

## AVALIAÇÃO DO CARVÃO ATIVADO PULVERIZADO NA REMOÇÃO DE CARBONO ORGÂNICO TOTAL EM ETA DE CICLO COMPLETO

Rodrigo Folha Moreira<sup>1</sup>, Giulliano Guimarães Silva<sup>2</sup>, Roberto José Duarte Neto<sup>3</sup>, Sérgio Carlos Bernardo Queiroz<sup>4</sup>, Adalcino Fernandes Reis Neto<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Estudante do Curso Superior de Engenharia Civil – IFTO. Bolsista do Programa de Iniciação Científica. e-mail: <[rodrigofomo@gmail.com](mailto:rodrigofomo@gmail.com)>

<sup>2</sup>Engenheiro Ambiental – Doutor em Tecnologia Ambiental. Professor no IFTO. e-mail: <[giullianogsilva@gmail.com](mailto:giullianogsilva@gmail.com)>

<sup>3</sup>Estudante do Curso Superior de Engenharia Civil – IFTO. Bolsista do Programa de Iniciação Científica. e-mail: <[robertoduarte.eng@gmail.com](mailto:robertoduarte.eng@gmail.com)>

<sup>4</sup>Engenheiro Ambiental – Doutor em Tecnologia Ambiental. Professor na UFT. e-mail: <[sergiocbq@gmail.com](mailto:sergiocbq@gmail.com)>

<sup>5</sup>Engenheiro Ambiental – Especialista em Saneamento e Meio Ambiente. Engenheiro na BRK Ambiental. e-mail: <[neto.afr@gmail.com](mailto:neto.afr@gmail.com)>

**Resumo:** A presença de contaminantes orgânicos na água pode servir como nutriente para o crescimento indesejável de microrganismos, contribuir para a formação de compostos orgânicos halogenados ou até mesmo inviabilizar o processo de tratamento de água. As consequências podem ser a eutrofização, ocorrências de sabor e odor, formação de subprodutos da cloração e interferências no processo de tratamento da água. Uma das alternativas empregada nas ETAs para remoção de material orgânico é a adsorção em carvão ativado pulverizado (CAP). Neste contexto, o presente trabalho teve objetivo de investigar a influência das variáveis tempo de contato, dosagem e tipo de carvão ativado pulverizado, na eficiência da adsorção de matéria orgânica em água bruta submetida ao processo de tratamento em ciclo completo. Foi realizada a avaliação com uso de dois tipos de CAPs de origem vegetal. O CAP proveniente da madeira teve significativa influência no tempo de contato e dosagem na remoção de matéria orgânica medida em carbono orgânico total (COT), ou seja, maiores dosagem e tempo de contato trouxeram melhores resultados. Dosagens de 30 mg/L e tempo de contato de 25 minutos obtiveram resultados satisfatórios, atingindo eficiências de remoção na ordem de 91% e concentração de COT de 2,05 mg/L.

**Palavras-chave:** carvão ativado em pó, dosagem, tempo de contato, tratamento de água em ciclo completo.

### 1 INTRODUÇÃO

Os cursos de água que recebem aportes de esgotos domésticos e efluentes industriais não tratados, e que sofrem impactos de períodos prolongados de estiagem, podem ter aumento considerável da concentração de matéria orgânica e de outros contaminantes inorgânicos e microbiológicos na água bruta. As consequências podem ser a eutrofização de corpos d'água, com ocorrência de florações, e incremento de matéria orgânica que podem acarretar diversos problemas, como sabor e odor, aumento da formação de subprodutos indesejados da cloração, interferências no processo de tratamento da água, aumento do consumo de químicos, além de corrosão de unidades do sistema de abastecimento (DI BERNARDO et al. 2017).

