



UNIVERSIDADE DE RIBEIRÃO PRETO  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS NATURAIS E TECNOLÓGICAS  
Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental

Tainara Aparecida Biscola

INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE APLICAÇÃO DO CARVÃO  
ATIVADO PULVERIZADO NA EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE  
AZUL DE METILENO NO TRATAMENTO EM CICLO COMPLETO

RIBEIRÃO PRETO

2019

Tainara Aparecida Biscola

INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE APLICAÇÃO DO CARVÃO  
ATIVADO PULVERIZADO NA EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE  
AZUL DE METILENO NO TRATAMENTO EM CICLO COMPLETO

Dissertação apresentada à Universidade  
de Ribeirão Preto como requisito parcial  
para à obtenção do título de Mestre em  
Tecnologia Ambiental.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Angela Di Bernardo Dantas

RIBEIRÃO PRETO

2019

Ficha catalográfica preparada pelo Centro de  
Processamento Técnico da Biblioteca Central da UNAERP

- Universidade de Ribeirão Preto -

B621i Biscola, Tainara Aparecida, 1994  
Influência das condições de aplicação do carvão ativado  
pulverizado na eficiência de remoção de azul de metileno no  
tratamento em ciclo completo/ Tainara Aparecida Biscola. –  
Ribeirão Preto, 2019.  
111 f.: il. color.

Orientadora: Profª Drª Angela Di Bernardo Dantas.

Dissertação (mestrado) - Universidade de Ribeirão Preto,  
UNAERP, Tecnologia Ambiental. Ribeirão Preto, 2019.

1. Tratamento de água. 2. Carvão ativado pulverizado.  
3. Contaminação. I. Título.

CDD 628

TAINARA APARECIDA BISCOLA

**“INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE APLICAÇÃO DO CARVÃO ATIVADO  
PULVERIZADO NA EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE AZUL DE METILENO  
NO TRATAMENTO EM CICLO COMPLETO”.**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre pelo programa de Mestrado Profissionalizante em Tecnologia Ambiental do Centro de Ciências Exatas, Naturais e Tecnologias da Universidade de Ribeirão Preto.

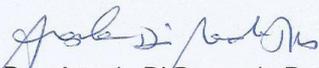
Orientador(a): Profa. Dra. Angela Di Bernardo Dantas

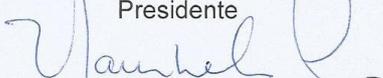
Área de concentração: Tecnologia Ambiental

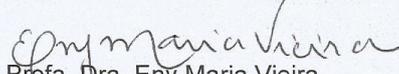
Data de defesa: 08 de fevereiro de 2.019

Resultado: APROVADA

BANCA EXAMINADORA

  
Profa. Dra. Angela Di Bernardo Dantas  
Universidade de Ribeirão Preto – UNAERP  
Presidente

  
Profa. Dra. Maristela Silva Martinez  
Universidade de Ribeirão Preto – UNAERP

  
Profa. Dra. Eny Maria Vieira  
Instituto de Química de São Carlos – IQSC

Ribeirão Preto  
2019

## DEDICATÓRIA

*Á DEUS por mais uma conquista, á meu pai Reginaldo e a minha mãe Fátima, pelos ensinamentos, amor e confiança e a minha irmã Gislaine pelo incentivo e carinho.*

## AGRADECIMENTOS

*Á Deus que permitiu minha existência e conferiu determinação e sabedoria.*

*Aos meus pais Fátima e Reginaldo, que pude contar com todo amor, apoio e incentivo, que se preocuparam á todo momento com o meu total sucesso.*

*Á minha irmã Gislaine e meu cunhado Rafael, que sempre estiveram dispostos em auxiliar-me e, desde sempre pude contar com seu apoio, amor e encorajamento.*

*Ao meu namorado Ronney, pelo apoio, amor, confiança, compreensão e paciência durante este período de grande dedicação.*

*Aos meus amigos Fernando, Guilherme, Taís, Junia, Mateus e Natália que torceram e disponibilizaram seu tempo para a concretização deste trabalho.*

*Á minha amiga Aline, pela sua amizade, confiança e apoio durante todos os anos de dedicação para com os estudos, tornando possíveis os sonhos em realidade.*

*Á minha orientadora, Angela Di Bernardo Dantas e a professora Cristina Paschoalato, que desde sempre propiciaram seus conhecimentos, pelos fundamentais esclarecimentos na parte experimental e teórica deste trabalho e por me oferecerem total apoio desde o início, incentivando, acompanhando e permitindo o avanço de mais uma conquista, confiando precisamente no esforço e dedicação para com a pesquisa.*

*Aos meus professores, Angela, Cristina, Luciana, Reinaldo, Maristela e Luciano, que proporcionaram um excelente aprendizado durante o período acadêmico e instruíram com muita dedicação.*

*Á professora Sarazete e ao meu amigo Sérgio, pelo auxílio imprescindível nas análises estatísticas, que sem cessar esteve à disposição em me ajudar.*

*Á Coordenação do Curso pelo Incentivo.*

*Á Universidade de Ribeirão Preto pela oportunidade oferecida.*

*E a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização e conclusão deste trabalho,*

*Meus sinceros e profundos agradecimentos.*

“Tente uma, duas, três vezes e se possível tente a quarta, a quinta e quantas vezes for necessário. Só não desista nas primeiras tentativas, a persistência é amiga da conquista. Se você quer chegar aonde a maioria não chega, faça o que a maioria não faz.” – Bill Gates

## RESUMO

Atualmente o grande problema de qualidade das águas são os microcontaminantes como fármacos, produtos de cuidados pessoais, agrotóxicos dentre outros compostos orgânicos, decorrentes do lançamento de esgotos industriais e sanitários tratados ou in natura nos mananciais. Uma vez esses contaminantes sendo passíveis de atingir os mananciais de abastecimento, os sistemas de tratamento de água em ciclo completo não conseguem removê-los, sendo que boa parte não possui regulamentação no padrão de potabilidade. Uma das alternativas empregada nas Estações de Tratamento de Água (ETAs) na remoção de microcontaminantes é a adsorção em carvão ativado pulverizado (CAP). A sua aplicação é geralmente feita sem a realização de estudos técnicos em sistemas improvisados, e 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, acarretando a necessidade de aplicação de elevadas dosagens para a eficiência desejada, com aumento significativo do custo operacional, e o aumento da geração de lodo. Neste contexto, o presente trabalho investigou as variáveis envolvidas na adsorção em CAP (tipo, dosagem e do tempo de contato) na eficiência da adsorção no tratamento em ciclo completo, de modo a permitir a comparação técnica entre as alternativas de implantação do CAP nas ETAs, com e sem tempo de contato prévio de adsorção no tratamento em ciclo completo de água preparada em laboratório e fortificada com azul de metileno (AZM), que pode ser considerado como um composto de referência de microcontaminantes como toxinas de cianobactérias, fármacos, entre outros. Foi realizada a caracterização de dois tipos de CAPs, um mineral (CAP A) e um vegetal umectado (CAP B), e determinada a condição de coagulação com policloreto de alumínio (pH de coagulação e dosagem) que resultou a maior remoção de turbidez da água decantada. Nos ensaios de adsorção em CAP, seguida da coagulação, floculação e sedimentação com ambos os CAPs, foi investigada a eficiência de adsorção do AZM em função do tempo de contato e das dosagens aplicadas. Os resultados mostraram que o CAP A foi mais eficiente em relação ao CAP B, e a maior eficiência de remoção do AZM foi obtida com os maiores tempos de contato estudados (90 e 120 min). Para o tempo de contato de 5 min, simulando a aplicação do CAP na entrada da ETA (prática comum), a adsorção não foi satisfatória para as dosagens de CAP investigadas, sendo provável a necessidade do emprego de dosagens maiores que  $30 \text{ mgL}^{-1}$ , condição que pode inviabilizar economicamente o uso do carvão nas ETAs. A pesquisa evidencia a necessidade da execução de ensaios de tratabilidade para determinação das condições de aplicação do carvão ativado pulverizado nas ETAs para a garantia de sucesso da adsorção na remoção de microcontaminantes orgânicos.

**Palavras-chave:** tratamento de água em ciclo completo; adsorção; azul de metileno; carvão ativado pulverizado; contaminação; dosagem; tempo de contato.

## ABSTRACT

Currently, the major problem of water quality are the microcontaminants such as pharmaceuticals, personal care products, pesticides and other organic compounds, resulting from the launch of effluents (industrial or domestic) treated or in natura in the water sources. Once these contaminants are able to reach the supply sources, systems of water treatment in complete cycle cannot remove them and most of them do not have regulation in the potability standard. One of the alternatives used in the Water Treatment Stations (WTSs) in the removal of microcontaminants is the adsorption in powdered activated carbon (PAC). Its application is usually done without technical studies in improvised systems, usually done in the raw water arrival channel or in the quick mixing unit of the WTSs, without contact time prior to coagulation, leading to the need for application of high dosages for the desired efficiency, with a significant increase in operating costs, and increased sludge generation. In this context, the present work investigated the variables involved in PAC adsorption (type, dosage and contact time) in the adsorption efficiency in the treatment in complete cycle, in order to allow a technical comparison between the alternatives of PAC implantation in the WTSs, with and without previous contact time of adsorption in the water treatment in complete cycle prepared in the laboratory and fortified with methylene blue (MB), which can be considered as a reference of microcontaminants as cyanobacterial toxins, drugs and others. It was realized the characterization of two types of PACs, one mineral (PAC A) and one moistened vegetable (PAC B) and the coagulation condition with aluminium polychloride (coagulation pH and dosage) was determined, resulting in greater turbidity removal of decanted water. In the PAC adsorption tests, followed by coagulation, flocculation and sedimentation with both PACs, the adsorption efficiency of the MB was investigated as a function of the contact time and the dosages applied. The results showed that PAC A was more efficient than PAC B, and the highest removal efficiencies of MB were obtained with the highest contact times studied (90 and 120 min). For the 5 min contact time, simulating the application of the PAC at the input of WTS (common practice), the adsorption was not satisfactory for the PAC dosages investigated, being probable the use of dosages greater than  $30 \text{ mgL}^{-1}$ , a condition that can make the use of coal economically unfeasible in WTSs. The research evidences the necessity of the execution of treatability tests to determine the conditions of application of the powdered activated carbon in the WTSs to guarantee the success of the adsorption in the removal of organic microcontaminants.

**Keywords:** water treatment; adsorption; blue methylene; powdered activated carbon; contamination; dosage; contact time.

# SUMÁRIO

|                                                                                                    |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> .....                                                                          | <b>16</b>  |
| <b>2 OBJETIVOS</b> .....                                                                           | <b>18</b>  |
| 2.1 OBJETIVO GERAL .....                                                                           | 18         |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....                                                                    | 18         |
| <b>3 REVISÃO DA LITERATURA</b> .....                                                               | <b>19</b>  |
| 3.1 CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS .....                                                                   | 19         |
| 3.2 PADRÕES DE POTABILIDADE.....                                                                   | 22         |
| 3.3 TRATAMENTO DE ÁGUA .....                                                                       | 25         |
| 3.4 CARVÃO ATIVADO .....                                                                           | 29         |
| 3.4.1 CARACTERÍSTICAS ADSORTIVAS DO CARVÃO ATIVADO .....                                           | 33         |
| 3.4.1.1 Índice de azul de metileno .....                                                           | 33         |
| 3.4.1.2 Número de iodo .....                                                                       | 33         |
| 3.4.1.3 pH .....                                                                                   | 34         |
| 3.4.1.4 Teor de cinzas .....                                                                       | 34         |
| 3.4.1.5 Umidade .....                                                                              | 34         |
| 3.4.1.6 Isotermas de adsorção .....                                                                | 34         |
| 3.4.2 FATORES QUE INFLUENCIAM NA ADSORÇÃO .....                                                    | 37         |
| <b>4 METODOLOGIA</b> .....                                                                         | <b>47</b>  |
| 4.1 PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ÁGUA, MÉTODOS ANALÍTICOS,<br>EQUIPAMENTOS E PRODUTOS QUÍMICOS ..... | 48         |
| 4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS CARVÕES ATIVADOS PULVERIZADOS .....                                         | 51         |
| 4.2.1 Determinação do Índice de Azul de Metileno.....                                              | 52         |
| 4.2.2 Isoterma de adsorção de Freundlich.....                                                      | 53         |
| 4.3 PREPARO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA DE ESTUDO .....                                               | 54         |
| 4.4 ENSAIOS DE TRATABILIDADE .....                                                                 | 55         |
| 4.4.1 Ensaio da Série I.....                                                                       | 56         |
| 4.4.2 Ensaio da Série II.....                                                                      | 57         |
| 4.4.3 Ensaio da Série III.....                                                                     | 59         |
| 4.4.3.1 Ensaio da Série III-A .....                                                                | 61         |
| 4.5 Ensaio da Série IV .....                                                                       | 64         |
| <b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....                                                              | <b>67</b>  |
| 5.1 Método analítico para a quantificação do Azul de Metileno .....                                | 67         |
| 5.2 CARACTERIZAÇÃO DOS CARVÕES ATIVADOS PULVERIZADOS .....                                         | 68         |
| 5.3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA DE ESTUDO .....                                                         | 74         |
| 5.4 ENSAIOS DE TRATABILIDADE .....                                                                 | 76         |
| 5.4.1 Ensaio da Série I.....                                                                       | 76         |
| 5.4.2 Ensaio da Série II.....                                                                      | 79         |
| 5.4.3 Ensaio da Série III.....                                                                     | 80         |
| 5.4.3.1 Ensaio da Série III-A .....                                                                | 82         |
| 5.4.4 Ensaio da Série IV .....                                                                     | 84         |
| <b>6 CONCLUSÕES</b> .....                                                                          | <b>93</b>  |
| <b>7 RECOMENDAÇÕES</b> .....                                                                       | <b>94</b>  |
| <b>REFERÊNCIAS</b> .....                                                                           | <b>95</b>  |
| <b>APÊNDICE A</b> .....                                                                            | <b>107</b> |
| <b>ANEXO A</b> .....                                                                               | <b>111</b> |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1</b> - Estrutura molecular do corante azul de metileno .....                                                                                     | 22 |
| <b>Figura 2</b> - Principais tecnologias de tratamento de água para abastecimento público .....                                                             | 26 |
| <b>Figura 3</b> - Distribuição da porosidade inteira do material carbonáceo .....                                                                           | 29 |
| <b>Figura 4</b> - Estrutura porosa do grão de carvão .....                                                                                                  | 30 |
| <b>Figura 5</b> - Exemplos de diferentes tipos de isotermas .....                                                                                           | 36 |
| <b>Figura 6</b> - Representação gráfica das isotermas de Freundlich .....                                                                                   | 37 |
| <b>Figura 7</b> - Fluxograma do desenvolvimento do presente trabalho .....                                                                                  | 47 |
| <b>Figura 8</b> - Equipamento jarreste utilizado na pesquisa .....                                                                                          | 49 |
| <b>Figura 9</b> - Filtros de laboratório de areia (FLAs) utilizados na pesquisa .....                                                                       | 50 |
| <b>Figura 10</b> - Preparação da suspensão de caulinita, fase de agitação .....                                                                             | 55 |
| <b>Figura 11</b> - Recipiente e armazenamento da água de estudo obtida a partir da mistura da suspensão de caulinita com a água do poço .....               | 55 |
| <b>Figura 12</b> - Fluxograma dos ensaios de tratabilidade com a água de estudo .....                                                                       | 56 |
| <b>Figura 13</b> - Definição das condições de coagulação para a Série I .....                                                                               | 56 |
| <b>Figura 14</b> - Definição das condições de coagulação para a Série II .....                                                                              | 58 |
| <b>Figura 15</b> - Definição das condições de coagulação para a Série III .....                                                                             | 60 |
| <b>Figura 16</b> - Definição das condições de coagulação da Série III-A para os jarros 1, 2 e 3 sem o AZM .....                                             | 62 |
| <b>Figura 17</b> - Definição das condições de coagulação da Série III-A para os jarros 4,5 .....                                                            | 62 |
| <b>Figura 18</b> - Definição das condições de coagulação para a Série IV .....                                                                              | 64 |
| <b>Figura 19</b> - Curva de calibração para o AZM obtida pela concentração de azul de metileno em função da absorbância no comprimento de onda 665 nm ..... | 68 |
| <b>Figura 20</b> - Isoterma de adsorção do azul de metileno para o CAP A .....                                                                              | 72 |
| <b>Figura 21</b> - Isoterma de adsorção do azul de metileno para o CAP B .....                                                                              | 72 |
| <b>Figura 22</b> - Turbidez da água decantada para Vs1 3,5 cmmin <sup>-1</sup> em função da dosagem de coagulante e pH de coagulação .....                  | 76 |
| <b>Figura 23</b> - Turbidez da água decantada para Vs2 1,4 cmmin <sup>-1</sup> em função da dosagem de coagulante e pH de coagulação .....                  | 77 |
| <b>Figura 24</b> - Representação gráfica do desvio percentual de pH de coagulação para os seis pontos reproduzidos .....                                    | 78 |
| <b>Figura 25 A</b> - Formação dos flocos da água de estudo sem o AZM no ensaio de coagulação, floculação e sedimentação em jarreste .....                   | 81 |
| <b>Figura 25 B</b> - Formação dos flocos da água de estudo com o AZM no ensaio de coagulação, floculação e sedimentação em jarreste .....                   | 82 |
| <b>Figura 26</b> - Ensaio de coagulação, floculação, sedimentação e filtração em jarreste para os jarros 1, 2 e 3 sem o AZM .....                           | 82 |
| <b>Figura 27 A</b> - Ensaio de adsorção, coagulação, floculação e sedimentação com CAP A .....                                                              | 84 |
| <b>Figura 27 B</b> - Ensaio de adsorção, coagulação, floculação e sedimentação com CAP A .....                                                              | 85 |
| <b>Figura 28</b> - Regressão linear do modelo estatístico com os resultados experimentais e calculados de concentração de AZM obtidos com o CAP A .....     | 86 |

|                                                                                                                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 29</b> - Superfície de resposta do azul de metileno residual na água decantada após adsorção com CAP A, coagulação, floculação e sedimentação em função da dosagem de CAP e do tempo de contato na adsorção ..... | 88 |
| <b>Figura 30</b> - Ensaio de adsorção, coagulação, floculação e sedimentação com CAP B .....                                                                                                                                | 90 |
| <b>Figura 31</b> - Regressão linear do modelo estatístico com os resultados experimentais e calculados de concentração de AZM obtidos com o CAP B .....                                                                     | 91 |

## LISTA DE QUADROS

|                                                                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Quadro 1</b> – Evolução da presença de compostos orgânicos presentes em águas para abastecimento público conforme a atualização das portarias.....                     | 23 |
| <b>Quadro 2</b> – Percentual de remoção de COT da água bruta.....                                                                                                         | 24 |
| <b>Quadro 3</b> – Avaliação das vantagens e desvantagens em relação aos pontos de aplicação do CAP na ETA.....                                                            | 39 |
| <b>Quadro 4</b> – Estudo do uso de carvão ativado no tratamento de água realizado por diversos autores.....                                                               | 40 |
| <b>Quadro 5</b> – Parâmetros físico-químicos, métodos de medição, unidades, equipamentos e limites de detecção e quantificação dos equipamentos utilizados no estudo..... | 48 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 1</b> - Tecnologias acessíveis para tratamento de água devido à presença de microcontaminantes .....                                                                   | 28 |
| <b>Tabela 2</b> - Divisão dos poros do carvão ativado .....                                                                                                                      | 30 |
| <b>Tabela 3</b> - Características dos produtos químicos utilizados na pesquisa .....                                                                                             | 50 |
| <b>Tabela 4</b> - Parâmetros físico-químicos e métodos utilizados para a caracterização dos carvões ativados .....                                                               | 52 |
| <b>Tabela 5</b> - Níveis fatoriais de variação de dosagem e tempo de contato para ambos os carvões ativados .....                                                                | 65 |
| <b>Tabela 6</b> - Resultados da concentração final de AZM e da absorbância (665nm) a partir de diluições feitas com solução padrão de AZM .....                                  | 67 |
| <b>Tabela 7</b> - Resultados obtidos da análise de pH para os carvões ativados estudados.....                                                                                    | 68 |
| <b>Tabela 8</b> - Resultados obtidos dos ensaios de teor de umidade para os carvões ativados estudados .....                                                                     | 69 |
| <b>Tabela 9</b> - Resultados obtidos dos ensaios de teor de cinzas para os carvões ativados estudados .....                                                                      | 70 |
| <b>Tabela 10</b> - Resultados obtidos do número de iodo para os carvões ativados estudados.....                                                                                  | 70 |
| <b>Tabela 11</b> - Parâmetros obtidos da isoterma de adsorção do azul de metileno conforme a norma JIS K 1474.....                                                               | 73 |
| <b>Tabela 12</b> - Caracterização da água do poço e da água de estudo para a execução dos ensaios com carvão ativado pulverizado.....                                            | 75 |
| <b>Tabela 13</b> - Temperatura e turbidez das amostras 1 e 2 nos dias de execução dos ensaios .....                                                                              | 75 |
| <b>Tabela 14</b> - Pontos reproduzidos a partir da seleção dos seis pontos dos diagramas de coagulação .....                                                                     | 78 |
| <b>Tabela 15</b> - 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..... | 79 |
| <b>Tabela 16</b> - Caracterização da água de estudo fortificada com 4,0 mgL <sup>-1</sup> de AZM ..                                                                              | 80 |
| <b>Tabela 17</b> – pH, turbidez, turvação com dosagens de alcalinizante e de coagulante da Série III para a água decantada na Vs2.....                                           | 81 |
| <b>Tabela 18</b> - Parâmetros obtidos do ensaio de coagulação, floculação, sedimentação e filtração da água bruta sem o AZM (em tréplica) .....                                  | 83 |
| <b>Tabela 19</b> - Caracterização da água bruta fortificada com 4,0 mgL <sup>-1</sup> de AZM para a execução do ensaio da Série III-A em tréplica .....                          | 83 |
| <b>Tabela 20</b> - Parâmetros obtidos do ensaio de coagulação, floculação e sedimentação da água de estudo com AZM (em tréplica) .....                                           | 83 |
| <b>Tabela 21</b> - Resultados do ensaio de adsorção, coagulação, floculação e sedimentação em função da dosagem e do tempo de contato do CAP A .....                             | 84 |

|                                                                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 22</b> - Dosagem x tempo de contato para cada ensaio de adsorção com os carvões ativados pulverizados CAP A e CAP B .....                                   | 85 |
| <b>Tabela 23</b> - Resultados da análise de regressão da concentração de AZM com os parâmetros calculados das variáveis dosagem e tempo de contato para o CAP A ..... | 86 |
| <b>Tabela 24</b> - Resultados estatísticos da ANOVA, obtidos por meio da validação do modelo estatístico gerado pelo software para o CAP A .....                      | 87 |
| <b>Tabela 25</b> - Resultados do ensaio de adsorção, coagulação, floculação e sedimentação em função da dosagem e tempo de contato do CAP B .....                     | 89 |
| <b>Tabela 26</b> - Análise de regressão da concentração de AZM com os parâmetros calculados das variáveis dosagem e tempo de contato para o CAP B .....               | 90 |

## LISTA DE SIGLAS

|              |                                                |
|--------------|------------------------------------------------|
| <b>Al</b>    | Alumínio                                       |
| <b>ANOVA</b> | Análise de Variância                           |
| <b>APHA</b>  | American Public Health Association             |
| <b>AZM</b>   | Azul de Metileno                               |
| <b>AWWA</b>  | <i>American Water Works Association</i>        |
| <b>CA</b>    | Carvão Ativado                                 |
| <b>CAG</b>   | Carvão Ativado Granular                        |
| <b>CAP</b>   | Carvão Ativado Pulverizado                     |
| <b>COD</b>   | Carbono Orgânico Dissolvido                    |
| <b>COT</b>   | Carbono Orgânico Total                         |
| <b>DBO</b>   | Demanda Bioquímica de Oxigênio                 |
| <b>DQO</b>   | Demanda Química de Oxigênio                    |
| <b>EPA</b>   | Environmental Protection Agency                |
| <b>ES</b>    | Espírito Santo                                 |
| <b>ETAs</b>  | Estações de Tratamento de Água                 |
| <b>Fe</b>    | Ferro                                          |
| <b>FLAs</b>  | Filtros de Laboratório de Areia                |
| <b>IAM</b>   | Índice de Azul de Metileno                     |
| <b>ISO</b>   | International Organization for Standardization |
| <b>MIB</b>   | Metil-isoborneol                               |
| <b>Mn</b>    | Manganês                                       |
| <b>MO</b>    | Matéria Orgânica                               |
| <b>MOD</b>   | Matéria Orgânica Dissolvida                    |
| <b>MON</b>   | Matéria Orgânica Natural                       |
| <b>NaOH</b>  | Hidróxido de Sódio                             |
| <b>NDMA</b>  | Nitrosodimetilamina                            |
| <b>NI</b>    | Número de Iodo                                 |
| <b>OC</b>    | Oxigênio Consumido                             |
| <b>OMS</b>   | Organização Mundial da Saúde                   |
| <b>PAC</b>   | Policloreto de Alumínio                        |
| <b>pH</b>    | potencial Hidrogeniônico                       |
| <b>POAs</b>  | Processos Oxidativos Avançados                 |
| <b>PVC</b>   | Policloreto de Vinila                          |
| <b>USEPA</b> | United States Environmental Protection Agency  |

## 1 INTRODUÇÃO

Microcontaminantes como desreguladores endócrinos, fármacos, produtos de cuidados pessoais, 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 e sanitários tratados ou in natura e que são lançados nas águas dos mananciais. Alguns desses compostos podem causar efeitos toxicológicos, de genotoxicidade, de resistência de bactérias patogênicas, dentre outros já estudados na literatura. Uma vez esses contaminantes sendo 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. A formação de subprodutos nas etapas de pré e interoxidação também é um problema existente nas Estações de Tratamento de Água (ETAs) em ciclo completo, podendo ou não apresentar elevada toxicidade, levando a necessidade de implantar novas tecnologias ou complementar os sistemas já existentes (CHEN et al., 2008; LIMA et al., 2014; 2017).

Uma das alternativas empregada nas ETAs na 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, 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).

O carvão ativado é um excelente adsorvente constituído por carbono e envolvido por micro, meso e macroporos que são capazes de adsorver moléculas contaminantes de variados tamanhos. A sua aplicação nas ETAs é geralmente feita sem a realização de estudos técnicos, em sistemas improvisados, prejudicando o sucesso da adsorção, a qual depende de variáveis como o tipo de carvão, as características adsortivas, tempo de contato, dosagem, ponto de aplicação, pH,

molécula do adsorvato e a presença da pré-oxidação antecedendo à adsorção (ZAGO, 2010).

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. Esta prática pode acarretar na 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 ETAs, visto que tempos de contato maiores de adsorção potencializarão a adsorção, com redução tanto do consumo de CAP quanto da geração de lodo, além de maior segurança operacional.

Neste contexto, o presente trabalho investigou as variáveis envolvidas (tipo, dosagem e tempo de contato) na eficiência de adsorção em CAP do AZM no tratamento de água em ciclo completo, de modo a permitir a comparação técnica entre as alternativas de implantação do CAP nas ETAs, com e sem tempo de contato prévio de adsorção.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Investigar a influência do tempo de contato, dosagem e tipo de carvão ativado pulverizado (CAP) na remoção de azul de metileno (AZM) no tratamento de água em ciclo completo.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Caracterizar os carvões ativados pulverizados (um mineral e um vegetal);
2. Otimizar a condição de coagulação com coagulante Policloreto de Alumínio (PAC);
3. Avaliar as eficiências dos carvões ativados pulverizados no tratamento de água em ciclo completo, variando-se as dosagens de CAP e tempo de contato.
4. Comparar tecnicamente as alternativas de implantação do CAP nas ETAs, considerando as dosagens, tempos de contato e tipo de carvões estudados.

### 3 REVISÃO DA LITERATURA

#### 3.1 CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS

Raouf et al (2012) alega que a agricultura é um fator que provoca alto grau de poluição. Os fluxos de retorno da irrigação ou a drenagem que contém resíduos agroquímicos são contaminantes severos para quem utiliza a água jusante, pois os mesmos têm como destino final águas superficiais e subterrâneas. Estas geram inúmeras substâncias químicas (orgânicas e inorgânicas) prejudicando a qualidade do corpo hídrico. Tais substâncias favorecem o crescimento de algas, gerando o processo de eutrofização dos mananciais.

Moreira et al (2012) abordam uma grande preocupação a respeito da contaminação das águas superficiais. Em sua pesquisa relataram a presença de agrotóxicos nas águas dos rios do estado de Mato Grosso. Foram realizados testes nos quais foram encontrados resíduos de agrotóxicos nas águas superficiais e também o impacto causado nos anfíbios expostos ao ambiente contaminado.

A contaminação das águas subterrâneas através de atividades antrópicas realizadas pelo uso de agrotóxicos mesmo em pequenas concentrações da ordem de  $\text{mgL}^{-1}$ , vem ocorrendo com maior frequência ocasionando riscos à saúde, pois são persistentes e resistentes sendo de difícil remoção principalmente em regiões que necessitam de tratamento e sistema de distribuição de água adequado (ALBERS et al, 2015; DI BERNARDO et al., 2017). Paschoalato et al (2008) comprovaram a contaminação de águas subterrâneas pelo uso dos herbicidas diuron e hexazinona nas plantações de cana-de-açúcar.

