do adsorvente, ou seja, a interação e quão forte é a ligação entre ambos. O valor médio de Kf do CAP A apresentou alta capacidade de adsorção de AZM e baixo valor de 1/n, exibindo forte ligação entre o adsorvente para com o

adsorvato, mostrando que a adsorção é favorável. No trabalho de Martinez et al. (2011), os maiores valores de Kf encontrados foram para os carvões ativados pulverizado e granular de ba-baçu, com valores de 1/n abaixo de 1. A isoterma de adsorção apresentou ótima correlação com R² entre 0,8 e 0,9. O CAP B apresentou valores de Kf muito inferiores em relação ao CAP A, revelando baixa capacidade adsortiva. O CAP A apresentou

R² maior que 0,9, enquanto o CAP B apresentou um R² entre 0,7 e 0,8.

3.2 Caracterização da Água de Estudo

Os parâmetros de caracterização das amostras de água do poço e das amostras da água de estudo preparadas são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Caracterização da água do poço e da água de estudo para a execução dos ensaios com carvão ativado pulverizado

Parâmetro	Água do poço	Amostra 1		Amostra 2		Unidade
		Água de estudo	Água de estudo	Água de estudo	Água de estudo	
pH	6,54	6,71	7,01	-	-	-
Cor Verdadeira	< 1	< 1	< 1	uH	-	-
Turbidez	2,0	95,0 a 102,0	95,5 a 100,3	uT	-	-
Alcalinidade	25	25	20	mgL ⁻¹ CaCO ₃ L ⁻¹	-	-
Ferro Total	0,322	0,423	0,458	mg FeL ⁻¹	-	-
Manganês Total	0,050	0,060	0,062	mg MnL ⁻¹	-	-
Alumínio Total	< 0,010	< 0,010	< 0,010	mg ALL ⁻¹	-	-
Temperatura	25,0	25,0	25,0	°C	-	-

A Tabela 5 mostra os valores de temperatura e de turbidez das amostras 1 e 2 nos dias de execução dos ensaios.

Tabela 5: Temperatura e turbidez das amostras 1 e 2 nos dias de execução dos ensaios

Parâmetro	Amostra 1				
	09/mar	112/mar	113/mar	114/mar	115/mar
Temperatura da água (°C)	25,0	25,0	24,0	26,0	25,0
Turbidez (uT)	100,0	102,0	96,3	95,0	97,3
Parâmetro	Amostra 2				
	114/mai	115/mai	116/mai	117/mai	222/mai
Temperatura da água (°C)	25,0	24,0	25,0	26,0	25,0
Turbidez (uT)	96,0	95,5	100,3	97,8	98,1

Não houve variação da temperatura durante o período dos ensaios, enquanto a turbidez variou entre 95,0 a 102,0 uT para ambas as amostras. Os resultados estão dentro do próprio erro experimental de leitura de turbidez. Para as amostras 1 e 2, os valores médios de turbidez resultaram em 98,1 e 97,5 uT, enquanto os desvios padrão resultaram em 2,5 uT e 1,7 uT, respectivamente.

3.3 Ensaios de Tratabilidade

3.3.1 Ensaio da Série I

Com base no critério estabelecido na metodologia, foram selecionados seis pontos na região de menor turbidez da água decantada, em destaque nas Figs. 4 e 5 (dosagem de coagulante no eixo y, em função ao pH de coagulação no eixo x e a

turbidez representada pelas bolhas). Foram traçadas as curvas de isoeffiência nos diagramas com valores de turbidez menores que 5,0 uT. Os seis pontos foram reproduzidos e ocorreu uma pequena variação no pH de coagulação entre

0,13 e 8,00%. No entanto, a turbidez resultou inferior a 5,0 uT para as velocidades de sedimentação de 3,5 cmmin^{-1} e de 1,4 cmmin^{-1} , podendo-se assegurar que a coagulação no mecanismo de varredura foi satisfatória.

