



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS
CAMPUS PALMAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

RODRIGO FOLHA MOREIRA

**O USO DA ADSORÇÃO EM CARVÃO ATIVADO PULVERIZADO
NA REMOÇÃO DE MATÉRIA ORGÂNICA NATURAL EM ETA
DE CICLO COMPLETO**

**PALMAS
2020**

RODRIGO FOLHA MOREIRA

**O USO DA ADSORÇÃO EM CARVÃO ATIVADO PULVERIZADO
NA REMOÇÃO DE MATÉRIA ORGÂNICA NATURAL EM ETA
DE CICLO COMPLETO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do Título de Bacharel do Curso
Superior de Engenharia Civil do Instituto
Federal do Tocantins, *Campus* Palmas.

Orientador: Prof. Dr. Giulliano Guimarães
Silva

**PALMAS
2020**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas do Instituto Federal do Tocantins

- M835u Moreira, Rodrigo Folha
O uso da adsorção em carvão ativado pulverizado na remoção de matéria orgânica natural em ETA de ciclo completo / Rodrigo Folha Moreira. – Palmas, TO, 2020.
16 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, Campus Palmas, Palmas, TO, 2020.
- Orientador: Dr. Giulliano Guimarães Silva
1. Tratamento de água em ciclo completo. 2. Carvão ativado em pó. 3. dosagem. I. Silva, Giulliano Guimarães. II. Título.

CDD 624

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio, deste documento é autorizada para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica do IFTO com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

FOLHA DE APROVAÇÃO

RODRIGO FOLHA MOREIRA


O USO DA ADSORÇÃO EM CARVÃO ATIVADO PULVERIZADO NA REMOÇÃO DE MATÉRIA ORGÂNICA NATURAL EM ETA DE CICLO COMPLETO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel do Curso Superior de Engenharia Civil do Instituto Federal do Tocantins, *Campus* Palmas.

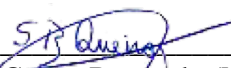
Orientador: Prof. Dr. Giulliano Guimarães Silva

Aprovado em: 31/08/2020

BANCA AVALIADORA


Prof. Dr. Giulliano Guimarães Silva (Orientador)
Instituto Federal do Tocantins - IFTO


Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza (Membro Interno)
Instituto Federal do Tocantins - IFTO


Prof. Dr. Sérgio Carlos Bernardo (Membro Externo)
Universidade Federal do Tocantins - UFT

SUMÁRIO

1. Introdução	5
2. Materiais e métodos.....	6
3. Resultados e discussões	10
4. Conclusões	15
5. Referências	16

O USO DA ADSORÇÃO EM CARVÃO ATIVADO PULVERIZADO NA REMOÇÃO DE MATÉRIA ORGÂNICA NATURAL EM ETA DE CICLO COMPLETO

Rodrigo Folha Moreira 1 (IFTO) E-mail: rodrigofomo@gmail.com

Adalcino Fernandes Reis Neto 2 (UFT) E-mail: neto.afr@gmail.com

Emerson Adriano Guarda 3 (UFT) E-mail: emersonprof@uft.edu.br

Giulliano Guimarães Silva 4 (IFTO) E-mail: giullianogsilva@gmail.com

Sérgio Carlos Bernardo 5 (UFT) E-mail: sergiocbq@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: Tratamento de água em ciclo completo, Carvão Ativado em Pó, dosagem, tempo de contato.

THE USE OF POWDERED ACTIVATED CARBON ADSORPTION IN THE REMOVAL OF NATURAL ORGANIC MATTER IN A FULL CYCLE WATER

Abstract: The presence of organic contaminants in the water can serve as a nutrient for the undesirable growth of microorganisms, contribute to the formation of halogenated organic compounds, or even make the water treatment process unfeasible. The consequences can be eutrophication, occurrences of taste and odor, the formation of by-products of chlorination, and interferences in the water treatment process. One of the alternatives used in ETAs to remove organic material is adsorption on pulverized activated carbon (CAP). In this context, the present work aimed to investigate the influence of the variables contact time, dosage, and type of pulverized activated carbon, on the efficiency of the adsorption of organic matter in raw water submitted to the full cycle treatment process. The evaluation was carried out using two types of CAP of plant origin. CAP from wood had a significant influence on contact time and dosage in the removal of organic matter measured in total organic carbon (TOC), that is, higher dosage and contact time brought better results. Dosages of 30 mg/L and contact time of 25 minutes obtained satisfactory results, reaching removal efficiencies in the order of 91% and TOC concentration of 2.05 mg/L.