A população enfrenta grande dificuldade no acesso à água potável. Mais de 1 bilhão de pessoas são negadas ao direito de ter uma água potável e 2,6 bilhões de pessoas não têm acesso a saneamento adequado. Anualmente, cerca de 1,8 milhões de crianças morrem por doenças causadas pela ausência de saneamento. Sistemas de distribuição ineficientes em países carentes economicamente impactam no atendimento à população, assim como a poluição dos corpos hídricos, dificultando o tratamento para adquirir os padrões de potabilidade (UNDP, 2006).

De acordo com o Instituto Trata Brasil (2018) metade da população brasileira têm acesso à coleta de esgoto, ao mesmo tempo em que mais de 100 milhões de brasileiros não tem acesso a este serviço. Milhões de pessoas nas maiores cidades

despejam esgoto de forma indiscriminada, mesmo sendo disponíveis redes coletoras e cerca de 13 milhões de pessoas entre crianças e adolescentes não têm acesso ao saneamento básico. Todavia, mais de 35 milhões de pessoas não têm acesso ao abastecimento de água tratada.

A contaminação da água dos rios é capaz de modificar suas propriedades físico-químicas e bacteriológicas tais como turbidez, cor, tamanho de partículas, temperatura, condutividade, viscosidade, Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), pH, toxicidade, espécies do fitoplâncton e do zooplâncton (DI BERNARDO et al., 2017). A carga biológica contaminante presente no ambiente aquático ameaça a saúde pública transmitindo doenças como cólera, febre tifoide, salmoneloses, disenteria bacilar, giardíase, criptosporidíase, esquistossomíase, viroses, entre outras (DI BERNARDO et al., 2017).

Há muitos casos em que foram comprovadas intoxicações humanas através das toxinas geradas pela lise celular das cianobactérias, como é o caso da cidade de Caruaru, em Pernambuco, no Brasil. O ocorrido resultou na morte de 52 pessoas, pois a água utilizada pela clínica para realizar a hemodiálise estava contaminada por microcistina e cilindrospermopsina, espécies de cianotoxinas hepatotóxicas, que agridem o fígado do organismo humano (AZEVEDO, 2002).

De acordo com a Portaria da consolidação nº5, de 28 de setembro de 2017, o valor limite máximo exigido que se possa encontrar de microcistinas em águas de abastecimento é de  $1,0 \mu\text{gL}^{-1}$ , mas para a realização de hemodíalises em clínicas hospitalares recomenda-se que esse valor seja igual a zero, pois não há dados que certifiquem a segurança de qualquer concentração (RAMIREZ, 2009).

Como a água é um dos principais meios de propagação de doenças, pode-se considerar indispensável seu tratamento avançado, em contínuo monitoramento protegendo a qualidade da mesma (SANCHES et al., 2012).

Os compostos orgânicos presentes nas águas são constituídos por substâncias orgânicas naturais, atividades antrópicas e através da ação da oxidação de substâncias que conferem cor ao corpo hídrico. A matéria orgânica natural (MON) pode ou não ser prejudicial à vida humana, pois, uma vez que, os agentes oxidantes como o cloro, promover a oxidação da mesma, formam subprodutos que são ofensivos para a saúde pública. A ação do Homem provoca a contaminação de

águas superficiais e subterrâneas, por meio do lançamento descontrolado de efluentes industriais ou sanitários (DI BERNARDO et al., 2017).

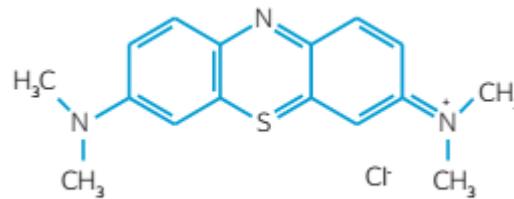
Os compostos orgânicos contaminantes tais como corantes, pesticidas e fármacos são resistentes e persistentes no ambiente aquático, sendo de difícil remoção e necessitando de inovação tecnológica (YU et al., 2014). Um recurso muito aplicado para monitorar a presença de matéria orgânica (MO) e investigar a degradação de compostos orgânicos é a análise do COT, que determina a quantidade total de substâncias orgânicas presentes na água principalmente das cianotoxinas, fármacos e dos agrotóxicos, entre outros. A medição de tais indicadores garante identificar as causas da poluição e a necessidade de análises específicas (BORGES, 2003; DI BERNARDO et al., 2011). Além do método de COT existem vários outros que determinam a presença de MO como é o caso do COD (Carbono Orgânico Dissolvido), DQO, DBO e OC (Oxigênio Consumido) (DI BERNARDO et al., 2017).

A matéria orgânica de origem natural (MON) incluem metabólitos tóxicos, como as microcistinas, microrganismos odoríferos que causam gosto e odor (MIB e geosmina), já os microcontaminantes ocasionados pela ação do Homem, são identificados de compostos orgânicos sintéticos, que podem ser compreendidos como fármacos, produtos de uso pessoal, agrotóxicos, desreguladores endócrinos, dentre outros (TEIXEIRA, 2014).

As moléculas orgânicas contaminantes presentes nas águas de mananciais como as microcistinas, os fármacos (ampicilina e atenolol), os agrotóxicos (2,4-D), entre outros, apresentam variações em sua estrutura com diâmetro molecular entre 1,2 a 2,6 nm para as microcistinas (MÜLLER et al., 2009), 1,35 e 1,64 nm para ampicilina e atenolol, respectivamente (HARO, 2017), 0,2074 nm para 2,4-D (LEAL, 2013). De acordo com Baçaoui et al (2001) e Hammed et al (2009), a molécula de azul de metileno (AZM) apresenta tamanho molecular mínimo igual a 0,8 nm, que, pode ser adsorvido em microporos secundários dos carvões ativados de diâmetro igual a 1,3 nm e em mesoporos (abertura próxima a 2,0 nm). É utilizada como molécula modelo de microcontaminantes tais como: microcistinas, saxitoxinas, corpos coloridos, entre outros, na aplicação de tratamento de água através de método simples com base na triagem de carvões ativados (BAÇAOUUI et al, 2001). A molécula de AZM representada pela fórmula molecular química  $C_{16}H_{18}N_3SCl \cdot 3H_2O$

com massa molar igual a 373,5 g/mol é bastante solúvel em água e apresenta estrutura aromática heterocíclica conforme Figura 1 (LEE e MILLS, 2003; OLIVEIRA, 2012). O AZM é um corante classificado como catiônico, que se liga ao grupo funcional de carga oposta da fibra através de interações iônicas (OLIVEIRA, 2012). O corante apresenta tamanho da sua molécula  $< 15 \text{ \AA}$  (correspondente a 1,5 nm) (HU e SRINIVASAN, 2001).

**Figura 1** - Estrutura molecular do corante azul de metileno



Fonte: Paulino et al., 2015.

### 3.2 PADRÕES DE POTABILIDADE

Em épocas passadas a qualidade das águas estava associada com questões estéticas e sensoriais, como a cor, gosto e o odor. No entanto surgiu uma grande preocupação em relação aos riscos causados por sua contaminação. Com o início da construção de redes de esgotos e de tratamento de água, o surto de doenças como a cólera passou a ser a resposta de sua eficiência (MURTHA et al., 2015). No Brasil, a primeira norma de potabilidade da água para consumo humano sucedeu em 14 de março de 1977 pela portaria nº 56, onde o decreto federal 79.367 determinou para o Ministério da Saúde que conferisse sua definição. Desde então, esta norma passou a ser atualizada promovendo o princípio de outras portarias, pois uma vez que a qualidade das águas passou a estar comprometida pela contaminação excessiva, devido a atividades antrópicas (agrícolas e industriais), houve um aumento das substâncias químicas que conferem riscos à saúde humana, por isso se faz necessário dispor do monitoramento rígido dos parâmetros de controle para que tais valores não ultrapassem seus limites (LAUS et al., 2006; DI BERNARDO et al., 2017).

O Quadro 1 mostra a crescente evolução dos compostos orgânicos presentes em águas para abastecimento público conforme a atualização da legislação.

**Quadro 1 – Evolução da presença de compostos orgânicos presentes em águas para abastecimento público conforme a atualização das portarias**

| <b>Portaria</b>                              | <b>Substâncias orgânicas</b> | <b>Agrotóxicos</b> | <b>Desinfetantes e produtos secundários da desinfecção</b> |
|----------------------------------------------|------------------------------|--------------------|------------------------------------------------------------|
| nº 36, de 19 de janeiro de 1990              | 7                            | 11                 | 2                                                          |
| nº 1.469, de 29 de dezembro de 2000          | 12                           | 22                 | 6                                                          |
| nº 518, de 25 de março de 2004               | 12                           | 22                 | 6                                                          |
| nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011          | 15                           | 27                 | 7                                                          |
| Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017 | 15                           | 27                 | 7                                                          |

**Fonte:** Autora, 2019.

Tais portarias foram estabelecidas com o intuito de acrescentar novos compostos orgânicos contaminantes (agrotóxicos e subprodutos originados da oxidação) que estão presentes nas águas de mananciais, sendo resistentes e persistentes. Com isso, os valores máximos permissíveis pela legislação ficam cada vez mais restritivos, comprometendo a qualidade e a segurança das águas.

Alguns microcontaminantes orgânicos emergentes como fármacos, agrotóxicos e demais presentes na água tratada, não possuem limites máximos permitidos na legislação, causando preocupação com a qualidade da mesma, conseqüentemente de quem passa a ingeri-la (PÁDUA, 2010).

Os subprodutos são formados pela oxidação de substâncias obtidas a partir da decomposição da MON como os ácidos húmicos e fúlvicos em contato com os agentes oxidantes, como por exemplo, o cloro ou pela degradação parcial de compostos sintéticos em contato com o mesmo. Na pesquisa de Paschoalato et al (2008) foi comprovada a formação de ácidos haloacéticos totais e trihalometanos totais utilizando como agente oxidante cloro, ozônio e peróxido. Puderam constatar a formação de vinte e dois subprodutos, enfatizando o cloro hidratado, no qual a legislação não faz menção alguma de seu potencial tóxico em águas superficiais. Na pesquisa de Chen et al (2008) os autores concluíram que houve a formação de

nitrosodimetilamina (NDMA), utilizando a cloramina como agente oxidante. No caso da formação de subproduto, ocorreu através da adição de diuron com concentração de  $20 \mu\text{gL}^{-1}$ , valor comumente encontrado na Califórnia e que na legislação o limite máximo se encontra a  $90 \mu\text{gL}^{-1}$ . A formação de NDMA atingiu uma concentração de  $170 \mu\text{gL}^{-1}$ , muito elevada e que também não faz menção na literatura.

A portaria de consolidação nº 5 não faz menção ao parâmetro de controle COT, que é considerado um indicativo de monitoramento para o desempenho das ETAs, visando compreender o grau de poluição em termos de moléculas orgânicas persistentes em um corpo hídrico, mas, recomenda-se que o valor seja igual a  $3 \text{mgL}^{-1}$  (DI BERNARDO et al., 2017). A Environmental Protection Agency (USEPA, 2012) recomenda que a concentração de COT na água tratada seja de máximo de  $2,0 \text{mgL}^{-1}$  quando a desinfecção é efetuada com cloro, e o Canadá recomenda o valor máximo de  $4 \text{mgL}^{-1}$  na água tratada (BRITISH COLUMBIA, 2001). De acordo com o Quadro 2, a USEPA estabelece os limites para remoção de COT no tratamento de água.

**Quadro 2 - Percentual de remoção de COT da água bruta**

| COT da fonte de abastecimento ( $\text{mgL}^{-1}$ ) | Remoção de COT (%)                                                         |            |       |
|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|------------|-------|
|                                                     | Alcalinidade da fonte de abastecimento ( $\text{mg CaCO}_3\text{L}^{-1}$ ) |            |       |
|                                                     | 0 a 60                                                                     | > 60 a 120 | > 120 |
| 2,0 a 4,0                                           | 35                                                                         | 25         | 15    |
| 4,1 a 8,0                                           | 45                                                                         | 35         | 25    |
| > 8,0                                               | 50                                                                         | 40         | 30    |

Fonte: Adaptado de USEPA, 2012.

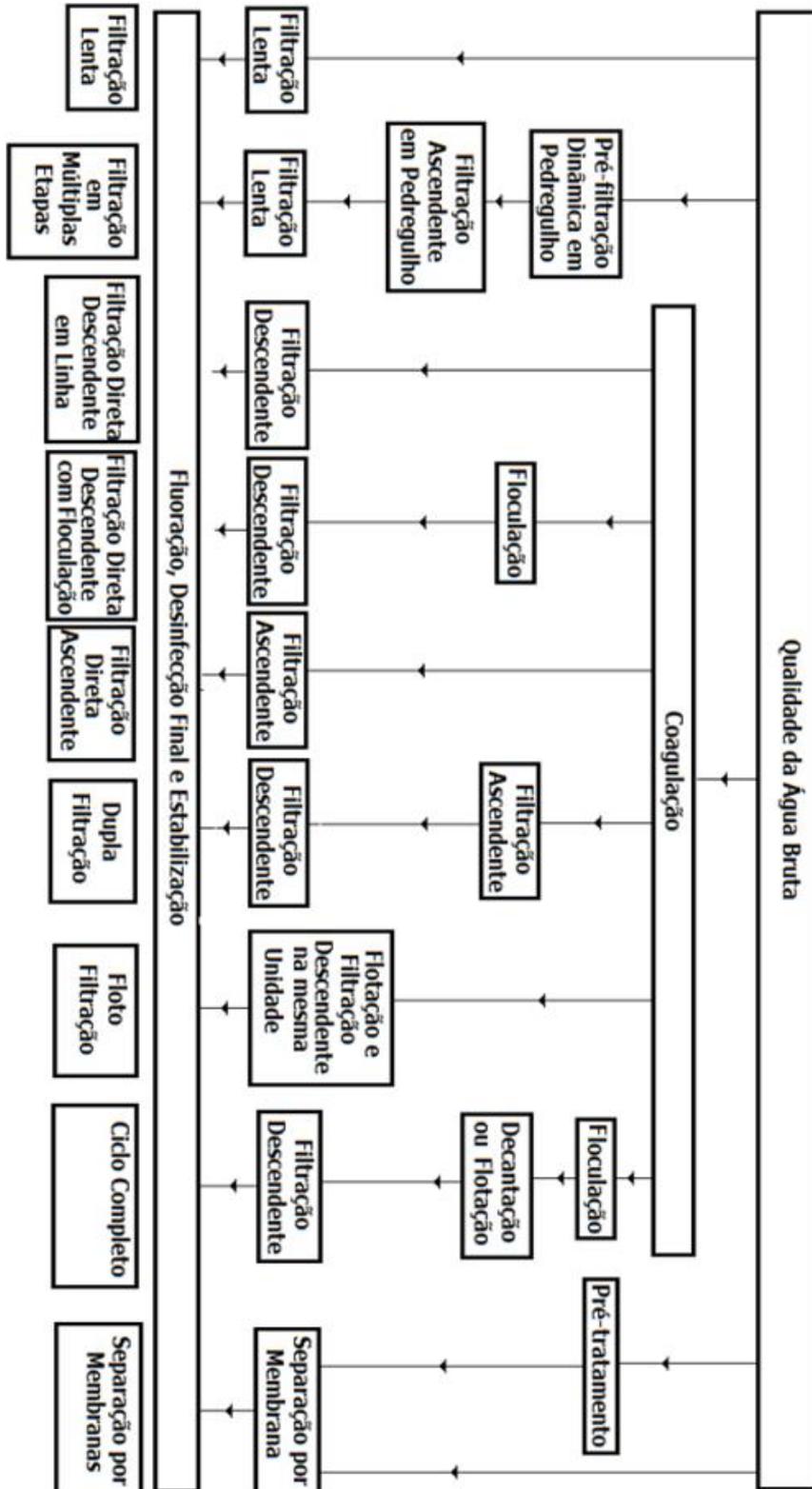
Compostos orgânicos como as microcistinas que apresentam similaridade com a molécula de AZM são mencionadas na legislação brasileira, apresentando valor máximo permissível de  $1,0 \mu\text{gL}^{-1}$  em águas para abastecimento público, enquanto que os fármacos não são citados. As microcistinas são cianotoxinas resultantes da lise celular das cianobactérias, presentes em mananciais eutrofizados pelo lançamento de esgotos industriais e sanitários. Essas toxinas são hepatotoxinas e agredem principalmente o fígado (SANCHES et al., 2012).

### 3.3 TRATAMENTO DE ÁGUA

O tratamento de água ocorre pela remoção de partículas suspensas, MO, microrganismos e demais substâncias indesejáveis que em pequenas concentrações conferem cor, odor e sabor, sendo que o objetivo é distribuir para a população água potável e segura (BOTERO, 2009; MOREIRA, 2010).

O tratamento de água em ciclo completo emprega produtos químicos, como oxidantes (cloro, ozônio, permanganato de potássio, dentre outros) para oxidação de compostos orgânicos e desinfecção, alcalinizantes (cal ou hidróxido de sódio) para ajuste/correção de pH, coagulantes (sais de ferro e de alumínio), dentre outros (PÁDUA, 2010). De acordo com Di Bernardo et al (2017) a Figura 2 mostra as tecnologias de tratamento de água mais relevantes para consumo humano.

Figura 2 - Principais tecnologias de tratamento de água para abastecimento público



Fonte: Di Bernardo et al, 2017.

Dentre as diversas tecnologias utilizadas para o tratamento de água, a mais comumente utilizada pelas ETAs é o tratamento em ciclo completo (DI BERNARDO et al., 2017). De acordo com Lima (2014) e Voltan (2014), as estações de tratamento de água utilizam normalmente a tecnologia em ciclo completo para o abastecimento público, a qual se baseia nos processos e operações de coagulação, floculação, sedimentação, filtração, fluoreação, cloração e correção de pH.

A água bruta quando chega à estação de tratamento sofre oxidação geralmente com cloro para que os compostos contaminantes possam ser removidos nas etapas seguintes. O coagulante a base de ferro ou alumínio é adicionado no momento da mistura rápida, podendo ser hidráulica ou mecanizada (DI BERNARDO et al.; 2017).

Existem vários fatores que podem interferir na etapa da coagulação sendo a prioridade para pH, alcalinidade, o tamanho das partículas, a espécie e dosagem de produtos químicos, que são os mais importantes. Em menor categoria a concentração e a validade da solução de coagulante, a temperatura, o mecanismo de coagulação predominante, o gradiente de velocidade e o tempo de mistura rápida (SANTOS et al.; 2007).

Existem dois tipos de mecanismos de remoção de partículas a qual a água está sujeita na etapa de coagulação, que são adsorção e desestabilização de cargas, isso quando existe somente a filtração direta, permitindo a desestabilização de partículas impuras e aumentando seu tamanho (PÁDUA, 2010), ou no mecanismo de varredura, que é o mais utilizado pelas Estações de Tratamento de Água (ETAs), devido a uma maior dosagem de coagulante, no qual resulta a formação de flocos na etapa de floculação (LIBÂNIO, 2010; DI BERNARDO et al., 2017).

Em seguida, a água coagulada é agitada de forma lenta por um tempo controlado até que os flocos alcancem dimensão e massa específica suficientes para que sejam removidos por sedimentação ou por flotação. Esta etapa é denominada floculação podendo ser efetuada em unidades mecanizadas ou hidráulicas. Nos sedimentadores ou flotores a água é clarificada através da filtração em unidades onde o escoamento é descendente, contendo geralmente areia ou antracito e permanecendo as impurezas depositadas no fundo dos reatores (PÁDUA, 2010; DI BERNARDO et al., 2017). A água filtrada é submetida às etapas

de desinfecção (geralmente com cloro), de fluoração e de correção final de pH. (PÁDUA, 2010).

Para a remoção de compostos orgânicos presentes no tratamento em ciclo completo, é necessária a combinação com outras tecnologias (RODRIGUEZ-MOZAZ et al, 2004; LOPES et al, 2008).

Muitas pesquisas relatam a ineficiência de remoção de compostos orgânicos contaminantes no tratamento de água em ciclo completo (ASCE et al, 2002; MARCHETTO e FILHO, 2006; PASCHOALATO et al, 2008; LIMA et al, 2014; VOLTAN, 2014). De acordo com Khah e Ansari (2009), Pereira (2010), Pádua (2010) e Di Bernardo et al (2017) em geral, os adsorventes mais empregados no processo de tratamento de água são alumina, zeólitas sintéticas, resinas de troca iônica, óxidos de metais e o carvão ativado. Outras tecnologias que são capazes de remover microcontaminantes são os processos oxidativos avançados (POAs) e as membranas. Segundo Lima et al (2017), o tratamento em ciclo completo seguido da adsorção em CAP apresenta resultados satisfatórios na remoção de microcontaminantes em águas contaminadas, assim como Asce et al., (2002) que também assegura a eficácia da eliminação dos compostos orgânicos pelos processos químicos/biológicos combinados.

A Tabela 1 mostra as possíveis tecnologias de remoção de microcontaminantes orgânicos e suas vantagens e desvantagens.

**Tabela 1** - Tecnologias acessíveis para tratamento de água devido à presença de microcontaminantes

| Processo                   | Vantagens                                                                                     | Desvantagens                                                                                                              |
|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Coagulação química         | Utilizada no tratamento de água na remoção de turbidez e cor                                  | Produção de lodo                                                                                                          |
| Adsorção em carvão ativado | Remoção de compostos orgânicos e fácil alteração na aplicação das dosagens                    | Árdua regeneração e alto custo de disposição para os resíduos potencialmente perigosos                                    |
| Osmose reversa             | Remoção de compostos orgânicos por repulsão eletrostática e exclusão por tamanho de partícula | Produção de lodo; adsorção dos compostos na superfície da membrana; difusão de compostos hidrofóbicos através da membrana |

**Fonte:** Adaptado de Alexander et al., 2012.

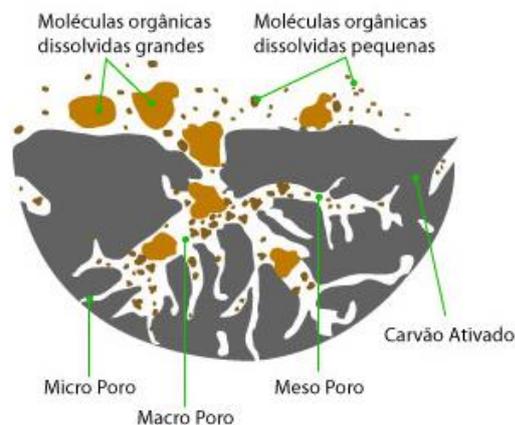
### 3.4 CARVÃO ATIVADO

Há vários trabalhos desenvolvidos por pesquisadores que utilizaram diferentes tipos de carvão ativado para remoção de diversos microcontaminantes presentes em soluções aquosas e que obtiveram grande sucesso como é o caso dos trabalhos de Paschoalato et al (2008), Marmo et al (2010), Fernandes et al (2011), Silva et al (2012), Leal (2013), Voltan (2014), Guerra (2014), Valença et al (2017) entre outros.

O carvão ativado muito utilizado na antiguidade teve seu uso potencializado após a Primeira Guerra Mundial, onde foi usado contra gases tóxicos. Até o final da guerra, pesquisadores desenvolveram importantes aplicações para o mesmo, tais como extração de benzeno de fabricação de gases e eliminação de odor, mas seu principal foco é a remoção de substâncias que resultam em cor, odor e sabor (MUCCIACITO, 2009; KHAH e ANSARI, 2009).

O carvão ativado (CA) é um material carbonáceo poroso no qual é designado aos processos de pirólise e ativação, podendo ser química ou física sofrendo o aumento da porosidade interna. Uma vez ativado os poros internos podem ser comparados com uma rede de túneis que se bifurcam em canais menores e assim sucessivamente. O surgimento da porosidade após ativação pode ser classificado de acordo com a sua dimensão em macro, meso e microporos (VALÊNCIA, 2007; DI BERNARDO et al., 2017) conforme mostra a Figura 3.

**Figura 3** - Distribuição da porosidade inteira do material carbonáceo



**Fonte:** Macroventa, 2018.

O que define a distribuição dos poros no produto final é o tipo de matéria-prima, tipo de ativação, dentre outros parâmetros operacionais utilizados em sua fabricação (VALÊNCIA, 2007). A Figura 4 mostra a distribuição de poros existentes em um grão de carvão.

**Figura 4 - Estrutura porosa do grão de carvão**



Fonte: Macroventa, 2018.

Os poros são classificados de acordo com seu diâmetro médio. A classificação dos poros é mostrada conforme Tabela 2.

**Tabela 2 - Divisão dos poros do carvão ativado**

| Classificação          | Diâmetro (nm) |
|------------------------|---------------|
| Microporos primários   | < 1,2         |
| Microporos secundários | 1,2 a 2       |
| Mesoporos              | 2 a 50        |
| Macroporos             | > 50          |

Fonte: Brandão e Silva, 2005.

Há uma variedade de materiais que são utilizados na produção de CA incluindo madeira, casca de coco, arroz e de nozes, carvões minerais (antracito, betuminoso, linhito), madeiras, turfa, osso e polímeros sintéticos como o Policloreto de Vinila (PVC) (KHAH e ANSARI, 2009; ZAGO, 2010). No Brasil, os carvões ativados mais empregados são madeira, carvão betuminoso e sub-betuminoso, osso e casca de coco. A produção é realizada pela carbonização e ativação para a expansão dos vazios internos. Os carvões ativados apresentam elevada capacidade adsorptiva, pois apresentam grande área específica superficial e existência de grupos funcionais de superfície (YU et al, 2016; DI BERNARDO et al., 2017). A carbonização é feita na ausência de ar, em temperaturas usualmente

compreendidas entre 500 e 800°C, enquanto que, a ativação é realizada com gases oxidantes em temperaturas de 800 a 900°C (DI BERNARDO et al, 2017). Segundo Tramontin et al (2011) o aumento intenso da temperatura resulta na expansão dos gases no interior do sólido aumentando o teor de carbono no material e reduzindo o teor de compostos voláteis. A ativação resulta no aumento da superfície do carvão elevando a remoção de hidrocarbonetos e alcatrões (KHAH e ANSARI, 2009).

O carvão ativado pode ser obtido na forma pulverizada (CAP) ou granular (CAG). O CAP é preparado por meio de uma suspensão, podendo ser adicionada tanto na captação quanto no início do tratamento de água na ETA. A instalação do CAP nas ETAs é menos onerosa em relação ao CAG e não há despesa com a regeneração do mesmo. Todavia, o carvão ativado granular (CAG) apresenta eficiência maior de adsorção e o CAP gera aumento de massa seca (lodo). De acordo com Voltan (2014), o CAP possui 100% dos sólidos suspensos totais e o lodo tratado possui apenas 25%, então para cada 1 kg de CAP, são gerados 4 kg de lodo. A massa molecular de compostos orgânicos microcontaminantes presentes nas águas é relativa ao tamanho dos poros do CA, por conta disto o carvão pode apresentar ou não efetividade de adsorção. É de extrema importância e necessidade entender as propriedades físicas e de adsorção de um determinado tipo de carvão e efetuar testes com o intuito de promover a remoção concreta de substâncias contaminantes (DI BERNARDO et al., 2017).

No Brasil o mercado interno demanda grande quantidade de carvão ativado fazendo com que a produção nacional não seja suficiente tendo que efetuar a importação do produto para atender diversas empresas (BORGES, 2003) que fazem a aplicação do mesmo para fins de abastecimento de água potável, tratamento de águas residuárias, transporte de gases, na área alimentícia e farmacêutica, dentre outras (LEGNER, 2012; MACHADO et al., 2015). A indústria do tratamento de água usufrui demasiadamente do adsorvente devido sua simples instalação nos casos em que a ETA já existe e sua ocorrência ocasional, por exemplo, de algas resultando gosto e odor na água sem ter que realizar mudanças (SILVA, 2005; BRANDÃO E SILVA, 2006; LEGNER, 2012; MACHADO et al., 2015; LIMA et al, 2017).

Apesar da relevância do carvão ativado nos processos de adsorção para remover microcontaminantes (YU et al., 2014) presentes em soluções aquosas,

existe a questão da quantidade limite para seu aproveitamento, devido a sua escassez como matéria prima e do alto custo de produção (PEREIRA, 2010).

A adsorção é um processo pela qual ocorre a transferência de massa de um soluto de uma fase fluida para uma superfície sólida (WARTCHOW et al., 1984). A eficiência de adsorção se encontra quando as moléculas que serão adsorvidas na interface sólido/líquido ficam retidas na superfície estável do adsorvente, isso significa que, a eficiência aumenta com o aumento da superfície (BORBA, 2006). De acordo com Khah e Ansari (2009) a estrutura porosa e a superfície do material sólido restringem a quantidade e a dimensão das moléculas a serem adsorvidas.

A técnica de adsorção em carvão ativado é aplicada para remover poluentes orgânicos, inorgânicos e biológicos, principalmente substâncias orgânicas dissolvidas em soluções aquosas que são causadores de cor, gosto e odor (KHAH e ANSARI, 2009). O adsorvente deve apresentar ótimo desempenho na adsorção dessas substâncias, pois há outros microcontaminantes orgânicos em solução competindo pelos sítios ativos do adsorvente para que também sejam adsorvidos (ZAGO, 2010).