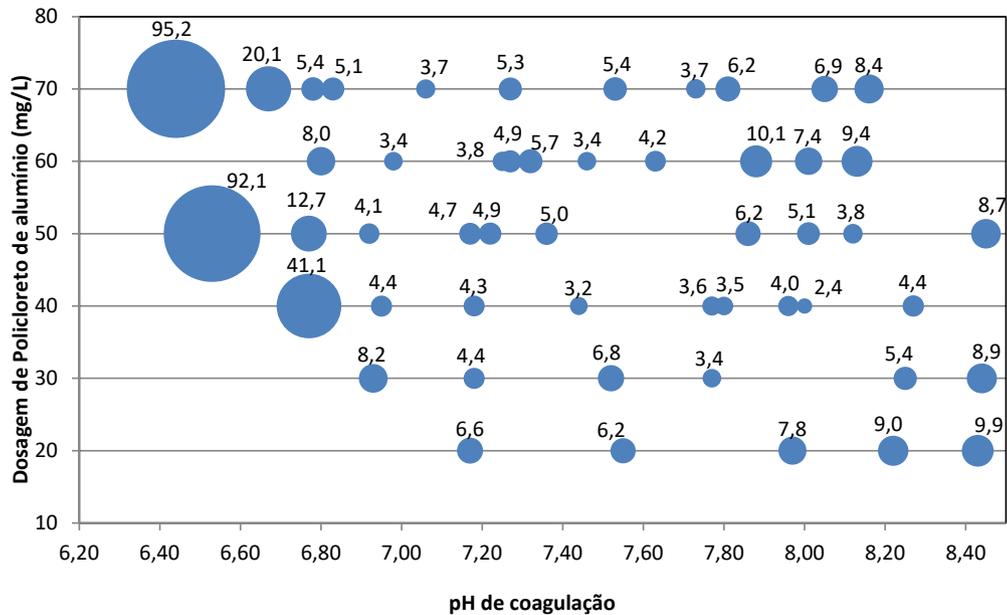


Figura 4: Turbidez da água decantada para Vs1 3,5 cmmin^{-1} em função da dosagem de coagulante e pH de coagulação

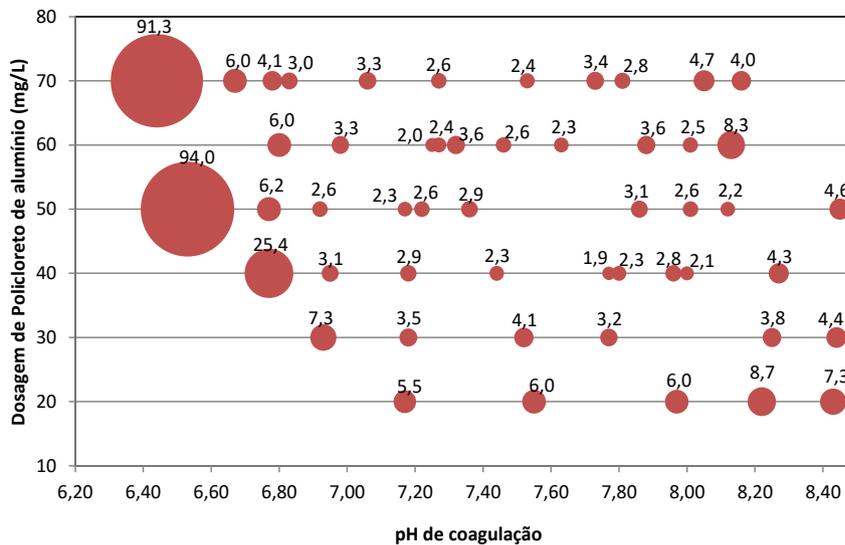


Figura 5: Turbidez da água decantada para Vs2 1,4 cmmin^{-1} em função da dosagem de coagulante e pH de coagulação

Nota-se que no gráfico de dosagem de PAC versus pH de coagulação para velocidade de sedimentação igual a 3,5 cmmin⁻¹, Fig. 3, a região que resultou em maior remoção de turbidez foi na faixa de pH entre 7,00 e 8,20 com dosagens de coagulante entre 40 e 70 mgL⁻¹. Com valores de pH de coagulação maiores que 8,20, a eficiência de clarificação se reduziu e as dosagens de químicos foram maiores. A Fig. 4 mostra a região de maior remoção de turbidez com velocidade de

sedimentação igual a 1,4 cmmin⁻¹, compreendida praticamente na mesma faixa de dosagens de PAC e pH de coagulação obtida com a velocidade de sedimentação de 3,5 cmmin⁻¹.

3.3.2 Ensaio da Série II

Os resultados do ensaio da série II são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6: pH de coagulação, turbidez da água decantada, turbidez, turvação, metais (Fe/Mn/Al totais) e cor aparente da água filtrada obtidos no ensaio da Série II

Turbidez da água decantada (uT)					
Ponto	Dosagem de NaOH (mgL ⁻¹)	Dosagem de PAC (mgL ⁻¹)	pH de coagulação	Vs1 = 3,5 cmmin ⁻¹	Vs2 = 1,4 cmmin ⁻¹
1	6,0	40	7,80	3,5	2,3
2	6,5	40	7,99	5,0	2,6
3	5,4	50	7,20	3,5	1,9
4	7,6	50	7,89	3,6	1,8
5	7,0	60	7,31	4,3	2,9
6	7,0	70	7,62	4,4	3,7
Água filtrada					
Ponto	Turbidez (uT)	Turvação (FTU)	Fe/Mn/Al total (mgL ⁻¹)	Cor aparente (uH)	
1	0,4	5	< 0,010	5	
2	0,5	4	< 0,010	10	
3	0,5	< 1	< 0,010	2	
4	0,4	5	< 0,010	15	
5	0,4	< 1	< 0,010	5	
6	0,4	< 1	< 0,010	1	

Os valores de turbidez da água decantada resultaram abaixo de 5,0 uT para as duas velocidades de sedimentação e da água filtrada com valores inferiores a 0,5 uT de turbidez, 5 FTU de turvação e 15 uH de cor aparente, confirmando que as condições de coagulação escolhidas foram eficientes para a clarificação da água de estudo. Assim, a água filtrada com valor inferior a 5 FTU de turvação passou a ser considerada um

referencial de coagulação eficiente neste estudo. Não foram observados residuais de ferro, de manganês e de alumínio na água filtrada nas condições de coagulação investigadas.