Keywords: Full cycle water treatment, activated carbon powder, dosage, contact time

1. Introdução

A contaminação da água é definida como a alteração de sua qualidade natural tanto por fenômenos naturais quanto pela ação do homem, que faz com que seja, parcial ou totalmente, imprópria para o uso a que se destina. Entende-se por qualidade natural da

água o conjunto de características físicas, químicas e bacteriológicas que a água apresenta em seu estado natural nos rios, lagos, mananciais, no subsolo ou no mar (MOPU, 1985).

Segundo a Funasa (2003), a contaminação dos recursos hídricos e dos mananciais de abastecimento público por rejeitos oriundos das atividades humanas, tem sido um dos maiores fatores de risco para a saúde da população, especialmente em regiões com condições inadequadas de saneamento e suprimento de água, o que é observado tanto em regiões brasileiras de alta concentração urbana como em áreas rurais. Os materiais em suspensão presentes na água servem de suporte e proteção para os microrganismos, dificultando sua eliminação pela desinfecção, sendo a matéria orgânica fonte de substrato para a proliferação da flora bacteriana, assim como as matérias nitrogenada e fosfatada, responsáveis pelo crescimento das algas e pela eutrofização dos corpos d'água (KONRADT - MORAES, 2009)

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. Materiais e métodos

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 ₂ /g)	Umidade (%)
CAP A	Vegetal (Madeira)	600,0	8,0
CAP B	Vegetal (Coco Babaçu)	851,6	35,8

Fonte: Autor, 2020.

O número de iodo apresentado pelos carvões acima determina a quantidade adsorvida de iodo pelo carvão. Tal parâmetro está relacionado com adsorção em microporos. De acordo com a norma NBR 12.073 o índice mínimo de iodo deve ser igual a 600 mg I₂/g. Pesquisas mostram que CAPs com o maior número de iodo promovem uma remoção mais eficiente de COT.

A Tabela 2 apresenta os equipamentos que foram utilizados na realização dos experimentos, juntamente com sua respectiva função.

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
Analisador de Carbono Orgânico Total TOC-L – marca SHIMADZU	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
ETAPA 01 - 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.
ETAPA 02 – 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.

ETAPA 03 – Planejamento Experimental, Ensaio 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 reservatório de acumulação do Córrego Caracol, localizado no município de Xinguara no Estado do Pará. O manancial em questão é utilizado para captação de água e abastecimento público do município e está localizado nas coordenadas geográficas: 7° 4' 28.06" S e 49° 56' 7.69" O.

No reservatório de acumulação de água (Figura 1), o monitoramento objetivou identificar regiões críticas com concentração de matéria orgânica, onde foram coletadas 10 amostras. A amostra que demonstrou ter o maior número de COT teve uma nova coleta realizada após 15 dias para a caracterização das propriedades físico-químicas dessa água bem como a coleta para a realização dos experimentos.



Figura 1 – Reservatório de água do Córrego Caracol e ponto de amostragem da água de estudo.

Na etapa 2, utilizando um equipamento Jartest, foram realizados ensaios de coagulação, floculação e sedimentação visando à verificação das condições de coagulação utilizando o coagulante policloreto de alumínio (produto comercial líquido 16 a 18% Al_2O_3) e alcalinizante cal hidratada (produto comercial em pó – 93% de Hidróxido de Cálcio). As condições dos ensaios são apresentadas na 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 (T_{mr}) = 30 s, G_{mr} = 1000 s ⁻¹
Floculação	Tempo de floculação (T_f) = 20 min, G_f = 25 s ⁻¹
Sedimentação	Velocidade de sedimentação (V_s) - V_{s1} = 1,0 cm/min e V_{s2} = 0,5 cm/min
Parâmetros de controle	pH de coagulação, turbidez e cor aparente da água decantada.