Conforme Pádua (2010) e Di Bernardo et al (2017) a adsorção ocorre por meio de forças atrativas e repulsivas tais como forças de Van der Waals, ligações de hidrogênio, interações dipolo-dipolo que podem ser de caráter químico ou físico fazendo com que haja interação do adsorvato com o adsorvente. O processo químico envolve o compartilhamento de elétrons do adsorvente com o adsorvato a partir de ligações químicas associadas à superfície do material adsorvente, enquanto que o processo físico ocorre através de interações como é o caso das forças de Van der Waals.

A adsorção em carvão ativado passou a ser uma ferramenta tanto quanto eficiente na purificação de águas de abastecimento por se tratar de uma tecnologia que acresce o tratamento de água em ciclo completo, sobretudo na remoção de compostos orgânicos geradores de cor, odor e sabor, como metil-isoborneol (MIB), geosmina, agrotóxicos e cianotoxinas (MACHADO et al., 2015; DI BERNARDO et al., 2017).

### 3.4.1 CARACTERÍSTICAS ADSORTIVAS DO CARVÃO ATIVADO

De acordo com Lima (2013) primeiro é necessário conhecer as características do carvão para que sua aplicação seja eficaz em determinado processo. A capacidade adsortiva do CA pode ser determinada através de diferentes aspectos, como Índice de azul de metileno (IAM) e Número de iodo (NI), teor de umidade, teor de cinzas e pH, sendo variáveis relevantes para o sucesso da adsorção de substâncias orgânicas.

#### 3.4.1.1 Índice de azul de metileno

O Índice de azul de metileno (IAM) revela a capacidade do carvão em adsorver moléculas que sejam equivalentes à do AZM, ou seja, significa que adsorverá moléculas de tamanho maiores, com área superficial dos poros superiores a 1,5 nm (DI BERNARDO et al., 2017). Desse modo, a avaliação do AZM prediz a adsorção de compostos orgânicos e permite um método simples para seleção de um contaminante na aplicação de água (BAÇAOUUI et al., 2001).

De acordo com Borges et al (2016) o IAM é um meio que determina a área superficial do carvão ativado. A molécula do corante é empregada como adsorbato, em testes de adsorção em fase líquida e indica a quantidade de mesoporos que existem no carvão (ZAGO, 2010; BORGES et al., 2016). Conforme a norma japonesa JIS K 1474/1991 o parâmetro é estabelecido como a razão entre a quantidade de azul de metileno adsorvido ( $Q_e$ ) pela concentração inicial de azul de metileno ( $C_0$ ) ( $\text{mLg}^{-1}$ ). Como no Brasil não há nenhum indicativo em relação ao IAM, Baçaoui et al (2001) apontam que, em Marrocos o limite mínimo de adsorção de azul de metileno que o carvão ativado demanda é de  $180 \text{ mgg}^{-1}$ .

#### 3.4.1.2 Número de iodo

O Número de Iodo (NI) determina a quantidade adsorvida de iodo pelo carvão. Está relacionado com a adsorção em microporos, ou seja, moléculas com diâmetro de poros menores que 1 nm (BAÇAOUUI et al, 2001; BRANDÃO E SILVA, 2006; DI BERNARDO et al, 2017). De acordo com a norma NBR 12.073 o índice

mínimo de iodo deve ser igual a  $600 \text{ mg I}_2\text{g}^{-1}$ . O padrão para a American Water Works Association (AWWA) é de  $500 \text{ mg I}_2\text{g}^{-1}$ .

#### 3.4.1.3 pH

O pH (potencial hidrogeniônico) do carvão ativado está vinculado com a matéria-prima e do processo de fabricação. Este parâmetro revela o grau ácido, básico ou neutro de uma determinada solução juntamente com os espectros de infravermelho dos grupamentos químicos ligados à superfície do carvão (ROZÁRIO, 2012; LEAL, 2013).

#### 3.4.1.4 Teor de cinzas

O conteúdo de cinzas reflete a pureza do carvão. O teor de cinzas significa a quantidade de matéria inorgânica presente no carvão ativado e que em elevado teor afeta no processo de adsorção, pois seu caráter passa a ser hidrofílico, ou seja, o carvão passa a ter mais afinidade com a água, desta forma as moléculas da mesma passam a ser adsorvidas pelos poros de carbono do carvão impedindo a adsorção do composto orgânico (TOLEDO et al., 2005). O aumento do teor de cinzas pode ocorrer devido a duas razões, ou pelo mecanismo de ativação ou simplesmente pela fixação de compostos inorgânicos no material após a etapa de pirólise (ALVES et al., 2015).

#### 3.4.1.5 Umidade

A fabricação de carvão com teores de umidade elevados pode diminuir substancialmente sua capacidade adsorptiva (ZAGO, 2010). O carvão ativado que é íntegro de água apresenta combinação entre umidade superficial e a inerente ao produto (LEAL, 2013).

#### 3.4.1.6 Isotermas de adsorção

As isotermas de adsorção são empregadas para que seja possível avaliar a capacidade de adsorção de um adsorvente. É necessário conhecer a quantidade

máxima que o mesmo pode adsorver de uma substância, em vista disso, dados de equilíbrio são obtidos através das isotermas de adsorção, que são modelos matemáticos que auxiliam na determinação de parâmetros adsortivos. Existem vários modelos matemáticos que avaliam a capacidade de adsorção, mas, somente dois são mais utilizados, as isotermas de Freundlich e Langmuir, que descrevem a relação entre adsorvato e adsorvente (BRANDÃO E SILVA, 2006; ZAGO, 2010).

De acordo com Brandão e Silva (2006) a isoterma de Freundlich é representada pela Equação 1 e na forma linearizada pela Equação 2.

$$Q_e = K.C_e.1/n \quad (1)$$

$$\log Q_e = \frac{1}{n}.C_e + \log K \quad (2)$$

Em que:

$Q_e$ : é a relação entre a quantidade de adsorvato e quantidade de adsorvente, expressa em ( $\text{mgg}^{-1}$ );

$C_e$ : é a concentração de adsorvato na condição de equilíbrio, expressa em ( $\text{mgL}^{-1}$ );

$K$  e  $n$ : são constantes experimentais determinados para um dado sistema adsorvato-adsorvente.

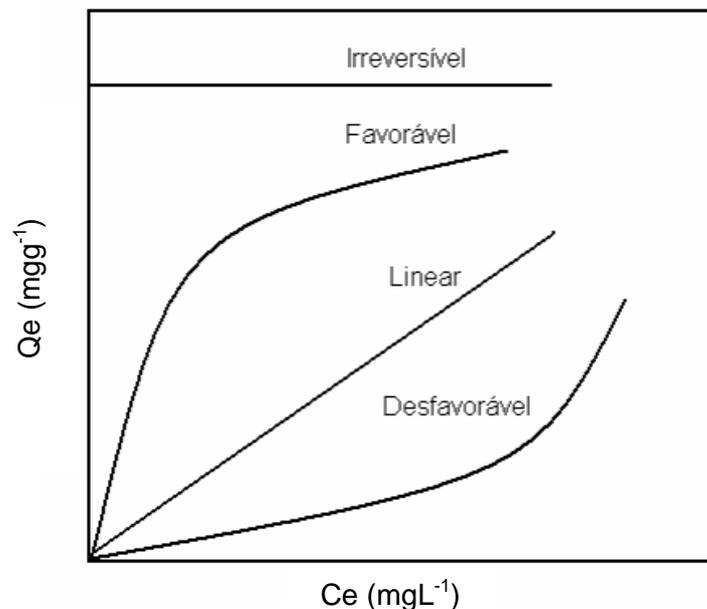
Conforme Brandão e Silva (2006) se estabilizar os valores de  $C_e$  e  $1/n$  na Equação 2, quanto maior for o valor de  $K_f$  maior a capacidade do carvão adsorver o adsorvato. Enquanto que, se estabilizar os valores de  $C_e$  e  $K_f$ , quanto maior o valor de  $n$  mais intensa será a afinidade entre o adsorvente e o adsorvato. Todavia, se o valor de  $n$  for muito superior, a adsorção passará a ser independente de  $C_e$  e a isoterma tenderá a uma horizontal. Ou seja, o valor de  $Q_e$  é, então, praticamente constante, evidenciando um processo de adsorção irreversível.

No entanto, valores muito baixos de  $n$  gera uma ligação muito fraca do processo adsortivo, apresentando uma isoterma com maior inclinação com a horizontal, ou seja, pequenos aumentos de  $C_e$  resultam em alterações elevadas de  $Q_e$ .

A equação de Freundlich compreende que, para valores maiores de  $C_e$ , tem-se um maior valor de  $Q_e$ , no entanto, isto ocorre até a saturação do adsorvente. A partir deste ponto, entretanto, mesmo com o aumento de  $C_e$ ,  $Q_e$  permanecerá constante. As isotermas são representadas através de curvas de concentração do soluto em fase sólida em função da concentração do soluto na fase líquida. Para determinar a melhor isoterma é necessário visualizar o formato da curva apresentado para conhecer qual é a interação entre adsorvato e adsorvente e se sua adsorção é favorável ou não (ZAGO, 2010).

A Figura 5 revela os tipos mais comuns de isotermas encontradas em materiais carbonosos, sendo que o valor de  $Q_e$  representa a capacidade adsortiva, enquanto que  $C_e$  é a concentração.

**Figura 5** - Exemplos de diferentes tipos de isotermas



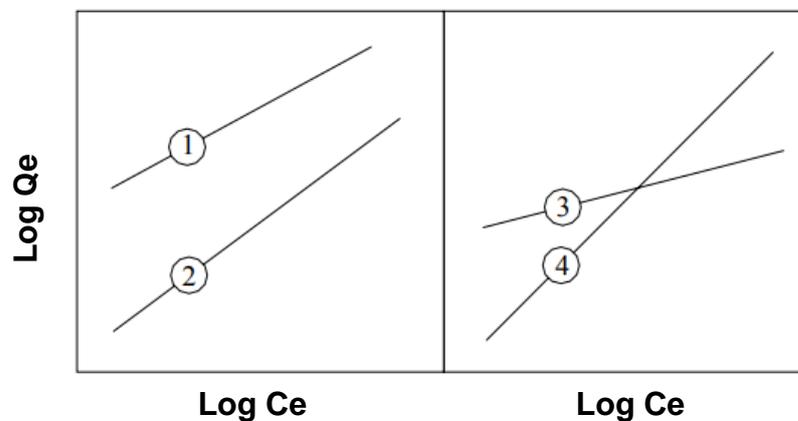
Fonte: Moreira, 2008.

Isotermas lineares apresentam uma reta desde a origem, no qual a quantidade adsorvida é equivalente à concentração do fluido, não possibilitando à capacidade máxima de adsorção. Isotermas côncavas extraem elevadas quantidades de adsorvatos até em baixos níveis de concentração no fluido, podendo ser chamadas de favoráveis. Isotermas não favoráveis são aquelas denominadas convexas, que em altas concentrações possuem baixa capacidade de remoção. As isotermas irreversíveis apresentam elevada quantidade de massa de adsorvato retida, que não depende da concentração do adsorvato na fase fluida (MOREIRA,

2008). O tipo Freundlich é o mais comum, apresentando adsorção em multicamadas e superfície heterogênea. Isotermas longas e lineares não são comuns para este caso, mas ocorre ligeiramente no início de todas as isotermas (CABRITA, 2009).

A isoterma de Freundlich em quase todos os casos é a que melhor se ajusta aos dados experimentais no tratamento de água (MASSCHELEIN, 1992, p.321-363 apud BRANDÃO e SILVA, 2005, p.424). A Figura 6 compara o desempenho de carvões ativados por meio de isotermas.

**Figura 6** - Representação gráfica das isotermas de Freundlich



Fonte: Masschelein, 1992, p.321-363 apud Brandão e Silva, 2005, p.424.

Observa-se que, em relação aos carvões 1 e 2, o carvão 1 possui capacidade de adsorção ( $Q_e$ ) maior que o carvão 2, para determinados valores de concentrações estudadas, mas o carvão 2 pode apresentar maiores faixas de adsorção quando este apresentar maiores concentrações. Já para os carvões 3 e 4 mais inclinados, o carvão 3 apresenta baixo valor de  $1/n$ , não sendo tão dependente da concentração residual de equilíbrio e pode ser mais adequado utilizando o carvão ativado pulverizado para o tratamento em batelada. A adsorção de substâncias pode se tornar menos eficiente se o valor de  $1/n$  for maior que 1 (MASSCHELEIN, 1992, p.321-363 apud BRANDÃO e SILVA, 2005, p.424).

### 3.4.2 FATORES QUE INFLUENCIAM NA ADSORÇÃO

Existem diferentes fatores que afetam o processo de adsorção tais como o tipo de carvão, dose aplicada, as características da água e do sistema experimental como o pH, temperatura e concentração de adsorvato (ZAGO, 2010). A área

superficial do adsorvente e a presença de grupos funcionais em sua superfície (grupos carboxílicos, fenólicos e lactonas), assim como o tamanho médio dos poros, a polaridade dos compostos em soluções aquosas e também o tamanho da molécula do adsorvato (MACHADO et al., 2015). O pH da solução afeta fortemente a superfície do adsorvente, bem como o grau de ionização e a estrutura molecular do adsorvato (ANSARI e SADEGH, 2007; GONG et al., 2013; VALENÇA et al., 2017). Quando o pH da solução se encontra ácido, a superfície do adsorvente tende a ficar carregada positivamente promovendo trocas eletrostáticas entre sua superfície e o adsorvato (ANSARI e SADEGH, 2007; VALENÇA et al., 2017). De acordo com Moreno-Castilla (2004) o pH da solução é o responsável pelo controle das forças iônicas da superfície do adsorvente e da molécula do adsorvato. A adsorção ocorre por meio de interações eletrostáticas e não eletrostáticas, sendo que, as interações eletrostáticas podem ser atrativas ou repulsivas, enquanto que, as não eletrostáticas são somente forças atrativas como, por exemplo, as forças de Van der Waals e interações hidrofóbicas.

Pode-se considerar que o local de aplicação do adsorvente nas ETAs também influencia na capacidade adsortiva do carvão ativado. Para obter uma melhor eficiência é necessário identificar o melhor ponto de aplicação. Nas ETAs, o CAP é adicionado em forma de suspensão, com o auxílio de uma bomba dosadora em qualquer unidade antes da filtração. Para almejar sua eficiência é necessário que garanta o contato entre a mistura de carvão com a água, o tempo de contato (de 10 a 120 min) necessário para a adsorção dos compostos orgânicos contaminantes e a influência com os demais produtos químicos. É de suma importância que sejam realizados testes de bancada para assegurar a eficiência de adsorção em termos de dosagem de CAP e tempo de contato na remoção dos contaminantes (DI BERNARDO et al., 2017).

O Quadro 3 descreve as vantagens e desvantagens de acordo com os locais de aplicação da suspensão de carvão ativado pulverizado (CAP).

**Quadro 3 – Avaliação das vantagens e desvantagens em relação aos pontos de aplicação do CAP na ETA**

| Local                            | Vantagens                                         | Desvantagens                                                                                                                                                                                       |
|----------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tomada de água                   | Maior tempo de contato.<br>Boa mistura.           | Algumas substâncias que seriam removidas por coagulação, sedimentação (ou flotação) e filtração podem ser adsorvidas, elevando o consumo de CAP.                                                   |
| Chegada de água bruta na ETA     | Melhor controle da dosagem em relação ao anterior | Mesmas desvantagens. Às vezes tem um pré decantador antecedendo a coagulação.                                                                                                                      |
| Unidade de mistura rápida na ETA | Mistura eficiente e tempo de contato razoável.    | Possível redução na taxa de adsorção, pela interferência de coagulantes. Tempo de contato às vezes insuficiente para remoção de certas substâncias. Adsorção de substâncias que seriam coaguladas. |
| Entrada dos filtros              | Uso eficiente de CAP                              | Possível passagem de CAP pelo meio filtrante (sólidos retidos nos filtros) e redução do tempo de contato                                                                                           |

**Fonte:** Di Bernardo et al., 2017.

Há várias pesquisas que apresentam a eficiência do carvão ativado na remoção de compostos orgânicos presentes em soluções aquosas (microcistinas, saxitoxinas, agrotóxicos, fármacos, trihalometanos, entre outros), outras, apenas para determinar a sua capacidade adsorviva conforme mostra o Quadro 4.

**Quadro 4 - Estudo do uso de carvão ativado no tratamento de água realizado por diversos autores**

(continua)

| <b>Autor</b>             | <b>Tipo de carvão</b>                        | <b>Tipo de água</b> | <b>Adsorvato</b>    | <b>Variáveis estudadas</b>                                         | <b>Conclusão</b>                                                                                                                                                                                                            |
|--------------------------|----------------------------------------------|---------------------|---------------------|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kuroda et al (2005)      | madeira                                      | abastecimento       | microcistina        | NI/IAM                                                             | Baixa capacidade adsorptiva por apresentar IAM relativamente baixo e volume de mesoporos baixo.                                                                                                                             |
| Marchetto e Filho (2005) | vegetal                                      | abastecimento       | MIB                 | dosagem de CAP e coagulante, tempo de contato e ponto de aplicação | O ponto de aplicação não apresentou influência no processo de adsorção. Os aumentos da dosagem e do tempo de contato aumentaram a eficiência de adsorção.                                                                   |
| Marchetto e Filho (2006) | vegetal                                      | abastecimento       | MIB                 | dosagem de coagulante                                              | Melhores faixas de dosagem de coagulante entre 30 e 50 mgL <sup>-1</sup> . O carvão foi excelente na remoção de MIB com percentuais de 50 a 60% e dosagem fixa de CAP de 30 mgL <sup>-1</sup> e tempo de contato de 16 min. |
| Müller et al (2009)      | madeira/<br>casca de coco/osso/<br>antracito | abastecimento       | microcistina        | NI e isoterma de adsorção                                          | O carvão de coco apresentou maior NI, mas a isoterma de adsorção revelou que o CAP de madeira possuía a maior capacidade em adsorver a microcistina.                                                                        |
| Paschoalato et al (2008) | babaçu                                       | abastecimento       | diuron e hexazinona | dosagem de CAP e tempo de contato                                  | Foi necessária a dosagem de 250 mgL <sup>-1</sup> e tempo de contato de 30 min para a remoção eficiente de diuron e hexazinona.                                                                                             |

**Quadro 4 - Estudo do uso de carvão ativado no tratamento de água realizado por diversos autores**

(continuação)

| <b>Autor</b>           | <b>Tipo de carvão</b> | <b>Tipo de água</b> | <b>Adsorvato</b>             | <b>Variáveis estudadas</b>                             | <b>Conclusão</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|------------------------|-----------------------|---------------------|------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Veronezi et al (2009)  | madeira/osso/mineral  | abastecimento       | saxitoxina                   | dosagem de CAP                                         | O CAP de madeira foi o mais eficiente na remoção de saxitoxinas em relação aos demais com dosagem de $50 \text{ mgL}^{-1}$ e tempo de contato de 2 h.                                                                                                                                                                                                            |
| Marmo et al (2010)     | -                     | abastecimento       | trialometanos                | dosagem de CAP, tempo de contato e técnicas de análise | O aumento da dosagem de CAP propiciou maiores percentuais de remoção do contaminante. O tempo de contato de 120 min apresentou maiores percentuais de remoção na análise de espectrofotometria.                                                                                                                                                                  |
| De Júlio et al (2010)  | vegetal               | abastecimento       | cianobactérias               | dosagem de CAP                                         | A dosagem de $10 \text{ mgL}^{-1}$ de CAP e tempo de contato de 15 min antes da coagulação mostrou ser condição eficiente na remoção de cianobactérias.                                                                                                                                                                                                          |
| Fernandes et al (2011) | vegetal               | abastecimento       | 17- $\alpha$ Etinilestradiol | dosagem de CAP e tempo de contato                      | Para o tempo de 60 min e dosagem de $50 \text{ mgL}^{-1}$ , a adsorção foi satisfatória com valor de residual de contaminante menor que o limite de quantificação, ao passo que com o aumento do tempo de contato (120 min), a dosagem de CAP necessária foi de $10 \text{ mgL}^{-1}$ , onde o valor de residual permaneceu inferior ao limite de quantificação. |

**Quadro 4 – Estudo do uso de carvão ativado no tratamento de água realizado por diversos autores**

(continuação)

| Autor                 | Tipo de carvão                  | Tipo de água  | Adsorvato           | Variáveis estudadas                                               | Conclusão                                                                                                                                                                                                                  |
|-----------------------|---------------------------------|---------------|---------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Silva (2012)          | casca de coco                   | abastecimento | fármacos            | pH, temperatura, tempo de contato e isoterma de adsorção          | Não apontou influência do pH, mas sim da temperatura, mostrando ser um processo de adsorção exotérmico. A remoção dos compostos orgânicos analisados foi superior a 90% em um tempo de 240 min e massa de carvão de 0,1 g. |
| Leal (2013)           | casca de coco                   | abastecimento | 2,4-D               | dosagem de CAP, tempo de contato e ponto de aplicação             | A dosagem de CAP na remoção do agrotóxico 2,4-D foi de $25 \text{ mgL}^{-1}$ e tempo de contato de 15 min. A adsorção mostrou-se eficiente independentemente dos pontos de aplicação.                                      |
| Lopes et al (2013)    | espiga de milho e CAP comercial | abastecimento | -                   | cinzas e NI                                                       | Os carvões de espiga de milho ativados a temperaturas diferentes mostraram-se ser mais eficientes, apresentando teor de cinzas menores, elevado NI e área superficial que quando comparado com o carvão comercial.         |
| Guerra (2014)         | casca de coco                   | abastecimento | 2,4-D               | dosagem de CAP e tempo de contato                                 | A dosagem de CAP ( $100 \text{ mgL}^{-1}$ ) e tempo de contato (30 min) empregados no estudo foram excelentes para remoção de 2,4-D.                                                                                       |
| Ferreira et al (2014) | Dendê e babaçu                  | residuária    | paracetamol         | característica adsorptivas dos adsorventes e isoterma de adsorção | O carvão de dendê apresentou área superficial específica e volume total de poros maiores, e isoterma de adsorção com ajuste de Langmuir com correlação melhor que o carvão de babaçu.                                      |
| Voltan (2014)         | babaçu                          | abastecimento | diuron e hexazinona | dosagem de CAP e tempo de contato                                 | Obteve remoção satisfatória dos herbicidas com dosagem de CAP de $12 \text{ mgL}^{-1}$ e tempo de contato de 30 min.                                                                                                       |

**Quadro 4 - Estudo do uso de carvão ativado no tratamento de água realizado por diversos autores**

(conclusão)

| Autor              | Tipo de carvão                | Tipo de água  | Adsorvato        | Variáveis estudadas                     | Conclusão                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|--------------------|-------------------------------|---------------|------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Costa et al (2015) | casca de nozes                | residuária    | azul de metileno | características adsorptivas dos carvões | O carvão de casca de nozes com tratamento químico se mostrou eficiente na adsorção de AZM, com baixo teor de cinzas e elevada área superficial específica.                                                                                                                                                                                                                                              |
| Alves et al (2015) | endocarpo da amêndoa-da-praia | residuária    | azul de metileno | características adsorptivas dos carvões | O carvão do endocarpo da amêndoa-da-praia foi mais eficiente quando ativado quimicamente em menor razão de impregnação de carbonato de sódio. O resultado de umidade não excedeu a 8%, exceto o teor de cinzas elevado. Para o CAP com maior razão de impregnação de carbonato de sódio apresentou menor porcentagem de adsorção, sendo necessária maior quantidade de massa para atingir o equilíbrio. |
| Rheinheimer (2016) | -                             | abastecimento | paracetamol      | massa de CAP, tempo de contato, pH      | Não houve influência na variação do pH; a massa empregada de CAP para os ensaios de adsorção foi de 1 g e o tempo de equilíbrio atingido foi de 180 min.                                                                                                                                                                                                                                                |

Fonte: Autora, 2019.

De acordo com Marchetto e Filho (2005) obtiveram resultados satisfatórios na remoção de MIB utilizando carvão ativado pulverizado. Conforme a pesquisa utilizou a água bruta do rio Grande, em São Bernardo do Campo e selecionaram dois tipos de carvões, um de origem vegetal e outro de origem mineral. As dosagens de

coagulante foram variadas para que pudesse analisar a interferência do precipitado metálico no processo de coagulação. O carvão de origem vegetal se mostrou mais eficiente que o mineral e não houve influência do pH no processo de adsorção. Os pesquisadores analisaram também diferentes pontos de aplicação do CAP antes e depois da etapa de coagulação, no entanto chegaram a conclusão de que não há interferência alguma nos resultados de adsorção com relação ao local de aplicação. Os autores provaram que a partir da dosagem de  $20 \text{ mgL}^{-1}$  com aumento gradativo e maior tempo de contato apresentou maior eficiência de remoção.

Marchetto et al (2006) estudaram a remoção de MIB utilizando carvão ativado pulverizado de origem vegetal. De acordo com os pesquisadores, com a dosagem fixa de CAP de  $30 \text{ mgL}^{-1}$  e tempo de adsorção de 16 min, foi possível obter uma eficiência de remoção de 50 a 60%. Não houve interferência do coagulante e do pH de coagulação no processo de adsorção e quanto ao processo de coagulação, a maior remoção de COD se deu na faixa de pH entre 5,8 a 6,5 com percentuais entre 30 e 50%. O uso de CAP não interferiu na remoção de COD.

Müller et al (2009) caracterizaram três tipos de carvões tais como: madeira, coco, osso e antracito. Os autores concluíram que o CAP de madeira para a remoção de microcistina mostrou-se ser mais eficiente que os demais através da isoterma de adsorção conforme modelo de Freundlich, onde apresentou maior capacidade de adsorção da microcistina e maior interação entre adsorvente e adsorvato. O intervalo das concentrações de CAP com tempo de contato de 2 h não foi o suficiente para atingir a concentração residual de microcistina de  $1 \mu\text{gL}^{-1}$ , portanto, foi possível calcular a dosagem necessária de CAP para atingir o valor máximo encontrado na legislação brasileira. O modelo matemático da isoterma referente à Freundlich se ajustou melhor obtendo resultados satisfatórios.

Paschoalato et al (2008) estudaram a remoção de diuron e hexazinona da água bruta proveniente do rio Pardo, utilizando o sistema de tratamento convencional combinado com adsorção em carvão ativado pulverizado. Concluíram que com a adição de  $250 \text{ mgL}^{-1}$  de CAP e tempo de contato de 30 min pode-se chegar a uma concentração de  $0,04 \text{ mgL}^{-1}$  e  $0,10 \text{ mgL}^{-1}$  de diuron e hexazinona, respectivamente, estando de acordo com as legislações investigadas.

Veronezi et al (2009) investigaram a adsorção em carvão ativado pulverizado na remoção de saxitoxinas em águas de abastecimento, produzindo uma água

sintética com concentração inicial de toxinas da ordem de 15 a 75  $\mu\text{gL}^{-1}$ . Os autores avaliaram três tipos de carvão, sendo o de madeira, osso e mineral. Foi variada a dosagem de CAP entre 5 e 50  $\text{mgL}^{-1}$  e concluíram que para a remoção de saxitoxinas o carvão de madeira apresentou melhores resultados, sendo necessário uma dosagem de 50  $\text{mgL}^{-1}$  com tempo de contato de 2 h. Ainda que o residual obtido de saxitoxinas tenha ficado acima do limite máximo exigido pela legislação, foi possível remover uma concentração elevada.

Marmo et al (2010) averiguaram a remoção de trialometanos em águas de abastecimento público, em adsorção em carvão ativado seguido do tratamento convencional. Na água de estudo foram adicionados ácidos húmicos como precursor na etapa de oxidação. Os autores puderam investigar os valores obtidos dos residuais de trialometanos através de duas técnicas: espectrofotometria e cromatografia, no entanto comprovaram que a segunda técnica apresentava valores de residuais menores que a primeira. Também relataram que quanto maior a dosagem de carvão, menor a concentração de contaminante. Em todas as dosagens de CAP o aumento do tempo de contato de 60 para 120 min para análise de espectrofotometria apresentou influência dos resultados de remoção dos trialometanos, enquanto que, para a análise de cromatografia o aumento do tempo não influenciou nos resultados finais, mostrando semelhanças.

Ren et al (2011) aplicaram carvão ativado pulverizado na remoção de pesticidas em soluções aquosas e através da isoterma de Freundlich pôde-se comprovar a eficácia de adsorção.

Fernandes (2011) concluiu que a adsorção em CAP foi eficiente na remoção de hormônio sintético 17 $\alpha$ -Ethinilestradiol de águas de abastecimento empregando o uso de 50  $\text{mgL}^{-1}$  de carvão com tempo de contato de 60 min. Quando o autor dobrou o tempo para 120 min foi necessário apenas a dosagem de 10  $\text{mgL}^{-1}$  para a redução do contaminante.

Silva et al (2012) estudou a remoção de antibióticos por meio de adsorção em carvão ativado a partir da casca de côco da baía através de ensaios feitos em batelada e relataram uma eficiência superior a 90% com tempo de contato de 240 min.