3.3.3 Ensaio da Série III

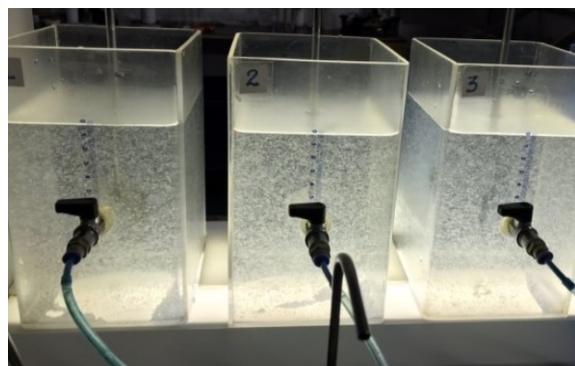
Os resultados do ensaio da Série III são mostrados na Tabela 7.

Tabela 7: pH, turbidez, turvação com dosagens de alcalinizante e de coagulante da Série III para a água decantada na Vs2

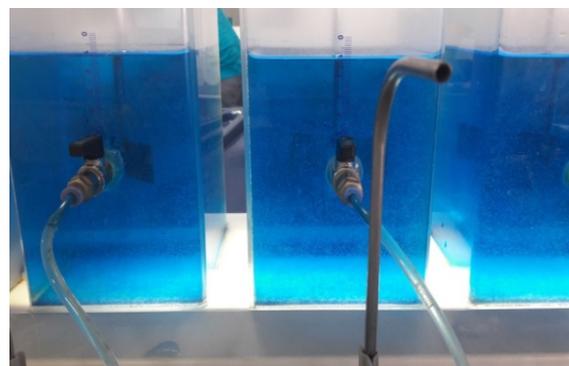
Ponto	Dosagem de alcalinizante NaOH (mgL ⁻¹)	Dosagem de coagulante PAC (mgL ⁻¹)	pH de coagulação	Água decantada Vs2 = 1,4 cmmin ⁻¹	
				Turbidez (uT)	Turvação (FTU)
1	6,0	40	7,57	27,6	10
2	6,5	40	7,71	20,1	9
3	5,4	50	7,44	30,3	8
4	7,6	50	7,66	20,6	9
5	7,0	60	7,52	16,9	6
6	7,0	70	7,47	27,6	10

A água bruta fortificada com 4,00 mgL⁻¹ de AZM resultou em uma concentração inicial de 3,223 mgL⁻¹ de AZM. A molécula de AZM hidratada possui massa molecular igual a 373,5 gmol⁻¹, ao passo que, quando a mesma entra em contato com solução aquosa, ocorre sua dissociação iônica, e a molécula passa a possuir 319,5 gmol⁻¹. A concentração de contaminação foi de 4,00 mgL⁻¹ em 100%; em 85,54%, a concentração real foi de 3,422 mgL⁻¹, resultado semelhante ao valor obtido pelo equipamento. No ensaio de coagulação, floculação e sedimentação para água decantada foi escolhido o ponto com dosagem de PAC de 60 mgL⁻¹ e NaOH de 7,0 mgL⁻¹ em função do menor valor de turbidez e de turvação (valores de turbidez e turvação de 16,9 uT e 6 FTU, respectiva-

mente). Quando se fortificou a água de estudo com solução de AZM, as leituras de turbidez pelo método nefelométrico aumentaram significativamente em razão da intensa coloração do AZM e sua propriedade de absorver luz (CORREIA et al., 2008). De acordo com o Método 180-1 (USEPA, 1993), ISO 7027 (2016) e Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 2130B (APHA, 1992), existe interferência da cor na leitura da turbidez, uma vez que a luz emitida para a determinação dos sólidos em suspensão é absorvida pela mesma, fazendo com que o resultado seja negativo. Entretanto, observou-se visualmente flocos de mesmo tamanho ao final da floculação, fotos das Figs. 6 A e 6 B.



(a)



(b)

Figura 6: (a) Formação dos flocos da água de estudo sem o AZM e (b) Formação dos flocos da água de estudo com o AZM

Os parâmetros obtidos para os jarros 1, 2 e 3 sem o AZM são mostrados na Tabela 8 e para os jarros 4,5 e 6, com o AZM na Tabela 9.

Tabela 8: Parâmetros obtidos do ensaio de coagulação, floculação, sedimentação e filtração da água bruta sem o AZM (em tréplica)

Jarro	Dosagem de NaOH (mgL ⁻¹)	Dosagem de PAC (mgL ⁻¹)	pH de coagulação	Água decantada		Água filtrada
				Turbidez Vs1 = 3,5 cmmin ⁻¹ (uT)	Turbidez Vs2 = 1,4 cmmin ⁻¹ (uT)	Turbidez (uT)
1	7,0	60	7,80	1,1	0,6	0,3
2	7,0	60	7,64	0,7	0,5	0,2
3	7,0	60	7,74	1,1	0,4	0,2

Tabela 9: Parâmetros obtidos do ensaio de coagulação, floculação e sedimentação da água de estudo com AZM (em tréplica)

Jarro	pH de coagulação	Água decantada Vs1 = 3,5 cmmin ⁻¹	Água decantada Vs2 = 1,4 cmmin ⁻¹
		AZM (mgL ⁻¹)	AZM (mgL ⁻¹)
4	7,86	2,565	2,400
5	7,89	2,360	2,105
6	7,86	2,741	2,671

Observou-se que, para as dosagens de coagulante e alcalinizante definidas no ensaio da Série III, a porcentagem média de remoção de azul de metileno foi de 21 a 26% para água decantada em relação à concentração inicial da água de estudo, evidenciando a necessidade da adsorção em CAP para sua remoção. Todos os valores de

turvação da água decantada resultaram inferiores a 0,01 FTU.