Uma das alternativas empregada nas ETAs na remoção de material orgânico é a adsorção em carvão ativado pulverizado (CAP). Essa prática tem sido adotada como complementação ao tratamento, por ser de fácil implementação, cujo principal objetivo é remover compostos odoríferos, toxinas liberadas por cianobactérias, subprodutos organo-halogenados, microcontaminantes orgânicos (fármacos, hormônios, agrotóxicos, etc.), sendo que boa parte não possui regulamentação no padrão de

potabilidade (PASCHOALATO et al., 2008; KHAH e ANSARI, 2009; MARMO et al, 2010; FERNANDES et al., 2011).

Previamente a implantação de um sistema de adsorção em carvão ativado pulverizado, devem ser avaliadas as melhores condições desta aplicação, visto que tempos de contato maiores de adsorção podem potencializar a adsorção com redução tanto do consumo de carvão, quanto da geração de lodo, além de garantir maior segurança operacional do sistema, ou seja, eficiência de remoção de orgânicos e fornecimento de água tratada com qualidade.

Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo investigar as variáveis que podem influenciar na eficiência da adsorção de matéria orgânica em água bruta submetida ao processo de tratamento de água em sistema de ciclo completo com aplicação de dois tipos de carvão ativado pulverizado (de origem vegetal), variando tempo de contato e dosagem.

## 2 METODOLOGIA

Os Carvões Ativados Pulverizados (CAPs) utilizados no trabalho foram selecionados dentre os já utilizados nos sistemas de tratamento de água nos estados do Tocantins e Pará, a fim de analisar a eficiência dos mesmos. Os carvões selecionados para o presente estudo bem como suas características são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Característica dos carvões selecionados para realização do estudo

CAP	Origem	Número de Iodo (mg I <sub>2</sub> /g)	Umidade (%)
CAP A	Vegetal (Madeira)	600,0	8,0
CAP B	Vegetal (Coco Babaçu)	851,6	35,8

Fonte: Autor, 2020.

A Tabela 2 apresenta os equipamentos que foram utilizados na realização dos experimentos.

Tabela 2 - Especificações e funções de cada um dos equipamentos usados na pesquisa.

Equipamentos	Função na Pesquisa
Jarteste, Nova Ética – Modelo LDB 6	Ensaio de tratabilidade
Analizador de Carbono Orgânico Total TOC-L – marca SHI-MADZU	Análise de carbono orgânico total
Balança eletrônica BL 210 S – marca Sartorius	Pesagem de produtos químicos
Cronômetro Mondaine Stop Watch	Medição do tempo
Espectrofotômetro de leitura direta, modelo DR 3900 / DR 900 - marca Hach	Leitura de cor aparente
pHmetro (potenciômetro), modelo 230 – marca Orion	Leitura de pH
Turbidímetro nefelométrico, modelo 2100P – marca Hach	Leitura da turbidez

Fonte: Autor, 2020.

A Tabela 3 apresenta os parâmetros físico-químico, unidades, métodos de medição e limites de quantificação para cada um dos parâmetros avaliados. As análises seguiram os métodos indicados na APHA (2012).

Tabela 3 – Parâmetros físico-químicos, unidades, métodos de medição, unidades e limites.

Parâmetro	Unidades	Métodologia	Referências	Limite de Quantificação
Carbono orgânico total	mg/L (NPOC)	Oxidação por combustão catalítica a 680 °C	5310-B. Standard Methods, 2017	0,001 mg/L (NPOC)
Turbidez	uT	Nefelometria	180.1, EPA, 1993	0,14 uT
Cor aparente	uC	Espectrofotometria	2120 C. Standard Methods, 2017	5 uC
pH	-	Eletrometria	4500-H+ B, Standard Methods, 2017	-

Fonte: Autor, 2020.

Os experimentos para desenvolvimento deste trabalho foram divididos em três etapas, conforme evidenciado na Tabela 4.

Tabela 4 - Divisão das etapas para o desenvolvimento do presente trabalho.