Leal (2013) caracterizou dois tipos de carvões ativados, ambos de origem vegetal, um a partir da casca de coco (CAP 1) e o outro a partir da madeira de

pinnus (CAP 2), variando as dosagens entre 10 e 150 mgL<sup>-1</sup> em diferentes tempos de contato iguais a 15 e 30 min. Nos seus ensaios analisou a capacidade adsortiva de cada carvão, sendo que os dois carvões selecionados foram satisfatórios na remoção do herbicida 2,4-D, mas que o carvão de coco foi o mais eficiente, pois apresentava NI igual a 617,67 mgg<sup>-1</sup>, umidade de 14,89%, pH de 8,46 e cinzas igual a 26,6%. Apesar do valor de umidade ter excedido o limite conforme a norma NBR 12.077 de até 8%, apresentando característica hidrofílica e maior quantidade de cinzas foi o que apresentou maiores índices de remoção do contaminante, cor aparente e turbidez em relação ao CAP 2. A dosagem determinada pela autora no experimento foi de 25 mgL<sup>-1</sup> e tempo de contato de 15 min.

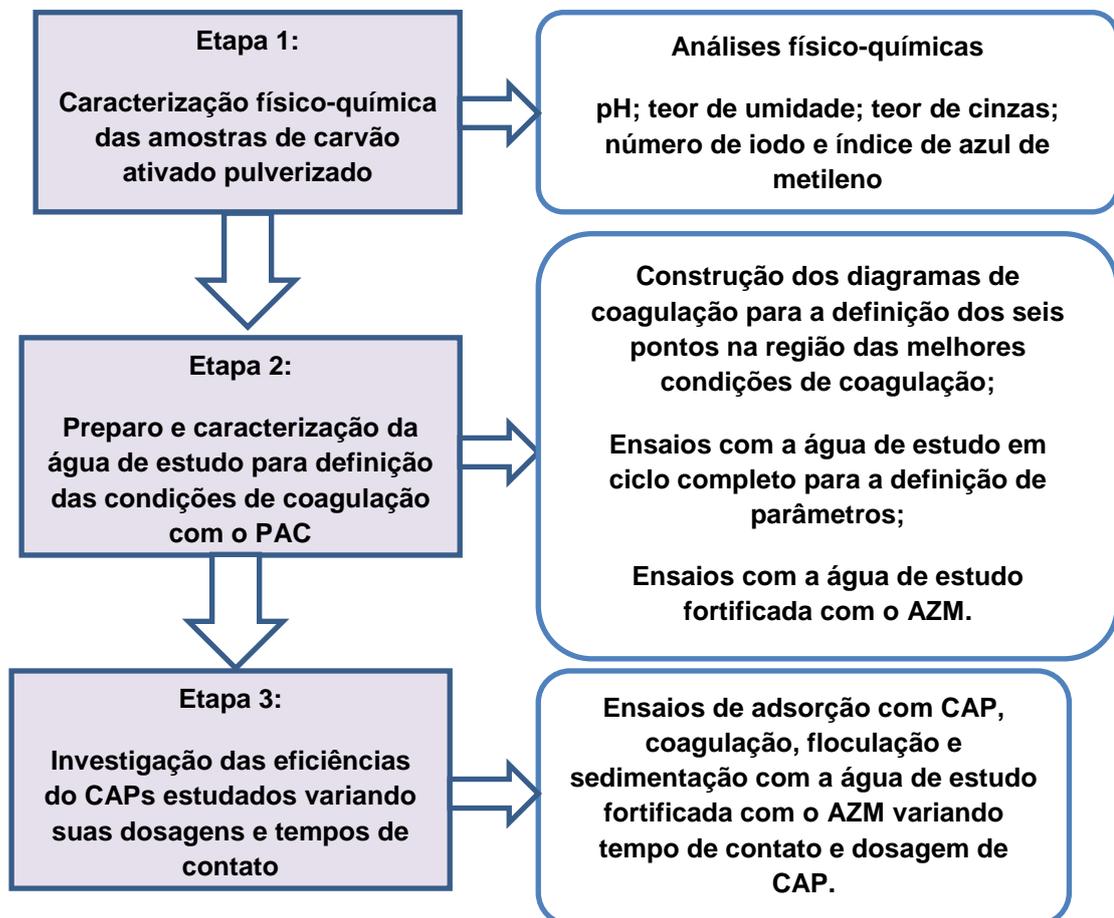
Guerra (2014) estudou a remoção do herbicida 2,4-D utilizando carvão ativado em pó no tratamento em ciclo completo em escala piloto. A pesquisadora contaminou a água de estudo proveniente do rio Santa Maria – ES com o herbicida 2,4-D a um valor igual a 100 µg/L. O CAP selecionado foi o a base de coco. No experimento em escala piloto foi investigada a capacidade de remoção do herbicida no tratamento convencional e no tratamento convencional associado à adsorção em CAP. No tratamento convencional obteve uma remoção de 36%. A dosagem de CAP foi variada no tratamento convencional associado à adsorção em carvão ativado com a adição de 42 mgL<sup>-1</sup> e 100 mgL<sup>-1</sup> com tempo de contato inferior a 30 min, no entanto a primeira dosagem alcançou uma porcentagem de remoção de 53%, que não atingiu o valor máximo permitido de acordo com a consolidação n°5 enquanto que a segunda adquiriu 71% estando de acordo com a legislação.

Rheinheimer (2016) investigou a remoção de paracetamol utilizando carvão ativado a partir da casca de côco da baía por processo batelada. No experimento variou diferentes valores de pH, diferentes massas de carvão de 0,5 a 1,5 g e diferenciados tempos de contato entre 5 min e 6 h. A concentração de paracetamol utilizada foi de 20 mgL<sup>-1</sup> e massa de carvão de 1 g. Determinou-se que para atingir o equilíbrio foi necessário um tempo de 180 min com remoção de 87,4% de paracetamol e não houve influência do pH nos testes de adsorção.

## 4 METODOLOGIA

Os experimentos foram divididos em três etapas: a primeira contemplou a caracterização físico-química das amostras de carvão ativado no laboratório de recursos hídricos da Universidade de Ribeirão Preto; na segunda etapa foi preparada e caracterizada a água de estudo e feitos os ensaios para a definição das condições de coagulação com o coagulante PAC; na terceira etapa foram feitos os ensaios para a investigação das eficiências dos carvões ativados pulverizados estudados no tratamento de água em ciclo completo, variando-se as dosagens e o tempo de contato. A descrição das três etapas é apresentada na Figura 7.

**Figura 7 - Fluxograma do desenvolvimento do presente trabalho**



Fonte: Autora, 2019.

#### 4.1 PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ÁGUA, MÉTODOS ANALÍTICOS, EQUIPAMENTOS E PRODUTOS QUÍMICOS

Os parâmetros de qualidade da água foram turbidez, cor aparente, cor verdadeira, metais (Al, Fe e Mn totais), turvação, alcalinidade total, pH, concentração de azul de metileno e temperatura. Os métodos de medição de cada parâmetro seguiram o Standard Methods (APHA, 2017). Os métodos de medição, unidades, equipamentos e limites de detecção e quantificação estão descritos no Quadro 5.

**Quadro 5** - Parâmetros físico-químicos, métodos de medição, unidades, equipamentos e limites de detecção e quantificação dos equipamentos utilizados no estudo

(continua)

| Parâmetro                 | Método                                                                 | Unidade           | Equipamento                                                    | Limite de detecção | Limite de quantificação |
|---------------------------|------------------------------------------------------------------------|-------------------|----------------------------------------------------------------|--------------------|-------------------------|
| Turbidez                  | Nefelométrico (Standard Methods 2130 B)                                | uT                | Turbidímetro, modelo 2100P, marca Hach                         | 0,1                | 0,1                     |
| Turvação (450 nm)         | Absortométrico (Método 8237 - DR 2000 Hach)                            | FTU               | Espectrofotômetro de leitura direta, modelo DR/2000 marca Hach | 1                  | 1                       |
| Cor aparente (455 nm)     | Espectrofotométrico (Standard Methods 2120C), espectrofotométrico - UV | uH                | Espectrofotômetro de leitura direta, modelo DR 3900 marca Hach | 1                  | 1                       |
| Cor verdadeira (455 nm)   |                                                                        | uH                |                                                                | 1                  | 1                       |
| Azul de Metileno (665 nm) |                                                                        | mgL <sup>-1</sup> |                                                                | 0,001              | 0,001                   |
| pH                        | Potenciométrico (Standard Methods 4500 B)                              | -                 | Potenciômetro, modelo 230A, marca Orion                        | 1                  | 0,01                    |

**Quadro 5 -** Parâmetros físico-químicos, métodos de medição, unidades, equipamentos e limites de detecção e quantificação dos equipamentos utilizados no estudo

(conclusão)

| Parâmetro          | Método                                             | Unidade                | Equipamento                                                                        | Limite de detecção | Limite de quantificação |
|--------------------|----------------------------------------------------|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-------------------------|
| Alumínio Total     | Espectrofotométrico - UV (Standard Methods 3111 B) | mg Al/L                | Espectrofotômetro de absorção atômica, modelo AA – Analyst 700, marca Perkin Elmer | 0,01               | 0,001                   |
| Ferro Total        | EAA-Chama (Standard Methods 3111 B)                | mg Fe/L                |                                                                                    | 0,01               | 0,001                   |
| Manganês Total     | EAA-Chama (Standard Methods 3111 B)                | mg Mn/L                |                                                                                    | 0,01               | 0,001                   |
| Alcalinidade Total | Titrimétrico (Standard Methods 2320 B)             | mgCaCO <sub>3</sub> /L | Bureta                                                                             | 1                  | 1                       |

Fonte: Autora, 2019.

O aparelho jarteste da marca Nova Ética conforme ilustra a Figura 8, é constituído por seis jarros com volume total de 2 L e possui seis pás que, permitem obtenção de gradiente de velocidade variável de 0 a 100 rpm. O equipamento é utilizado para a realização de ensaios de coagulação, floculação e sedimentação.

**Figura 8 -** Equipamento jarteste utilizado na pesquisa



Fonte: Autora, 2019.

A simulação da filtração em areia utilizou os filtros de laboratório de areia (FLAs) compostos por seis filtros de acrílico preenchidos com 15 cm de areia e suporte para acoplamento no jarteste conforme ilustra Figura 9, foi usado no trabalho, com areia tipo I com grãos entre 0,30 e 0,59 mm. A concentração dos produtos químicos e preparo das soluções utilizadas durante os estudos estão descritas na Tabela 3.

**Figura 9** - Filtros de laboratório de areia (FLAs) utilizados na pesquisa



Fonte: Autora, 2019.

**Tabela 3** - Características dos produtos químicos utilizados na pesquisa

| Produto químico               | Características e Marca                                                    | Preparo das amostras                                                              |
|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Tiosulfato de sódio PA        | Reagente analítico 99,5% marca Vetec Química Fina                          | Utilizado em grãos para desclorar a água do poço                                  |
| Policloreto de Alumínio (PAC) | Produto comercial líquido 9 a 11% $Al_2O_3$ marca Aratrop                  | Solução preparada com 20,000 gramas do produto comercial em 1 L de água destilada |
| Hidróxido de Sódio (NaOH)     | Produto comercial líquido 97% NaOH marca Cinética                          | Solução preparada com 4,000 gramas do produto comercial em 1 L de água destilada  |
| Azul de metileno (AZM)        | Produto comercial em pó marca Zilquímica, pó verde escuro, solúvel em água | Solução preparada com 1,200 gramas do contaminante em 1 L de água destilada       |
| Caulinita                     | Produto comercial marca Prominérios                                        | Mistura preparada com 2,0 kg de caulim em 80 L de água do poço desclorada         |

Fonte: Autora, 2019.

O AZM é uma molécula de fácil acesso por ser muito utilizada em testes de adsorção para avaliar a capacidade adsorptiva de um CA; nesta pesquisa este composto foi usado no preparo da água de estudo como indicador de moléculas orgânicas contaminantes com mesmo tamanho molecular e que estão presentes nas águas de mananciais (microcistinas, saxitoxinas e alguns fármacos).

Para análise da concentração do azul de metileno foi usado o método espectrofotométrico com leitura no comprimento de onda 665 nm, no equipamento espectrofotômetro DR 3900 da marca Hach, de acordo com os trabalhos de Cottet (2010) e Alfredo (2015). Para a determinação da concentração de azul de metileno e obtenção da curva padrão de calibração, utilizou-se uma solução estoque de azul de metileno de concentração inicial de  $1200 \text{ mgL}^{-1}$  e diluiu-a em solução tampão fosfato (pH = 7,00) para fazer a solução padrão de  $24 \text{ mgL}^{-1}$ . A partir disto, foram feitas várias diluições dispondo de volumes como: 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5 e 5,5 mL em volume final de 50 mL, usando como solvente a solução tampão fosfato e foi medida a absorbância das amostras.

#### 4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS CARVÕES ATIVADOS PULVERIZADOS

Os carvões 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, umectado), respectivamente. Os laudos técnicos dos carvões fornecidos pelos fabricantes encontram-se no Anexo A.

A caracterização das amostras de carvão foi realizada através da determinação dos vários parâmetros físico-químicos como pH, umidade, teor de cinzas, número de iodo e índice de azul de metileno. Todas as análises foram realizadas em triplicata para ambos os carvões. Os resultados foram comparados com os valores informados pelos fabricantes.

A Tabela 4 mostra os parâmetros e metodologias utilizados para a caracterização dos carvões ativados.

**Tabela 4** - Parâmetros físico-químicos e métodos utilizados para a caracterização dos carvões ativados

| Parâmetro                  | Método                       |
|----------------------------|------------------------------|
| Número de iodo             | MB-3410 – ABNT               |
| Índice de azul de metileno | JIS K 1474/1991              |
| pH                         | ASTM D-3838                  |
| Teor de cinzas             | NBR 16.586                   |
| Teor de umidade            | NBR 12.077 MB-3414<br>– ABNT |

**Fonte:** Autora, 2019.

#### 4.2.1 Determinação do Índice de Azul de Metileno

Para o desempenho de adsorção do azul de metileno na obtenção do IAM foi empregada a metodologia da norma JIS K 1474/1991.

Após a obtenção da curva de calibração para o azul de metileno, foram pesadas dez massas de carvão ativado entre 0,1000 e 0,3000 g em frascos com tampa e para cada frasco foram adicionados 25 mL da solução de trabalho de azul de metileno ( $1200 \text{ mgL}^{-1}$ ). As misturas foram agitadas em Shaker por 30 min a 100 rpm. Após a agitação, as mesmas foram filtradas em filtro de papel de 20 cm. Os filtrados foram transferidos para cubetas de vidro de 10 mL com 25 mm de caminho óptico e lidas as absorvâncias no comprimento de onda de 665 nm. Obtida a curva de calibração foram determinadas as concentrações finais de AZM em cada frasco.

Para a determinação da quantidade de azul de metileno adsorvido em  $\text{mgg}^{-1}$  de carvão foi utilizada a Equação 3:

$$Q_e = \frac{(1200 - C_e) \times \left(\frac{25}{1000}\right)}{S} \quad (3)$$

Onde:

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

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

$S$  = massa de carvão (g);

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

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

Para a determinação do Índice de azul de metileno na concentração remanescente de  $0,24 \text{ mgL}^{-1}$  foi utilizada a Equação 4:

$$\text{IAM} = \frac{Q_e}{C_0} \quad (4)$$

Onde:

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

$Q_e$  = capacidade adsortiva do azul de metileno para  $0,24 \text{ mgL}^{-1}$  ( $\text{mgg}^{-1}$ );

$C_0$  = concentração inicial de azul de metileno ( $1,2 \text{ gL}^{-1}$ ).

Após determinado a quantidade de azul de metileno adsorvido, foi construída a isoterma através de um gráfico, no qual foi representado pela quantidade de azul de metileno adsorvido ( $\text{mgg}^{-1}$ ) em relação a concentração de azul de metileno final ( $\text{mgL}^{-1}$ ).

#### 4.2.2 Isoterma de adsorção de Freundlich

A isoterma de adsorção conforme modelo de Freundlich, foi aplicada neste estudo com o intuito de investigar a relação adsorvente/adsorvato e estimar a capacidade máxima adsortiva que o carvão pode ter em relação ao contaminante em estudo, o AZM. O modelo matemático de Freundlich na forma linearizada que foi utilizado é representado conforme Equação 5.

$$\log Q_e = \frac{1}{n} \cdot C_e + \log K_f \quad (5)$$

Em que:

$Q_e$ : é a relação entre a quantidade de adsorvato e quantidade de adsorvente, expressa em  $\text{mgg}^{-1}$ ;

$C_e$ : é a concentração de adsorvato na condição de equilíbrio, expressa em  $\text{mgL}^{-1}$ ;

$K_f$  e  $n$ : são constantes experimentais determinados para um dado sistema adsorvato-adsorvente.

Conforme os valores de  $C_e$  e  $Q_e$  obtidos pelo IAM, pôde-se obter os valores de  $\text{Log } Q_e$  e  $\text{Log } C_e$  para cada amostra. Desta forma, após plotado o gráfico no qual se estabelecia no eixo das abcissas  $\text{Log } C_e$  e no eixo das ordenadas  $\text{Log } Q_e$ , era obtida a equação da reta que, representava a forma linearizada da isoterma, conforme Equação 6:

$$Y = ax + b \quad (6)$$

Então:

$$Y = \text{Log } Q_e;$$

$$x = \text{Log } C_e;$$

$$a = 1/n;$$

$$b = \text{Log } K_f.$$

#### 4.3 PREPARO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA DE ESTUDO

A água de estudo foi preparada a partir de uma suspensão de caulinita com 80 L de água do poço da UNAERP, que foi desclorada (isenta de cloro) com cinco grãos de tiosulfato de sódio e acrescido 2,0 kg de caulin, conforme o trabalho de Dantas e Di Bernardo (2006), sendo homogeneizada e agitada com agitador mecânico apresentado na Figura 10. A água do poço desclorada foi caracterizada medindo-se os parâmetros pH, cor verdadeira, turbidez, alcalinidade, metais (Fe, Al e Mn) e temperatura.

Ao final da mistura, a suspensão sedimentou por 48 h e posteriormente foi feita a coleta do sobrenadante (coleta com recipiente na superfície). Em uma caixa de polietileno de volume igual a 1000 L conforme Figura 11, foi preenchida com água do poço também desclorada utilizando cinco grãos de tiosulfato de sódio. O sobrenadante da suspensão de caulinita foi transferido para a caixa de água para conferir turbidez, até o valor de 100,0 uT referente ao trabalho de Bomfim (2015). Para a confirmação do resultado esperado, aguardou-se o tempo de 1 h e mediu-se a turbidez.

**Figura 10** - Preparação da suspensão de caulinita, fase de agitação



Fonte: Autora, 2019.

**Figura 11** - Recipiente e armazenamento da água de estudo obtida a partir da mistura da suspensão de caulinita com a água do poço



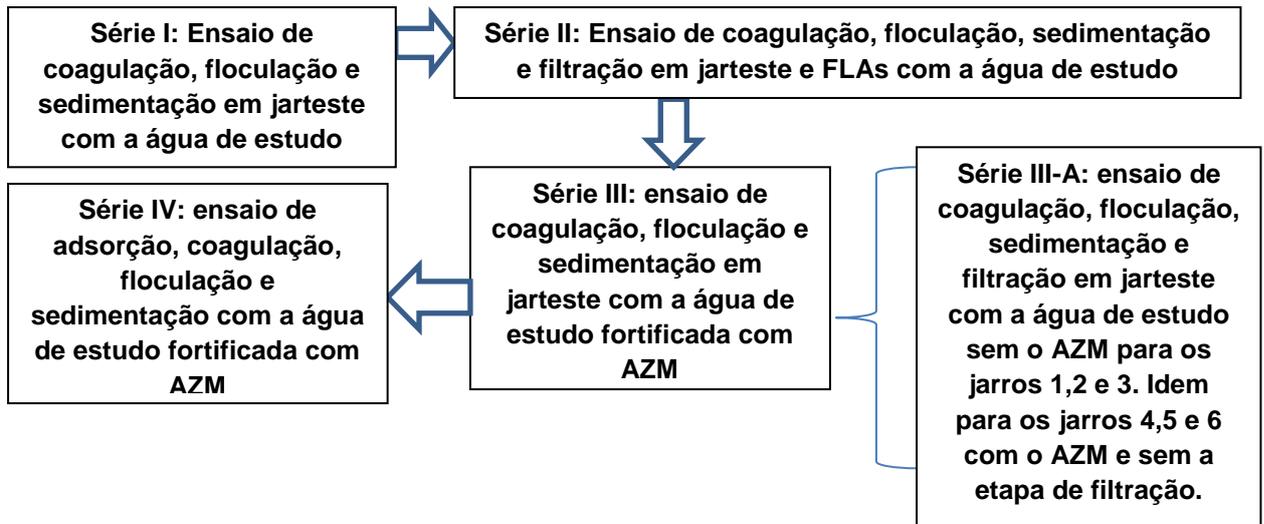
Fonte: Autora, 2019.

Para cada carvão, foram preparados 1000 L de água de estudo e feita a sua caracterização físico-química conforme parâmetros como os da água do poço. Em conformidade com a caracterização da água de estudo, foi feito um monitoramento da turbidez e da temperatura de  $25,0^{\circ}\text{C} \pm 1$  diariamente.

#### 4.4 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 na água de estudo, a qual foi fortificada com azul de metileno, cujo objetivo foi investigar a eficiência do carvão ativado na adsorção do azul de metileno. A Figura 12 mostra o fluxograma dos ensaios de tratabilidade com a água de estudo.

**Figura 12** - Fluxograma dos ensaios de tratabilidade com a água de estudo

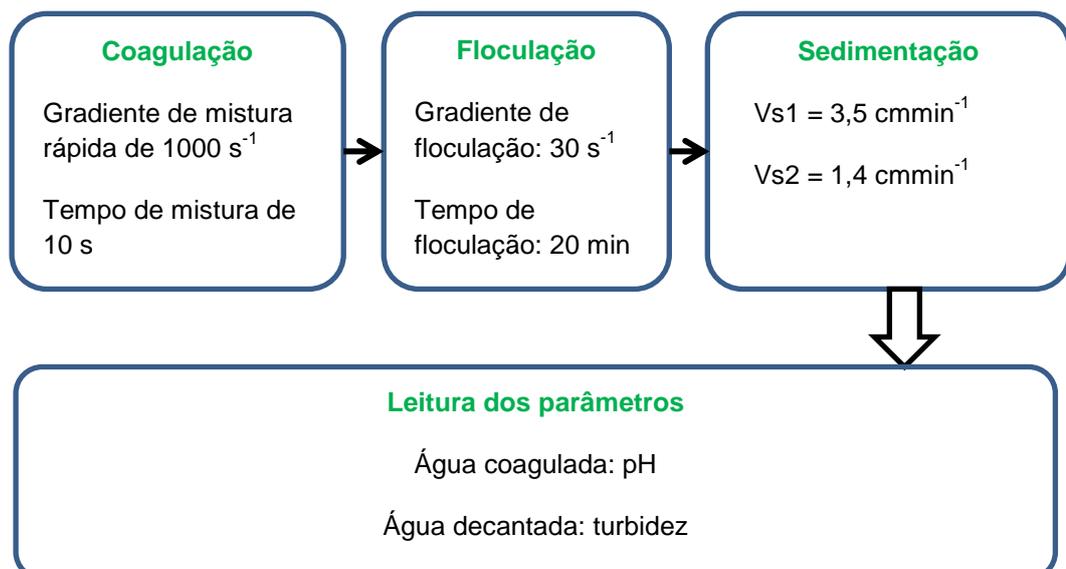


Fonte: Autora, 2019.

#### 4.4.1 Ensaio da Série I

Foram feitos 59 pontos para a obtenção do diagrama de coagulação. Nos ensaios da Série I foi avaliada a remoção de turbidez por coagulação, floculação e sedimentação de acordo com o trabalho de Bomfim (2015). O fluxograma da Série I é representado na Figura 13.

**Figura 13** - Definição das condições de coagulação para a Série I



Fonte: Autora, 2019.

Os parâmetros de execução dos ensaios são apresentados a seguir:

- Alcalinizante: hidróxido de sódio (NaOH) (dosagens entre 2 a 10 mgL<sup>-1</sup>);
- Coagulante: policloreto de alumínio (PAC) (dosagens entre 20 a 70 mgL<sup>-1</sup>);
- Tempo de mistura rápida (T<sub>mr</sub>): 10 s;
- Gradiente de mistura rápida (G<sub>mr</sub>): 1000 s<sup>-1</sup>;
- Tempo de floculação (T<sub>f</sub>): 20 min;
- Gradiente de floculação (G<sub>f</sub>): 30 s<sup>-1</sup>;
- Velocidade de sedimentação 1 (V<sub>s1</sub>): 3,5 cmmin<sup>-1</sup>;
- Velocidade de sedimentação 2 (V<sub>s2</sub>): 1,4 cmmin<sup>-1</sup>.

Parâmetros medidos foram:

- Água coagulada: pH;
- Água decantada: turbidez.

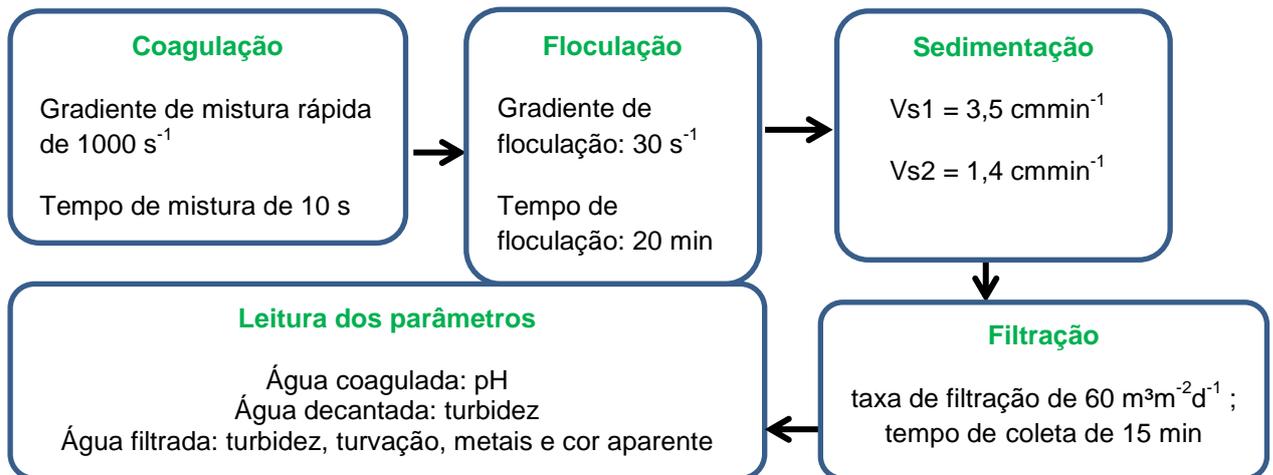
Para cada velocidade de sedimentação foram construídos os diagramas de coagulação tendo-se a dosagem do coagulante nas ordenadas, o pH de coagulação no eixo das abcissas e os valores de turbidez remanescentes da água decantada na forma de gráfico de bolhas. Depois de construído o diagrama de coagulação, foram selecionados seis pontos e tais pontos foram reproduzidos nas mesmas condições de coagulação, floculação e sedimentação para a confirmação dos resultados.

Um dos critérios para a seleção das melhores condições de coagulação foi a obtenção de turbidez da água decantada inferior a 5,0 uT e/ou a aplicação das menores dosagens de produtos químicos (PAC e NaOH).

#### 4.4.2 Ensaio da Série II

Para a realização do ensaio 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, acrescida a etapa de filtração em FLA. O fluxograma da Série II é representado na Figura 14.

**Figura 14 - Definição das condições de coagulação para a Série II**



Fonte: Autora, 2019.

Os parâmetros de execução dos ensaios são apresentados a seguir:

- Alcalinizante: hidróxido de sódio (NaOH) (dosagens entre 5,4 a 7,0 mgL<sup>-1</sup>);
- Coagulante: policloreto de alumínio (PAC) (dosagens entre 40 a 70 mgL<sup>-1</sup>);
- Tempo de mistura rápida (T<sub>mr</sub>): 10 s;
- Gradiente de mistura rápida (G<sub>mr</sub>): 1000 s<sup>-1</sup>;
- Tempo de floculação (T<sub>f</sub>): 20 min;
- Gradiente de floculação (G<sub>f</sub>): 30 s<sup>-1</sup>;
- Velocidade de sedimentação 1 (V<sub>s1</sub>): 3,5 cmmin<sup>-1</sup>;
- Velocidade de sedimentação 2 (V<sub>s2</sub>): 1,4 cmmin<sup>-1</sup>;
- Filtração em FLA: taxa de filtração de 60 m<sup>3</sup>m<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup> ; tempo de coleta de 15 min e areia tipo I (tamanho dos grãos entre 0,30 e 0,59 mm).

Os parâmetros medidos foram:

- Água coagulada: pH;
- Água decantada: turbidez;
- Água filtrada: turbidez, turvação, metais (ferro total, alumínio total e manganês total) e cor aparente.

Turbidez ou turvação apresenta unidades como NTU (Unidade de Turbidez Nefelométrica)/FTU (Unidade Turbidimétrica de Formazina), ambas são

compatíveis, pois utilizam como padrão primário para calibração a formazina, sendo que a unidade em FTU é pouco utilizada (USEPA, 1978; SABESP, 1999).