3.3.4 Ensaio da Série IV

Os resultados do ensaio de adsorção, coagulação, floculação e sedimentação com o CAP A são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10: Resultados do ensaio de adsorção, coagulação, floculação e sedimentação, variando a dosagem e tempo de contato do CAP A

Dosagem de NaOH (mgL ⁻¹)	Dosagem de PAC (mgL ⁻¹)	Dosagem de CAP (mgL ⁻¹)	Tempo de adsorção (min)	pH de coagulação	Água decantada Vs2	
					Turvação (FTU)	Concentração de AZM (mgL ⁻¹)
7	60	10	5	7,26	< 0,010	0,322
7	60	30	5	7,02	< 0,010	0,176
7	60	10	120	7,34	< 0,010	0,145
7	60	30	120	7,40	< 0,010	< 0,010
7	60	10	62,5	7,40	< 0,010	0,299
7	60	30	62,5	7,42	< 0,010	< 0,010
7	60	20	5	7,41	< 0,010	0,140
7	60	20	120	7,48	< 0,010	< 0,010
7	60	20	62,5	7,28	< 0,010	0,042
7	60	20	62,5	7,53	< 0,010	0,011
7	60	20	62,5	7,49	< 0,010	< 0,010

A turvação mostrou-se um parâmetro indicativo de que a coagulação ocorreu de forma eficiente na varredura, apresentando valores menores do que 0,010 FTU. Os ensaios realizados com o CAP A

mostraram semelhanças em relação a alguns trabalhos, como os de Marchetto e Filho (2005), Müller et al. (2009), Martinez et al. (2011), Silva et al. (2013), Voltan (2014) e Alves et al. (2015). Os auto-

res concluíram que, conforme há o aumento da dosagem de carvão e simultaneamente maior tempo

de contato, menor é o residual de contaminante. A Fig. 7 ilustra os ensaios realizados com o CAP A.



Figura 7: Ensaio de adsorção, coagulação, floculação e sedimentação com CAP A
Foto tirada 3 min após o início da floculação

Os resultados estatísticos obtidos da análise de regressão para a variável resposta, concentração de AZM, mostraram ser significativos ao nível de confiança de 95% para as variáveis x_1 e x_{12} (dosagem) e x_2 (tempo de contato), com valores de p-valor

abaixo de 0,05. Como a variável resposta foi significativa, o programa estatístico utilizado, Protimiza Experimental Design, gerou um modelo matemático baseado na relação entre os dados calculados e os dados reais, conforme Fig. 8, e o mesmo foi validado.

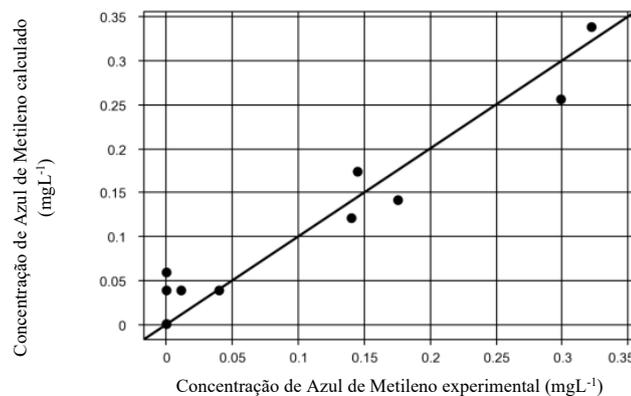


Figura 8: Regressão linear estatística para o CAP A

Com todo um espectro de resultados possíveis gerados dentro da faixa de dosagem de CAP e tempo de contato, comparou-se o modelo estatístico com os dados reais e foi possível obter 91,52 de relação, certificando-se de que o modelo é válido. Os dados da ANOVA também revelaram a validação do modelo, mostrando que o ajuste estatístico para o CAP

A foi excelente, pois houve influência da dosagem e do tempo de contato, ou seja, quanto maiores as dosagens e os tempos de contato, menores resultaram as concentrações de AZM, constatando que o carvão conseguiu adsorver com eficiência o AZM. Pode ser observado na Fig. 9 a superfície de resposta gerada por meio da validação da ANOVA.