Fonte: Autor, 2020.

Nessa etapa foi realizado um planejamento experimental denominado delineamento composto face centrada (DCFC), que teve como objetivo observar a influência das variáveis estudadas (dosagem e tempo de contato) utilizando o carvão ativado.

A análise estatística foi realizada por meio do software online Protimiza Experimental Design (<http://experimental-design.protimiza.com.br/>). As condições experimentais e seus níveis reais e codificados e os valores mínimos e máximos das variáveis são mostrados na Tabela 6, conforme Rodrigues e Iemma (2014), conforme Figura 2.



Figura 2 - Planejamento experimental do DFC para o estudo das condições de aplicação dos CAPs.

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 ₁	5	17,5	30
Tempo de Contato	min	X ₂	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 ₁ (mg/L)	Tempo de Contato X ₂ (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 Jartest foram simuladas todas as etapas de tratamento previstas em um sistema de ciclo completo. A simulação da filtração em areia utilizou filtros de laboratório de areia (FLA) constituídos de material acrílico e preenchidos com 15 cm de areia (areia tipo I com grãos entre 0,30 e 0,59 mm). 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 ⁻¹
	Tempo de Contato	Variável conforme Planejamento Experimental
Coagulação / Floculação	Coagulante	Policloreto de Alumínio 18%; Dosagem PAC: 120 mg/L
	Tempo de mistura rápida	30 segundos
	Gradiente de mistura rápida	1000 s ⁻¹

	Tempo de floculação (Tf)	20 min
	Gradiente de floculação	25 s ⁻¹
	Velocidade de sedimentação	0,5 cm/min
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.

Todos os dados gerados nos delineamentos experimentais passaram pelo tratamento estatístico no software Protimiza Experimental Design, sendo obtido o grau de significância de cada variável pesquisada (p-valor). Para os resultados que apresentaram significância estatística, o software elaborou um modelo matemático, que detalha as mudanças dos níveis das variáveis sobre as respostas. Cada modelo matemático foi submetido a análise de variância (ANOVA), no qual foi verificado a adequação dos valores previstos com os valores experimentais, e posteriormente validado o modelo matemático pela ANOVA, foram gerados os gráficos de superfície de reposta 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 ₃)/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 ₃)/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, nesse caso identificado pelo resultado de COT (23,09 mg/L), satisfazendo dessa forma a condição da água necessária para realização dos ensaios. Além do COT, também foi identificada elevada cor aparente e verdadeira, situação essa perceptível na amostra, além de significativa presença de metais, no caso, ferro e manganês.

Com base nos resultados obtidos nos ensaios de coagulação, foi selecionada a dosagem de 120 mg/L de policloreto de alumínio, 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 após

realização dos ensaios de tratabilidade 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		CAP A		
	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. Nela são apresentados os coeficientes de regressão, bem como o desvio padrão e valores de t e p para as variáveis que foram estatisticamente significativas a 10% de significância. 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).

CAP A									
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	0,0280

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 (X1) e interação entre os dois (X1 e X2) teve significância ($p \leq 0,10$). Considerando-se os parâmetros significativos ($p \leq 0,10$), obteve-se a Equação, que representa o modelo quadrático da cor aparente (uC) resultante da aplicação do CAP A, em função das variáveis estudadas.

Equação 1

$$\text{Cor Aparente (uC)} = 4,80 - 1,50 x_1 + 1,70 x_2^2 - 2 x_1 x_2 \quad (1)$$

Onde

x_1 : dosagem de CAP (mg/L)

x_2 : tempo de contato (minutos)

Os parâmetros não significativos foram incorporados aos resíduos para o cálculo da análise de variância (ANOVA), conforme apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 - Análise da variância (ANOVA) de Cor Aparente com CAP A.