De acordo com o Método 180-1 (USEPA, 1993) diferentes equipamentos utilizados para a leitura de turbidez podem diferir significativamente na medida das amostras. Como as leituras das amostras de turbidez foram lidas em equipamentos diferentes, no qual se utilizou o turbidímetro com o princípio nefelométrico e o espectrofotômetro com o método absorvitivo no comprimento de onda de 450 nm, os valores diferiram significativamente.

Existem dois métodos utilizados na determinação da turbidez, sendo a turbidimetria e a nefelometria, no qual a turbidimetria é baseada na técnica analítica de espectrofotometria, 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. O turbidímetro nefelométrico ou nefelômetro apresenta fonte de luz que, ilumina a amostra, e um ou mais detectores fotoelétricos com um dispositivo de leitura para indicar a intensidade da luz espalhada em ângulos de 90° pelo feixe de luz incidente (USEPA, 1978; MARTINS, 2012).

#### 4.4.3 Ensaio da Série III

Para a realização do ensaio de coagulação, floculação e sedimentação, o ensaio da Série III foi realizado com a água bruta fortificada com azul de metileno. A fortificação da água ocorreu a partir da Equação 10.

$$C_1 \times V_1 = C_2 \times V_2 \quad (10)$$

Onde:

$C_1$  = concentração inicial de azul de metileno ( $1200 \text{ mgL}^{-1}$ );

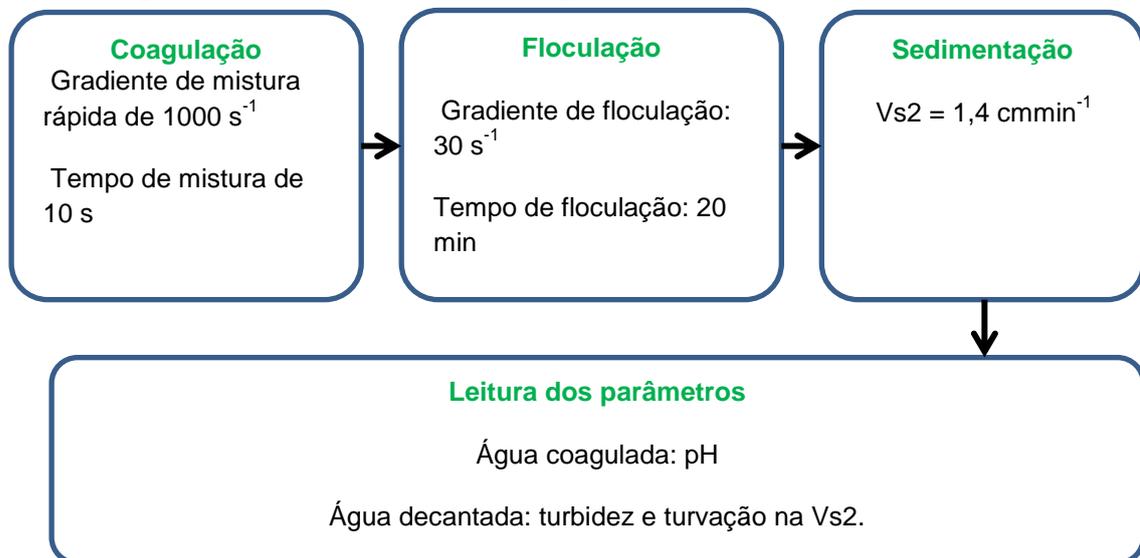
$V_1$  = volume inicial de fortificação (L);

$C_2$  = concentração proposta para a fortificação ( $\text{mgL}^{-1}$ );

$V_2$  = volume final do recipiente (L).

A concentração de contaminação foi definida com base na capacidade máxima de adsorção do composto orgânico pelo melhor carvão, pois o intuito era investigar o potencial de adsorção e o efeito que resultaria para o carvão que não teve boa afinidade na adsorção do contaminante. Também foi investigado o desempenho de adsorção, considerando faixas de dosagens que são comumente empregadas nas ETAs, viáveis do ponto de vista econômico. Foi feita a caracterização da água de estudo e para a realização do ensaio os parâmetros de execução foram os mesmos listados da Série II. O fluxograma da Série III é representado na Figura 15.

**Figura 15** - Definição das condições de coagulação para a Série III



**Fonte:** Autora, 2019.

Os parâmetros de execução dos ensaios são apresentados a seguir:

- Alcalinizante: hidróxido de sódio (NaOH) (Dosagens entre  $5,4$  a  $7,0 \text{ mgL}^{-1}$ );
- Coagulante: policloreto de alumínio (PAC) (Dosagens entre  $40$  a  $70 \text{ mgL}^{-1}$ );
- Tempo de mistura rápida ( $T_{mr}$ ): 10 s;
- Gradiente de mistura rápida ( $G_{mr}$ ):  $1000 \text{ s}^{-1}$ ;
- Tempo de floculação ( $T_f$ ): 20 min;
- Gradiente de floculação ( $G_f$ ):  $30 \text{ s}^{-1}$ ;
- Velocidade de sedimentação 2 ( $Vs2$ ):  $1,4 \text{ cmmin}^{-1}$ .

Parâmetros medidos:

- Água coagulada: pH;
- Água decantada: turbidez e turvação para Vs2.

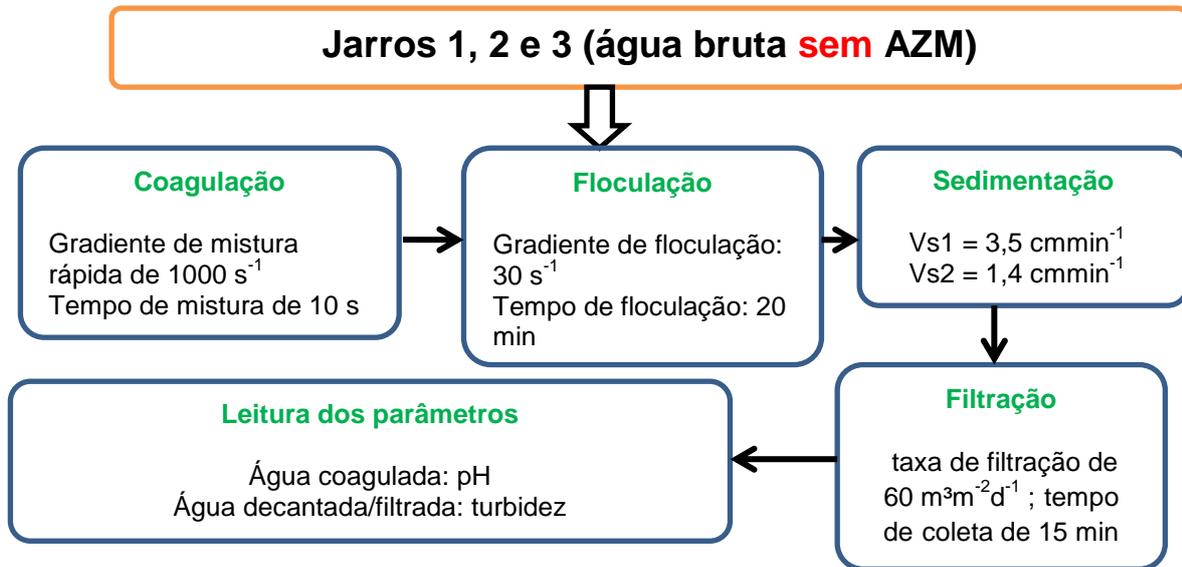
Quando fortificada a água de estudo com solução de AZM, valores de turbidez aumentaram significativamente em razão da sua intensa coloração que tem a propriedade de absorver luz (CORREIA et al., 2008). De acordo com o Método 180-1 (USEPA, 1993), ISO 7027 (2016) e Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 2130B (APHA, 1992), existe interferência da cor (substâncias dissolvidas) 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.

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  $1,4 \text{ cmmin}^{-1}$  (Vs2).

#### 4.4.3.1 Ensaio da Série III-A

Após a seleção de um ponto, um novo ensaio foi repetido em triplicata com as dosagens de coagulante e alcalinizante determinadas no ensaio da Série III, para a confirmação das condições de coagulação definidas. O ensaio de coagulação, floculação, sedimentação e filtração foi executado para os jarros 1, 2 e 3 sem o AZM. O fluxograma da Série III-A para os jarros 1, 2 e 3 é representado na Figura 16.

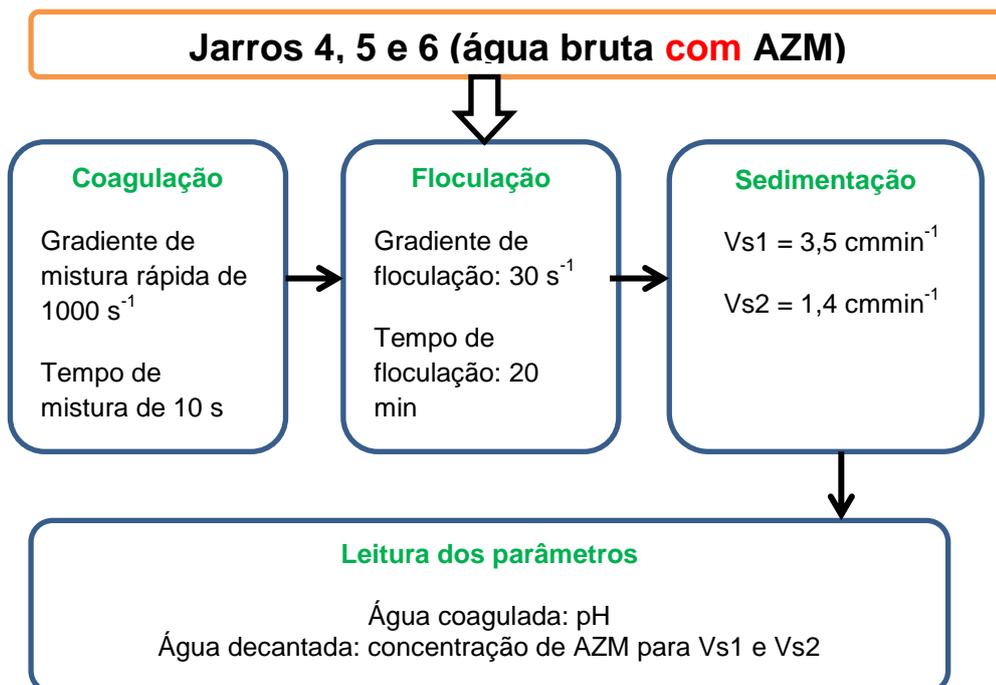
**Figura 16** - Definição das condições de coagulação da Série III-A para os jarros 1, 2 e 3 sem o AZM



Fonte: Autora, 2019.

Foi realizada a caracterização da água bruta fortificada com  $4,0 \text{ mgL}^{-1}$  de AZM. Para os jarros 4,5 e 6 o ensaio de coagulação, floculação e sedimentação foi executado com a água de estudo com o AZM conforme Figura 17.

**Figura 17** - Definição das condições de coagulação da Série III-A para os jarros 4,5 e 6 com o AZM



Fonte: Autora, 2019.

Os parâmetros de execução para os jarros 1, 2 e 3 foram:

- Alcalinizante: hidróxido de sódio (NaOH) (Dosagem definida na Série III);
- Coagulante: policloreto de alumínio (PAC) (Dosagem definida na Série III);
- Tempo de mistura rápida (Tmr): 10 s;
- Gradiente de mistura rápida (Gmr):  $1000 \text{ s}^{-1}$ ;
- Tempo de floculação (Tf): 20 min;
- Gradiente de floculação (Gf):  $30 \text{ s}^{-1}$ ;
- Velocidade de sedimentação 1 (Vs1):  $3,5 \text{ cmmin}^{-1}$ ;
- Velocidade de sedimentação 2 (Vs2):  $1,4 \text{ cmmin}^{-1}$ .
- Filtração em FLA: taxa de filtração de  $60 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ ; tempo de coleta de 15 min e areia tipo I (tamanho dos grãos entre 0,30 e 0,59 mm).

Os parâmetros medidos foram:

- Água coagulada: pH;
- Água decantada: turbidez;
- Água filtrada: turbidez.

Foi feita a caracterização da água de estudo (água bruta com AZM) e para os jarros 4,5 e 6 o ensaio em triplicata de coagulação, floculação e sedimentação com AZM, os parâmetros de execução foram:

- Alcalinizante: hidróxido de sódio (NaOH) (Dosagem definida na Série III);
- Coagulante: policloreto de alumínio (PAC) (Dosagem definida na Série III);
- Tempo de mistura rápida (Tmr): 10 s;
- Gradiente de mistura rápida (Gmr):  $1000 \text{ s}^{-1}$ ;
- Tempo de floculação (Tf): 20 min;
- Gradiente de floculação (Gf):  $30 \text{ s}^{-1}$ ;
- Velocidade de sedimentação 1 (Vs1):  $3,5 \text{ cmmin}^{-1}$ ;
- Velocidade de sedimentação 2 (Vs2):  $1,4 \text{ cmmin}^{-1}$ .

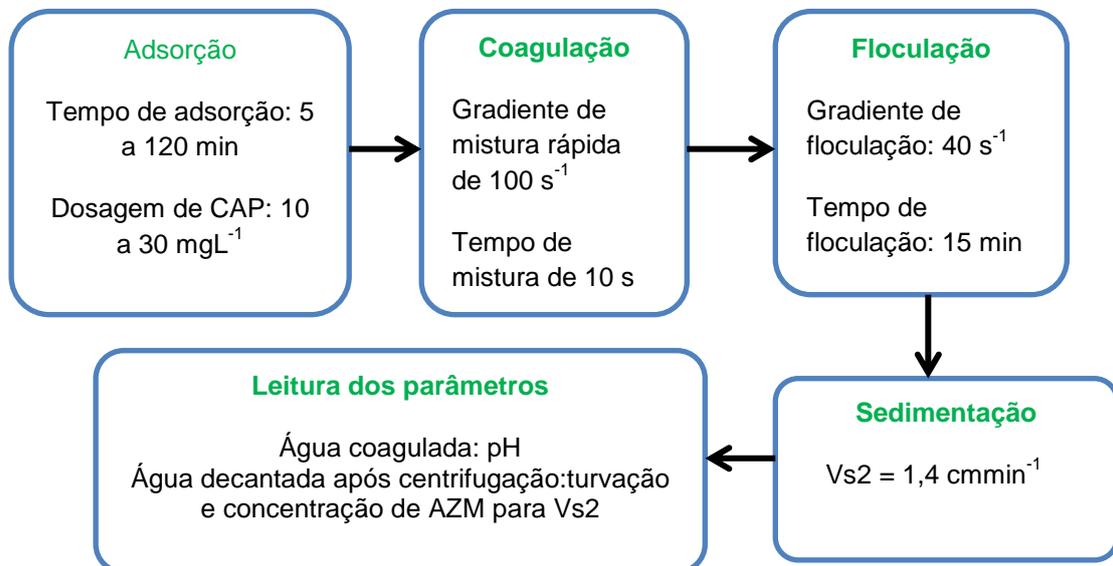
Os parâmetros medidos para os jarros 4, 5 e 6 foram:

- Água coagulada: pH;
- Água decantada: concentração de AZM para Vs1 e Vs2.

#### 4.5 Ensaio da Série IV

Foram efetuados os ensaios de adsorção, coagulação, floculação e sedimentação em jarreste conforme o fluxograma representado na Figura 18.

**Figura 18** - Definição das condições de coagulação para a Série IV



Fonte: Autora, 2019.

Os parâmetros de execução foram:

- Alcalinizante: hidróxido de sódio (NaOH): dosagem definida na Série III;
- Coagulante: policloreto de alumínio (PAC): dosagem definida na Série III;
- Dosagem de fortificação da Série III: valor definido com base na capacidade máxima adsortiva do composto orgânico contaminante pelo melhor carvão ativado;
- Carvão ativado pulverizado (CAP): dosagens de 10 a 30 mgL<sup>-1</sup>;
- Tempo de adsorção (T<sub>ad</sub>): 5 a 120 min;
- Tempo de mistura rápida (T<sub>mr</sub>): 10 s;

- Gradiente de mistura rápida ( $G_{mr}$ ):  $100 \text{ s}^{-1}$ ;
- Velocidade de sedimentação 2 ( $V_{s2}$ ):  $1,4 \text{ cmmin}^{-1}$ ;
- Gradiente de floculação ( $G_f$ ):  $40 \text{ s}^{-1}$ ;
- Tempo de floculação ( $T_f$ ): 15 min.

Após a etapa de sedimentação, as amostras foram conduzidas para a centrifugação, com o objetivo de fazer a leitura apenas do sobrenadante.

Parâmetros medidos:

- Água coagulada: pH;
- Água decantada após centrifugação: turvação e concentração de AZM na  $V_{s2}$ .

Para o entendimento da influência do tempo de contato e da dosagem do carvão na eficiência de remoção do azul de metileno, 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 azul de metileno da água decantada.

A Tabela 5 apresenta os níveis fatoriais mínimo (-1) e máximo (+1) e ponto central (0) considerando a variação da dosagem de carvão ativado de 10 a  $30 \text{ mgL}^{-1}$  e tempo de contato de 5 a 120 min.

**Tabela 5** - Níveis fatoriais de variação de dosagem e tempo de contato para ambos os carvões ativados

| Fator            | Unidade           | Símbolo | -1 | 0    | +1  |
|------------------|-------------------|---------|----|------|-----|
| Dosagem          | $\text{mgL}^{-1}$ | $X_1$   | 10 | 20   | 30  |
| Tempo de contato | min               | $X_2$   | 5  | 62,5 | 120 |

Fonte: Autora, 2019.

As dosagens de carvão ativado e tempos de contato foram determinados no experimento por serem viáveis e comuns nas aplicações em ETAs em escala real. O tempo de 5 min simula a aplicação do carvão 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.

A matriz dosagem e tempo de contato para ambos os carvões ativados foi definida pelo método estatístico adotado, para a execução dos ensaios de adsorção, coagulação, floculação e sedimentação em jarreste.

Os pontos críticos da superfície de resposta foram calculados e considerando as variáveis dosagem e tempo de contato foi apresentado o valor de p-valor para cada uma. Os valores de p-valor representaram o nível significativo de confiança que os resultados do experimento alcançaram. Para melhor entendimento, o valor de p-valor que apresentou abaixo de 0,05, mostrou-se que a variável resposta foi estatisticamente significativa ao nível de confiança de 95%, ou seja, os dados obtidos mostraram influência das variáveis em estudo para a variável resposta, mas para um valor acima de 0,05, os dados obtidos não foram significativos e o modelo estatístico não foi válido e não puderam gerar a superfície de resposta.

Os resultados foram avaliados pela análise de variância (ANOVA) e gráficos de superfície de resposta, com grau de influência dos fatores analisados gerados pelo software.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da quantificação do azul de metileno, caracterização físico-química dos carvões ativados pulverizados, caracterização da água de estudo, os ensaios de tratabilidade com a água de estudo e a influência da eficiência dos carvões ativados na remoção de azul de metileno são apresentados nos itens 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4.

### 5.1 Método analítico para a quantificação do Azul de Metileno

Para determinar as concentrações remanescentes de azul de metileno nas soluções após os testes de adsorção, empregou-se a equação da reta que foi obtida através da curva de calibração do azul de metileno e composta com base nos dados apresentados na Tabela 6.

A Tabela 6 mostra os resultados de concentração de Azul de metileno ( $\text{mgL}^{-1}$ ) e absorvância (665 nm) obtidos a partir de diluições feitas com a solução padrão de AZM ( $24 \text{ mgL}^{-1}$ ).

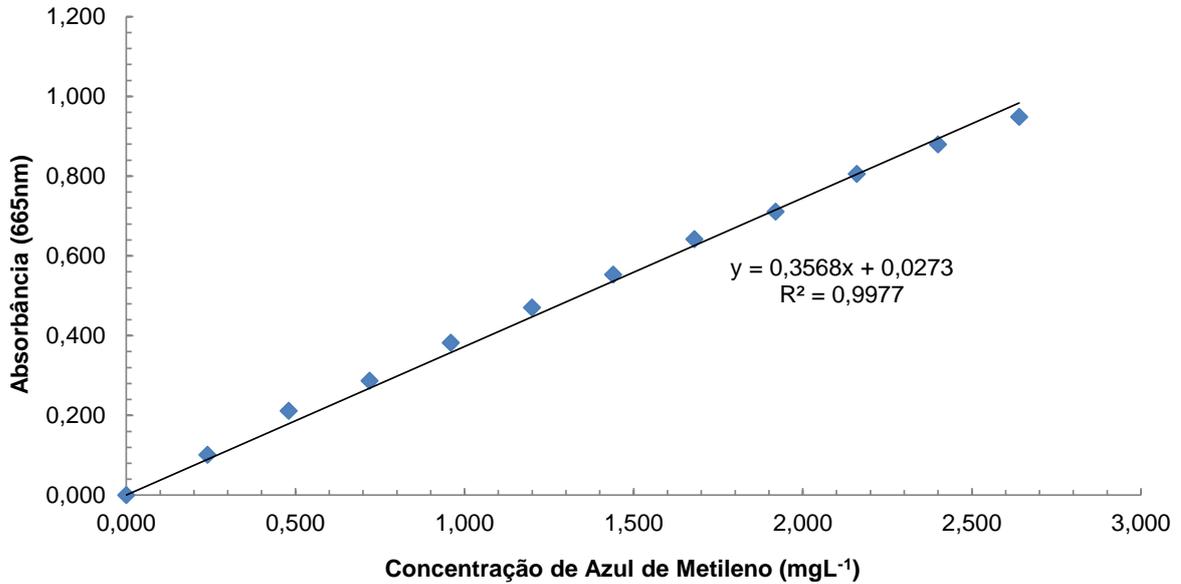
**Tabela 6** - Resultados da concentração final de AZM e da absorvância (665nm) a partir de diluições feitas com solução padrão de AZM

| Concentração de AZM ( $\text{mgL}^{-1}$ ) | Abs (665 nm) |
|-------------------------------------------|--------------|
| 0,000                                     | 0,000        |
| 0,240                                     | 0,101        |
| 0,480                                     | 0,211        |
| 0,720                                     | 0,287        |
| 0,960                                     | 0,382        |
| 1,200                                     | 0,470        |
| 1,440                                     | 0,553        |
| 1,680                                     | 0,642        |
| 1,920                                     | 0,711        |
| 2,160                                     | 0,805        |
| 2,400                                     | 0,879        |
| 2,640                                     | 0,948        |

Fonte: Autora, 2019.

A Figura 19 mostra a curva de calibração utilizada para a determinação do Índice de azul de metileno.

**Figura 19** - Curva de calibração para o AZM obtida pela concentração de azul de metileno em função da absorbância no comprimento de onda 665 nm



Fonte: Autora, 2019.

De acordo com a Figura 19, a curva de calibração apresentou boa linearidade, obtendo-se  $R^2 = 0,9977$ . Desta forma pode-se utilizar a equação da reta,  $y = 0,3568X + 0,0273$ , para quantificar as concentrações de azul de metileno com leituras de absorbância no comprimento de onda 655 nm.

## 5.2 CARACTERIZAÇÃO DOS CARVÕES ATIVADOS PULVERIZADOS

Os resultados das análises de pH, teor de umidade, teor de cinzas, número de iodo e índice de azul de metileno dos carvões ativados pulverizados são apresentados nas Tabelas 7, 8, 9, 10 e 11 respectivamente.

**Tabela 7** - Resultados obtidos da análise de pH para os carvões ativados estudados

| Amostra       | pH       |          |
|---------------|----------|----------|
|               | Carvão A | Carvão B |
| Amostra 1     | 7,09     | 9,33     |
| Amostra 2     | 6,82     | 9,15     |
| Amostra 3     | 6,43     | 9,26     |
| Média         | 6,78     | 9,25     |
| Desvio Padrão | 0,27     | 0,07     |

Fonte: Autora, 2019

Observa-se que, o carvão A mostrou ser de natureza ácida, enquanto que o carvão B obteve caráter básico. O experimento realizado seguiu a mesma tendência dos trabalhos de Alves et al (2015) e Valença et al (2017). Os autores estudaram a influência do pH na remoção de azul de metileno e íons fluoreto, respectivamente, em solução aquosa utilizando carvão ativado obtido a partir do endocarpo da Amêndoa-da-Praia e casca da castanha-do-Brasil. Os pesquisadores concluíram que, conforme aumentava o pH do meio, a eficiência de adsorção diminuía, considerando que os valores de pH dos adsorventes eram de caráter alcalino. Já no trabalho de Silva et al (2012), o pH da solução mostrou-se ser independente na adsorção dos antibióticos estudados. Segundo Toledo et al (2005), o sucesso da adsorção está nas cargas opostas entre adsorvente e adsorvato, pois uma vez que essas cargas forem iguais a capacidade adsortiva é prejudicada, ocorrendo a repulsão eletrostática.

**Tabela 8** - Resultados obtidos dos ensaios de teor de umidade para os carvões ativados estudados

| Teor de umidade (%) |          |          |
|---------------------|----------|----------|
| Amostra             | Carvão A | Carvão B |
| Amostra 1           | 3,50     | 31,08    |
| Amostra 2           | 2,60     | 29,42    |
| Amostra 3           | 3,11     | 29,64    |
| Média               | 3,07     | 30,04    |
| Desvio Padrão       | 0,45     | 0,90     |

**Fonte:** Autora, 2019.

Observa-se que o carvão A apresentou teor de umidade dentro do limite estabelecido pela norma NBR 12.077, com valor de 3,07%, diferente da especificação do fabricante que obteve 8%, enquanto que o carvão B apresentou valor superior a 30%, similar ao valor especificado pelo fabricante de 30 a 40%. A matéria-prima, condições de armazenamento, clima e o método de ativação (ZAGO, 2010) são fatores que contribuem para a ineficiência do processo de adsorção. Segundo Almeida et al (2014) a madeira de pinus apresenta elevada umidade, com teor de 86,5% em base seca. A presença de água na madeira impacta negativamente no processo de carbonização, uma vez que há redução do seu poder calorífico em razão da energia necessária para evaporá-la, reduzindo a taxa de aquecimento e também sua resistência (INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTUDOS FLORESTAIS, 1979). É recomendado que a matéria prima no processo de

carbonização apresente umidade abaixo de 30% em base seca (BARCELLOS, 2002). O carvão ativado pulverizado umectado ou umedecido não exige instalação contra incêndios, uma vez que executa o papel de agente extintor, capaz de prevenir incêndios ou explosões, reduzindo também o custo com a instalação nas ETAs (MELLO, 2011).

**Tabela 9** - Resultados obtidos dos ensaios de teor de cinzas para os carvões ativados estudados

| Teor de cinzas (%) |          |          |
|--------------------|----------|----------|
| Amostra            | Carvão A | Carvão B |
| Amostra 1          | 6,81     | 5,68     |
| Amostra 2          | 6,87     | 5,66     |
| Amostra 3          | 7,00     | 5,69     |
| Média              | 6,89     | 5,67     |
| Desvio Padrão      | 0,07     | 0,01     |

**Fonte:** Autora, 2019.

Conforme os resultados obtidos pela Tabela 8, percebe-se que o teor de cinzas dos carvões apresentou-se baixo, com quantidade mínima de matéria inorgânica. Em relação ao laudo técnico do fabricante do CAP B, obteve um teor de cinzas máximo de 12%. 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, a porcentagem de cinzas pode ser superior a 15% (BERNARDO et al., 1997).