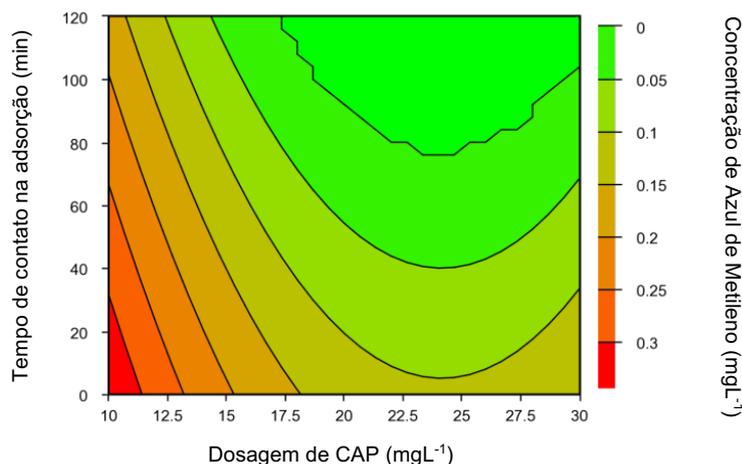


Figura 9: Superfície de resposta do AZM nos ensaios de adsorção com o CAP A, coagulação, floculação e sedimentação em função da dosagem de CAP e do tempo de contato na adsorção

A Fig. 9 mostra as faixas de dosagem e tempos de contato para atingir uma condição otimizada de remoção de AZM. Observa-se que, na região verde claro com dosagens entre 15 e 17,5 mgL⁻¹ e tempo de contato de 120 min, foram obtidas concentrações de AZM inferiores a 0,05 mgL⁻¹. O mesmo comportamento foi verificado para dosagens superiores, por exemplo, com 25 mgL⁻¹ e tempo de contato de 40 min, condição na qual também foram obtidas concentrações residuais de AZM baixas.

Nota-se que com as dosagens de 10 a 30 mgL⁻¹ e tempo de contato de 5 min, condição que simula a aplicação na entrada da ETA ou na unidade de mistura rápida, não foi possível atingir a região ótima de adsorção; contudo, é recomendado que sejam avaliadas outras dosagens superiores de CAP, com o agravante do aumento significativo e em alguns casos, até inviável, do custos operacional e de geração de lodo. Os resultados obtidos do ensaio de adsorção, coagulação, floculação e sedimentação em jarreste com o CAP B são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11: Resultados do ensaio de adsorção, coagulação, floculação e sedimentação, variando a dosagem e tempo de contato do CAP B

Dosagem de NaOH (mgL ⁻¹)	Dosagem de PAC (mgL ⁻¹)	Dosagem de CAP (mgL ⁻¹)	Tempo de contato (min)	pH de coagulação	Água decantada Vs2	
					Turvação (FTU)	Concentração de AZM (mgL ⁻¹)
7	60	10	5	7,52	12	0,800
7	60	30	5	7,47	18	0,800
7	60	10	120	7,55	22	0,700
7	60	30	120	7,56	10	0,600
7	60	10	62,5	7,50	29	0,500
7	60	30	62,5	7,70	19	0,800
7	60	20	5	7,32	41	0,698
7	60	20	120	7,69	16	0,700
7	60	20	62,5	7,85	26	0,700
7	60	20	62,5	7,81	22	0,700
7	60	20	62,5	7,84	24	0,800

A Figura 10 ilustra os ensaios realizados com o CAP B.

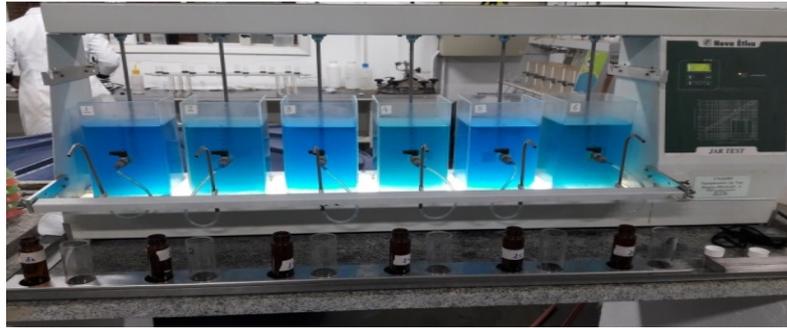


Figura 10: Ensaio de adsorção, coagulação, floculação e sedimentação com CAP B
Foto tirada após a adição do coagulante

Os resultados estatísticos obtidos da análise de regressão não apresentaram influência significativa ao nível de confiança de 95% sobre a variável resposta (concentração de AZM), apresentando valores de p-valor maiores que 0,05, para as variáveis x_1 , x_1^2 , x_2 , x_2^2 e $x_1 \cdot x_2$, e portanto, o modelo estatístico não foi validado. O mode-

lo matemático que o software gerou com base nos dados calculados e nos dados experimentais obtidos com o CAP B não apresentou relação estatística entre as variáveis calculadas e a variável resposta. A Fig. 11 mostra o gráfico comparativo entre o modelo e os dados experimentais reais.