COT (mg/L)					
Fontes de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor
Regressão	37,4	3,0	12,5	8,1	0,01128
Resíduos	10,8	7,0	1,5		
Total	48,2	10,0			
% variação explicada (R^2) = 62,17% $F_{0,10;2;8} = 3,11$					

Fonte: Autor, 2020.

A Figura 3 apresenta a superfície de resposta obtida para cor aparente em função da dosagem e tempo de contato do CAP A.

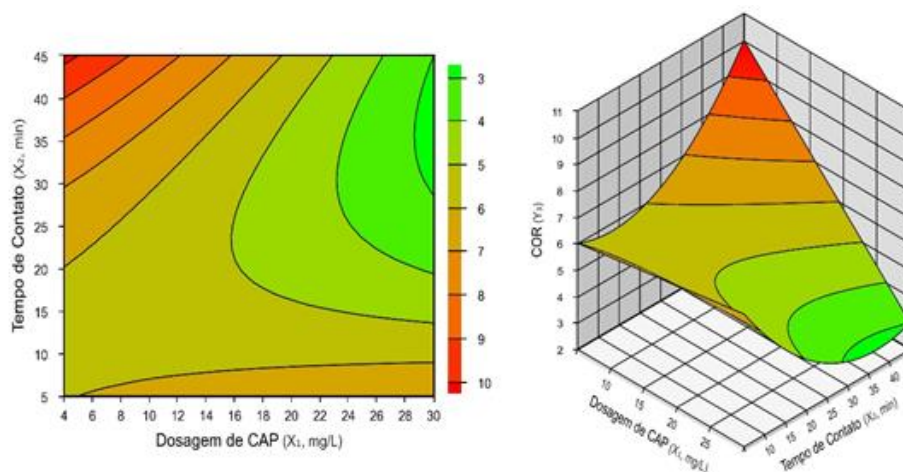


Figura 3 - Superfície de resposta do resultado de cor aparente (uC) em relação ao CAP A.

O aumento de dosagem e tempo de contato do CAP A (ver Figura 3), 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 13 são apresentados os resultados dos ensaios das variáveis estudadas, demonstrando a eficiência da remoção de material orgânico utilizando o CAP B.

Tabela 13 - 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 13, 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 14 - 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 14, 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. Considerando os parâmetros significativos, foram obtidas as equações, que representam o modelo quadrático da concentração de COT (mg/L) e cor aparente (uC) resultante da aplicação do CAP B, em função das variáveis estudadas.

Equação 2

$$\text{COT (mg/L)} = 4,37 - 0,57 x_1 - 0,45 x_1^2 - 0,46 x_2 - 0,34 x_1 x_2 \quad (2)$$

Equação 3

$$\text{Cor Aparente (uC)} = 4,55 - 0,50 x_1 + 0,50 x_1 x_2 \quad (3)$$

Onde

x_1 : dosagem de CAP (mg/L)

x_2 : tempo de contato (minutos)

Os parâmetros não significativos foram incorporados aos resíduos para o cálculo da análise de variância (ANOVA), conforme apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Análise da variância (ANOVA) de Cor Aparente com CAP B.

COT (mg/L)					
Fontes de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	4,2	4,0	1,1	24,2	0,00076
Resíduos	0,3	6,0	0,0		
Total	4,5	10,0			

% variação explicada (R^2) = 62,17% $F_{0,10;2;8} = 3,11$

Fonte: Autor, 2020.

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 4.