Etapas	Atividade
<b>ETAPA 01</b> - Coleta e caracterização da água de estudo	Identificação do manancial objeto de estudo, e regiões críticas com concentração de matéria orgânica no mesmo. Coleta e transporte de amostra de água para o Laboratório. Caracterização da água de estudo, com análise dos parâmetros físico químicos.
<b>ETAPA 02</b> – Definição das condições da água submetida aos ensaios de tratabilidade e ensaios de Coagulação	Definição da condição de coagulação com realização de ensaios para construção do diagrama de coagulação com definição de dosagem de coagulante policloreto de alumínio (PAC) e pH de coagulação.
<b>ETAPA 03</b> – Planejamento Experimental, Ensaios de tratabilidade e investigação da eficiência	Estruturação do planejamento experimental, realização dos ensaios de tratabilidade simulando ETA de ciclo completo, variando tempo de contato, dosagem e tipo de carvão ativado pulverizado (CAP).

Fonte: Autor, 2020.

Na Etapa 1, foram avaliados a série histórica dos resultados de carbono orgânico total dos principais mananciais submetidos ao abastecimento de água no Estado do Tocantins e Pará. A amostra de água bruta foi coletada no Córrego Caracol, localizado no município de Xinguara no Estado do Pará, onde foram coletadas 10 amostras. A amostra que apresentou o maior número de COT teve nova coleta realizada para a caracterização da propriedades físico-químicas bem como coleta da água bruta.

Na etapa 2, utilizando um equipamento Jartest, foram realizados ensaios de coagulação, floculação e sedimentação visando à verificação das condições de coagulação. Conforme Tabela 5.

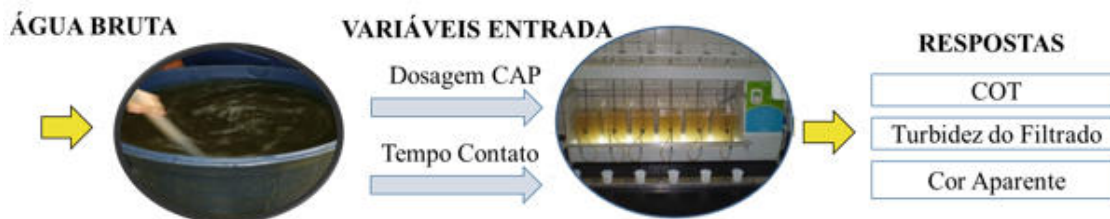
Tabela 5 - Condições de ensaio para água bruta.

Condições para os ensaios da água bruta	
Parâmetro	Condições
Coagulante	Policloreto de Alumínio 18% (PAC) – Dosagem variando de 20 a 120 mg/L;
Mistura rápida	Tempo de mistura rápida (Tmr) = 30 s, Gmr = 1000 s-1
Floculação	Tempo de floculação (Tf) = 20 min, Gf = 25 s-1
Sedimentação	Velocidade de sedimentação (Vs) - Vs1 = 1,0 cm/min e Vs2 = 0,5 cm/min
Parâmetros de controle	pH de coagulação, turbidez e cor aparente da água decantada.

Fonte: Autor, 2020.

Na última etapa foi realizado um planejamento experimental denominado delineamento composto face centrada (DCFC), que teve objetivo observar a influência das variáveis (dosagem e tempo de contato) utilizando o carvão ativado. A análise estatística foi realizada por meio do software online Protimiza Experimental Design, onde as condições experimentais são mostradas na Figura 1.

Figura 1 - Planejamento experimental do DFC para o estudo das condições de aplicação dos CAPs.



Fonte: Autor, 2020.

A Tabela 6 mostra as condições experimentais e seus níveis reais e codificados e os valores mínimos e máximos das variáveis.

Tabela 6 - Variáveis do DCF para o estudo das condições de aplicação do carvão ativado pulverizado.

Variável	Unidade	Código	Nível		
			-1	0	+1
Dosagem de CAP	mg/L	X <sub>1</sub>	5	17,5	30
Tempo de Contato	min	X <sub>2</sub>	5	25	45

Fonte: Protimiza Experimental Design, 2020.