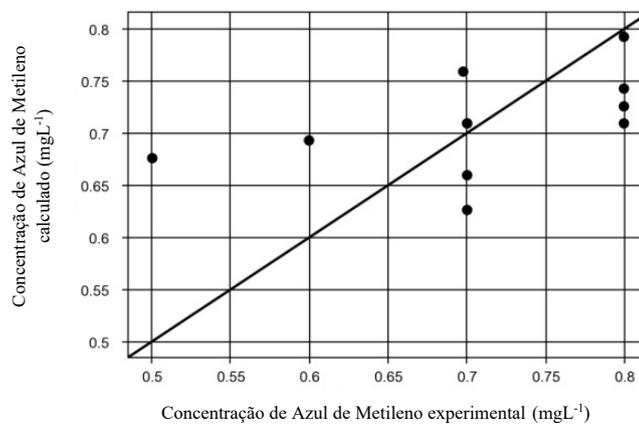


Figura 11: Regressão linear estatística para o CAP B

O modelo estatístico não apresentou relação com os resultados experimentais, indicando um R² igual a 24,09%, e confirmando que o modelo não é válido.

As dosagens do carvão foram insuficientes ou as características do mesmo não foram adequadas para a remoção do azul de metileno. Nas condi-

ções estudadas, o tempo de contato e a dosagem de carvão no experimento com o CAP B não tiveram influência na remoção de AZM, ou seja, aumentando o tempo de contato, assim como a dosagem de CAP, a concentração residual de AZM permaneceu constante. Observa-se que a turbidez resultou muito superior em relação ao ensaio

com o CAP A (aspecto visual da coloração azul intenso da água durante a etapa de sedimentação). Ressalta-se que a ineficiência de adsorção do CAP B pode também ter sido função de sua característica. Uma vez que o AZM é um corante catiônico, e suas cargas interagem com a superfície carregada negativamente do adsorvente em solução, com o pH alcalino, as forças atrativas se enfraqueceram e ocorreu a repulsão eletrostática, afetando a adsorção da molécula do AZM.

O CAP B, em função de ser um produto comercial umectado, apresentou teor de umidade elevado de 30%, equivalente ao trabalho de Leal (2013) com valor acima de 14% e Alves et al. (2015) com 20,52%, excedendo o limite permitido pela norma da ABNT NBR 12.077. Isso significa que, de acordo com Leal (2013), o carvão possui caráter hidrofílico, ou seja, possui mais afinidade com a água do que com o próprio contaminante, diminuindo sua capacidade de adsorção (ZAGO, 2010). Essa característica pode ter tido influência na reduzida eficiência observada com o CAP B.

4 CONCLUSÕES

- Nas condições ensaiadas, a clarificação da água bruta por coagulação, floculação, sedimentação e filtração foi eficiente (remoção satisfatória de metais, cor aparente, turbidez e turvação), porém a remoção do composto orgânico AZM foi de apenas de 24 %;
- Nos ensaios de adsorção em CAP, coagulação, floculação e sedimentação, o CAP A apresentou desempenho elevado, com eficiência de até 100% de remoção do AZM e foram constatadas, por meio da estatística, as influências do tempo de contato de adsorção prévio ao tratamento de água em ciclo completo e da dosagem aplicada; a maior eficiência de adsorção do AZM foi obtida com os maiores tempos de contato para dosagens acima de 20 mgL⁻¹;

- O CAP B não foi eficiente na adsorção do AZM mesmo com tempos de contato de 120 min e dosagens de até 30 mgL⁻¹; o carvão ativado pulverizado umectado, comercializado geralmente com teor de umidade acima de 30% (CAP B), indicando que apesar das vantagens operacionais do uso do CAP umectado e da simplificação das instalações de segurança contra incêndio na área de seu armazenamento, sua aquisição deve ser feita com ressalvas;

- Considera-se o IAM um parâmetro indicativo das características adsorptivas dos carvões ativados; valores de IAM acima de 160 mLg⁻¹ como CAP A podem resultar em elevada eficiência de adsorção de moléculas com tamanhos moleculares similares às do AZM; entretanto, a seleção de um CAP deve ser feita com ressalvas, considerando apenas o IAM, pois os resultados do presente estudo indicaram influência significativa do tempo de contato, do ponto de aplicação e da dosagem aplicada. O tempo de contato de 5 min, que simula a aplicação do CAP na entrada da ETA (prática comum nas ETAs), não foi eficiente para as dosagens estudadas, sendo provável a necessidade do emprego de dosagens maiores, condição que pode inviabilizar economicamente o uso do CAP nas ETAs, além da maior geração de lodo;

- Para garantir o sucesso da adsorção em carvão ativado pulverizado no tratamento de água, é de extrema importância a execução de ensaios de tratabilidade com a água bruta para avaliar a eficiência de diferentes CAPs em condições que simulem à aplicação na ETA (tempo de contato, dosagem de CAP e ponto de aplicação).

5 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Todos os autores contribuíram de forma igualitária.