**Tabela 10** - Resultados obtidos do número de iodo para os carvões ativados estudados

| Número de iodo (mgg <sup>-1</sup> ) |          |          |
|-------------------------------------|----------|----------|
| Amostra                             | Carvão A | Carvão B |
| Amostra 1                           | 1288,32  | 760,84   |
| Amostra 2                           | 1092,74  | 1022,63  |
| Amostra 3                           | 1167,23  | 784,38   |
| Média                               | 1182,76  | 855,95   |
| Desvio Padrão                       | 80,60    | 118,25   |

**Fonte:** Autora, 2019.

Sabendo-se que o iodo possui diâmetro molecular de aproximadamente 0,27 nm, o número de iodo está relacionado com a capacidade do carvão em adsorver

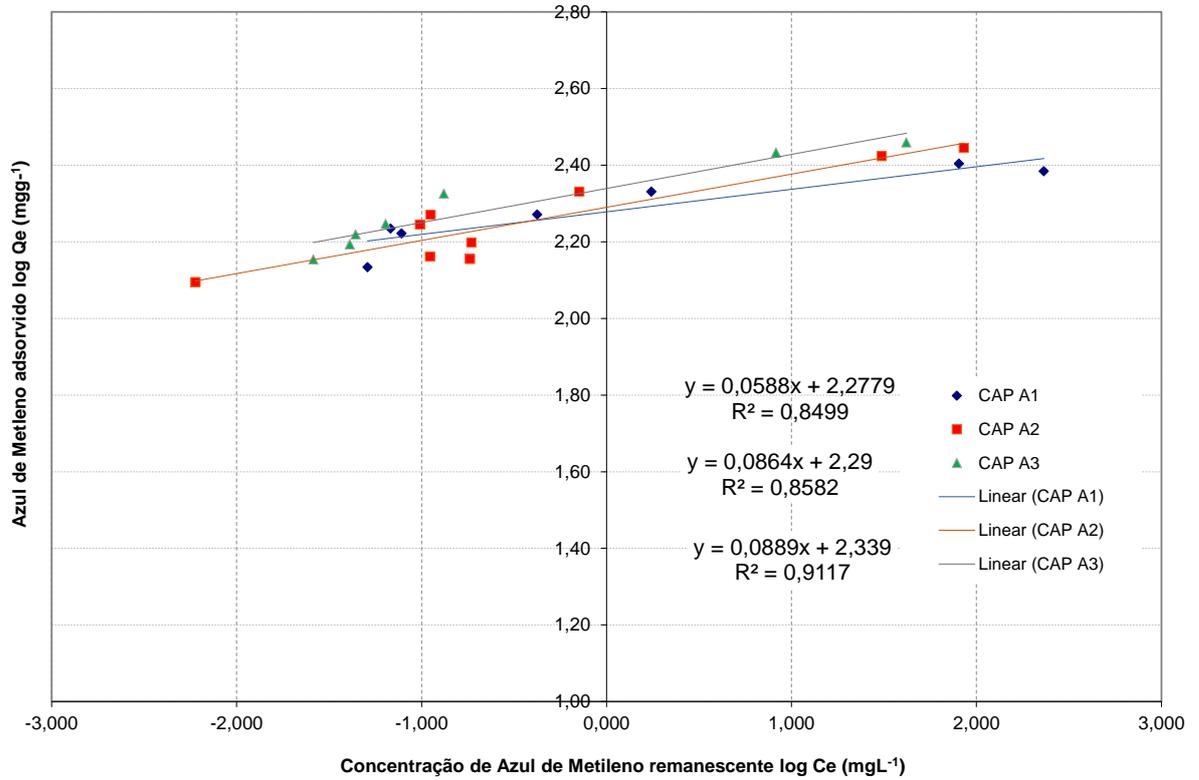
moléculas de tamanho molecular menor que 1 nm em seus microporos (KURODA et al., 2005; BRANDÃO E SILVA, 2006; LEAL, 2013; DI BERNARDO et al, 2017).

O limite mínimo do número de iodo estabelecido pela AWWA standards (1991) para CAP é de  $500 \text{ mgg}^{-1}$ , enquanto que, para a norma EB- 2133 (ABNT, 1991) o valor limite mínimo a ser utilizado em ETAs é de  $600 \text{ mgg}^{-1}$ . Observa-se que, ambos os carvões atenderam o limite exigido conforme as normas citadas, apresentando valores superiores a  $800 \text{ mgg}^{-1}$ . De acordo com as especificações dos fabricantes, o carvão A apresentou número de iodo mínimo de  $500 \text{ mgg}^{-1}$  e o carvão B apresentou valor mínimo de  $800 \text{ mgg}^{-1}$ . O carvão com maior número de iodo foi o CAP A, indicando uma possível maior capacidade em adsorver moléculas orgânicas microporosas em relação ao CAP B. Zago (2010) analisou diferentes tipos de carvões ativados pulverizados, dentre eles, betuminoso, coco, madeira, osso e um comercial no teste de número de iodo e concluiu que o CAP betuminoso, de origem mineral, revelou maior adsorção de moléculas em seus microporos, equivalente ao resultado obtido da presente pesquisa.

Puderam-se comparar os resultados obtidos com os da literatura, como carvões de origem vegetal e mineral aplicados na remoção de microcontaminantes tais como, MIB, geosmina, microcistina e herbicida, obtiveram número de iodo acima do limite mínimo estabelecido pela norma EB-2133 (ABNT, 1991) (MARCHETTO e FILHO, 2005; MÜLLER et al., 2008; MARTINEZ et al., 2011; LOPES et al., 2013; GUERRA et al., 2014).

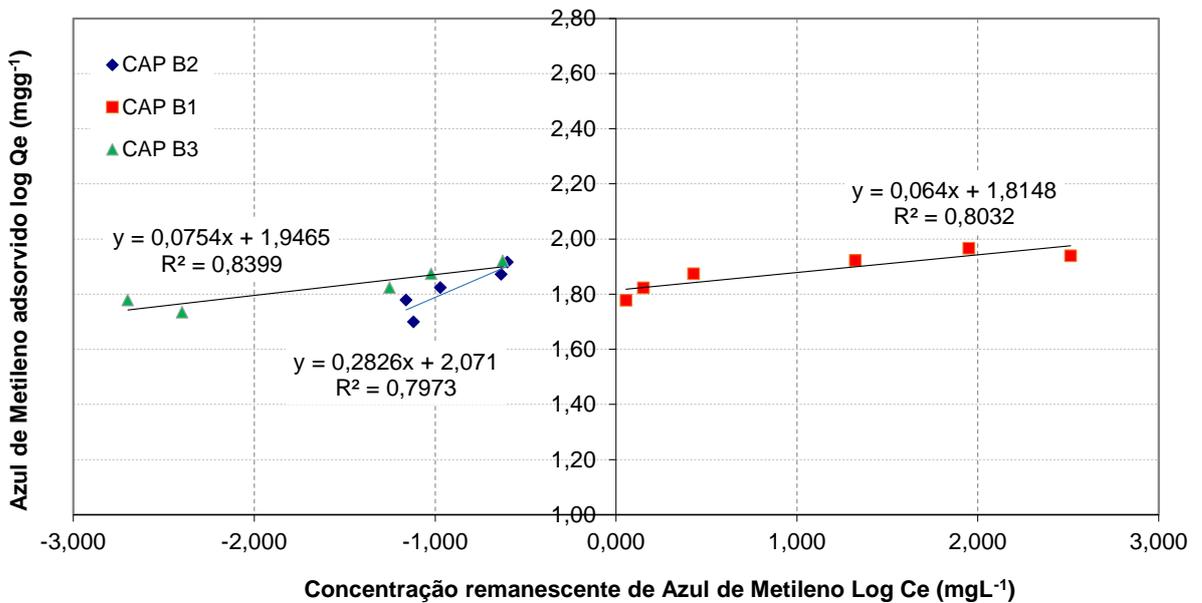
Os ensaios para determinação do índice de azul de metileno foram realizados conforme a metodologia da norma JIS K 1474 (1991), para os carvões ativados pulverizados selecionados (A e B). As isotermas de adsorção do AZM obtidas são representadas pelas Figuras 20 e 21.

**Figura 20 - Isoterma de adsorção do azul de metileno para o CAP A**



Fonte: Autora, 2019.

**Figura 21 - Isoterma de adsorção do azul de metileno para o CAP B**



Fonte: Autora, 2019.

Os resultados da análise do IAM de cada amostra de ambos os carvões e os parâmetros cinéticos de linearização podem ser observados na Tabela 11.

**Tabela 11** - Parâmetros obtidos da isoterma de adsorção do azul de metileno conforme a norma JIS K 1474

| Amostra      | Tipo de carvão | Matéria-prima | IAM (mLg <sup>-1</sup> ) | 1/n   | Kf (m <sup>3</sup> g <sup>-1</sup> ) |
|--------------|----------------|---------------|--------------------------|-------|--------------------------------------|
| A1           | CAP            | Betuminoso    | 163                      | 0,078 | 200,96                               |
| A2           | CAP            | Betuminoso    | 156                      |       |                                      |
| A3           | CAP            | Betuminoso    | 168                      |       |                                      |
| <b>Média</b> | -              | -             | 162                      |       |                                      |
| B1           | CAP            | Pinus         | 64                       | 0,141 | 90,50                                |
| B2           | CAP            | Pinus         | 56                       |       |                                      |
| B3           | CAP            | Pinus         | 56                       |       |                                      |
| <b>Média</b> | -              | -             | 59                       |       |                                      |

**Fonte:** Autora, 2019.

De acordo com o trabalho de Pozzetti et al (2013), os autores investigaram a eficiência dos carvões ativados pulverizados betuminoso e de pinus na remoção de lixiviado e caracterizaram esses carvões utilizando o parâmetro IAM. Os autores puderam concluir que o carvão mineral (betuminoso) teve melhor capacidade adsorptiva em relação ao carvão de origem vegetal (pinus) obtendo valores máximos de 142 e 134 mLg<sup>-1</sup>, respectivamente. Já no estudo de Martinez et al (2011), foi obtido IAM igual a 120 mLg<sup>-1</sup> utilizando como adsorvente o carvão ativado vegetal de babaçu. Comparando-se o carvão mineral que os autores utilizaram em seu estudo com o carvão mineral utilizado nesta pesquisa, o CAP A com valor igual a 162 mLg<sup>-1</sup> mostrou-se ser melhor que o estudado pelos pesquisadores. Já o CAP B mostrou-se pouca eficiência em relação aos carvões de Pozzetti et al (2013) e Martinez et al (2011) com valor de 59 mLg<sup>-1</sup>.

Em relação a atual pesquisa, o CAP A apresentou maior IAM em relação ao CAP B, isso significa que, quanto maior o valor deste parâmetro, maior é a sua capacidade em adsorver moléculas que possuem estrutura molecular similar ao AZM. O CAP B mostrou não ter afinidade com tal tipo de molécula, apresentando menor capacidade adsorptiva. Quando comparado os resultados obtidos com o apresentado pela literatura, os carvões apresentaram índice de azul de metileno inferiores ao proposto pela literatura marroquina.

A isoterma de adsorção do azul de metileno foi aplicada conforme a norma JIS K 1474, com o intuito de investigar e comparar o desempenho de adsorção de

ambos os carvões, sendo realizado um ajuste cinético pelo modelo matemático de Freundlich. A constante de equilíbrio de Freundlich,  $K_f$ , indica a capacidade adsorptiva 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  $K_f$  do CAP A apresentou alta capacidade de adsorção de azul de metileno 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  $K_f$  encontrados foram para os carvões ativados pulverizado e granular de babaçu, indicando valores de  $1/n$  abaixo de 1. Coelho et al (2013) analisou a influência de adsorção em água deionizada para a remoção de atrazina e obtiveram resultados satisfatórios de  $K_f$  e  $1/n$ . A isoterma de adsorção apresentou ótima correlação com  $R^2$  entre 0,8 e 0,9. O formato da curva da isoterma obedeceu ao modelo de Freundlich conforme Hammed et al (2006), Zago (2010) e Martinez et al (2011).

O CAP B apresentou valores de  $K_f$  muito inferiores em relação ao CAP A, revelando baixa capacidade adsorptiva. Em comparação com o CAP A, o CAP B necessitou de maior quantidade de massa para que fosse possível remover o contaminante, inviabilizando sua utilização no tratamento em ETAs. A correlação da isoterma de adsorção  $R^2$  não obteve um resultado muito bom em relação ao CAP A, apresentando valores entre 0,7 e 0,8.

### 5.3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA DE ESTUDO

Os parâmetros analisados para caracterizar a água do poço e as duas amostras da água de estudo são apresentados na Tabela 12.

**Tabela 12** - Caracterização da água do poço e da água de estudo para a execução dos ensaios com carvão ativado pulverizado

| Parâmetro      | Amostra 1    |                | Amostra 2      | Unidade                                                |
|----------------|--------------|----------------|----------------|--------------------------------------------------------|
|                | Água do poço | 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 <sup>-1</sup><br>CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> |
| Ferro Total    | 0,322        | 0,423          | 0,458          | mg FeL <sup>-1</sup>                                   |
| Manganês Total | 0,050        | 0,060          | 0,062          | mg MnL <sup>-1</sup>                                   |
| Alumínio Total | < 0,010      | < 0,010        | < 0,010        | mg AIL <sup>-1</sup>                                   |
| Temperatura    | 25,0         | 25,0           | 25,0           | ° C                                                    |

Fonte: Autora, 2019.

Os valores de turbidez das amostras preparadas ficaram na faixa fixada. As concentrações dos metais resultaram abaixo do valor máximo permitido de água tratada, de acordo com o Anexo XX da Portaria de Consolidação nº5, exceto para o ferro total, que apresentou valor superior a 0,3 mg FeL<sup>-1</sup>.

A Tabela 13 mostra os valores de temperatura e de turbidez das amostras 1 e 2 nos dias de execução dos ensaios.

**Tabela 13** - Temperatura e turbidez das amostras 1 e 2 nos dias de execução dos ensaios

| Parâmetro                | Amostra 1 |        |         |         |         |
|--------------------------|-----------|--------|---------|---------|---------|
|                          | 9/mar     | 12/mar | 13/marc | 14/marc | 15/marc |
| 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 |        |         |         |         |
|                          | 14/mai    | 15/mai | 16/mai  | 17/mai  | 22/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    |

Fonte: Autora, 2019.

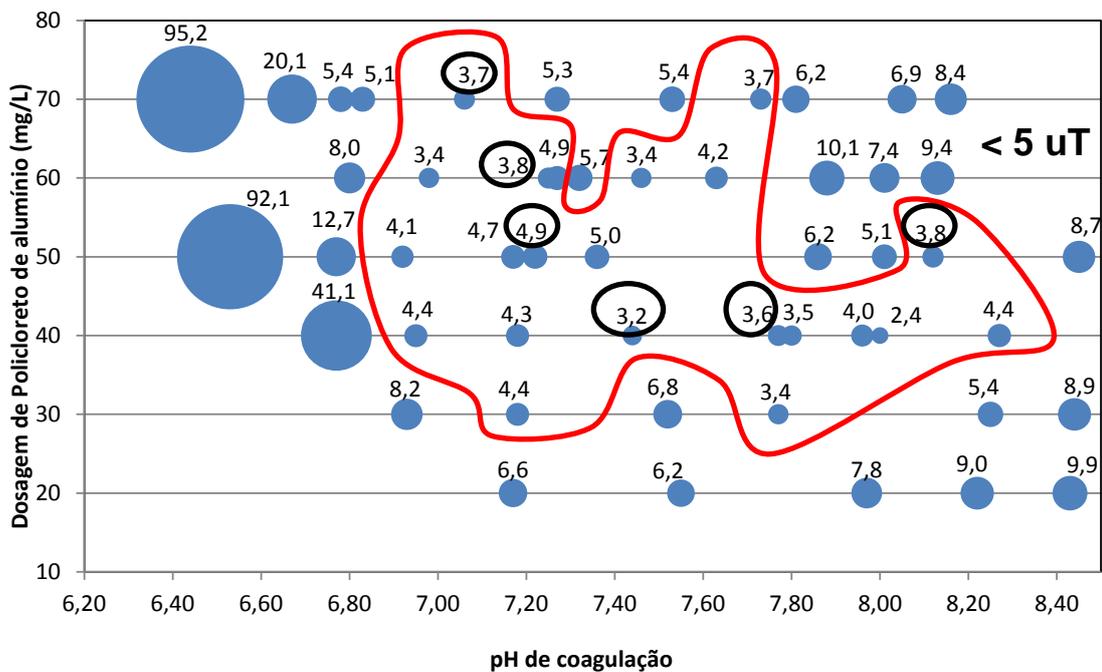
Não houve variação da temperatura durante o período dos ensaios, enquanto que a turbidez variou entre 95,0 a 102,0 uT para ambas as amostras.

## 5.4 ENSAIOS DE TRATABILIDADE

### 5.4.1 Ensaio da Série I

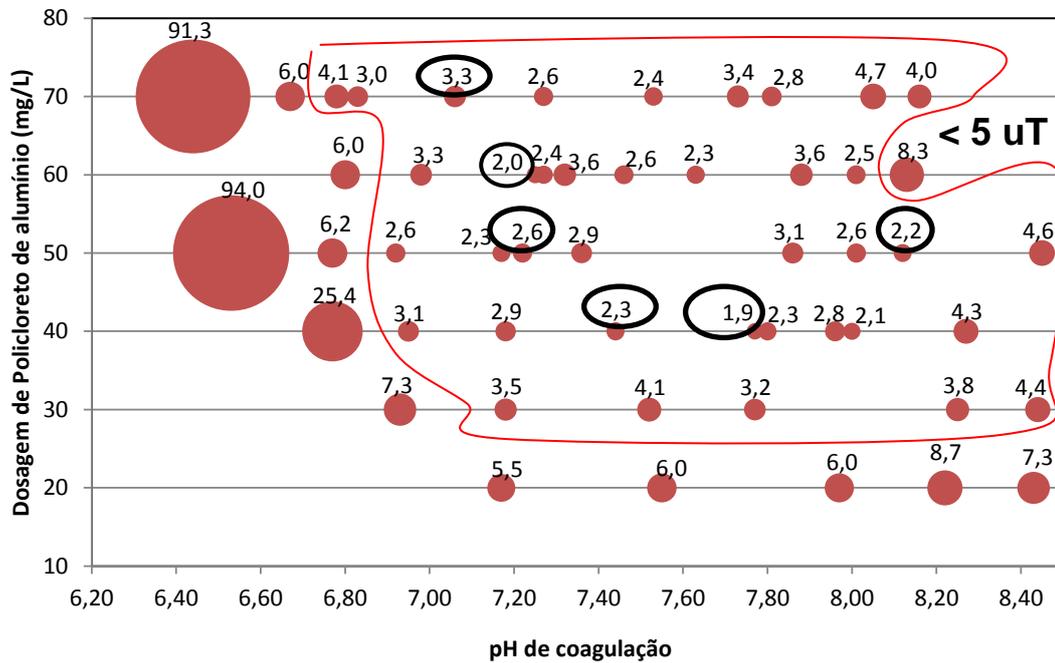
Com base no critério estabelecido na metodologia, foram selecionados os seis pontos na região de menor turbidez da água decantada, em destaque nas Figuras 22 e 23 (dosagem de coagulante no eixo y, em função ao pH de coagulação no eixo x e a turbidez representada pelas bolhas). Foram traçadas as curvas de isoeffiência em cada um dos diagramas com valores de turbidez menores que 5,0 uT.

**Figura 22** - Turbidez da água decantada para  $Vs1\ 3,5\ \text{cmmin}^{-1}$  em função da dosagem de coagulante e pH de coagulação



Fonte: Autora, 2019.

**Figura 23** - Turbidez da água decantada para Vs2 1,4 cmmin<sup>-1</sup> em função da dosagem de coagulante e pH de coagulação



Fonte: Autora, 2019.

Observa-se que no gráfico dosagem de PAC versus pH de coagulação para velocidade de sedimentação igual a 3,5 cmmin<sup>-1</sup>, Figura 22, a região que resultou a maior remoção de turbidez encontra-se na faixa de pH entre 7,00 e 8,20 com dosagens de coagulante entre 40 e 70 mgL<sup>-1</sup>. Valores de pH maiores que 8,20, apresentaram turbidez elevada e maior gasto de produtos químicos e para valores de pH menores que 7,00, a turbidez da água decantada resultou elevada e em alguns casos não ocorreu a coagulação. A Figura 23 mostra a região de maior remoção de turbidez com velocidade de sedimentação igual a 1,4 cmmin<sup>-1</sup>, compreendida praticamente na mesma faixa de dosagens de PAC e pH de coagulação obtida com a velocidade de sedimentação de 3,5 cmmin<sup>-1</sup>.

Os seis pontos foram reproduzidos, cujos resultados são apresentados na Tabela 14.

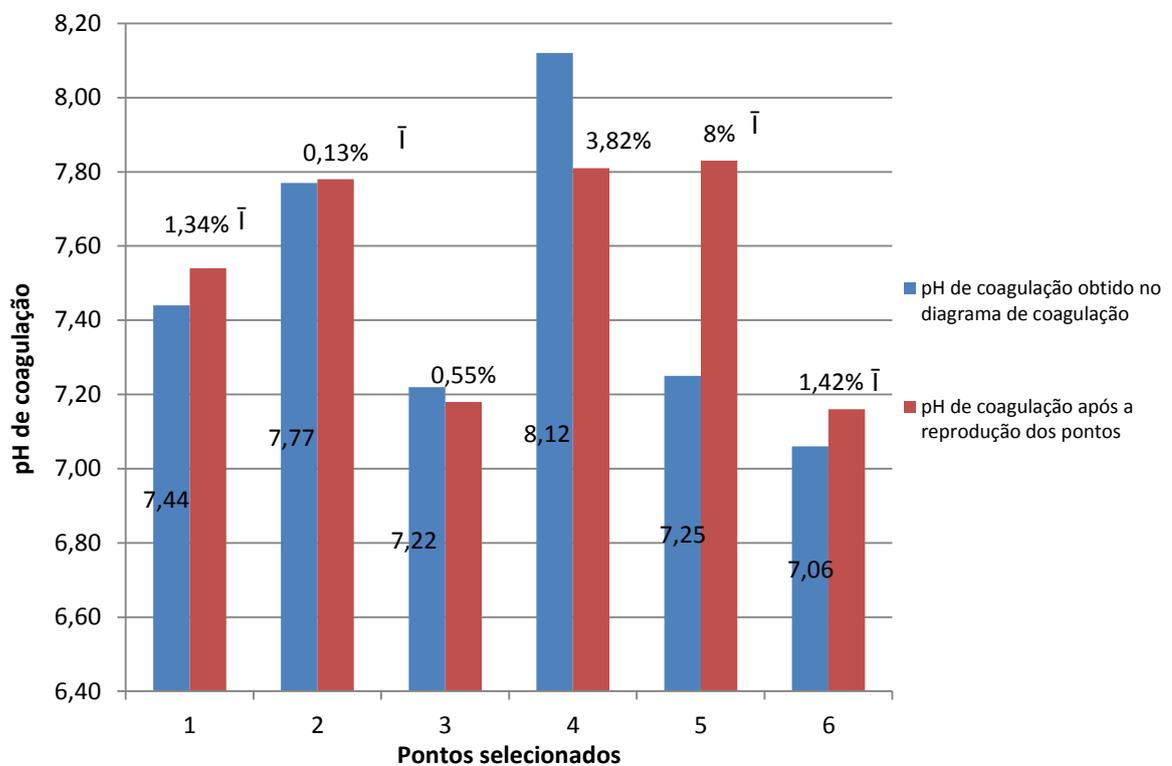
**Tabela 14** - Pontos reproduzidos a partir da seleção dos seis pontos dos diagramas de coagulação

| Ponto | Alcalinizante<br>C = 4 gL <sup>-1</sup><br>(mgL <sup>-1</sup> ) | Coagulante<br>C = 20 gL <sup>-1</sup><br>(mgL <sup>-1</sup> ) | pH de<br>coagulação | Turbidez da água<br>decantada (uT)  |                                     |
|-------|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
|       |                                                                 |                                                               |                     | Vs1 =<br>3,5<br>cmmin <sup>-1</sup> | Vs2 =<br>1,4<br>cmmin <sup>-1</sup> |
| 1     | 6,0                                                             | 40                                                            | 7,54                | 4,1                                 | 2,2                                 |
| 2     | 6,5                                                             | 40                                                            | 7,78                | 4,2                                 | 3,6                                 |
| 3     | 5,4                                                             | 50                                                            | 7,18                | 6,0                                 | 3,9                                 |
| 4     | 7,6                                                             | 50                                                            | 7,81                | 6,1                                 | 3,0                                 |
| 5     | 7,0                                                             | 60                                                            | 7,83                | 3,3                                 | 2,9                                 |
| 6     | 7,0                                                             | 70                                                            | 7,16                | 5,2                                 | 3,2                                 |

Fonte: Autora, 2019.

A Figura 24 mostra a variação e o desvio percentual de cada ponto reproduzido do diagrama de coagulação.

**Figura 24** - Representação gráfica do desvio percentual de pH de coagulação para os seis pontos reproduzidos



Fonte: Autora, 2019.

Os pontos reproduzidos apresentaram variações de pH de coagulação. Observou-se mínima variação percentual entre os pontos, exceto para o quinto

ponto, com desvio de 8%. Visto que a turbidez resultou em valores inferiores a 5,0 uT para a velocidade de sedimentação de 1,4 cmmin<sup>-1</sup>, pode-se assegurar que a coagulação no mecanismo de varredura foi satisfatória.

#### 5.4.2 Ensaio da Série II

Os resultados do ensaio da série II são mostrados na Tabela 15.

**Tabela 15** - 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

| Ponto | Dosagem de alcalinizante NaOH (mgL <sup>-1</sup> ) | Dosagem de coagulante PAC (mgL <sup>-1</sup> ) | pH de coagulação | Turbidez da água decantada (uT) |                               |
|-------|----------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------|---------------------------------|-------------------------------|
|       |                                                    |                                                |                  | Vs1 = 3,5 cmmin <sup>-1</sup>   | Vs2 = 1,4 cmmin <sup>-1</sup> |
| 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 <sup>-1</sup> ) | 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                 |

Fonte: Autora, 2019.

Observa-se que, a turbidez da água decantada está abaixo de 5,0 uT para as duas velocidades de sedimentação e da água filtrada abaixo de 0,5 uT, confirmando que as condições de coagulação escolhidas foram eficientes para a clarificação da água de estudo. Não foram observados residuais de ferro, de manganês e de alumínio na água filtrada nas condições de coagulação investigadas.

A cor aparente resultou em valores abaixo de 15 uH em todas as condições. Todos os valores de turbidez abaixo de 0,5 uT da água filtrada resultaram em

valores de turvação abaixo de 5 FTU. Tal valor pode ser considerado um referencial de uma coagulação eficiente.

#### 5.4.3 Ensaio da Série III

A Tabela 16 mostra a caracterização da água de estudo fortificada com AZM. A água de estudo foi fortificada com AZM com concentração de  $4,0 \text{ mgL}^{-1}$ , com base no valor médio da capacidade máxima de adsorção do CAP A igual a  $200 \text{ mgg}^{-1}$ .

**Tabela 16** - Caracterização da água de estudo fortificada com  $4,0 \text{ mgL}^{-1}$  de AZM

| Parâmetro           | Valor | Unidade           |
|---------------------|-------|-------------------|
| Turbidez            | 77,0  | uT                |
| Turvação            | 10    | FTU               |
| pH                  | 7,34  | -                 |
| Concentração de AZM | 3,223 | $\text{mgL}^{-1}$ |

Fonte: Autora, 2019.

A água bruta foi fortificada com  $4,0 \text{ mgL}^{-1}$  de AZM, porém, o equipamento revelou valor igual a  $3,223 \text{ mgL}^{-1}$ . A molécula de AZM hidratada possui massa molecular igual a  $373,5 \text{ g mol}^{-1}$ , ao passo que, quando a mesma entra em contato com solução aquosa ocorre a dissociação iônica, então a molécula passa a possuir  $319,5 \text{ g mol}^{-1}$ . A concentração de contaminação foi de  $4,0 \text{ mgL}^{-1}$  em 100%, em 85,54% a concentração real foi de  $3,422 \text{ mgL}^{-1}$ , resultado semelhante ao obtido pelo equipamento.

Os resultados do ensaio da Série III são mostrados na Tabela 17.

**Tabela 17** – pH, turbidez, turvação com dosagens de alcalinizante e de coagulante da Série III para a água decantada na Vs2

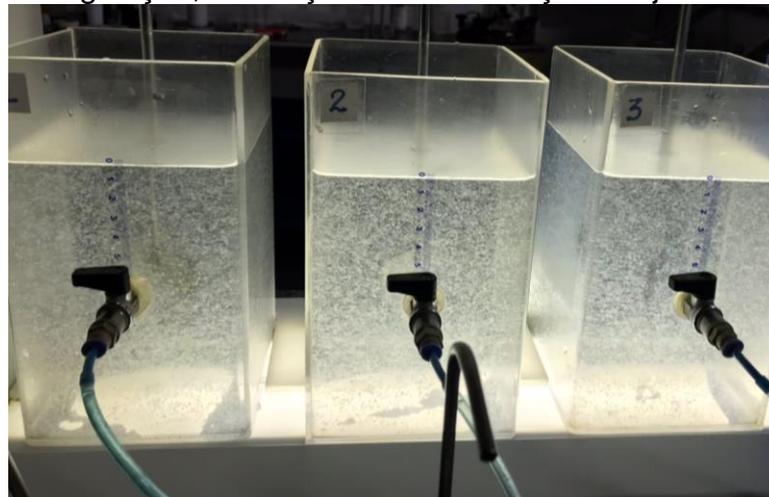
| Ponto | Dosagem de alcalinizante NaOH (mgL <sup>-1</sup> ) | Dosagem de coagulante PAC (mgL <sup>-1</sup> ) | pH de coagulação | Água decantada Vs2 = 1,4 cmmin <sup>-1</sup> |                |
|-------|----------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------|----------------------------------------------|----------------|
|       |                                                    |                                                |                  | 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             |

Fonte: Autora, 2019.

Dentre os seis pontos selecionados no ensaio da Série I, a condição de coagulação do ponto 5 foi escolhida em função do menor valor de turbidez e de turvação da água decantada obtidos com a velocidade de sedimentação de 1,4 cmmin<sup>-1</sup>. Portanto, foi determinado que a dosagem de coagulante e alcalinizante para os próximos ensaios seriam de 60 mgL<sup>-1</sup> e 7,0 mgL<sup>-1</sup>, respectivamente e pH de coagulação de 7,52.

As Figuras 25 A e 25 B mostram que não houve interferência no processo de coagulação de ambas as amostras de água, evidenciando que a formação dos flocos foi satisfatória visualmente em comparação com o branco (água de estudo sem o AZM).

**Figura 25 A** - Formação dos flocos da água de estudo sem o AZM no ensaio de coagulação, floculação e sedimentação em jarreste



Fonte: Autora, 2019.