Foram realizados onze experimentos com cada tipo de carvão, conforme Tabela 7.

Tabela 7 - Condições dos ensaios tratabilidade com CAPs estudados.

Ensaio	Variáveis	
	Dosagem de CAP X <sub>1</sub> (mg/L)	Tempo de Contato X <sub>2</sub> (min)
1	5	5
2	30	5
3	5	45
4	30	45
5	5	25
6	30	25
7	17,5	5
8	17,5	45
9	17,5	25
10	17,5	25
11	17,5	25

Fonte: Protimiza Experimental Design, 2020.

Utilizando o equipamento Jarrest foram simuladas todas as etapas de tratamento previstas em um sistema de ciclo completo. Os ensaios de tratabilidade e suas etapas seguiram as condições abaixo apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Condições para os ensaios de tratabilidade.

Condições para os ensaios de tratabilidade		
Tópico	Condições	Parâmetros
Adsorção com CAP	Adsorvente	2 tipos de CAP
	Dosagem CAP	Variável conforme Planejamento Experimental
	Gradiente da adsorção	100 s <sup>-1</sup>
	Tempo de Contato	Variável conforme Planejamento Experimental
Coagulação / Flocculação	Coagulante	Policloreto de Alumínio 18%; Dosagem PAC: 120 mg/L
	Tempo de mistura rápida	30 segundos
	Gradiente de mistura rápida	1000 s <sup>-1</sup>
	Tempo de flocculação (Tf)	20 min
	Gradiente de flocculação	25 s <sup>-1</sup>
Filtração	Meio Filtrante	Areia tipo I com grãos entre 0,30 e 0,59 mm
	Altura do meio filtrante	15 cm
Parâmetros de controle	Água coagulada	pH
	Água filtrada	turbidez, cor aparente, COT

Fonte: Autor, 2020.

Os dados gerados nos delineamentos experimentais passaram pelo tratamento estatístico no software Protimiza Experimental Design, obtendo o grau de significância de cada variável pesquisada (p-valor). Para os resultados que apresentaram significância estatística, o software elaborou um modelo matemático, onde foi submetido a análise de variância (ANOVA), após validado o modelo matemático pela ANOVA, foram gerados os gráficos de superfície de resposta para cada índice de desempenho.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados da caracterização físico-química da água bruta do Córrego Caracol, estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Características físico-químicas da amostra da água de estudo - Córrego Caracol.

Parâmetro	Unidade	Resultado
Alcalinidade	mg (CaCO <sub>3</sub> )/L	91
Alumínio dissolvido	mg (Al)/L	0,107
Cor aparente	uC	352
Cor verdadeira	uC	179
COT	mg/L	23,09
DBO	mg/L	4,5
Dureza	mg (CaCO <sub>3</sub> )/L	134
Ferro dissolvido	mg (Fe)/L	0,876
Fósforo	mg (P)/L	0,015
Manganês dissolvido	mg (Mn)/L	0,154
Nitrato	mg (N)/L	0,214
Nitrito	mg (N)/L	0,009
Nitrogênio amoniacal	mg (N)/L	0,182
pH (a 25°C)	-	7,07
Turbidez	uT	44,5

Fonte: Autor, 2020.

Analisando a Tabela 9, foi identificada uma alta concentração de matéria orgânica, identificado pelo resultado de COT (23,09 mg/L), satisfazendo a condição da água necessária para os ensaios. Além do COT, também foi identificado elevada cor aparente e verdadeira, a presença de ferro e manganês.

Com os ensaios de coagulação, foi selecionada a dosagem de 120 mg/L de PAC, sem uso de alcalinizante (cal hidratada) e pH de coagulação de 6,57. Nessa condição de coagulação foram obtidos os menores valores de turbidez e cor aparente para as velocidades de sedimentação estudadas, turbidez de 2,22 uT e cor aparente de 24 uC com velocidade de sedimentação de 0,5 cm/min.