6 REFERÊNCIAS

- ALVES, M. F.; BRITO, M. J. P.; BORGES, M. V.; BATISTA, A. S.; JESUS, F. W. A.; FERNANDES, S. A. A.. Produção de carvão ativado obtido a partir do endocarpo da Amêndoa-da-Praia (*Terminalia catappa* Linn) para adsorção de corantes orgânicos em meio aquoso. **Caderno de Ciências Agrárias**, v.7, n.2, p. 50-55, mai/ago 2015. <https://doi.org/10.35699/2447-6218.2015.2843>
- American Water Works Association (AWWA), **Standard for Powdered Activated Carbon ANSI/AWWA B600-90**, USA, 1991.
- APHA Method 2130: **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 18th edition, 1992. Disponível em: <<https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/002/apha.method.2130.1992.pdf>>. Acesso em: 21 nov. 2018.
- BAÇAOU, A. S.; YAACOUBI, A.; DAHBI, A.; BENNOUNA, C.; LUU, R. P. T.; MALDONADO-HODAR, F.J.; RIVERA-UTTRILLA, J.; MORENO-CAS-TILLA, C.. Optimization of conditions for the preparation of activated carbons from olive-waste cakes. **Carbon**, v. 39, n.3, p. 425-432, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(00\)00135-4](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(00)00135-4)
- BERNARDO, E.C.; EGASHIRA, R.; KAWASAKI, J.. Decolorization of Molasses' Wastewater Using Activated Carbon Prepared From Cane Bagasse. **Carbon**, Tokyo, v. 35, n. 9, p.1217-1221, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(97\)00105-X](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(97)00105-X)
- BOMFIM, A.P.S.. **Avaliação dos Coagulantes Tanfloc em Comparação aos Coagulantes Inorgânicos à Base de Alumínio no Tratamento de Água**. 2015. 203p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) - Universidade de Ribeirão Preto, Ribeirão Preto, 2015.
- BRANDÃO, C.C.S.; SILVA, A.S.. Remoção de cianotoxinas por adsorção em carvão ativado. In: PÁDUA, V.L. (Coord.) **Contribuição ao estudo da remoção de cianobactérias e microcontaminantes orgânicos por meio de técnicas de tratamento de água para consumo humano**. Rio de Janeiro: ABES, 2006, p. 415-465.
- CHEN, W.H.; YOUNG, T.M.. NDMA Formation during Chlorination and Chloramination of Aqueous Diuron Solutions. **Environmental Science Technology**, Davis, California, v. 42, n.4, p.1072-1077, 2008. <https://doi.org/10.1021/es072044e>
- LEAL, W.P.; COELHO, E.R.C.C.; VAZZOLER, H.. Emprego do carvão ativado para remoção de atrazina em água de abastecimento público. **Revista Engenharia Sanitária Ambiental**, Vitória – ES, v.17, n.4, p. 421-428, 2013. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522012000400009>
- CORREIA, A.; BARROS, E.; SILVA, J.; RAMALHO, J.. Análise da Turbidez da Água em Diferentes Estados de Tratamento. In: VIII ERMAC 8º Encontro Regional de Matemática Aplicada e Computacional, Natal – RN, v.8, p.1-5, 2008. **Anais...**
- DANTAS, A. D. B.; DI BERNARDO, L.. Performance of two-stage filtration system for treating high turbidity water. *Journal of Water Supply: Research and Technology — AQUA*, São Carlos-SP, v.55, n.7-8, p.499-515, 2006. <https://doi.org/10.2166/aqua.2006.042>
- DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D.; VOLTAN, P. E. N.. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água**. 3ª edição. São Carlos-SP: LDIBE, 2017.
- FERNANDES, R.; BRESAOLA JUNIOR, R.. Remoção de 17 α -etini-lestradiol de águas para abastecimento, utilizando diferentes tecnologias de tratamento físico-químico. **Revista DAE**, Campinas-SP, 2011. Disponível em: <http://revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_187_n_1463.pdf>. <http://dx.doi.org/10.4322/dae.2014.082>
- ISO 7027. 1ª edição, 2016. Disponível em: <<https://www.evs.ee/products/iso-7027-1-2016>>. Acesso em: 16 de out de 2018.
- KHAH, M. A.; ANSARI, R.. Activated charcoal: preparation, characterization and applications: a review article. **International Journal of Chemistry Technology Research**, Rasht, Iran, v.1, n.4, p. 2745-2788, 2009.
- KURODA, E. K.; JÚNIOR, E.C.A.; DI BERNARDO, L.; TROFINO, J.C.. Caracterização e Escolha do Tipo de Carvão Ativado a ser Empregado no Tratamento de Águas Contendo Microcistinas. In: 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2005, São Carlos. Anais... São Carlos: ABES, 2005. p. 1-10. **Anais...**
- LEAL, W.P.. **Remoção do Ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D) por Adsorção em Carvão Ativado Pulverizado Associado ao Tratamento Convencional de Água para Consumo Humano**. 2013. 154p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2013.
- LIMA, D. R. S.; TONUCCI, M. C.; LIBANIO, M.; AQUINO, S. F.. Fármacos e desreguladores endócrinos em águas brasileiras: ocorrência e técnicas de remoção. **Revista Engenharia Sanitária Ambiental**, v.22, n.6, p.1043-1054, Dez. 2017. Disponível em:<<http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522017165207>>. Acesso em 26 de Janeiro de 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522017165207>
- MARCHELTO, M.; FILHO, F.S.S.. Interferência do processo de coagulação na remoção de compostos orgânicos causadores de gosto e odor em águas de abastecimento mediante a aplicação de carvão ativado em pó. **Revista Engenharia Sanitária Ambiental**, v.10, n.3, p. 243-252, jul./set 2005. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522005000300009>>.
- MARMO, C. R.; SANTOS, B. V. A. P.; JÚNIOR, R.B.. Remoção de trihalometanos (THM) em águas de abastecimento por tratamento convencional e adsorção em carvão ativado em pó (CAP). **Revista DAE**, p. 19-25, 2010. Disponível em: <http://revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_182_n_1461.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2018. <http://dx.doi.org/10.4322/dae.2014.047>
- MARTINEZ, M.S.; PIZA, A.V.T.; DANTAS, A.D.B.; PASCHOALATO, C. F.P.R.; BERNARDO, L.D.. Remoção dos Herbicidas Diuron e Hexazinona de Água por Adsorção em Carvão Ativado. **Revista DAE**, Ribeirão Preto, v.59, p.35-39, jan. 2011. <http://dx.doi.org/10.4322/dae.2014.071>