**Figura 25 B** - Formação dos flocos da água de estudo com o AZM no ensaio de coagulação, floculação e sedimentação em jarteste

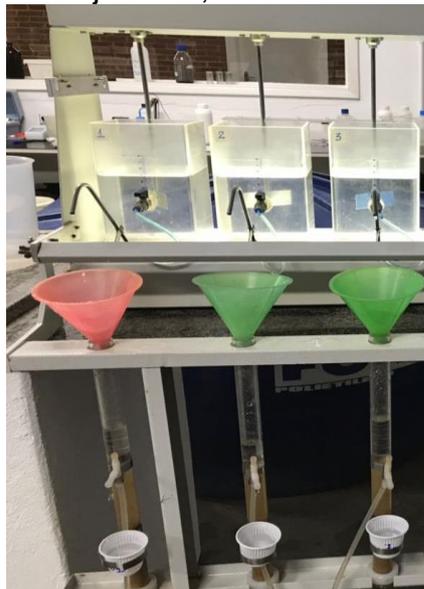


Fonte: Autora, 2019.

#### 5.4.3.1 Ensaio da Série III-A

Um novo ensaio foi executado com as dosagens de coagulante e alcalinizante definidos (ponto 5) para a quantificação de outros parâmetros, ilustrado na Figura 26. Os parâmetros obtidos são mostrados na Tabela 18 para os jarros 1,2 e 3, sem o AZM. A caracterização da água de estudo com AZM é apresentada na Tabela 19, e os resultados do ensaio são mostrados na Tabela 20 (jarros 4, 5 e 6).

**Figura 26** - Ensaio de coagulação, floculação, sedimentação e filtração em jarteste para os jarros 1, 2 e 3 sem o AZM



Fonte: Autora, 2019.

**Tabela 18** - Parâmetros obtidos do ensaio de coagulação, floculação, sedimentação e filtração da água bruta sem o AZM (em tréplica)

| Jarro | Dosagem de NaOH (mgL <sup>-1</sup> ) | Dosagem de PAC (mgL <sup>-1</sup> ) | pH de coagulação | Água decantada                              |                                             | Água filtrada |
|-------|--------------------------------------|-------------------------------------|------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------|
|       |                                      |                                     |                  | Turbidez Vs1 = 3,5 cmmin <sup>-1</sup> (uT) | Turbidez Vs2 = 1,4 cmmin <sup>-1</sup> (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           |

Fonte: Autora, 2019.

Os valores de turbidez da água filtrada foram inferiores a 0,5 uT, indicando condição de coagulação eficiente.

**Tabela 19** - Caracterização da água bruta fortificada com 4,0 mgL<sup>-1</sup> de AZM para a execução do ensaio da Série III-A em tréplica

| Parâmetro           | Valor | Unidade           |
|---------------------|-------|-------------------|
| Concentração de AZM | 3,242 | mgL <sup>-1</sup> |
| pH                  | 7,77  | -                 |
| Turvação            | 10    | FTU               |

Fonte: Autora, 2019.

**Tabela 20** - Parâmetros obtidos do ensaio de coagulação, floculação e sedimentação da água de estudo com AZM (em tréplica)

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

Fonte: Autora, 2019.

Observou-se que, para a dosagem 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, mostrando que a coagulação não foi eficiente em sua remoção, sendo necessário a adsorção em CAP seguida da coagulação, floculação e sedimentação para maior remoção do AZM. Todos os valores de turvação apresentaram valores menores que 0,01 FTU.

#### 5.4.4 Ensaio da Série IV

Os resultados do ensaio de adsorção, coagulação, floculação e sedimentação com o CAP A são apresentados na Tabela 21.

**Tabela 21** - Resultados do ensaio de adsorção, coagulação, floculação e sedimentação em função da dosagem e do tempo de contato do CAP A

| Água decantada Vs2 = 1,4 cmmin <sup>-1</sup> |                                     |                                     |                         |                  |                |                                          |
|----------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------|------------------|----------------|------------------------------------------|
| Dosagem de NaOH (mgL <sup>-1</sup> )         | Dosagem de PAC (mgL <sup>-1</sup> ) | Dosagem de CAP (mgL <sup>-1</sup> ) | Tempo de adsorção (min) | pH de coagulação | Turvação (FTU) | Concentração de AZM (mgL <sup>-1</sup> ) |
| 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                                  |

Fonte: Autora, 2019.

A Figura 27 A e 27 B ilustra os ensaios realizados com o CAP A.

**Figura 27 A** - Ensaio de adsorção, coagulação, floculação e sedimentação com CAP A



Foto tirada após adsorção antes da adição do alcalinizante e coagulante

Fonte: Autora, 2019.

**Figura 27 B** - Ensaio de adsorção, coagulação, floculação e sedimentação com CAP A

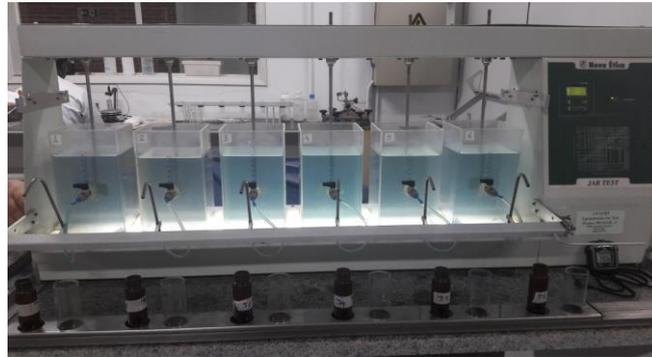


Foto tirada 3 min após o início da floculação

**Fonte:** Autora, 2019.

A matriz dosagem e tempo de contato dos carvões definida pelo método estatístico foi utilizada para a execução dos ensaios de adsorção, coagulação, floculação e sedimentação (Tabela 22).

**Tabela 22** - Dosagem x tempo de contato para cada ensaio de adsorção com os carvões ativados pulverizados CAP A e CAP B

| <b>Dosagem (mgL<sup>-1</sup>)</b> | <b>Tempo de contato (min)</b> |
|-----------------------------------|-------------------------------|
| 10                                | 5                             |
| 30                                | 5                             |
| 10                                | 120                           |
| 30                                | 120                           |
| 10                                | 62,5                          |
| 30                                | 62,5                          |
| 20                                | 5                             |
| 20                                | 120                           |
| 20                                | 62,5                          |
| 20                                | 62,5                          |
| 20                                | 62,5                          |

**Fonte:** Autora, 2019.

Os resultados da análise estatística do CAP A são mostrados nas Tabelas 23 e 24.

**Tabela 23** - Resultados da análise de regressão da concentração de AZM com os parâmetros calculados das variáveis dosagem e tempo de contato para o CAP A

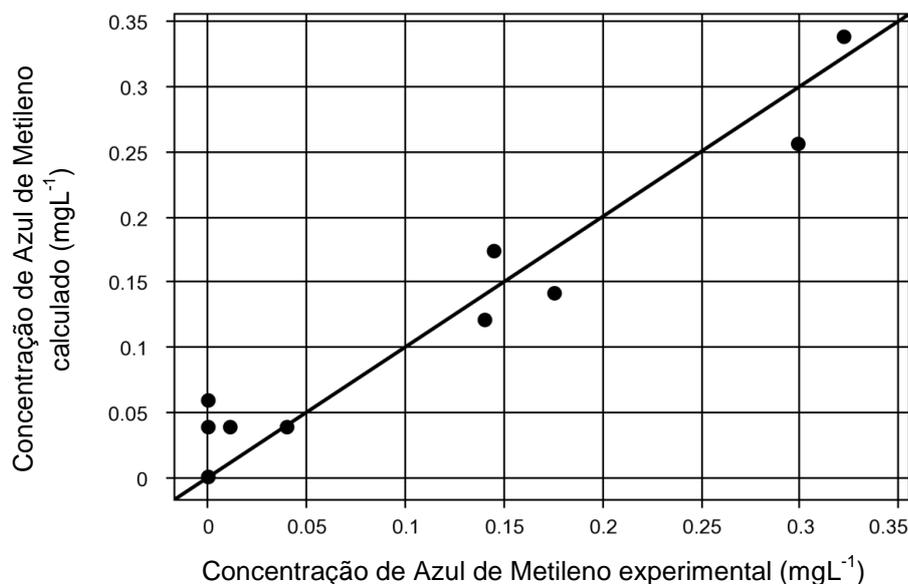
| Nome            | Coefficiente | Erro padrão | t calculado | p-valor |
|-----------------|--------------|-------------|-------------|---------|
| Média           | 0,03         | 0,02        | 1,11        | 0,3174  |
| $x_1$           | -0,10        | 0,02        | -5,32       | 0,0031  |
| $x_1^2$         | 0,11         | 0,03        | 3,88        | 0,0116  |
| $x_2$           | -0,08        | 0,02        | -4,44       | 0,0067  |
| $x_2^2$         | 0,03         | 0,03        | 1,09        | 0,3252  |
| $x_1 \cdot x_2$ | 0,00         | 0,02        | 0,01        | 0,9916  |

Fonte: Autora, 2019.

Para a variável resposta concentração de azul de metileno, os valores das variáveis  $x_1$  e  $x_1^2$  (dosagem) e  $x_2$  (tempo de contato) mostraram ser significativos ao nível de confiança de 95%, pois os valores de p-valor ficaram abaixo de 0,05, ou seja, para os valores mínimos ou máximos das variáveis, ocorreu interferência estatística no resultado da variável resposta.

Como a variável resposta foi significativa, o programa gerou um modelo matemático baseado na relação dos dados calculados e dos resultados experimentais, conforme Figura 28, e o mesmo foi validado.

**Figura 28** - Regressão linear do modelo estatístico com os resultados experimentais e calculados de concentração de AZM obtidos com o CAP A



Fonte: Autora, 2019.

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

resultados experimentais e, foi possível obter 91,52 de relação, certificando-se de que o modelo é válido.

A Tabela 24 mostra os resultados estatísticos da ANOVA.

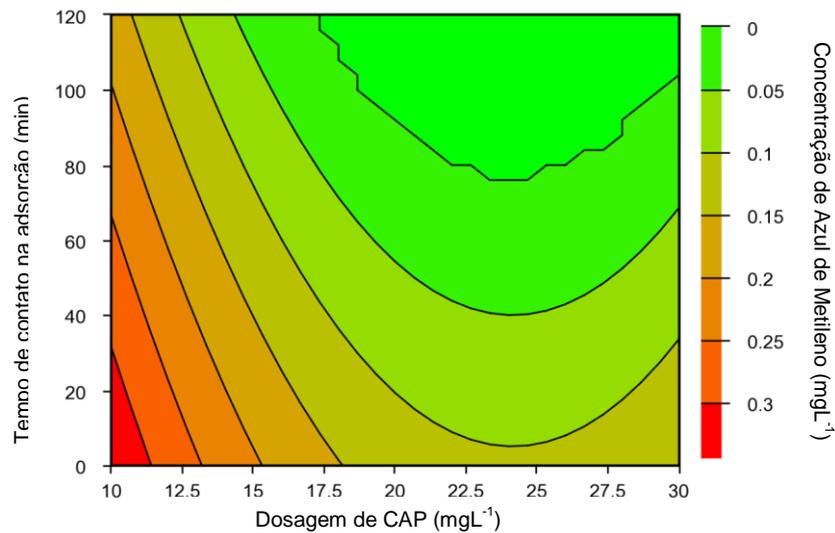
**Tabela 24** - Resultados estatísticos da ANOVA, obtidos por meio da validação do modelo estatístico gerado pelo software para o CAP A

| Fonte de variação | Soma dos quadrados | Graus de Liberdade | Quadrado Médio | F <sub>calc</sub> | p-valor |
|-------------------|--------------------|--------------------|----------------|-------------------|---------|
| Regressão         | 0,1                | 3                  | 0,0            | 25,2              | 0,00040 |
| Resíduos          | 0,0                | 7                  | 0,0            |                   |         |
| Falta de ajuste   | 0,0                | 5                  | 0,0            | 5,5               | 0,15982 |
| Erro puro         | 0,0                | 2                  | 0,0            |                   |         |
| Total             | 0,1                | 10                 |                |                   |         |

Fonte: Autora, 2019.

A ANOVA também é um indicador que pode ou não validar os dados estatísticos. O valor de p-valor se encontra abaixo de 0,05 e o valor do R<sup>2</sup> acima de 80%, portanto as variáveis possuem influência estatística. O ajuste estatístico para o CAP A foi excelente, pois mostrou a influência da dosagem e do tempo de contato, ou seja, quanto maiores as dosagens e os tempos de contato, menores eram as concentrações de AZM, revelando que o carvão foi eficiente nas condições estudadas. Na Figura 29 é apresentada a superfície de resposta gerada através da validação da ANOVA no programa Protimiza Experimental Design.

**Figura 29** - Superfície de resposta do azul de metileno residual na água decantada após adsorção com CAP A, coagulação, floculação e sedimentação em função da dosagem de CAP e do tempo de contato na adsorção



**Fonte:** Autora, 2019.

A Figura 29 mostra as faixas de dosagem e tempos de contato ideais para atingir uma condição otimizada de remoção de AZM. Observa-se que, na região verde claro dosagens entre 15 e 17,5 mgL<sup>-1</sup> no tempo de contato de 120 min, tem-se uma concentração de AZM abaixo de 0,05 mgL<sup>-1</sup>, deste modo, o mesmo ocorre para dosagens superiores, por exemplo, com 25 mgL<sup>-1</sup> no tempo de contato de 40 min, em que também se encontra numa região otimizada de remoção do contaminante. É de suma importância a realização de um estudo econômico para compreender melhor a viabilidade da aplicação do carvão ativado em ETAs, considerando a projeção de um sistema em que requer maior tempo de contato, e aplicação de dosagens mínimas na captação da ETA, sabendo-se que o CAP gera lodo e que o mesmo deve ser tratado, transportado e disposto em aterro sanitário, dispendo altos custos ou na implantação de uma câmara de pré-adsorção garantindo tempo de contato, no entanto adquirindo alto custo de implantação. Nota-se que com as dosagens de 10 a 30 mgL<sup>-1</sup> com tempo de contato de 5 min, quando aplicadas na etapa 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.

A turvação mostrou-se ser um parâmetro indicativo de que a coagulação ocorreu de forma eficiente na varredura, apresentando valores menores que 0,010 FTU.

Os ensaios realizados com o CAP A mostraram semelhanças em relação aos trabalhos de Marchetto e Filho (2005), Müller et al (2009), Martinez et al (2011), Silva et al (2012), Voltan (2014) e Alves et al (2015). Os autores concluíram em suas pesquisas que com o aumento da dosagem de carvão, e simultaneamente aumento do tempo de contato, menor o residual do contaminante.

Os resultados obtidos do ensaio de adsorção, coagulação, floculação e sedimentação em jarreste com o CAP B são apresentados na Tabela 25.

**Tabela 25** - Resultados do ensaio de adsorção, coagulação, floculação e sedimentação em função da dosagem e tempo de contato do CAP B

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

Fonte: Autora, 2019.

A Figura 30 ilustra os ensaios realizados com o CAP B.

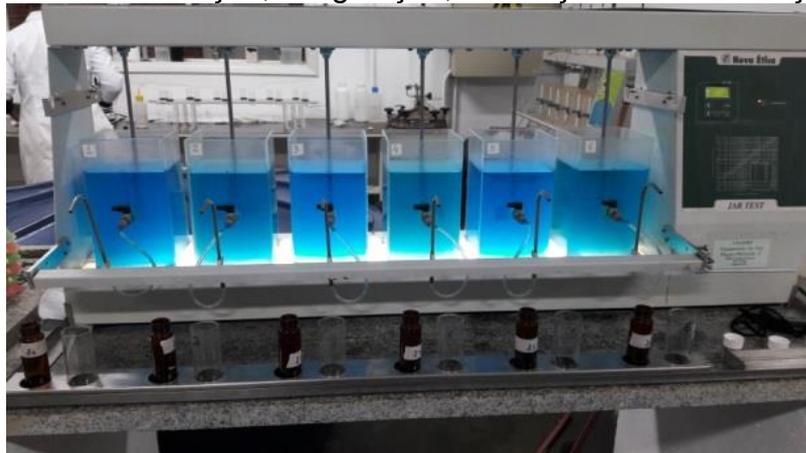
**Figura 30** - Ensaio de adsorção, coagulação, floculação e sedimentação com CAP B

Foto tirada após a adição do coagulante

Fonte: Autora, 2019.

Os resultados da análise estatística do CAP B são mostrados na Tabela 26.

**Tabela 26** - Análise de regressão da concentração de AZM com os parâmetros calculados das variáveis dosagem e tempo de contato para o CAP B

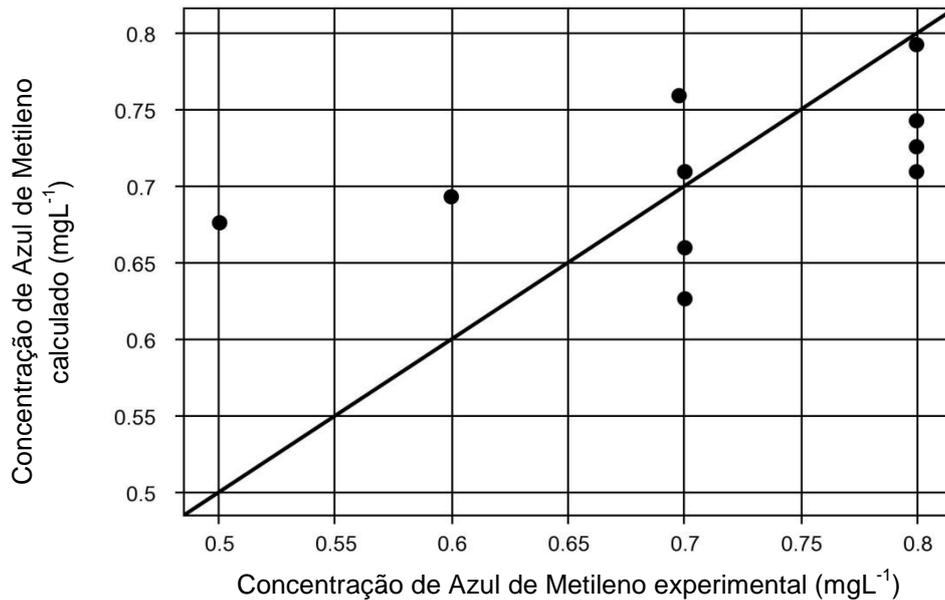
| Nome            | Coefficiente | Erro padrão | t calculado | p-valor |
|-----------------|--------------|-------------|-------------|---------|
| Média           | 0,71         | 0,06        | 12,36       | 0,0001  |
| $x_1$           | 0,03         | 0,05        | 0,73        | 0,4988  |
| $x_1^2$         | -0,03        | 0,07        | -0,37       | 0,7291  |
| $x_2$           | -0,05        | 0,05        | -1,09       | 0,3271  |
| $x_2^2$         | 0,02         | 0,07        | 0,33        | 0,7549  |
| $x_1 \cdot x_2$ | -0,02        | 0,06        | -0,45       | 0,6740  |

Fonte: Autora, 2019.

O p-valor foi maior que 0,05 isso significa que, a variável não foi estatisticamente significativa ao nível de confiança de 95%. O CAP B não teve influência significativa sobre a variável resposta, pois, aumentando ou diminuindo os valores das variáveis  $x_1$  e  $x_2$ , a resposta permaneceu constante. Portanto, o modelo estatístico não foi validado.

O modelo matemático que o software gerou com base nos dados calculados e nos dados reais, não apresentou relação estatística entre as variáveis calculadas e a variável resposta. A Figura 31 mostra o gráfico comparativo entre o modelo e os dados experimentais.

**Figura 31** - Regressão linear do modelo estatístico com os resultados experimentais e calculados de concentração de AZM obtidos com o CAP B



**Fonte:** Autora, 2019.

O modelo estatístico não apresentou relação com os resultados experimentais, indicando um  $R^2$  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, fato já comprovado nos testes de adsorção pelo IAM.

O tempo de contato e a dosagem de carvão no experimento com o CAP B não teve influência na remoção de AZM, ou seja, aumentando o tempo de contato assim como a dosagem de CAP, a concentração residual permaneceu constante. Observa-se que a turvação resultou muito superior em relação ao ensaio com o CAP A (aspecto visual da coloração azul intenso da água durante a etapa de sedimentação).

Também é relevante esclarecer a ineficiência de adsorção quando o CAP B apresentou pH alcalino. Uma vez que o AZM é um corante catiônico, suas cargas interagem com a superfície carregada negativamente do adsorvente em solução, mas como o pH do meio mostrou ser de caráter alcalino, as forças atrativas se enfraqueceram e ocorreu a repulsão eletrostática, afetando na adsorção do contaminante.

O CAP B apresentou resultado de teor de umidade elevado de 30%, equivalente ao trabalho de Leal (2013) com valor acima de 14%, excedendo o limite permitido pela norma da ABNT NBR 12.077. Isso significa que, 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). Isso explica o resultado obtido com o CAP B, pois como esperado, o teor de umidade do mesmo apresentou valor muito superior ao CAP A, pois o mesmo foi utilizado umectado, resultando em uma menor eficiência de adsorção. Com tudo, o carvão ativado pulverizado umectado ou umedecido deixa de ser inflamável e simplifica a instalação de armazenamento do mesmo, não sendo necessária a instalação contra incêndios.

## 6 CONCLUSÕES

- Os ensaios de tratabilidade de bancada de coagulação, floculação, sedimentação e filtração foram eficientes na clarificação da água bruta (metais, cor aparente, turbidez, turvação), porém a remoção do AZM foi da ordem de 24 %;
- Nos ensaios de adsorção, seguida da coagulação, floculação e sedimentação, o CAP A apresentou bom desempenho com uma média de 97% de remoção do AZM e foi constatada, por meio da estatística, a influência do tempo de contato de adsorção prévio ao tratamento em ciclo completo, sendo que a eficiência de remoção do AZM foi obtida com os maiores tempos de contato;
- Considera-se o IAM um parâmetro indicativo das características adsorptivas dos carvões ativados; valores de IAM acima de  $160 \text{ mLg}^{-1}$  como CAP A, poderão resultar elevada eficiência de adsorção de moléculas com tamanhos moleculares similares às do AZM; entretanto, seu uso na seleção de um CAP deve ser feito com ressalvas, pois os resultados do presente estudo indicaram influência significativa do tempo de contato. O tempo de contato de 5 min, que simula a aplicação na entrada da ETA (prática comum), não foi eficiente para as dosagens estabelecidas, sendo provável a necessidade do emprego de dosagens maiores, condição que pode inviabilizar economicamente o uso do CAP nas ETAs. A aplicação de  $50 \text{ mgL}^{-1}$  de CAP com a adição dos produtos químicos (PAC e NaOH) nas ETAs, impactaria no aumento de 50% do custo total por ano.
- Os resultados dos ensaios de caracterização e de adsorção indicaram a ineficiência do CAP B na adsorção do AZM, com 78% de remoção, provável consequência da sua umidade elevada; assim, mesmo sendo mais simples seu armazenamento, a perda da eficiência deve ser estudada caso a caso;

## **7 RECOMENDAÇÕES**

Com base nos resultados da pesquisa apresentada recomenda-se, para trabalhos futuros, estudos comparativos entre outros tipos de CAPs, investigando sua eficiência de adsorção quando o mesmo for umedecido ou não umedecido, assim como a variação das dosagens e a seleção de outros contaminantes em diferentes concentrações.

## REFERÊNCIAS

ALBERS, C. N.; FELD, L.; JENSEN, L. E.; AAMAND, J.. Degradation of trace concentrations of the persistent groundwater pollutant 2,6-dichlorobenzamide (bam) in bioaugmented rapid sand filters. **Water Research**, v.83, p. 61–70, out. 2015.

ALEXANDER, J.T.; HAI, F.I.; AL-ABOUD, T.M.. Chemical coagulation-based processes for trace organic contaminant removal: Current state and future potential. **Journal of Environmental Management**, v.111, p. 195-207, 2012.

ALFREDO, C. P. A.. Adsorção de azul de metileno em casca de batata utilizando sistema em batelada e coluna de leito fixo. *Revista Virtual de Química*, v.7, n.6, p. 1909-1920, nov./dez. 2015.

ALMEIDA, D. H. D.; MOLINA, J.C.; ALMEIDA, T. H. D.; CALIL JUNIOR, C.; ALVES, A. C. L.. Determinação do Teor de Umidade e Densidade Básica para Espécies de Pinus e Eucalipto. **Revista Científica Eletrônica de Ciências Aplicadas da FAIT**, São Paulo, n.4, p. 1-7, 2014. Disponível em: <[http://fait.revista.inf.br/imagens\\_arquivos/arquivos\\_destaque/GJqhOS2OjOZ3IRW\\_2014-4-16-16-31-23.pdf](http://fait.revista.inf.br/imagens_arquivos/arquivos_destaque/GJqhOS2OjOZ3IRW_2014-4-16-16-31-23.pdf)>. Acesso em: 05 dez. 2018.

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 cattapa* Linn) para adsorção de corantes orgânicos em meio aquoso. **Caderno de Ciências Agrárias**, v.7, n.2, p. 50-55, mai./ago 2015.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS (ASTM). (1999) D 3838-1980: **Standard Test Method for pH of Activated Carbon**. Estados Unidos: ASTM.

AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA), Standard for Powdered Activated Carbon ANSI/AWWA B600-90, USA, 1991.

ANSARI, R.; SADEGH, M. Application of Activated Carbon for Removal of Arsenic Ions from Aqueous Solutions.. **Journal of Chemistry**, v. 4, n.1, p.103-108, jan. 2007.

APHA Method: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Disponível em: < <https://www.standardmethods.org/>>. Acesso em: 05 jan. 2019.

APHA Method 2130: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 18<sup>a</sup> edition, 1992. Disponível em: <<https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/002/apha.method.2130.1992.pdf>>. Acesso em: 21 nov. 2018.

ARAÚJO, L. S.. **Comparação do desempenho de carvão ativado produzido a partir de diferentes matrizes para remoção de microcistina-LR de águas de abastecimento**. 2017. 117p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

ASCE, C. A.M.; WANG, Y.; LOFTIN, K.; MEYER, M. Removal of Antibiotics from Surface and Distilled Water in Conventional Water Treatment Processes.. **Journal of Environmental Engineering**, v.128, n.3, p.253-260, mar. 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 12.073: **Carvão ativado pulverizado. Determinação do número de iodo. Código Secundário: MB 3410.** Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 12.077: **Carvão ativado pulverizado. Determinação da umidade. Código Secundário: MB 3414.** Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 16.586: **Carvão ativado pulverizado. Determinação de cinzas.** Rio de Janeiro, 2017.  
AZEVEDO, S.M.F.O.; CARMICHAEL, W. W.; JOCHIMSEN, E.M.; RINEHART, K. L.; LAU, S.; SHAW, G.R.S.; EAGLESHAM, G.K.. Human intoxication by microcystins during renal dialysis treatment in Caruaru. **Toxicology**, v. 181, p. 441-446, 2002.

BAÇAOU, A, S.; YAACOUBI, A.; DAHBI, A.; BENNOUNA, C.; LUU, R. P. T.; MALDONADO-HODAR, F.J.; RIVERA-UTTRILLA,J.; MORENO-CASTILLA, C.. Optimization of conditions for the preparation of activated carbons from olive-waste cakes. **Carbon**, v. 39, n.3, p. 425-432, 2001.

BARCELLOS, D.C.. **Forno Container para Produção de Carvão Vegetal: Desempenho, Perfil Térmico e Controle da Poluição.** 2002. 85p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.

BERNARDO, E.C.; EGASHIRA, R.; KAWASAKI, J.. Decolorization of Molasses' Wastewater Using Activated Carbon Prepared From Cane Bagasse. **Carbon**, v. 35, n. 9, p.1217-1221, 1997.

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.

BORBA, C. E.. **Modelagem da remoção de metais pesados em coluna de adsorção de leito fixo.** 2006. 145p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

BORGES, J. T.. **A utilização da técnica mims na determinação de trihalometanos em águas de abastecimento e a influência do íon brometo, da amônia e de algas na formação desses compostos.** 2003. 151p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

BORGES, W.M.S.; ARANTES, A.C.C.; CASTRO, G.M.M.; BIANCHI, M.L.; NOBRE, J.R.C.; RESENDE, E.C.; CASTRO, J.P.; GUERREIRO, M.C.. Produção,

caracterização e avaliação da capacidade adsorptiva de carvões ativados em forma de briquete. **Revista Matéria**, v. 21, n.4, p. 930-942, 2016.

BOTERO, W. G.. Caracterização de lodo gerado em estações de tratamento de água: perspectivas de aplicação agrícola. **Revista Química Nova**, v.32, n.8, p. 2018-2022, 2009. Disponível em: <[http://quimicanova.sbq.org.br/imagebank/pdf/Vol32No8\\_2018\\_06-AR08376.pdf](http://quimicanova.sbq.org.br/imagebank/pdf/Vol32No8_2018_06-AR08376.pdf)>.