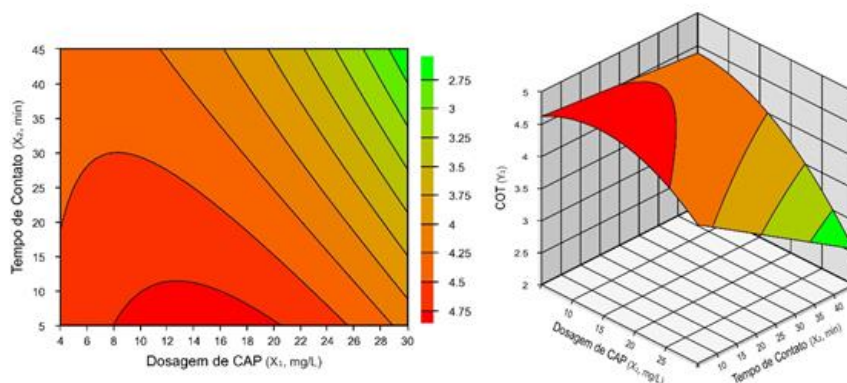


Figura 4 - Superfície de resposta do resultado de Carbono Orgânico Total (COT) em relação ao CAP B.

Avaliando a superfície de resposta obtida (ver Figura 4), 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.

Marchetto et al (2006) em sua pesquisa utilizando carvão ativado pulverizado de origem vegetal com a dosagem fixa de CAP de 30 mg/L e tempo de adsorção de 16 minutos, e sem pré oxidação, obteve eficiências entre 50 a 60% na remoção de MIB (Compostos causadores de sabor e odor em água).

Na Tabela 16 encontra-se os resultados da análise comparativas entre os carvões estudados.

Tabela 16 - Resultados de concentração e eficiência de remoção de COT para cada tipo de CAP avaliado.

Resultados					
Dosagem CAP (mg/L)	Tempo de Contato (min)	Concentração COT (mg/L)		Eficiência de remoção COT (%)	
		CAP A	CAP B	CAP A	CAP B
		5	5	3,92	4,72
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	2,05	3,01	91%	87%

Fonte: Autor, 2020.

Na Tabela 16 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.

Em estudos similares em que foi avaliado a remoção de orgânicos com emprego de carvões de origem animal, mineral e vegetal, os melhores resultados foram obtidos com uso do carvão ativado vegetal. Em seu estudo Veronezi *et al.* (2009) investigou a adsorção em carvão ativado pulverizado na remoção de saxitoxinas em águas de abastecimento, utilizando os três tipos de carvão, sendo obtido os melhores resultados com uso do carvão vegetal com dosagens de até 50 mg/L e tempo de contato de 2 horas.

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. Nas Figura 5 e Figura 6 a seguir são apresentados gráficos de comparação entre os dois tipos de CAPs avaliados.

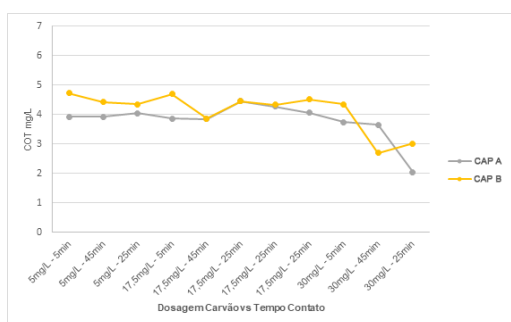


Figura 5 - Comparativo CAPs – Resultados COT (mg/L).

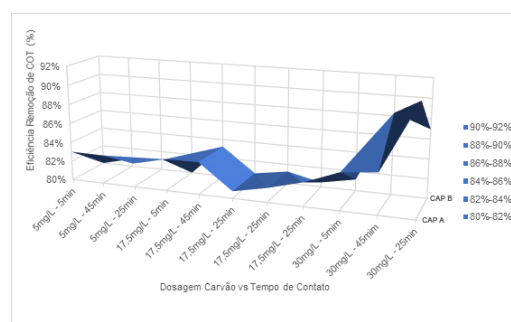


Figura 6 - Comparativo CAPs – Eficiência Remoção COT (%)

Os gráficos comparativos entre os CAPs demonstram 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 resultados 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. Porém, estatisticamente, isso não quer dizer que um carvão é melhor que o outro.