Foi obtido a concentração de COT de 13,75 mg/L para uma amostra do filtrado sem CAP, nesse caso o “branco”. Isso demonstra que para a água objeto desse estudo, somente o processo de tratamento convencional em dosagens adequadas de coagulante, é possível remover 40% do COT presente na água.

Na Tabela 10 são apresentados os resultados dos ensaios das variáveis estudadas, demonstrando a eficiência da remoção de material orgânico utilizando o CAP A.

Tabela 10 - Delineamento de face centrada e respostas observadas para o CAP A (COT, Turbidez e Cor).

Ensaio	Variáveis		CAPA		
	Dosagem de CAP (mg/L)	Tempo de Contato (min)	COT (mg/L)	Turbidez (uT)	Cor Aparente (uC)
1	5	5	3,92	0,48	6
2	30	5	3,74	0,19	6
3	5	45	3,93	0,98	12
4	30	45	3,66	0,16	4
5	5	25	4,05	0,20	5
6	30	25	2,05	0,32	4
7	17,5	5	3,86	0,32	6
8	17,5	45	3,85	0,13	5
9	17,5	25	4,45	0,41	5
10	17,5	25	4,28	0,14	5
11	17,5	25	4,06	0,14	5

Fonte: Autor, 2020.

Analisando os resultados da Tabela 10, foi possível calcular os efeitos das variáveis estudadas, os quais estão apresentados na Tabela 11 que mostra o tratamento estatístico para os dados de COT e cor aparente com o uso do CAP A. Valores de p-valor abaixo de 0,100 indicam que houve efeito estatístico das variáveis (X1 e X2) nas respostas estudadas, com nível de confiança de 90%.

Tabela 11 - Coeficiente de regressão e desvio padrão das respostas para o CAP A (COT e Cor).

	CAPA								
	COT (mg/L)				Cor Aparente (uC)				
	Coef. de regressão	Desvio padrão	t calculado	p-valor	Coef. de regressão	Desvio padrão	t calculado	p-valor	
Média	4,02	0,32	12,40	0,0001	Média	4,58	0,67	6,84	0,0010
X1 (L)	-0,41	0,26	-1,58	0,1740	X1 (L)	-1,50	0,53	-2,81	0,0374
X1 (Q)	-0,60	0,40	-1,51	0,1926	X1 (Q)	0,55	0,82	0,67	0,5305

X2 (L)	-0,01	0,26	-0,05	0,9607	X2 (L)	0,50	0,53	0,94	0,3914
X2 (Q)	0,21	0,40	0,52	0,6226	X2 (Q)	1,55	0,82	1,89	0,1170
X1 * X2	-0,02	0,32	-0,07	0,9459	X1 * X2	-2,00	0,65	-3,06	<b>0,0280</b>

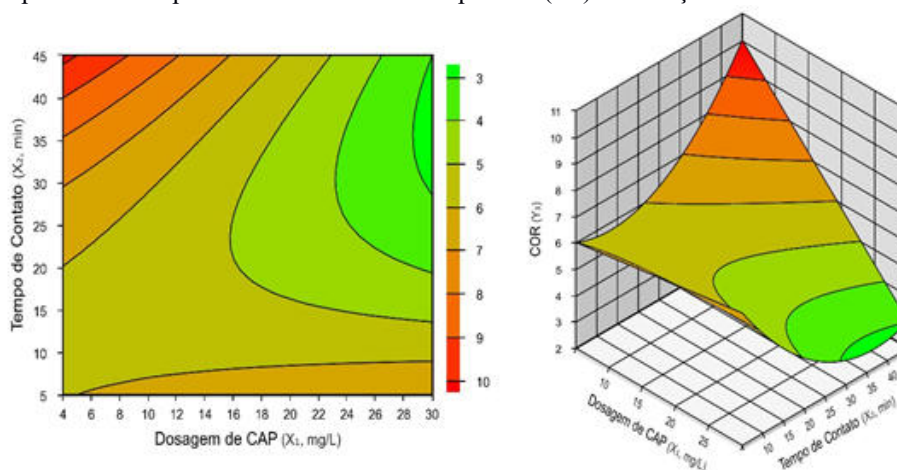
L- termos lineares; Q- termos quadráticos

Fonte: Autor, 2020.