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.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília – DF, set. 2017. Disponível em: <[http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2017/prc0005\\_03\\_10\\_2017.html](http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2017/prc0005_03_10_2017.html)>. Acesso em: 25 de out de 2018.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº 2.914. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília – DF, dez. 2011. Disponível em: <[http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914\\_12\\_12\\_2011.html](http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html)>. Acesso em: 25 de out de 2018.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº 518. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília – DF, mar. 2004. Disponível em: <<http://app3.cidades.gov.br/snisweb/src/pdf/Portaria-518-2004.pdf>>. Acesso em: 25 de out de 2018.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº 1469. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília – DF, dez. 2000. Disponível em: <<https://daejudiai.com.br/wp-content/uploads/2013/10/Portaria-1469-2000.pdf>>. Acesso em: 25 de out de 2018.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº 36. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília – DF, jan. 1990. Disponível em: <[http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/1990/prt0036\\_19\\_01\\_1990.html](http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/1990/prt0036_19_01_1990.html)>. Acesso em: 25 de out de 2018.

BRITISH COLUMBIA. **Ambient Water Quality Guidelines for Organic Carbon**. Disponível em: <<https://www2.gov.bc.ca/gov/content/environment/air-land-water/water/water-quality/water-quality-guidelines/approved-water-quality-guidelines>>. Acesso em: 05 jan. 2019.

CABRITA, I.R.C.. **Carvões ativados para a remoção de compostos farmacêuticos em meio aquoso**. 2009. 83p. Dissertação (Mestrado em Química Tecnológica) - Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2009.

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.

COELHO, E.R.C.C.; VAZZOLER, H.; LEAL, W.P.. 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.

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.

COTTET, L. **Modificação da Argila Montmorilonita e do Carvão de Coco de Babaçu Ativado com Óxido de Ferro: Caracterização e Aplicação na Adsorção do Azul de Metileno**. 2010. 114p. Dissertação (Mestrado em Química Aplicada) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava, 2010.

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.

DE COSTA, P. D.; DOMINGUINI, L.; FURMANSKI, L. M.. Produção, caracterização e aplicação de carvão ativado de casca de nozes para adsorção de azul de metileno. **Revista Virtual de Química**, Criciúma-SC, v.7, n.4, p. 1272-1285, mar. 2015.

DE JÚLIO, M.; FIORAVANTE, D.A.; FILHO, O.S.; GRAHAM, N.J.D.. Remoção de cianobactérias de água proveniente de manancial Brasileiro eutrofizado, utilizando os diagramas de coagulação para o sulfato de alumínio e PAC. **Engenharia Civil**, n. 37, p. 47-61, 2010.

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.

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 $\alpha$ -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](http://revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_187_n_1463.pdf)>

GONG, R.; YE, J.; DAI, W.;YAN, X.; HU, J.; HU, X.; LI, S.; HUANG, H.. Adsorptive Removal of Methyl Orange and Methylene Blue from Aqueous Solution with Finger Citron Residue-Based Activated Carbon. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 52, n. 39, p.14297-14303, 2013.

GUARATINI, C. C. I.; ZANONI, M. V. B.. Corantes Têxteis. **Revista Química Nova**, Araraquara-SP, v. 23, n.1, p. 71-78, 2000.

GUERRA, J. F.. **Remoção do herbicida 2,4 diclorofenoxiacético (2,4-D) no tratamento convencional de água e associado à adsorção em carvão ativado em pó (CAP) em escala piloto**. 2014. 128p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2014.

HAMEED, B.H.; DIN, A.T.M.; AHMAD, A.L.. Adsorption of methylene blue onto bamboo-based activated carbon: Kinetics and equilibrium studies. **Journal of Hazardous Materials**, Penang, Malaysia v.141, n.3, p. 819–825, 2007.

HAMEED, B.H.; AHMAD, A.A.. Batch adsorption of methylene blue from aqueous solution by garlic peel, an agricultural waste biomass. **Journal of Hazardous Materials**, Penang, Malaysia, v. 164, n.2-3, p.870–875, 2009.

HARO, N.K.. **Remoção dos fármacos Atenolol, Paracetamol e Ampicilina por adsorção em carvão ativado**. 2017. 131p. Tese. (Doutorado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 2017.

HU, Z.; SRINIVASAN, M. P.. Mesoporous high-surface-area activated carbon. **Microporous and Mesoporous Materials**, v.43, n.3, p. 267-275, 2001.

INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTUDOS FLORESTAIS. O Carvoejamento da Madeira e seus Reflexos na Qualidade do Carvão: Qualidade da Madeira, 1979. Disponível em: <<https://www.ipef.br/publicacoes/ctecnica/nr064.pdf>>. Acesso: em 13 fev. 2019.

INSTITUTO TRATA BRASIL. **Principais Estatísticas**. Disponível em: <<http://www.tratabrasil.org.br/saneamento/principais-estatisticas>>. Acesso em 20 dez. 2017.

ISO 7027. 1º edição, 2016. Disponível em: <<https://www.evs.ee/products/iso-7027-1-2016>>. Acesso em: 16 out. 2018.

JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD – JIS K 1474. Test methods for activated carbon, **Japão**, p.47, 1991.

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.

LAUS, R.; LARANJEIRA, M. C. M.; MARTINS, A. O.; PEDROSA, R. C.; BENASSI, J. C.; GEREMIAS, R.; FÁVERE, V.T.. Microesferas de quitosana reticuladas com tripolifosfato utilizadas para remoção da acidez, ferro (III) e manganês (II) de águas contaminadas pela mineração de carvão. **Revista Química Nova**, Florianópolis-SC, v. 29, n.1, p. 34-39, 2006.

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.

LEE, S.K., MILLS, A.. Novel photochemistry of leuco-Methylene Blue. **Chemical Communications**, n.18, p. 2366-2367, 2003.

LEGNER, C.. O uso de carvão no processo de tratamento de água. **Revista Tae**, 2012. Disponível em: <<http://www.revistatae.com.br/4922-noticias>>.

LIBÂNIO, M.. **Fundamentos de Qualidade e Tratamento de água**. 3ª edição, São Paulo: Átomo. 2010. 494p.

LIMA, D.R.S.; AFONSO, R.J.C.F.; LIBÂNIO, M.; AQUINO, S.F.. Avaliação da remoção de fármacos e de desreguladores endócrinos em águas de abastecimento por clarificação em escala de bancada. **Revista Química Nova**, v. 37, n.5, p.783-788, abr. 2014.

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.

LOPES, L.G.; MARCHI, M.R.R.; SOUZA, J.B.G.; MOURA, J.A.. Hormônios Estrogênicos no Ambiente e Eficiência das Tecnologias de Tratamento para Remoção em Água e Esgoto. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 13, n.4, p.123-131, out./dez 2008.

LOPES, C.W.; BERTELLA, F.; PERGHER, S.B.C.; FINGER, P.H.; DALLAGO, R.M.; PENHA, F.G.. Síntese e Caracterização de Carvões Ativados Derivados do Sabugo de Milho. **Perspectiva**, v.37, n.139, p.27-35, set. 2013.

MACHADO, C. R. A.; SAGGIORO, E.M.; SILVA, Y. G. L.; PEREIRA, L. P. S.; CAMPOS, J.C.. Avaliação da adsorção de Fenol e Bisfenol A em carvões ativados comerciais de diferentes matrizes carbonáceas. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté-SP, v. 10, p. 915-927, out/dez. 2015. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1980993X2015000400915&script=sci\\_abstract](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1980993X2015000400915&script=sci_abstract)>. Acesso em 26 jan. 2018.

MACROVENDA (2018). Disponível em: <[www.macrovenda.com.br/carvão-ativado.php](http://www.macrovenda.com.br/carvão-ativado.php)> . Acesso em 25 de out de 2018.

MARCHETTO, 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>>.

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](http://revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_182_n_1461.pdf)>. Acesso em: 19 mar. 2018.

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.

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.

MELLO, T. A. D.. **Material Introdutório para a química aplicada à Proteção e Combate a Incêndios: Curso Técnico Profissionalizante em Segurança do Trabalho**. 2011. 56p. Trabalho de Conclusão de Curso em Ensino de Química – Instituto de Química, Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

MOREIRA, S.D.A.. **Adsorção de íons metálicos de efluente aquoso usando bagaço do pedúnculo de caju: estudo de batelada e coluna de leito fixo**. 2008. 133p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil-Saneamento Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

MOREIRA, D.R.. **Desenvolvimento de adsorventes naturais para tratamento de efluentes de galvanoplastia**. 2010. 79p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais) - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 2010.

MOREIRA, J. C.; PERES, F.; SIMÕES, A. C.; PIGNATI, W. A.; DORES, E. C.; VIEIRA, S. N.; STRÜSSMANN, C.; MOTTET, T.. Contaminação de águas superficiais e de chuva por agrotóxicos em uma região do estado do Mato Grosso.

**Revista Ciência e Saúde Coletiva**, Rio de Janeiro, v. 17, n. 6, p. 1557-1568, 2012. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1413-81232012000600019](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-81232012000600019)>. Acesso em 08 Feb. 2018.

MORENO-CASTILLA, C.. Adsorption of organic molecules from aqueous solutions on carbon materials. **Carbon**, Granada, Spain, v. 42, n. 1, p. 83-94, 2004.

MUCCIACITO, J. C.. Uso eficiente do carvão ativado como meio filtrante em processos industriais. **Revista Meio Filtrante**. Ed. 39, 2009. Disponível em: <<https://www.tratamentodeagua.com.br/artigo/uso-eficiente-do-carvao-ativado-como-meio-filtrante-em-processos-industriais/>>. Acesso em: 30 set. 2017.

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.

MURTHA, N.A.; CASTRO, J. E.; HELLER, L.. Uma Perspectiva Histórica das Primeiras Políticas Públicas de Saneamento e de Recursos Hídricos no Brasil. **Revista Ambiente & Sociedade**, São Paulo, v. XVIII, n. 3, p. 193-210, jul./set 2015.

NOBRE, C. R. J.; CASTRO, P. J.; MOTTA, P. J.; BIANCHI, L. M.; TRUGILHO, F. P.; BORGES, S. M. W.; MOULIN, C. J.. Produção de carvão ativado de resíduo madeireiro da região Amazônica. **Scientia Forestalis**, Piracicaba-SP, v. 43, n. 108, p. 895-906, dez. 2015.

OLIVEIRA, S. P.. **Adsorção do corante azul de metileno em caulinita natural e intercalada com acetato de potássio provenientes da região de Bom Jardim de Goiás-GO**. 2012. 62p. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá-MT, 2012.

OLIVEIRA, M.D.; REZENDE, O.L.T.; OLIVEIRA, S.M.A.C.; LIBÂNIO, M.. Nova abordagem do Índice de Qualidade de Água Bruta utilizando a Lógica Fuzzy. **Revista Engenharia Sanitária Ambiental**, v.19, n.4, p. 361-372, out./dez 2014.

PÁDUA, V. L.. **Introdução ao tratamento de água**. In: **Abastecimento de água para consumo humano** (Organizadores PÁDUA, V.L.; HELLER, L) Belo Horizonte: UFMG, 2010. p. 531-583.

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://revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_179_n_1402.pdf)>

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 Subtância Húmica. **Revista Engenharia Sanitária Ambiental**, v.13, n.3, p.313-322, jul./set 2008.

PAULINO, T.R.S., ARAÚJO, R.S., SALGADO, B.C.B.. Estudo de oxidação avançada de corantes básicos via reação Fenton ( $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$ ). **Revista Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 20, n.3, p.347-352, 2015.

PEREIRA, E. I.. **Produção de carvão ativado a partir de diferentes precursores utilizando  $\text{FeCl}_3$  como agente ativante**. 2010. 72p. Dissertação (Mestrado em Agroquímica) - Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG, 2010.

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.

RAMIREZ, S. S.. **Água para hemodiálise no estado do rio de janeiro: uma avaliação dos dados gerados pelo programa de monitoramento da qualidade nos anos de 2006-2007**. 2009. 38p. Especialização em Produtos Ambientais e Serviços Vinculados à Vigilância Sanitária - Instituto Nacional de Controle de Qualidade em Saúde Fundação Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro, 2009.

RAOUF, N.A.; AL-HOMAIDAN, A. A.; IBRAHEEM, I. B. M.. Microalgae and wastewater treatment. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 19, p. 257-275, 2012.

REN, L.; ZHANG, J.; LI, Y.; ZHANG, C.. Preparation and evaluation of cattail fiber-based activated carbon for 2, 4-dichlorophenol and 2, 4, 6-trichlorophenol removal. **Chemical engineering journal**, v. 168, n. 2, p. 553-561, 2011.

RHEINHEIMER, M.O.W.. **Remoção de Paracetamol por Adsorção em Carvão Ativado: Processo em Batelada e Coluna de Leito Fixo**. 2016. 45p. Trabalho de Diplomação em Engenharia Química - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 2016.

RODRIGUEZ-MOZAZ, S.; DE ALDA, M. J. L.; BARCELÓ, D.. Monitoring of estrogens, pesticides and bisphenol A in natural waters and drinking water treatment plants by solid-phase extraction–liquid chromatography–mass spectrometry. **Journal of Chromatography A**, Barcelona, v. 1045, n. 1-2, p. 85-92, 2004.

ROZÁRIO, A.. **Avaliação da remoção do ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D) em águas através do uso de carvão granular (CAG) em pequenas colunas (escala experimental)**. 2012. 208p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2012.

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.

SANCHES, S.M.; PRADO, E.L.; FERREIRA, I.M.; BRAGA, H.F.; VIEIRA, E.M.. Presença da toxina microcistina em água, impactos na saúde pública e medidas de

controle. **Revista de Ciências Farmacêuticas Básica e Aplicada**, v.33, n.2, p.181-187, 2012.

SANTOS, E.P.C.C. DOS; TEIXEIRA, A.R.; ALMEIDA, C.P.; LIBÂNIO, M.; PÁDUA, V.L. DE.. Estudo da coagulação aplicada à filtração direta descendente. **Revista Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 12, n.4, p.361-370, out./dez 2007.

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 em meio aquoso usando carvão ativado preparado a partir da casca de coco da baía. **Revista Sociedade Brasileira de Química**, Ilha Solteira-SP, 2012. Disponível em: <<http://sec.s bq.org.br/cdrom/35ra/resumos/T1208-1.pdf>>. Acesso em: 13 fev. 2018.

SILVA, V.L.A.. **Remoção de microcistinas de águas para abastecimento em sistema que associa unidades de adsorção por carvão ativado em pó e flotação por ar dissolvido em escala de laboratório**. 2005. 96p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2005. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-07102016-103812/es.php>>. Acesso em: 06 de jul.2017.

TEIXEIRA, M.B.. **Remoção de Carbono Orgânico Dissolvido de Água de Abastecimento por Adsorção em Carvão Ativado Granular**. 2014. 75p. Dissertação de Mestrado – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 2014.

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.

TRAMONTIN, D.P.; PETERSON, M.; PIZZOLO, J.P.; PIZZOLO, J. P.. Adsorção do corante básico (azul de metileno) por carvão ativado preparado a partir de finos de carvão. In: **III Congresso Brasileiro De Carvão Mineral**. Gramado, RS, 2011. Disponível em: <[http://www.ufrgs.br/rede-carvao/Sessos\\_C4\\_C5\\_C6/C6\\_ARTIGO\\_01.pdf](http://www.ufrgs.br/rede-carvao/Sessos_C4_C5_C6/C6_ARTIGO_01.pdf)>. Acesso em: 13 fev. 2018.

United Nations Development Programme (UNDP). **Human Development Report, 2006**. Disponível em: <<http://www.undp.org/content/dam/undp/library/corporate/HDR/2006%20Global%20HDR/HDR-2006-Beyond%20scarcity-Power-poverty-and-the-global-water-crisis.pdf>>. Acesso em: 13 fev. 2018.

United States Environmental Protection Agency (USEPA). **Method 180.1: Determination of Turbidity by Nephelometry**, 1978. Disponível em: <[https://www.umass.edu/mwwp/pdf/epa180\\_1turbidity.pdf](https://www.umass.edu/mwwp/pdf/epa180_1turbidity.pdf)> Acesso em: 21 nov. 2018.

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](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). **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/epadrinkingwateradvicenoteadvicenoten04.html>>. Acesso em: 16 mar. 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.

VALÊNCIA, C. A. V.. **Aplicação da adsorção em carvão ativado e outros materiais carbonosos no tratamento de águas contaminadas por pesticidas de uso agrícola**. 2007. 116p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

VERONEZI, V.M.; GIANI, A.; MELO S.C.; GOMES, L.L.; LIBÂNIO, M.. Avaliação da remoção de saxitoxinas por meio de técnicas de tratamento das águas de abastecimento. **Revista Engenharia Sanitária Ambiental**, v.14, n.2, p. 193-204, abr./jun, 2009. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/esa/v14n2/a07v14n2.pdf>>. Acesso em: 06 jul. 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 (Tese de doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2010.

WARTCHOW, D.; Freitas, A.F.R.; Luca, S.J.. Utilização de carvões ativados nacionais no tratamento de águas residuárias. **Revista Dae**, Camboriú-SC, v.44,

n.136, mar. 1984. Disponível em: <  
[http://revistadae.com.br/artigos/artigo\\_edicao\\_136\\_n\\_1170.pdf](http://revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_136_n_1170.pdf)>.

YU, J.G.; ZHAO, X.H.; YANG, H.Y.; CHEN, X.H.; YANG, Q.; YU, L.Y.; JIANG, J.H.; CHEN, X.Q.. Aqueous adsorption and removal of organic contaminants by carbon nanotubes. **Science of the Total Environment**, v. 482, p.241-251, 2014.

YU, F. LI, Y.; HAN, S.; MA, J.. Adsorptive removal of antibiotics from aqueous solution using carbon materials. **Chemosphere**, v. 153, p. 365–385, 2016.

## APÊNDICE A

**Tabela A1** – Diferentes massas de carvão ativado obtidas em cada amostra realizada em tréplica, referente ao CAP A

**Tabela A2** – Diferentes massas de carvão ativado obtidas em cada amostra realizada em tréplica, referente ao CAP B

**Tabela A3** – Resultados do ensaio de coagulação, floculação e sedimentação da água bruta

**Tabela A1** - Diferentes massas de carvão ativado obtidas em cada amostra realizada em tréplica, referente ao CAP A

| Amostras | CAP A1<br>massa (g) | Amostras | CAP A2<br>massa (g) | Amostras | CAP A3<br>massa (g) |
|----------|---------------------|----------|---------------------|----------|---------------------|
| 1        | 0,1000              | 8        | 0,1000              | 17       | 0,1005              |
| 2        | 0,1105              | 9        | 0,1103              | 18       | 0,1101              |
| 3        | 0,1400              | 10       | 0,1400              | 19       | 0,1419              |
| 4        | 0,1608              | 11       | 0,1610              | 20       | 0,1700              |
| 5        | 0,1748              | 12       | 0,1708              | 21       | 0,1810              |
| 6        | 0,1800              | 13       | 0,1902              | 22       | 0,1924              |
| 7        | 0,2205              | 14       | 0,2068              | 23       | 0,2106              |
| -        | -                   | 15       | 0,2101              | -        | -                   |
| -        | -                   | 16       | 0,2414              | -        | -                   |
| -        | -                   | -        | -                   | -        | -                   |

**Tabela A2** - Diferentes massas de carvão ativado obtida em cada amostra realizada em tréplica, referente ao CAP B

| Amostras | CAP B1<br>massa (g) | Amostras | CAP B2<br>massa (g) | Amostras | CAP B3<br>massa (g) |
|----------|---------------------|----------|---------------------|----------|---------------------|
| 1        | 0,2514              | 7        | 0,3643              | 12       | 0,3600              |
| 2        | 0,3004              | 8        | 0,4034              | 13       | 0,4017              |
| 3        | 0,3530              | 9        | 0,4500              | 14       | 0,4503              |
| 4        | 0,4003              | 10       | 0,5001              | 15       | 0,5002              |
| 5        | 0,4510              | 11       | 0,5500              | 16       | 0,5537              |
| 6        | 0,5009              | -        | -                   | -        | -                   |

**Tabela A3 – Resultados do ensaio de coagulação, floculação e sedimentação da água bruta**

(continua)

| Pontos | Alcalinizante NaOH<br>C = 4 gL <sup>-1</sup> |                      | Coagulante PAC<br>C = 20 gL <sup>-1</sup> |                      | pH de<br>coagulação | Água decantada          |                         |
|--------|----------------------------------------------|----------------------|-------------------------------------------|----------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|
|        | V(mL)                                        | (mgL <sup>-1</sup> ) | V(mL)                                     | (mgL <sup>-1</sup> ) |                     | Turbidez<br>Vs1<br>(uT) | Turbidez<br>Vs2<br>(uT) |
| 1      | 1,5                                          | 3,0                  | 2                                         | 20                   | 7,17                | 6,6                     | 5,5                     |
| 2      | 2,0                                          | 4,0                  | 2                                         | 20                   | 7,55                | 6,2                     | 6,0                     |
| 3      | 2,5                                          | 5,0                  | 2                                         | 20                   | 7,97                | 7,8                     | 6,0                     |
| 4      | 3,0                                          | 6,0                  | 2                                         | 20                   | 8,22                | 9,0                     | 8,7                     |
| 5      | 3,5                                          | 7,0                  | 2                                         | 20                   | 8,43                | 9,9                     | 7,3                     |
| 6      | 4,0                                          | 8,0                  | 2                                         | 20                   | 8,62                | 9,1                     | 7,1                     |
| 7      | 1,5                                          | 3,0                  | 3                                         | 30                   | 6,93                | 8,2                     | 7,3                     |
| 8      | 2,0                                          | 4,0                  | 3                                         | 30                   | 7,18                | 4,4                     | 3,5                     |
| 9      | 2,5                                          | 5,0                  | 3                                         | 30                   | 7,52                | 6,8                     | 4,1                     |
| 10     | 3,0                                          | 6,0                  | 3                                         | 30                   | 7,77                | 3,4                     | 3,2                     |
| 11     | 3,5                                          | 7,0                  | 3                                         | 30                   | 8,25                | 5,4                     | 3,8                     |
| 12     | 4,0                                          | 8,0                  | 3                                         | 30                   | 8,44                | 8,9                     | 4,4                     |
| 13     | 1,5                                          | 3,0                  | 4                                         | 40                   | 6,77                | 41,1                    | 25,4                    |
| 14     | 2,0                                          | 4,0                  | 4                                         | 40                   | 6,95                | 4,4                     | 3,1                     |
| 15     | 2,5                                          | 5,0                  | 4                                         | 40                   | 7,18                | 4,3                     | 2,9                     |
| 16     | 3,0                                          | 6,0                  | 4                                         | 40                   | 7,44                | 3,2                     | 2,3                     |
| 17     | 3,5                                          | 7,0                  | 4                                         | 40                   | 8,00                | 2,4                     | 2,1                     |
| 18     | 4,0                                          | 8,0                  | 4                                         | 40                   | 8,27                | 4,4                     | 4,3                     |
| 19     | 3,3                                          | 6,5                  | 4                                         | 40                   | 7,77                | 3,6                     | 1,9                     |
| 20     | 3,1                                          | 6,2                  | 4                                         | 40                   | 7,80                | 3,5                     | 2,3                     |
| 21     | 3,2                                          | 6,4                  | 4                                         | 40                   | 7,96                | 4,0                     | 2,8                     |
| 22     | 3,0                                          | 6,0                  | 4                                         | 40                   | 7,54                | 4,1                     | 2,2                     |
| 23     | 3,3                                          | 6,5                  | 4                                         | 40                   | 7,78                | 4,2                     | 3,6                     |
| 24     | 1,0                                          | 2,0                  | 5                                         | 50                   | 6,53                | 92,1                    | 94,0                    |
| 25     | 1,5                                          | 3,0                  | 5                                         | 50                   | 6,67                | 91,4                    | 89,9                    |
| 26     | 2,0                                          | 4,0                  | 5                                         | 50                   | 6,77                | 12,7                    | 6,2                     |
| 27     | 2,5                                          | 5,0                  | 5                                         | 50                   | 6,92                | 4,1                     | 2,6                     |
| 28     | 3,0                                          | 6,0                  | 5                                         | 50                   | 7,17                | 4,7                     | 2,3                     |
| 29     | 3,5                                          | 7,0                  | 5                                         | 50                   | 7,36                | 5,0                     | 2,9                     |
| 30     | 2,7                                          | 5,4                  | 5                                         | 50                   | 7,22                | 4,9                     | 2,6                     |
| 31     | 3,6                                          | 7,2                  | 5                                         | 50                   | 7,86                | 6,2                     | 3,1                     |
| 32     | 3,8                                          | 7,5                  | 5                                         | 50                   | 8,01                | 5,1                     | 2,6                     |
| 33     | 3,8                                          | 7,6                  | 5                                         | 50                   | 8,12                | 3,8                     | 2,2                     |
| 34     | 4,2                                          | 8,4                  | 5                                         | 50                   | 8,45                | 8,7                     | 4,6                     |
| 35     | 2,7                                          | 5,4                  | 5                                         | 50                   | 7,18                | 6,0                     | 3,9                     |
| 36     | 3,8                                          | 7,6                  | 5                                         | 50                   | 7,81                | 6,1                     | 3,0                     |
| 37     | 2,5                                          | 5,0                  | 6                                         | 60                   | 6,80                | 8,0                     | 6,0                     |
| 38     | 3,0                                          | 6,0                  | 6                                         | 60                   | 6,98                | 3,4                     | 3,3                     |

**Tabela A3 – Resultados do ensaio de coagulação, floculação e sedimentação da água bruta**

(conclusão)

| Pontos | Alcalinizante NaOH<br>C = 4 gL <sup>-1</sup> |                      | Coagulante PAC<br>C = 20 gL <sup>-1</sup> |                      | pH de<br>coagulação | Água decantada   |                  |
|--------|----------------------------------------------|----------------------|-------------------------------------------|----------------------|---------------------|------------------|------------------|
|        | V(mL)                                        | (mgL <sup>-1</sup> ) | V(mL)                                     | (mgL <sup>-1</sup> ) |                     | Vs1              | Vs2              |
|        |                                              |                      |                                           |                      |                     | Turbidez<br>(uT) | Turbidez<br>(uT) |
| 39     | 3,5                                          | 7,0                  | 6                                         | 60                   | 7,25                | 3,8              | 2,0              |
| 40     | 4,0                                          | 8,0                  | 6                                         | 60                   | 7,63                | 4,2              | 2,3              |
| 41     | 4,5                                          | 9,0                  | 6                                         | 60                   | 7,88                | 10,1             | 3,6              |
| 42     | 3,8                                          | 7,5                  | 6                                         | 60                   | 7,46                | 3,4              | 2,6              |
| 43     | 4,5                                          | 9,0                  | 6                                         | 60                   | 8,01                | 7,4              | 2,5              |
| 44     | 4,8                                          | 9,5                  | 6                                         | 60                   | 8,13                | 9,4              | 8,3              |
| 45     | 3,2                                          | 6,4                  | 6                                         | 60                   | 7,32                | 5,7              | 3,6              |
| 46     | 3,3                                          | 6,5                  | 6                                         | 60                   | 7,27                | 4,9              | 2,4              |
| 47     | 3,5                                          | 7,0                  | 6                                         | 60                   | 7,83                | 3,3              | 2,9              |
| 48     | 1,5                                          | 3,0                  | 7                                         | 70                   | 6,44                | 95,2             | 91,3             |
| 49     | 2,5                                          | 5,0                  | 7                                         | 70                   | 6,67                | 20,1             | 6,0              |
| 50     | 3,0                                          | 6,0                  | 7                                         | 70                   | 6,78                | 5,4              | 4,1              |
| 51     | 4,0                                          | 8,0                  | 7                                         | 70                   | 7,27                | 5,3              | 2,6              |
| 52     | 3,5                                          | 7,0                  | 7                                         | 70                   | 7,06                | 3,7              | 3,3              |
| 53     | 3,8                                          | 7,6                  | 7                                         | 70                   | 6,83                | 5,1              | 3,0              |
| 54     | 4,5                                          | 9,0                  | 7                                         | 70                   | 7,73                | 3,7              | 3,4              |
| 55     | 5,0                                          | 10                   | 7                                         | 70                   | 8,16                | 8,4              | 4,0              |
| 56     | 4,2                                          | 8,4                  | 7                                         | 70                   | 7,81                | 6,2              | 2,8              |
| 57     | 4,7                                          | 9,4                  | 7                                         | 70                   | 8,05                | 6,9              | 4,7              |
| 58     | 4,1                                          | 8,2                  | 7                                         | 70                   | 7,53                | 5,4              | 2,4              |
| 59     | 3,5                                          | 7,0                  | 7                                         | 70                   | 7,16                | 5,2              | 3,2              |

## ANEXO A

| Amostra                | Análises                                         | Especificação do fabricante |
|------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------|
| <b>CAP A</b>           | Nº Iodo ( $\text{mg I}_2\text{g}^{-1}$ )         | 500 min.                    |
|                        | Umidade (%)                                      | 8 máx.                      |
|                        | Cinzas (%)                                       | -                           |
|                        | Índice de Azul de Metileno ( $\text{mgg}^{-1}$ ) | -                           |
| <b>CAP B umedecido</b> | Nº Iodo ( $\text{mg I}_2\text{g}^{-1}$ )         | 800 mín.                    |
|                        | Umidade (%)                                      | 30-40                       |
|                        | Cinzas (%)                                       | -                           |
|                        | Índice de Azul de Metileno ( $\text{mgg}^{-1}$ ) | -                           |
|                        | Cinzas                                           | 12 máx.                     |