MARTINS, G.S.. **Construção de um turbidímetro de baixo custo para controle de qualidade de efluentes industriais**. 2012. 119p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

MASSCHELEIN, W. J.. Adsorption. In: **Unit Processes in Drinking Water Treatment**, Marcel Dekker, Inc., Nova York, EUA, 1992, p. 321-363.

MÜLLER, C. C.; RODRIGUEZ, M. T. M. R.; CYBIS, L. F. A.. Adsorção em carvão ativado em pó para remoção de microcistina de água de abastecimento público. **Revista Engenharia Sanitária Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 14, n.1, p. 29-38, jan./abr 2009. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522009000100004>

PASCHOALATO, C. F. P. R.; DANTAS, A. D. B.; ROSA, I. D. A.; FALEIROS, R. J. R.; DI BERNARDO, L.. Uso de carvão ativado para remoção dos herbicidas diuron e hexazinona de água. **Revista DAE**, São Paulo, v. 179, p. 34-41, 2008. Disponível em: < http://revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_179_n_1402.pdf>. <http://dx.doi.org/10.4322/dae.2014.026>

POZZETTI, J. D. C.; JÚNIOR, V.G.A.; BATISTA, A.D.; KURODA, E.K.. Seleção de Carvão Ativado Pulverizado para Pós-Tratamento de Lixiviado de Aterro Sanitário. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 9, n. 11, p.504-519, 2013. <http://dx.doi.org/10.17271/198008279112013693>

PROTIMIZA EXPERIMENTAL DESIGN. Disponível em: < <https://experimental-design.protimiza.com.br/>>. Acesso em: 22 abr. 2019.

SABESP (Cia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo). Norma Técnica Interna SABESP, 1999. **Turbidez Método de Ensaio**. Disponível em: <<http://www2.sabesp.com.br/normas/nts/nts008.pdf>>. Acesso em: 10 jan. 2019.

SILVA, N. C.; FILHO, N.L.D.; BASTOS, A.C.; VIEIRA, E.G.; GARCIA, E.F.; SOARES, I.V.; PERUJO, S.D.. Remoção de Antibióticos da Água Por Meio do Processo de Adsorção em Carvão Ativado. In: 53º Congresso Brasileiro de Química, Ilha Solteira-SP, 2013. **Anais...** Disponível em: < <http://www.abq.org.br/cbq/2013/trabalhos/5/2305-16023.html>>. Acesso em: 13 fev. 2018.

TOLEDO, I.B.; GARCÍA, M.A.F.; UTRILLA, J.R.; CASTILLA, C.M.; FERNÁNDEZ, F.J.V.. Bisphenol A removal from water by activated carbon. Effects of carbon characteristics and solution chemistry. **Environmental Science & Technology**, Granada, Spain, v. 39, n.16, p. 6246-6250, 2005. <https://doi.org/10.1021/es0481169>

United States Environmental Protection Agency (USEPA). **Method 180.1: Determination of Turbidity by Nephelometry**, 1993. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-08/documents/method_180-1_1993.pdf> Acesso em 05 dez. 2018.

United States Environmental Protection Agency (USEPA). **Guidance Manual for Compliance With the Interim Enhanced Surface Water Treatment Rule: Turbidity Provisions**, 1999. Disponível em:< <https://www.epa.gov/dwreginfo/guidance-manuals-surface-water-treatment-rules>> Acesso em: 05 dez. 2018.

United States Environmental Protection Agency (USEPA). **Method 180.1: Determination of Turbidity by Nephelometry**, 1978. Disponível em: <https://www.umass.edu/mwpp/pdf/epa180_1turbidity.pdf> Acesso em: 21 nov. 2018.

VALENÇA, R. M.; MACÊDO, W. V.; RODRIGUES, C. C.; NÓBREGA, S. W.. Adsorção de Fluoreto em Solução Aquosa e em Água de Abastecimento em Carvão Ativado à Base de Casca de Castanha-do-Brasil. **Revista Engenharia Ambiental**, Espírito Santo do Pinhal, v. 14, n. 2, p. 44-54, jul./dez. 2017.

VOLTAN, P.E.N.. **Remoção de diuron e hexazinona por meio de adsorção em carvão ativado, oxidação e tratamento em ciclo completo**. 2014. 256p. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2014. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-30032017-085628/>>. Acesso em: 2018-01-04.

ZAGO, J.F.. **Influência das características físico-químicas de carvões ativados na adsorção de saxitoxinas**. 2010. 182p. Tese (Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2010.