Avaliando os dados da Tabela 11, observa-se que para a concentração de COT, nenhum resultado foi estatisticamente significativo ( $p \leq 0,10$ ). Já com relação a cor aparente o termo linear da dosagem de CAP ( $X_1$ ) e interação entre os dois ( $X_1$  e  $X_2$ ) teve significância ( $p \leq 0,10$ ).

A Figura 2 apresenta a superfície de resposta obtida para cor aparente em função da dosagem e tempo de contato do CAP A.

Figura 2 - Superfície de resposta do resultado de cor aparente (uC) em relação ao CAP A.



Fonte: Autor, 2020.

O aumento de dosagem e tempo de contato do CAP A (ver Figura 2), favoreceu a redução dos valores de cor aparente. Todos os resultados obtidos atenderam a legislação vigente, que estabelece o limite máximo de 15 uC.

Na Tabela 12 são apresentados os resultados dos ensaios das variáveis estudadas, demonstrando a eficiência da remoção de material orgânico utilizando o CAP B.

Tabela 12 - Delineamento de face centrada e respostas observadas para o CAP B (COT, Turbidez e Cor).

Ensaio	Variáveis		CAP B		
	Dosagem de CAP (mg/L)	Tempo de Contato (min)	COT (mg/L)	Turbidez (uT)	Cor Aparente (uC)
1	5	5	4,72	0,24	5
2	30	5	4,35	0,35	3
3	5	45	4,43	0,28	5
4	30	45	2,7	0,24	5
5	5	25	4,35	0,24	5
6	30	25	3,01	0,25	4
7	17,5	5	4,69	0,13	5
8	17,5	45	3,87	0,14	5
9	17,5	25	4,46	0,13	4

10	17,5	25	4,33	0,13	4
11	17,5	25	4,51	0,17	5

Fonte: Autor, 2020.

Analisando os resultados da Tabela 12, foi possível calcular os efeitos das variáveis estudadas, os quais estão apresentados na que mostra o tratamento estatístico para os dados de COT e cor aparente com o uso do CAP B.

Tabela 13 - Coeficiente de regressão e desvio padrão das respostas para o CAP B (COT e Cor).

CAP B									
COT (mg/L)					Cor Aparente (uC)				
	Coef. de regressão	Desvio padrão	t calculado	p-valor		Coef. de regressão	Desvio padrão	t calculado	p-valor
Média	4,32	0,11	39,66	0,0000	Média	4,47	0,26	17,23	0,0000
X1 (L)	-0,57	0,09	-6,61	0,0012	X1 (L)	-0,50	0,21	-2,42	0,0601
X1 (Q)	-0,48	0,13	-3,58	0,0159	X1 (Q)	-0,18	0,32	-0,58	0,5875
X2 (L)	-0,46	0,09	-5,30	0,0032	X2 (L)	0,33	0,21	1,61	0,1676
X2 (Q)	0,12	0,13	0,91	0,4024	X2 (Q)	0,32	0,32	0,99	0,3662
X1 x X2	-0,34	0,11	-3,20	0,0240	X1 x X2	0,50	0,25	1,98	0,1051

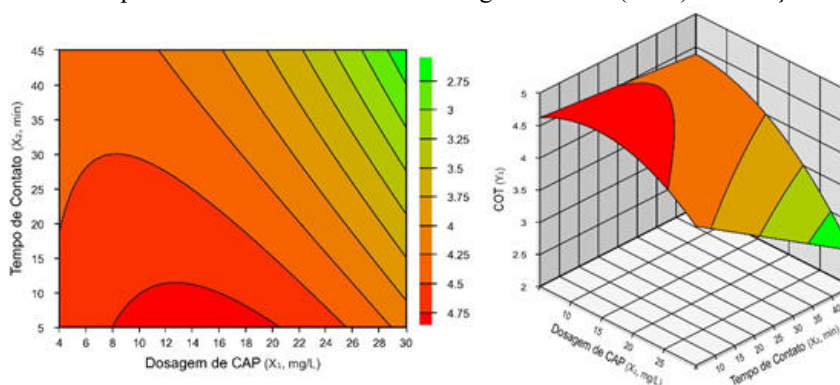
L- termos lineares; Q- termos quadráticos

Fonte: Autor, 2020.