Para os níveis avaliados no trabalho não houve significância estatística, uma vez que ambos os carvões obtiveram resultados próximos em relação à concentração de COT (entre 2 e 3 mg/L). Só é possível afirmar de fato qual o melhor carvão a partir de uma análise estatística, na qual sejam trabalhados maiores níveis de dosagem, para que se tenha uma melhor distribuição das análises. O uso desses CAPs nas condições de melhor eficiência é ideal para evitar a formação de subprodutos orgânico halogenados, potencialmente tóxicos aos seres humanos, que no caso tem como principal precursor a matéria orgânica presente na água (DI BERNANRDO, 2017).

4. Conclusões

- 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;
- Ambos os carvões de origem vegetal tiveram bons resultados na eficiência da remoção de COT a partir das variáveis tempo de contato e dosagem em situações de aplicação com tempo > 25min e dosagem > 25 mg/L;

- A aplicação dos CAPs A e B, tiveram bons resultados, tendo o CAP A, resultados superiores a 90% e ambos com concentrações de COT abaixo do limite recomendado de 3 mg/L;
- É necessária avaliação dos CAPs de origem vegetal estudados em dosagens superiores a 30 mg/L visto que quanto maior foi a dosagem de CAP, melhores foram os resultados, de modo que seja possível avaliar e/ou minimizar investimentos necessários para garantia do tempo de contato do CAP.

5. Referências

- APHA Method: **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 23ª edition, 2017.
- ALVARENGA, J. A. **Avaliação da formação de subprodutos da cloração em água para consumo humano**. 2010. 100p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais UFMG. Belo Horizonte, 2010.
- DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D.; VOLTAN, P. E. N. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água**. 3ª edição. São Carlos-SP: LDIBE, 2017.
- DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D.; VOLTAN, P. E. N. **Tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água**. 1ª edição. São Carlos-SP: LDIBE, 2011.
- FERNANDES, R.; BRESAOLA JUNIOR, R. **Remoção de 17 α -etinilestradiol 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>. Acesso em: 20 de jan. 2020.
- FUNASA MINISTERIO DA SAUDE/FUNDAÇÃO NACIONAL DA SAÚDE. **Cianobactérias Tóxicas na Água para Consumo Humano. Impactos na Saúde Pública e Processos de Remoção em Água para Consumo Humano**. FUNASA/MS, Brasília, Brasil, 56p. 2003.
- KONRADT-MORAES, L. C. K. **Estudos dos processos de coagulação e floculação seguidos de filtração com membranas para obtenção de água potável**. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Química/UEM, Maringá, PR, Brasil, 2009.
- MARCHETTO, M.; FILHO, F.S.S. **Otimização Multi-objetivo de Estações de Tratamento de Águas de Abastecimento: Remoção de Turbidez, Carbono Orgânico Total e Gosto e Odor**. Revista Engenharia Sanitária Ambiental, v.11, n.1, p. 7-15, jan./mar 2006
- 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. 2020.
- MOPU MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS Y URBANISMO. **Guia para laboracion de estudios del medio fisico: contenido y metodologia**. Madrid, Espanha. GEOTEMA, 572p. 1985.
- PASCHOALATO, C. F. P. R.; TRIMAILOVAS, M. R.; DI BERNARDO, L. **Formação de Subprodutos Orgânicos Halogenados nas Operações de Pré-oxidação com Cloro, Ozônio e Peroxônio e pós-cloração em Água Contendo Substância Húmica**. Revista Engenharia Sanitária Ambiental, v.13, n.3, p.313-322, jul./set 2008.
- Rodrigues M. I., Iemma A. F. (2014) **Experimental Design and Process Optimization**, CRC Press, New York, 2014.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **EPA Drinking Water Guidance on Disinfection by-Products Advice Note n.4. Version 2. Disinfection By- Products in Drinking Water**, 2012. Disponível em: <<http://www.epa.ie/pubs/advice/drinkingwater/epadrinkingwateradvicenoteadvicenoten o4.html>>. Acesso em: 16 mar. 2020.