Na Tabela 13, observa-se que para os resultados de COT, apenas o termo quadrático do tempo de contato (X2) não teve significância estatística ( $p \leq 0,10$ ). Relativos aos resultados de cor aparente apenas o termo linear da dosagem de CAP (X1) foi estaticamente significativo.

A superfície de resposta obtida para concentração de COT em função da dosagem e tempo de contato do CAP B, apresentou representatividade estatística, conforme evidenciado na Figura 3.

Figura 3 - Superfície de resposta do resultado de Carbono Orgânico Total (COT) em relação ao CAP B.



Fonte: Autor, 2020.

Avaliando a Figura 3, observa-se uma tendência de redução das concentrações de COT, condicionada com o aumento da dosagens e tempo de contato do CAP. Valores de COT próximo a 2,0 mg/L, foram alcançados com dosagens de 30 mg/L de carvão e tempo de contato superiores a 25 min. Na Tabela 14 encontra-se os resultados da análise comparativas entre os carvões estudados.

Tabela 14 - Resultados de concentração e eficiência de remoção de COT para cada tipo de CAP avaliado.

Resultados					
Dosagem CAP (mg/L)	Tempo de Con-tato (min)	Concentração COT (mg/L)		Eficiência de remoção COT (%)	
		CAP A	CAP B	CAP A	CAP B
5	5	3,92	4,72	83%	80%
5	45	3,93	4,43	83%	81%
5	25	4,05	4,35	82%	81%
17,5	5	3,86	4,69	83%	80%
17,5	45	3,85	3,87	83%	83%
17,5	25	4,45	4,46	81%	81%
17,5	25	4,28	4,33	81%	81%
17,5	25	4,06	4,51	82%	80%
30	5	3,74	4,35	84%	81%
30	45	3,66	2,7	84%	88%
30	25	<b>2,05</b>	3,01	<b>91%</b>	87%

Fonte: Autor, 2020.

Na Tabela 14 é possível identificar concentrações de COT na ordem de 2,05 mg/L na amostra filtrada, ou seja, etapa final de um sistema de ciclo completo. Apesar da legislação atual que define os padrões de potabilidade da água não estabelecer limites máximos permitidos para esse parâmetro, alguns resultados atingidos no estudo, atendem a recomendação de pesquisadores da área (DI BERNANRDO, 2011) que recomendam 3,0 mg/L como limite máximo para água tratada.

Nesse trabalho, foram alcançadas eficiências de quase 92% na remoção de COT, bem acima do recomendado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América (UESPA, 2012), que estabelece eficiência de remoção mínima de 40% para fontes abastecimento que possuam concentrações de COT acima de 8,0 mg/L e Alcalinidade entre 60 e 120 mg/L.

Realizando um comparativos entre os CAPs (ver Tabela 14), é possível ver que ambos foram eficientes (87 a 91%), alcançando concentrações de COT próximas a 2,0 mg/L na amostra do filtrado. O CAP A apresentou melhores resultado em condições de alta dosagem e tempo de contato para os níveis avaliados. O CAP B também teve comportamento semelhante, ou seja, mais eficiência com maiores dosagem e tempo de contato conforme identificado no trabalho.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sistema de tratamento em ciclo completo sem aplicação de CAP, obteve aproximadamente 40% de eficiência de remoção de COT, evidenciando dessa forma necessidade de complementação do processo de tratamento para obtenção de resultados de COT que atendam os limites recomendados;

